

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**INVESTIGAÇÃO QUALITATIVA DA EFICIÊNCIA DE
UM PROJETO DE COBERTURA EM MEMBRANA ESTRUTURAL**

TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL

Área de concentração em construção metálica

Autora

Eliana Ferreira Nunes

Orientadores

Prof. Dr. João Batista Marques de Sousa Junior

Prof. Dr. Bernd Baier

Co-orientadora

Profª Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas

Ouro Preto, outubro de 2012.

N972i

Nunes, Eliana Ferreira.

Investigação qualitativa da eficiência de um projeto de cobertura em membrana estrutural [manuscrito] / Eliana Ferreira Nunes - 2012.

243f.: il. color.; graf.; tabs.

Orientadores: Prof. Dr. João Batista Marques de Sousa Júnior.

Prof. Dr. Bernd Baier.

Coorientadora: Prof^ª Dr^ª Arlene Maria Sarmanho Freitas.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Membranas estruturais - Teses.
3. Otimização estrutural - Teses. 4. Estratégias desempenho - Teses.
I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 624.014:624.074

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

INVESTIGAÇÃO QUALITATIVA DA EFICIÊNCIA DE UM PROJETO DE COBERTURA EM MEMBRANA ESTRUTURAL

AUTORA: ELIANA FERREIRA NUNES

Esta tese foi apresentada em sessão pública e aprovada em 16 de outubro de 2012, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:




Prof. Dr. João Batista Marques de Sousa Jr. (Orientador / UFOP)



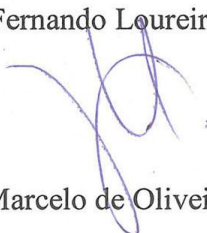
Prof. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freias (Orientadora / UFOP)



Prof. Dr. Bernd Baier (Orientador / U.Duisburg-Essen)



Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro (UFOP)



Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti (USP)



Prof. Dr. Athail Rangel Pulino Filho (UNB)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof João Batista, pela oportunidade de realizar esse trabalho; orientação, grande apoio e confiança, além de compartilhar seu conhecimento sobre o método dos elementos finitos.

A Prof Arlene, pela co-orientação, motivação e apoio nos estudos de campo.

Ao Prof Dr Bernd Baier, pela receptividade, análises e reflexões, orientação, confiança e motivação, e o grande apoio durante todo o período do estágio no exterior, além do conhecimento e experiência transmitidos, norteando o refinamento da geometria das superfícies e análises realizadas.

Ao Dr Reinhold Koenen, pela receptividade, a disponibilidade e orientação nas análises numéricas e experimentais, além de compartilhar seu conhecimento e experiência.

Ao Mr Klaus Saxe (Essen Labor), pelas sugestões e apoio nas análises experimentais.

Ao Mr Thomas Homm (Essen Labor), pelas informações, sugestões e pela realização dos testes dos materiais.

Ao Dr Baeck, pela receptividade e sugestões.

Aos professores Henor de Souza (DEARQ) e Kátia Novack (DEQUI) pelas orientações.

Aos coordenadores do PROPEC e à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), o apoio ao desenvolvimento da pesquisa e à realização e dos estudos de caso.

Aos Professores Marcílio e Ricardo (UFOP), Prof Ruy (USP), e Róvia (representante discente) pelo apoio ao processo de seleção do doutorado sanduiche.

Ao Prof Dr Jochen Menkenhagen, coordenador do Departamento de Engenharia civil *University Duisburg-Essen* (UDE) e do *Essen Laboratory for Lightweight structures* (Essen Labor), pela receptividade e por proporcionar as condições favoráveis ao desenvolvimento desse trabalho, bem como os recursos às análises experimentais.

À Fapemig, Fundação Gorceix e à Capes, os recursos que tornaram possível a realização desse trabalho, os estudos de caso e a cooperação técnica entre a UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) e a UDE (*University Duisburg-Essen*).

À COPPE-RJ, na pessoa de Vinícius Oliveira, pela gentil cessão de uso do software Densalfa nessa investigação.

Ao Mr Robert Schwetz, Mr Paolo Giugliano, Mr David Holten e Mrs Renate Mueller, (Mehler Technologies), pela receptividade, informações sobre o material, apresentação detalhada dos procedimentos de produção do material e cessão de amostras para os testes do material.

A Mr Harry Buskes (Carpro), pela amizade, discussões sobre os critérios de desempenho do sistema, apresentação do procedimento de manufatura e gentil preparação dos materiais para os testes.

Ao Mr Wolfgang Rudolf-Wittrin (Ceno-tec), por compartilhar seu conhecimento e experiência sobre os procedimentos de projeto e manufatura e apresentação dos trabalhos realizados.

Ao Mr Murat Devecioglu, (Verseidag), pela receptividade, informações sobre o material e apresentação minuciosa dos procedimentos de produção do material.

Ao arquiteto Nicolai Kugel, pela entrevista e por compartilhar seu processo de trabalho.

Ao Célio Firmo, pela amizade, sabedoria, motivação, apoio e perguntas desafiadoras.

A Dietrich Wischhoff (Tensitex) pela amizade, discussões durante o desenvolvimento desse trabalho e disponibilidade em compartilhar seu conhecimento e experiência.

Aos arquitetos Siegbert Zanettini e Érika Bataglia (Zanettini Arquitetura), o grande apoio à realização dos estudos de campo. Aos arquitetos Gilberto Gabriel e Gustavo Alves (Ruy Rezende Arquitetura) e aos engenheiros Prof Ruy M. Pauletti, Profa Heloísa Maringoni e Nelson Fiedler (Fiedler-Tensoestrutura), pelo incentivo e disponibilidade para compartilhar seus processos de trabalho, conhecimento e experiência.

À equipe de Construção e Montagem da Petrobras, em especial a Rafael Carneiro, João Marcelo, Desirée Vieira, Érika Baptista; a equipe CNC/Consórcio Novo Cenpes, em especial a Antônio Passos, Magrini, Henrique Mouta e Tarcísio; e a equipe do Confidere: em especial a Marco Antônio, Philippe Coutinho, Ozana Viana pela confiança, informações e apoio durante os estudos de campo.

Aos mestres do ar, responsáveis pelas montagens das estruturas analisadas, por compartilharem seu saber e vivência.

À Patrícia e Tatiana, a amizade, grande apoio e tradução desse trabalho.

À D Abigail, pela revisão de linguagem desse trabalho.

A Carmem, Cláudio, Luciana, Kísla e Andrea o grande apoio durante a realização desse trabalho. A Maria Ana, Daniele e Eliane, pelo carinho e grande apoio durante a pesquisa de campo.

A Mrs Pasche e Mrs Monreal, aos amigos Johannes, Kai, Yusuf, Denis, e as amigas Zelina, Cláudia, Somayeh e Shamila, pelo grande apoio durante o estágio no exterior.

E a todos que de alguma forma apoiaram o desenvolvimento desse trabalho.

De forma especial aos meus pais e irmãos queridos, pelo apoio incondicional, silencioso e amoroso, e a Deus, por iluminar meus caminhos.

RESUMO

Por meio deste trabalho investigou-se qualitativamente o desempenho das membranas estruturais, estruturas de superfície (em dupla curvatura em direções opostas) com espessura e peso mínimos, que absorvem apenas os esforços na forma de tensões de tração no seu próprio plano, considerando-se dois aspectos: estrutural e de procedimento de projeto. Abrangeu, inicialmente, a análise de estruturas leves construídas e o acompanhamento dos procedimentos construtivos de coberturas em membrana. Estas investigações possibilitaram identificar as estratégias que contribuem para alcançar o ótimo desempenho do sistema e os desafios das etapas de projeto e construção, e balizaram a análise qualitativa do desempenho de um projeto de cobertura em membrana estrutural, ou seja, de uma situação em particular, como exemplo. Essa análise qualitativa desenvolveu-se em duas etapas, guiada por dados numéricos e experimentais. A primeira etapa envolveu a processo de otimização do conjunto estrutural sob a ação de cargas. As análises evidenciaram que o desempenho desse sistema flexível resulta da estabilidade espacial do conjunto estrutural (arranjo e geometria de todos os componentes), da rigidez da superfície da membrana (geometria da membrana), bem como a organização e cooperação de todos os componentes em estado de tensão. A segunda etapa abrangeu a investigação experimental do comportamento do material da membrana no contexto da estrutura para a análise da geometria da superfície da membrana planejada. Tal avaliação possibilitou verificar as diferenças entre o modelo teórico (forma de equilíbrio contínua) e a forma real (composta de painéis planos), e propor ajustes na geometria dos painéis planos, para que a forma final possa revelar não só o caminho das forças, mas também o melhor uso do material. As investigações, análises realizadas e o procedimento de trabalho adotado ampliaram a compreensão desse sistema apontando possibilidades para aumentar o desempenho do mesmo e minimizar as falhas da etapa preliminar de projeto.

Palavras-chave: membranas estruturais, estratégias de desempenho, material da membrana, processo de otimização, testes do material da membrana.

ABSTRACT

This paper provides a qualitative investigation about the structural performance of the membranes, surface structures (with double curvature in opposite directions) with minimum thickness and weight, which absorb forces in form of tensile stresses in its own plane, considering two aspects: structural and design procedure. Initially, it involved the analyses of lightweight structure buildings and the observation of constructive work process in membrane roofs. These investigations allowed identifying strategies that contribute to achieve optimum system performance and the challenges encountered along the stages of designing and building. They also guided the qualitative analysis of the performance of a structural membrane roofing project, i.e., a particular situation, as example. This qualitative analysis was developed in two stages, guided by experimental and numerical data. The first stage involved the optimization procedure of the structural system under load action. This analysis showed that the flexible system performance is resulted of the three-dimensional stability of the structural system (arrangement and geometry of all components), membrane surface stiffness (membrane geometry), as well as the cooperation of all components in pre-tension state. The second stage comprised the experimental investigation of the membrane material behaviour within the structure context in order to analyze the flattened membrane geometry. Such evaluation enabled to verify the difference between the theoretical model (shape of equilibrium) and the actual shape (consisting of flat panels), enabling the proper adjustment of the surface geometry so that the final shape can reveal not only the path of the forces, but also the best use of the material. The investigations, analyzes and working procedure here adopted broadened the understanding of this system pointing possibilities to increase its performance and to minimize failures during the preliminary stage of design.

Keywords: structural membranes, performance strategies, membrane material, optimization process, membrane material testing.

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
1.1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	23
1.2	OBJETIVOS E HIPÓTESE QUE NORTEIAM A INVESTIGAÇÃO	25
1.3	METODOLOGIA	25
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	26
2	ESTRUTURAS LEVES - VISÃO GERAL	27
2.1	CONTEXTO HISTÓRICO	27
2.2	SISTEMA CONSTRUTIVO	32
2.3	PRINCÍPIOS DO SISTEMA	35
2.4	ESTRATÉGIAS QUE BALIZAM O ÓTIMO DESEMPENHO DESSE SISTEMA	38
2.4.1	OBSERVAÇÃO E ANÁLISE DE EDIFICAÇÕES CONSTRUÍDAS	38
2.4.2	ESTRATÉGIAS OU REGRAS IDENTIFICADAS	56
2.5	MATERIAL DA MEMBRANA	65
2.5.1	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL DA MEMBRANA	65
2.5.2	MATERIAIS MAIS USADOS	68
2.5.3	COMPORTAMENTO DO MATERIAL	74
2.6	PROCESSO DE PROJETO.....	77
2.6.1	DEFINIÇÃO DA FORMA – MÉTODO DE DENSIDADE DE FORÇA	79
2.6.2	ANÁLISE NUMÉRICA – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	82
2.6.3	DEFINIÇÃO DOS PADRÕES DE CORTE DA SUPERFÍCIE	82
2.7	DESAFIOS DO PROCESSO DE PROJETO E DE CONSTRUÇÃO NO BRASIL.....	85
2.7.1	DESCRIÇÃO DAS COBERTURAS EM MEMBRANA	85
2.7.2	PROCEDIMENTOS DE MANUFATURA E MONTAGEM	87
2.7.3	PROCEDIMENTOS DE TRABALHO E DESAFIOS	90
3	ESTUDO DE CASO	95
3.1	1ª ETAPA DA ANÁLISE QUALITATIVA DA EFICIÊNCIA DE UM PROJETO.....	96
3.1.1	CONCEITO ESTRUTURAL DO PROJETO QUE NORTEIA A ANÁLISE	96
3.1.2	VARIÁVEIS QUE BALIZAM A ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DO PROJETO	98

3.1.3	CASOS (VARIÁVEIS) INVESTIGADOS E MODELOS AVALIADOS	99
3.1.4	PROCEDIMENTO DE REPRESENTAÇÃO/ SIMULAÇÃO DOS MODELOS	104
3.1.5	DADOS/ PARÂMETROS QUE BALIZAM A SIMULAÇÃO DOS MODELOS	108
3.1.6	INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DOS MODELOS	122
3.1.7	CONSIDERAÇÕES DA 1ª ETAPA DA ANÁLISE QUALITATIVA	184
3.2	2ª ETAPA DA ANÁLISE QUALITATIVA/ EXPERIMENTAL	185
3.2.1	TESTE BIAXIAL	187
3.2.2	TESTE BIAXIAL DA UNIÃO	199
3.2.3	TESTES UNIAXIAIS DA UNIÃO	208
3.2.4	CONSIDERAÇÕES DA 2ª ETAPA DA ANÁLISE QUALITATIVA	214
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	215
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	221
	APÊNDICE A – INFORMAÇÕES SOBRE O PROJETO ORIGINAL	227
	APÊNDICE B – DIREÇÕES DE INCIDÊNCIA DO VENTO	229
	APÊNDICE C – MAPEAMENTO DOS COEFICIENTES DE VENTO	230
	APÊNDICE D – PONTOS DE ANCORAGEM DOS MODELOS AVALIADOS	233
	APÊNDICE E – DIMENSÕES DO SISTEMA SUPORTE	234
	APÊNDICE F – AVALIAÇÃO PRELIMINAR DOS COMPONENTES DO SISTEMA SUPORTE	235
	APÊNDICE G – INFORMAÇÕES DOS TESTES EXPERIMENTAIS	240
	ANEXO A – EQUAÇÕES DO MÉTODO DENSIDADE DE FORÇA	241
	ANEXO B – LINHAS ISOBÁRICAS DE CP, MODELOS ENSAIADOS	242

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-1– Tenda Negra do oriente Médio, Velaria, Chapiteau	27
Figura 2.1-2 – Shukhov radio tower - Vistas: externa, interna, Rússia (1896)	28
Figura 2.1-3 – Vista externa e modelo da Arena de Raleigh, Carolina do Norte, 1952	29
Figura 2.1-4 – Formas de equilíbrio	29
Figura 2.1-5 – Estádio Olímpico, Munich (1972)	30
Figura 2.1-6 – Fröttmaning station – Munich, 2004	32
Figura 2.1-7 – Allianz Arena, Munich, 2005	32
Figura 2.2-1 – Rede de cabos/ membranas (dupla curvatura em direções opostas): formas de equilíbrio	33
Figura 2.2-2– Principais curvaturas: r_1 e r_2 e curvatura Gaussiana de superfícies curvas (K)	34
Figura 2.2-3 – Bolhas (a) e filme (b) de sabão; (c) Comportamento das membranas anticlásticas	35
Figura 2.3-1 – Processo de otimização das estruturas: modelo físico, foto de árvore e desenhos	36
Figura 2.3-2 – Forma como se conectam seis barras: podem formar dois triângulos ou tetraedro	37
Figura 2.3-3 – Tensegrity realizado a partir de prisma (a) e de octaedro (b); (c) arco tensegrítico	37
Figura 2.4-1– Cobertura do pátio interno - Museum of Hamburg History	39
Figura 2.4-2– Exhibition hall, Hückelhoven	41
Figura 2.4-3 – RheinEnergie Stadium, Köln	42
Figura 2.4-4 – RheinEnergie Stadium, Köln	43
Figura 2.4-5 – Imtech Arena (Volksparkstadion), Hamburg	44
Figura 2.4-6 – Imtech Arena (Volksparkstadion), Hamburg	45
Figura 2.4-7 – Anfiteatro Cobertura retrátil, Castelo de Kufstein	46
Figura 2.4-8 – Anfiteatro Cobertura retrátil, Castelo de Kufstein	47
Figura 2.4-9 – New Waldstadion, Frankfurt/ Main	48
Figura 2.4-10 – New Waldstadion, Frankfurt/ Main	49
Figura 2.4-11– Rothenbaum Tennis Stadium, Hamburg	50
Figura 2.4-12 – Rothenbaum Tennis Stadium, Hamburg	51
Figura 2.4-13 – Rinque de patinação (Eisbahn Stellingen), Hamburg	52
Figura 2.4-14 – Rinque de patinação (Eisbahn Stellingen), Hamburg	53
Figura 2.4-15 – Estádio Olímpico, Munich	54
Figura 2.4-16 – Cobertura do pátio interno da empresa IHK, Würzburg	55
Figura 2.4-17 – Cobertura do pátio interno da empresa IHK, Würzburg	56
Figura 2.4-18 – Análise do conjunto estrutural - cascas e o sistema pórtico/ponte suspensa	57
Figura 2.4-19 – Análise do conjunto estrutural das membranas e rede de cabos	58
Figura 2.4-20 – Arranjo da membrana (coberturas investigadas)	59
Figura 2.4-21– (a-d) Topos e vales; (e-h) Pontos altos e baixos	60
Figura 2.4-22 - União entre componentes	60
Figura 2.4-23 – Geometria e arranjo dos componentes do sistema suporte	61
Figura 2.4-24 – Ancoragens dos componentes	63
Figura 2.4-25 – Progressiva capacidade das estruturas leves suportar grandes forças com pouca massa	64
Figura 2.5-1– Estrutura do tecido de PVC (tecido + cobertura)	65
Figura 2.5-2 – (a) Formação dos fios; (b) Gráfico: comprimento de ruptura das fibras	66
Figura 2.5-3 – (a-b) Processo de tecelagem do tecido poliéster e aplicação de cobertura em PVC	67
Figura 2.5-4 – Tecidos entrelaçados (<i>plain</i> e <i>atlas</i>): direção e modulação dos fios	68
Figura 2.5-5 – Transmissão da luz de tecidos cobertos (a, b, c); filme ETFE (d)	73
Figura 2.5-6 – (a) Comportamento não linear; (b) Comportamento não elástico	74
Figura 2.5-7– Curvatura dos fios: (a) trama; (b) urdidura	75

Figura 2.5-8 – Comportamento do tecido em relação à orientação dos fios: 90°, 0° e 45°	75
Figura 2.5-9 – Diferentes deformações nas direções do tecido (90°, 0° e 45°) quando solicitado	76
Figura 2.5-10 – (a) <i>Creep</i> (fluência); (b) Relaxação	77
Figura 2.6-1 – Comportamento elástico do elemento de barra: independente e parte da rede de cabos ..	80
Figura 2.6-2 – Forma de equilíbrio encontrando o equilíbrio vertical.....	81
Figura 2.6-3 – Método densidade de força.....	81
Figura 2.6-4 – Definição dos padrões de corte e planificação da superfície	83
Figura 2.6-5 – Detalhe da união: região menor deformação	84
Figura 2.6-6 – União de tecidos.....	84
Figura 2.7-1 – Vista aérea da cobertura do Centro de Convenções Cenpes II; Sistema suporte cobertura.....	86
Figura 2.7-2 – Corte esquemático – sistema suporte da cobertura do Centro de Convenções Cenpes II ..	86
Figura 2.7-3 – Cobertura da Praça, Boulevard Cidade Nova	86
Figura 2.7-4 – Procedimento de manufatura da superfície – cobertura da Praça	87
Figura 2.7-5 – Procedimento de montagem – cobertura da Praça.....	88
Figura 2.7-6 - Procedimento de montagem – cobertura do Centro de convenções	89
Figura 2.7-7 – Conexão de borda rígida desenvolvida pelo eng. Prof. Ruy Pauletti.....	91
Figura 2.7-8 – Conexão de borda flexível desenvolvida pela Tensitex.....	91
Figura 2.7-9 – Modulação da superfície (alteração proposta) – cobertura do Centro de convenções.....	92
Figura 2.7-10 – Sistema suporte da cobertura do Centro de Convenções – alteração proposta	92
Figura 2.7-11 – Geometria da borda da superfície e sist. suporte da cobertura da Praça - alterações.....	92
Figura 2.7-12 – Imprecisão do sistema suporte – cobertura do Centro de convenções.....	93
Figura 2.7-13 – Imprecisão do sistema suporte – cobertura da Praça	93
Figura 3.1-1 – Modelo original – A1: planta e vistas 3D	96
Figura 3.1-2 – Modelo original – A1: sistema suporte (mastros + sistema suporte espacial)	97
Figura 3.1-3 – Modelo original – A1: planta e seção vertical.....	97
Figura 3.1-4 – Modelo original – vista 3D e detalhe dos mastros.....	98
Figura 3.1-5 – 1ª Etapa da análise qualitativa da eficiência do projeto - variáveis investigadas	99
Figura 3.1-6 – Caso 1: número de mastros (variável investigada) - modelos A1, B1, C1	100
Figura 3.1-7 – Configuração dos cabos que suportam o anel treliçado e o mastro flutuante (ex. modelo A1)....	100
Figura 3.1-8 – Caso 2: configuração dos cabos (variável investigada) - modelos: A2.40°, B2.30°, C2.24°	101
Figura 3.1-9 – Caso 2: configuração dos cabos (variável investigada) - modelos: B2.60° e C2.48°	101
Figura 3.1-10 – Caso 2: ângulo entre pares de cabos definido por um módulo da superfície interna	102
Figura 3.1-11 – Caso 2: ângulo entre pares de cabos definido por dois módulos da superfície interna... 102	
Figura 3.1-12 – Caso 3: geometria da membrana interna (variável investigada)	103
Figura 3.1-13– Caso 3: geometria da membrana externa (variável investigada)	103
Figura 3.1-14 – Imagens dos modelos físicos realizados (escalas 1/1500, 1/200, 1/100) - modelo A1 ...	105
Figura 3.1-15 – Informações: nós, elementos da rede e pré-tensão aplicada.....	105
Figura 3.1-16 – Superposição da rede de cabos (modelo computacional) e modelo físico.....	105
Figura 3.1-17 – Representação e simulação dos modelos - Etapas de trabalho	107
Figura 3.1-18 – Desenho esquemático: pressões que atuam na geometria da superfície	111
Figura 3.1-19 – Modelos ensaiados (R215, R30, R475) utilizados como referência ao estudo de caso ..	112
Figura 3.1-20 – Gráficos de linhas isobáricas de Cp* (em cores) – modelos R215, R390, R475	113
Figura 3.1-21 – Ângulos e setores das superfícies do Modelo A1 para a aplicação dos Cps	115
Figura 3.1-22 – Direções (global e local) de incidência do vento (superf. externas, modelos: A, B, C)....	116
Figura 3.1-23 – Mapeamento dos coeficientes pressão de vento (direção -Y).....	116
Figura 3.1-24 – Restrições da ancoragem considerando coordenadas locais (exemplo: modelo A1)	121
Figura 3.1-25 – Direções do vento	122

Figura 3.1-26 – Tensões Von Mises – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)	126
Figura 3.1-27 – Tensões Von Mises – A1, B1, C1 (chuva + vento -Y e -Y2).....	126
Figura 3.1-28 – Tensão máxima na membrana externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)	127
Figura 3.1-29 – Tensão mínima na membrana externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2).....	127
Figura 3.1-30 – Tensão máxima na membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)	128
Figura 3.1-31– Tensão máxima na membrana interna – A1, B1, C1 (tensão admissível do material).....	128
Figura 3.1-32 – Tensão mínima na membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2).....	128
Figura 3.1-33 – Pequenas áreas de compressão nos pontos de ancoragem superior das superfícies ...	129
Figura 3.1-34 – Deslocamentos do sistema suporte – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2).....	129
Figura 3.1-35 – Deslocamentos da membrana externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2).....	130
Figura 3.1-36 – Deslocamentos da membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2).....	130
Figura 3.1-37 – Tensão Von Mises – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	132
Figura 3.1-38 – Tensão Von Mises – A1, B1, C1 (chuva + vento: -X, Y, -Y, -Y2)	133
Figura 3.1-39 – Tensão máxima na membrana externa – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	134
Figura 3.1-40 – Tensão mínima na membrana externa – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	135
Figura 3.1-41 – Tensão máxima na membrana interna – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	136
Figura 3.1-42 – Tensão máxima na membrana interna – A1, B1, C1 (tensão máxima do material)	137
Figura 3.1-43 – Tensão mínima na superfície interna – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2).....	138
Figura 3.1-44 – Deslocamentos do sistema suporte – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2).....	139
Figura 3.1-45 – Deslocamentos da membrana externa – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	140
Figura 3.1-46 – Deslocamentos da membrana interna – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	141
Figura 3.1-47 – Tensões Von Mises – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)	144
Figura 3.1-48 – Tensão Von Mises – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)	144
Figura 3.1-49 – Tensão máxima na membrana externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)	145
Figura 3.1-50 – Tensão máx. membrana externa – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)..	145
Figura 3.1-51 – Tensão mínima na superfície externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)	146
Figura 3.1-52 – Tensão mín. membrana externa – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y; -Y2) ..	146
Figura 3.1-53 – Tensão máxima na membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)	147
Figura 3.1-54 – Tensão máx. membrana interna – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2) ..	147
Figura 3.1-55 – Tensão mínima na membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)	148
Figura 3.1-56 – Tensão mín. membrana interna – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2) ...	148
Figura 3.1-57 – Deslocamentos do sistema suporte – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2).....	149
Figura 3.1-58 – Deslocamentos sistema suporte – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)...	149
Figura 3.1-59 – Deslocamentos da membrana externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2).....	150
Figura 3.1-60 – Deslocamentos memb. externa – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)..	150
Figura 3.1-61– Deslocamentos da membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)	151
Figura 3.1-62 – Deslocamentos memb. interna – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)...	151
Figura 3.1-63 – Ângulos entre par de cabos; pré-tensão aplicada aos cabos; caminho das cargas.....	153
Figura 3.1-64 – Tensão Von Mises – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	154
Figura 3.1-65 – Tensão Von Mises – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)	155
Figura 3.1-66 – Tensão máxima na membrana externa – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	156
Figura 3.1-67 – Tensão máxima na membrana externa – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)	157
Figura 3.1-68 – Tensão mínima na membrana externa – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	158
Figura 3.1-69 – Tensão mínima na membrana externa – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)	159
Figura 3.1-70 – Tensão máxima na membrana interna – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2).....	160
Figura 3.1-71 – Tensão máxima na membrana interna – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)	161
Figura 3.1-72 – Tensão mínima na membrana interna – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento -X, Y, -Y, -Y2)	162

Figura 3.1-73 – Tensão mínima na membrana interna – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)	163
Figura 3.1-74 – Deslocamentos do sistema suporte – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	164
Figura 3.1-75 – Deslocamentos no sistema suporte – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)	165
Figura 3.1-76 – Deslocamentos da membrana externa – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	166
Figura 3.1-77 – Deslocamentos da membrana externa – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)	167
Figura 3.1-78 – Deslocamentos da membrana interna – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)	168
Figura 3.1-79 – Deslocamentos da membrana interna – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)	169
Figura 3.1-80 – Representação esquemática da alteração da curvatura de borda da superfície.....	170
Figura 3.1-81 – Tensão Von Mises – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -Y2)	171
Figura 3.1-82 – Tensão máxima na membrana externa – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -Y2)	172
Figura 3.1-83 – Tensão mínima na membrana externa – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -Y2).....	172
Figura 3.1-84 – Tensão máxima na membrana interna – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -Y2).....	173
Figura 3.1-85 – Tensão mínima na membrana interna – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -Y2).....	173
Figura 3.1-86 – Deslocamentos do sistema suporte – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -Y2)	173
Figura 3.1-87 – Deslocamentos da membrana externa – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -Y2)	174
Figura 3.1-88 – Deslocamentos da membrana interna – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -Y2).....	175
Figura 3.1-89 – Tensão Von Mises – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2).....	176
Figura 3.1-90 – Tensão máxima na membrana externa – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2) ..	177
Figura 3.1-91 – Tensão mínima na membrana externa – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2) ..	178
Figura 3.1-92 – Tensão máxima na membrana interna – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2) ..	179
Figura 3.1-93 – Tensão mínima na membrana interna – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2) ..	180
Figura 3.1-94 – Deslocamentos do sistema suporte – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2)	181
Figura 3.1-95 – Deslocamentos da membrana externa – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2) .	182
Figura 3.1-96 – Deslocamentos da membrana interna – B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2) ..	183
Figura 3.2-1 – Análise qualitativa da eficiência do projeto: 1ª e 2ª etapas	186
Figura 3.2-2 – Parâmetros e procedimentos avaliados na etapa experimental.....	186
Figura 3.2-3 – Teste biaxial; material PES/PVC	187
Figura 3.2-4 – Equipamento de teste - <i>Essen laboratory for lightweight structures, UDE</i>	187
Figura 3.2-5 – Padrões de corte radiais das superfícies: externa e interna do modelo B2 _{int-ext}	188
Figura 3.2-6 – Tensão máxima (a) e mínima (b) na membrana externa do modelo B2 _{int-ext} (vento -Y2) .	189
Figura 3.2-7 – Tensão máxima (a) e mínima (b) na membrana interna do modelo B2 _{int-ext} (vento -Y2)	189
Figura 3.2-8 – Cálculo das constantes elásticas	194
Figura 3.2-9 – Transferência de ondulação dos fios.....	196
Figura 3.2-10 – Compensação dos painéis planos.....	198
Figura 3.2-11 – Ângulos dos padrões de corte - superfícies externa/ interna (A2-40°, B2 _{int-ext} e C2-48°)	200
Figura 3.2-12 – Teste biaxial da união (superfície externa do modelo B2 _{int-ext}) – ângulos avaliados.....	200
Figura 3.2-13 – (a) Pontos e linhas de referência marcadas na amostra; (b) sobreposições dos painéis	201
Figura 3.2-14 – Orientação dos fios do material em relação à direção de aplicação da carga	202
Figura 3.2-15 – Teste biaxial da união – comparação dos testes - ângulo entre painéis: 0° e 4°	206
Figura 3.2-16 – Teste biaxial da união – comparação dos testes - ângulo entre painéis: 4° e 8°	207
Figura 3.2-17 – Detalhe da amostra	209
Figura 3.2-18 – Amostras dos testes uniaxiais da união, após a realização dos testes	209
Figura 3.2-19 – Teste uniaxial da união dos painéis, temperatura: + 23°C	210
Figura 3.2-20 – Teste uniaxial da união dos painéis; temperatura: (a) +70°C; (b) -10°C	212
Figura 3.2-21 – Detalhe do tipo de falha das amostras do teste uniaxial da união a +23°C	212
Figura 3.2-22 – Detalhe do tipo de falha das amostras do teste uniaxial da união a -10°C	212
Figura 3.2-23 – Detalhe do tipo de falha das amostras do teste uniaxial a +70°C	213

Figura 4-1 – Procedimento de trabalho adotado e novas etapas de trabalho	218
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.5-1 – Características técnicas dos tecidos e filmes selecionados	71
Tabela 3.1-1 – Características e campo de tensão aplicado às superfícies na modelagem pelo MDF ...	106
Tabela 3.1-2 – Informações sobre os materiais tipo III e IV	108
Tabela 3.1-3 – Tabela com a rigidez tangencial das membranas técnicas	109
Tabela 3.1-4 – Características dos modelos R215, R390 e R475 e direção de incidência do vento	112
Tabela 3.1-5 – Valores limites de C_p^* média resultante dos modelos R215, R390, R475	113
Tabela 3.1-6 – Coeficientes de pressão e pressão dinâmica aplicada aos modelos	114
Tabela 3.1-7 – Tensões máximas na estrutura de membrana em estudo; padrões de corte das superfícies	119
Tabela 3.1-8 – Parâmetros para análise e comparação dos modelos: pré-tensão aplicada	120
Tabela 3.1-9 – Passos de carga e pré-tensão aplicada aos componentes dos modelos em estudo	123
Tabela 3.1-10 – Relação massa/área total dos modelos em estudo	123
Tabela 3.1-11 – Deslocamentos (sist. suporte/ membranas) dos modelos em estudo (ações: vento, chuva) .	124
Tabela 3.1-12 – Pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte – caso 1	125
Tabela 3.1-13 – Relação massa/área dos modelos – caso 1	125
Tabela 3.1-14 – Pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte nos modelos - casos 1 e 2	142
Tabela 3.1-15 – Relação massa/área dos modelos - casos 1 e 2	143
Tabela 3.1-16 – Pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte nos modelos B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext} .	170
Tabela 3.1-17 – Relação massa/área de cada dos modelos B2-30°, B2 _{int} e B2 _{int-ext}	171
Tabela 3.2-1 – Teste biaxial - relação das cargas aplicadas nas direções do material	190
Tabela 3.2-2 – Avaliação das constantes elásticas nos ciclos de carga máxima prevista na estrutura ...	193
Tabela 3.2-3 – Teste biaxial da união - relação das cargas aplicadas direção do material	201
Tabela 3.2-4 – Teste biaxial da união entre painéis - deformação do material	202

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 3.2-1 – Teste biaxial – Valores de referência das cargas aplicadas nas direções do material	191
Diagrama 3.2-2 – Teste biaxial – Força- tempo nas direções do material: urdidura (<i>warp</i>) e trama (<i>fill</i>) .	192
Diagrama 3.2-3 – Teste biaxial – Força-alongamento-tempo nas direções do material	192
Diagrama 3.2-4 – Teste biaxial – Alongamento-tempo	197
Diagrama 3.2-5 – Valores de referência das cargas aplicadas nos testes biaxiais da união	201
Diagrama 3.2-6 – Teste biaxial da união - ângulo entre painéis: 0°	204
Diagrama 3.2-7 – Teste biaxial da união - ângulo entre painéis: 4°	204
Diagrama 3.2-8 – Teste biaxial da união - ângulo entre painéis: 8°	205
Diagrama 3.2-9 – Teste biaxial da união - comparação dos ângulos entre painéis: 0°, 4° e 8°	205
Diagrama 3.2-10 – Teste uniaxial da união, temperatura: +23°C	210
Diagrama 3.2-11 – Teste uniaxial da união, temperatura: -10°C	211
Diagrama 3.2-12 – Teste uniaxial da união, temperatura: +70°C	211

ABREVIATÕES

Ag	área da seção transversal do componente
Ae	área efetiva da seção transversal do componente
C_p^*	coeficiente de pressão média resultante
C_p	coeficiente de pressão

E	módulo de elasticidade
$E_1 ; E_2$	módulo de elasticidade nas direções da urdidura e trama
F_y	resistência de escoamento do aço
F_e	tensão elástica de flambagem
F_{cr}	tensão crítica de flambagem
K	curvatura Gaussiana
Mn	resistência nominal a flexão
N_0	resistência admissível do material
P	pressão transversal
P_n	resistência nominal dos elementos (força axial)
P_u	medição da resistência dos elementos
S	módulo elástico da seção
S_h, H_x	componente horizontal da força de pré-tensão
S_1, S_a	força interna de tração no elemento
S_1	fator topográfico
S_2	fator de rugosidade
S_3	fator estatístico
$T_1 ; T_2$	forças de tração nas direções principais
$V_1 ; V_2$	componente vertical da força de pré-tensão
V_k	velocidade característica do vento
V_0	velocidade básica do vento
Z	módulo plástico da seção
a	comprimento final em função das coordenadas XYZ
$\cos x$	cosseno do ângulo x
d ; y ; \emptyset	diâmetro
$f_{u,k}$	resistência do material na união
h	altura
I	momento de inércia
k	fator de comprimento efetivo (fator de redução associado à flambagem)
$k_1 ; k_2$	curvaturas principais
l	comprimento inicial do elemento
m	massa
p_x	forças externas de tração no elemento
q	densidade de força
r	raio de giração
r_1 e r_2	raios das curvaturas principais
t	espessura
z, u	deslocamento no plano vertical
α, β	ângulos
$\Delta \epsilon$	variação das deformações
Δx	comprimento de projeção do cabo no eixo x
$\Delta \sigma$	variação das tensões
ϵ	deformação
$\epsilon_1 ; \epsilon_2$	deformações nas direções da urdidura e trama
λ	índice de esbeltez
ρ	densidade (peso específico)
π	constante matemática
$\sigma_1 ; \sigma_2$	tensão de tração
$\nu_{21} ; \nu_{12}$	coeficiente de Poisson

A todos, sem exceção.

It is not the material but how it is used that matter – a Chinese old saying.
(YU, 2012)

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O tema dessa tese – membranas estruturais – baseia-se no conceito de estruturas de superfície com espessura e peso mínimos, que absorvem apenas os esforços na forma de tensões de tração no seu próprio plano, e cuja estabilidade tridimensional resulta da sua geometria (dupla curvatura) e retesamento. São estruturas que se inserem no campo das tensoestruturas ou estruturas retesadas quando classificadas segundo seu estado de solicitação interna, no grupo de sistemas flexíveis conforme seu comportamento, estruturas leves quando se considera o seu peso próprio, e como sistemas espaciais quando classificadas morfologicamente, (PAULETTI, 2003).

Essas estruturas trabalham associadas com o sistema suporte (mastros, cabos, treliças, arcos, etc), normalmente em aço, de forma conjunta e contínua e em estado de retesamento. A associação referida tem possibilitado o desenvolvimento de estruturas capazes de vencer grandes vãos com baixo peso, alta resistência, rapidez de construção e capacidade de reutilização sendo uma tendência na arquitetura e na engenharia.

A redução do peso possibilita diminuir o custo e aumentar a capacidade de adaptação da edificação, permitindo vários usos e a maior utilização da mesma (ROLAND, 1973). Assim, essas estruturas têm sido muito utilizadas em edificações complexas e com grandes vãos livres, como as grandes coberturas de estádios, aeroportos, tanto quanto de anfiteatros, auditórios e estações de metrô, dentre outras. Destaca-se sua utilização em coberturas retráteis e nas estruturas temporárias de fácil montagem, com grande capacidade de adaptação a diferentes locais, como os alojamentos para situações de emergência. Observam-se também estruturas em membrana em multicamadas, preenchidas com gases, usadas como coberturas ou revestimento de grandes fachadas leves.

Trata-se de estruturas que se caracterizam por elevado grau de complexidade apresentando grandes desafios aos procedimentos de projeto e construtivo. São flexíveis quando comparadas aos sistemas rígidos como as cascas. Ademais, sob a ação de cargas exibem grandes deslocamentos. Logo, apresentam a não linearidade geométrica, dificultando sua análise por métodos tradicionais.

O material utilizado nas membranas, tratado aqui por tecido estrutural, apresenta grande eficiência (elevada resistência e baixo peso). Contudo, exhibe comportamento complexo quando solicitado, e necessita ser verificado por testes.

O vento geralmente é considerado o carregamento crítico dessas estruturas leves, gerando forças de sucção significativas, exceto para edificações localizadas em regiões com grande carga de neve. Essas informações demandam ensaios em túnel de vento, que fornecem os valores adequados dos coeficientes de pressão de vento, necessários à análise estrutural (FOSTER; MOLLAERT, 2004).

Além disso, as membranas tal como o sistema suporte em aço são pré-fabricadas. A manufatura resulta da planificação da forma espacial, ou seja, da modulação, corte e união dos painéis planos. Por isso, são apenas montadas e tensionadas no local da obra, restringindo grandes alterações.

No Brasil, os arquitetos e os engenheiros lidam com os desafios do comportamento desse sistema, com as incertezas dos dados avaliados e limitações dos programas numéricos utilizados. Verificam-se ainda poucas publicações nessa área e a ausência de recomendações técnicas que balizem o controle de qualidade dessas estruturas e o trabalho técnico das equipes no nível de projeto e construção.

Por causa dessas incertezas e limitações, é usual adotar simplificações nas simulações numéricas, em relação ao comportamento do material, às cargas, bem como em relação às etapas de planificação. Entretanto, essas simplificações geram falhas metodológicas ao procedimento de projeto, tornando a análise menos precisa. Essas falhas metodológicas somam-se às imprecisões dos componentes e ou construtivas, dificultando a precisão e o desempenho construtivo dessas estruturas.

Essas considerações ilustram as motivações e as justificativas para a investigação da eficiência de um projeto, buscando compreender as estratégias utilizadas para alcançar a eficiência estrutural do sistema e os procedimentos que possibilitam cercar as falhas metodológicas dessa etapa preliminar de trabalho, contribuindo para elevar o desempenho (estrutural e construtivo) dessas estruturas.

Este trabalho resulta da cooperação técnica entre a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e a *University Duisburg-Essen* (UDE, Essen, Alemanha), bem como do apoio de arquitetos, engenheiros e das empresas de produção e manufatura de membranas estruturais, possibilitando integrar o conhecimento e a experiência de diferentes campos: arquitetura, engenharia civil e materiais.

1.2 OBJETIVOS E HIPÓTESE QUE NORTEIAM A INVESTIGAÇÃO

Este trabalho investiga qualitativamente o desempenho das membranas estruturais (em dupla curvatura em direções opostas) dentro dos contextos: estrutural (configuração do sistema e o comportamento do material da membrana) e do procedimento de projeto.

Busca os parâmetros ou as estratégias que norteiam o ótimo desempenho desse sistema; e os procedimentos que contribuem para o aprimoramento do sistema, para minimizar as falhas metodológicas da etapa preliminar de trabalho e as diferenças entre o modelo teórico e a estrutura real.

Parte-se da hipótese de que a eficiência dessas estruturas deriva *da geometria dos componentes do sistema (membrana e sistema suporte), trabalhando de forma conjunta em estado de tensão, bem como da geometria da membrana planificada.*

Assim, essa hipótese envolve duas investigações. Inicialmente, analisa a influência da geometria da membrana e do arranjo do conjunto estrutural no desempenho do sistema, sendo a membrana considerada uma superfície tridimensional contínua. Em seguida, analisa a influência da geometria da membrana planificada, e nesse caso, considera-se que a compreensão e a avaliação do comportamento do material são passos essenciais para minimizar as diferenças entre modelos teórico e real.

1.3 METODOLOGIA

A etapa inicial do trabalho abrange a revisão bibliográfica, os estudos de campo e as visitas técnicas. Essa abordagem envolveu a observação do objeto de pesquisa *in loco*, ampliando a percepção do mesmo, e possibilitou integrar o suporte teórico científico e a análise crítica do objeto em estudo, formando o conhecimento básico que fundamenta esta investigação.

Os estudos de campo abrangeram a observação, o registro e a análise das etapas de trabalho (projeto e construção) no Brasil, investigando os seus desafios. As visitas técnicas envolveram a observação, o registro e a análise de estruturas leves construídas na Alemanha, buscando identificar as estratégias para alcançar a eficiência do sistema. Foram realizadas também visitas técnicas aos fabricantes de materiais, buscando conhecer as etapas de produção do mesmo.

Para demonstrar a hipótese deste trabalho dentro do contexto estrutural e do ponto de vista do procedimento de projeto, foi realizada uma análise qualitativa do

desempenho de um projeto de cobertura em membrana estrutural. Essa análise foi realizada em duas etapas, balizada por dados numéricos e experimentais.

A primeira etapa envolveu o procedimento de otimização do conjunto estrutural do projeto sob a ação de cargas. Abrangeu a modelagem e a análise preliminar do conjunto estrutural (membrana e sistema suporte). Utilizaram-se o Método Densidade de Força e o Método dos Elementos Finitos. As cargas de vento, utilizadas na simulação dos modelos, tiveram como referência o cálculo pressão de vento da norma NBR 6123 (ABNT1988) e os resultados dos ensaios em túnel de vento de tensoestruturas realizados por Vilela (2011).

A segunda etapa abrangeu a investigação experimental do comportamento do material da membrana para a análise da geometria da membrana planificada. Os testes foram realizados no *Essen laboratory for lightweight structures -UDE, Essen*.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho foi organizado em quatro partes. A primeira parte compreende a introdução e a justificativa do tema, os objetivos e a hipótese que norteia esta investigação.

A segunda parte abrange uma visão geral dessas estruturas leves e o conhecimento que fundamenta esta investigação. Apresenta o contexto histórico, as características e princípios desse sistema, bem como a análise de estruturas leves construídas e a busca das estratégias que contribuem para alcançar o ótimo desempenho do sistema. São descritas as características e as particularidades do comportamento dos materiais da membrana, destacando os mais usados. Em seguida, são abordados o processo de projeto dessas estruturas e alguns métodos de trabalho. Posteriormente, aponta os desafios e as falhas encontradas nas etapas de projeto e construção no Brasil.

A terceira parte apresenta a análise qualitativa da eficiência de um projeto, realizada em duas etapas. Na primeira etapa apresenta a avaliação da influência do arranjo do conjunto estrutural e da geometria da membrana no desempenho do sistema sob a ação de cargas. Na segunda etapa apresenta a avaliação da influência da geometria da membrana planificada no desempenho do sistema. Essa análise foi balizada pela análise experimental do material.

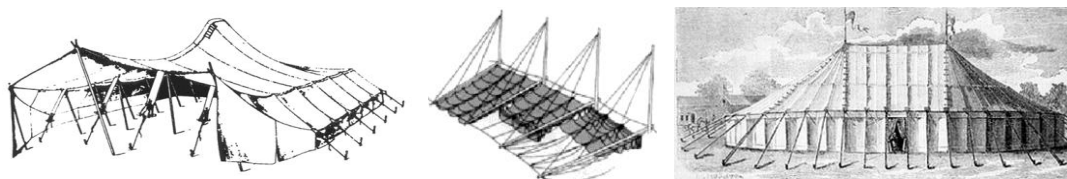
A quarta parte apresenta as considerações finais e as contribuições desse trabalho.

2 ESTRUTURAS LEVES - VISÃO GERAL

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO

As membranas estruturais têm como referência as tendas encontradas nas primeiras épocas da civilização. Essas edificações leves e móveis destacam-se como uma das primeiras formas espontâneas de habitações construídas pelo homem, sendo utilizadas até os dias atuais por povos nômades. As tendas foram introduzidas na cultura ocidental pelos exércitos persas, sendo transmitidas aos gregos e posteriormente aos romanos (PAULETTI, 2003). É importante também ressaltar as coberturas retráteis realizadas pelos romanos para proteção do sol sobre pátios internos e teatros, chamadas de *velaria*, as quais segundo Otto *et al.*, (1972), eram construídas e operadas pelos marinheiros (Figura 2.1-1).

Figura 2.1-1– Tenda Negra do oriente Médio, Velaria, Chapiteau



Fonte: KOCK, 2004, p.23; JOTA; PORTO, 2003, p.5; FOSTER; MOLLAERT, 2004, p.26.

Entretanto, essa forma de construção desenvolveu-se pouco desde os romanos até o final do século XVIII, sendo utilizadas nas culturas urbanas como coberturas temporárias ou móveis, para acomodação das campanhas militares, festas e eventos públicos. A ausência de desenvolvimento dessas superfícies de uma única curvatura pode ser explicada pela instabilidade dessas ao vento e limitação da força dos tecidos e das conexões (FOSTER, 1994).

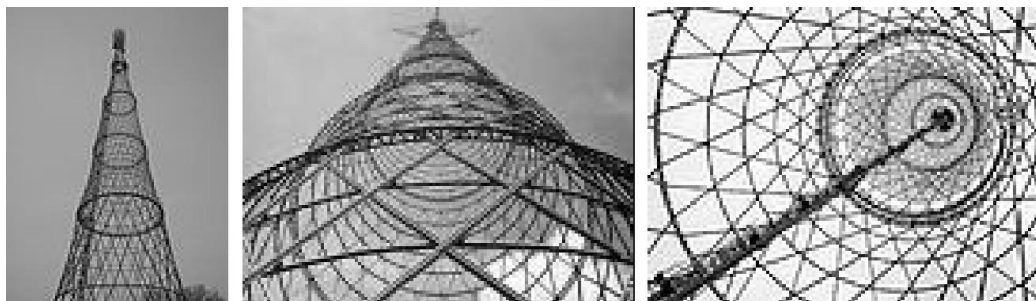
Segundo Baier (2010), os primeiros tecidos usados nas construções têxteis como tendas, foram feitos de fios de lã (ovelha, cabra) e fibras como linho e o cânhamo. O algodão só começou a ser cultivado na Ásia e no sul da América no final do século XVI, possibilitando seu uso para vestuário e construções. Contudo, a mudança da produção artesanal dos tecidos para a produção industrial só aconteceu bem após a invenção do fuso e do tear, ou seja, no final do século XVIII, com a invenção da máquina de fiar e do tear mecânico, revolucionando a produção têxtil.

Com a industrialização, o desenvolvimento da tecelagem e a expansão das ferrovias, a partir de 1860, essas coberturas (em lona de linho ou cânhamo)

passaram a ser muito utilizadas nos circos modernos itinerantes nos Estados Unidos e Europa, conforme Figura 2.1-1, (FOSTER, 1994 *apud* PAULETTI, 2003).

Entretanto, as ideias e as aplicações modernas das coberturas em dupla curvatura em direções opostas, com pequena tensão, podem ser observadas apenas no final do século XIX, com os trabalhos do engenheiro Vladimir Shukhov (1853-1939). Segundo Linkwitz (1999), as superfícies espaciais, compostas por redes flexíveis metálicas, propostas por Shukhov, foram geradas pelo deslocamento de linhas retas paralelas e reversas no espaço, direcionadas por curvas diretrizes (Figura 2.1-2).

Figura 2.1-2 – Shukhov radio tower - Vistas: externa, interna, Rússia (1896)

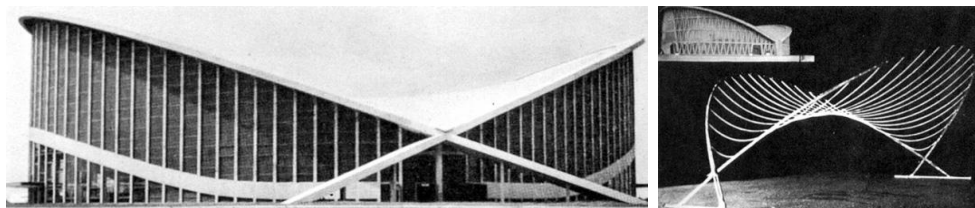


Fonte: SHUKHOV_TOWER..., 2010.

Esse conceito básico, que permite elaborar formas livres, foi também muito utilizado pelo arquiteto Antoni Gaudí (1852-1926) na cobertura da igreja Sagrada Família em Barcelona, e pelo arquiteto/engenheiro Félix Candela (1910-1997) ao elaborar cascas hiperbólicas em concreto. As formas livres em concreto ou madeira podem ser definidas de forma independente do fluxo de forças que atuam sobre elas, entretanto, sob o peso próprio e cargas externas estão submetidas à flexão e necessitam de certa espessura e ou reforço em aço (LINKWITZ, 1999).

Em 1952, registrou-se a primeira experiência significativa de coberturas em rede de cabos para grandes vãos com o projeto da Arena de *Raleigh*, Carolina do Norte, EUA, desenvolvido pelo arquiteto Matthew Nowicki e os engenheiros Fred Severud e William H. Deitrick (OTTO; TROSTEL, 1969). Nessa cobertura introduziu-se o princípio de retesamento de superfícies de dupla curvatura em direções opostas, possibilitando grande estabilidade frente a carregamentos aerodinâmicos, despertando a atenção de arquitetos e engenheiros do mundo todo (Figura 2.1-3).

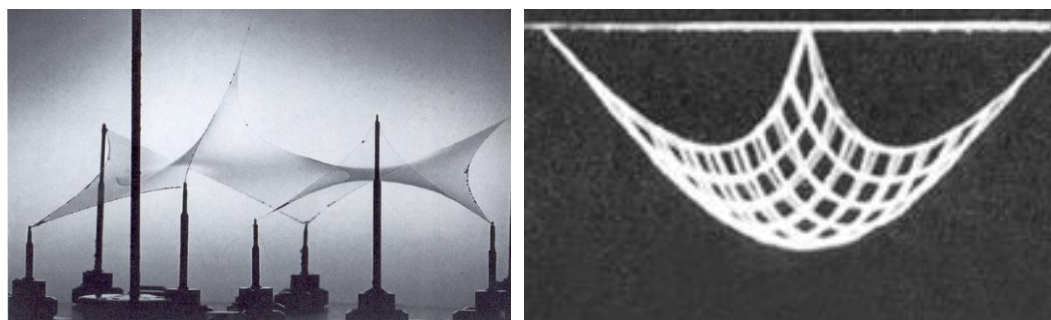
Figura 2.1-3 – Vista externa e modelo da Arena de Raleigh, Carolina do Norte, 1952



Fonte: OTTO; TROSTEL, 1969, p.56, p.21.

Entretanto, segundo Addis (1994), até a década de 50, essas estruturas estavam limitadas às formas catenárias ou aos paraboloides hiperbólicos, pois não havia um procedimento de projeto que possibilitasse o desenvolvimento de estruturas baseadas em formas de equilíbrio. Estas seguem o caminho das forças que nela atuam, como por exemplo, a rede de cabos sob pré-tensão ou suspensa livremente por seus pontos de ancoragem e o filme de sabão (superfície mínima), (Figura 2.1-4). As formas de equilíbrio são definidas por equações diferenciais, e só puderam ser reveladas inicialmente, com a ajuda de modelos físicos, cujas pesquisas tiveram como precursor o arquiteto Prof. Dr. Frei Otto.

Figura 2.1-4 – Formas de equilíbrio



Filme de sabão e rede de cabos suspensa livremente por seus pontos de ancoragem

Fonte: OTTO, 1990, p.7.7; Adaptado de OTTO; TROSTEL, 1969, p.29.

Segundo Rodríguez (2005), Prof. Dr. Frei Otto inaugurou um novo campo de conhecimento com sua tese *Cubiertas Colgantes (Das Hängende Dach)*, em 1958, baseada na teoria dos cabos e pontes suspensas, motivada pelas propriedades da catenária e dos sistemas estruturais de malhas espaciais e membranas retesadas.

Posteriormente, na direção do *Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK)*, *University of Stuttgart* (1964-1992), investigou as formas estruturais, com modelos experimentais em escala reduzida. Esses estudos foram realizados por equipes interdisciplinares de arquitetos, engenheiros e biólogos e basearam-se no princípio de leveza. Foram desenvolvidos a partir da observação da fisiologia dos animais, das formas e das estruturas da natureza, buscando identificar

o consumo de matéria e de energia desses sistemas (LEWIS, 2003). Dentre suas obras destacam-se as coberturas do Complexo Olímpico, Munich (1972), que marca o início da modernidade da engenharia das estruturas retesadas (DREW, 1979 *apud* PAULETTI, 2003), Figura 2.1-5.

Figura 2.1-5 – Estádio Olímpico, Munich (1972)



(foto da autora)

Esses estudos possibilitaram a compreensão qualitativa do comportamento dessas estruturas e a elaboração de modelos reais. Permitiram também a criação de modelos matemáticos e computacionais para simular a geometria e o comportamento não linear das curvas tridimensionais, pelos engenheiros no final dos anos 60. De acordo com Addis (1994) *apud* Nunes (2008), as tensoestruturas provocaram uma revolução na cultura construtiva nos anos 60: impulsionaram o desenvolvimento da engenharia e de novos materiais, motivados por novos métodos de projetar desenvolvidos por arquitetos e engenheiros.

As pesquisas do Prof. Dr. Frei Otto, bem como o desenvolvimento das tecnologias dos balões de ar quente na França no final do século XVIII, e o *1st International Colloquium on Pneumatic Structures* em 1967 estimularam o desenvolvimento das estruturas pneumáticas, tendo seu apogeu na Expo'70, em Osaka.

O desenvolvimento da tecnologia dos materiais pode ser observado apenas na segunda metade do século XX, sendo possível a substituição dos materiais de fácil deterioração (peles e fibras naturais) por fibras sintéticas ou filmes de grande desempenho, durabilidade, confiabilidade e segurança ao fogo (KOCH, 2004).

Segundo Baier (2010), os tecidos feitos com fibras naturais, comparados com os produtos sintéticos atuais, absorviam mais umidade, eram pesados, inflamáveis, susceptíveis a mofo, apodrecimento, sujeira, mesmo usando repelentes e

retardantes de fogo, o que comprometia sua vida útil. Assim, com a descoberta das fibras sintéticas (Nylon em 1938 e Poliéster em 1947) e com a demanda à durabilidade, a resistência mecânica e a padronização das propriedades dos tecidos, houve redução do uso de fibras naturais na construção. Além disso, o desenvolvimento progressivo de outras fibras sintéticas e produtos plásticos influenciou a mudança da pequena escala de manufatura para a grande produção industrial mundial, e a melhoria da qualidade e das características dos materiais utilizados nas construções em membranas atuais.

Destacam-se os tecidos estruturais de poliéster cobertos por PVC, usados desde os anos 50, e os de fibra de vidro coberto por teflon (PTFE) usados a partir dos anos 70 (HUNTINGTON, 2003), bem como o filme translúcido EFFE utilizado a partir dos anos 80.

Esses materiais de alta qualidade, com peso próprio e rigidez quase desprezível são trabalhados por uma lógica estrutural que os faz pouco deformáveis, quando sob a ação de cargas, pois utiliza conceitos como a dupla curvatura e a pré-tensão da superfície, de forma que sob a ação de cargas há apenas a diminuição da tensão inicial (RODRÍGUEZ, 2005).

A associação desses tecidos estruturais às estruturas em aço, em sua maioria, tem possibilitado sua aplicação em estruturas permanentes de grande porte, capazes de vencer grandes vãos com baixo peso, bem como em estruturas retráteis e temporárias. Favorecem essa aproximação: a modulação, a padronização e pré-fabricação da estrutura em aço e o desenvolvimento de conexões de alta resistência que facilitam o ajuste, a articulação e montagem dos componentes.

As estruturas retráteis possibilitam a alteração da sua forma no ambiente em prazos relativamente curtos, além da alternativa de uso do espaço aberto e fechado. Essas estão associadas aos mecanismos de dobra ou deslizamento.

As coberturas temporárias podem ser desmontadas e transportadas em pequenos volumes como as tendas nômades. Permitem a mobilidade e a adaptação a diferentes locais e atividades, sendo uma intervenção reversível no local.

Essas estruturas de espessura mínima são mais adequadas como coberturas abertas permitindo o fluxo e a velocidade do ar (BAIER, 2010) ou associadas a edificações convencionais, de maneira que a membrana possa atuar como um filtro passivo do ambiente, criando um micro clima agradável e integrando diferentes espaços (Figura 2.1-6).

Figura 2.1-6 – Fröttmaning station – Munich, 2004



Arquitetos: Bohn Architekten, Munich (Foto da autora)

Observam-se também estruturas de membranas em multicamadas preenchidas com ar ou material isolante, e filmes translúcidos em ETFE preenchidos com ar utilizados como, por exemplo, o revestimento da fachada e da cobertura do estádio Allianz Arena (Figura 2.1-7). Essas possibilitam maior controle das condições térmicas dentro do envelope construído e reduzem os gastos ventilação mecânica (aquecimento ou resfriamento). Entretanto, há redução da translucidez diurna nas membranas em multicamadas (CHILTON *et al.*, 2004).

Figura 2.1-7 – Allianz Arena, Munich, 2005



Arquitetos: Herzog& De Meuron, Basel; Eng.: Arup GmbH, Berlin and Sailer Stepan und Partner, Munich; (foto da autora).

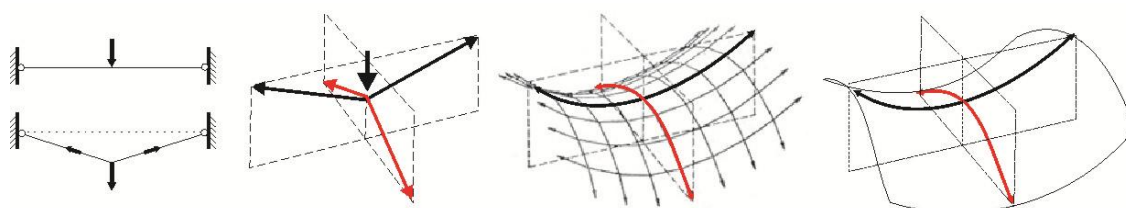
2.2 SISTEMA CONSTRUTIVO

A membrana é uma superfície bidimensional – duas dimensões significativas, sendo a terceira (espessura) muito reduzida – com peso mínimo, ou seja, é uma superfície flexível cuja estabilidade tridimensional e a capacidade de resistir às cargas resulta da sua geometria (dupla curvatura) e do estado de retesamento.

Essas estruturas apresentam comportamento similar a redes de cabos: adotam formas que seguem as forças que nela atuam. São formas ativas ou de equilíbrio, e suportam as cargas desenvolvendo esforços na forma de tensões de tração no seu próprio plano (Figura 2.2-1).

Essas superfícies trabalham de forma conjunta e contínua com o sistema suporte. Esse compreende os elementos flexíveis trabalhando a tração (cabos), estruturas a flexo-compressão (mastros, vigas, arcos, pórticos), e ou tração e compressão (*tensegrity*, treliças).

Figura 2.2-1 – Rede de cabos/ membranas (dupla curvatura em direções opostas): formas de equilíbrio



Fonte: Adaptado de ROLAND, 1973, p.15.

No dizer de Knippers *et al.* (2011), a geometria da superfície da membrana é definida por suas curvaturas principais e a curvatura Gaussiana (Figura 2.2-2). As curvaturas principais descrevem a magnitude e direção das curvaturas, mínima e máxima num ponto da superfície. Essas resultam da interseção de planos perpendiculares entre si com o plano tangente da superfície curva no ponto considerado. As curvaturas principais (k_1 e k_2) correspondem ao inverso dos raios da curvatura ($k_1=1/r_1$). A direção da curvatura é indicada por valores, valor positivo indica da curva na direção do observador (convexa), e negativo, curva na direção contrária ao observador (côncava). Assim, a curvatura Gaussiana é a medida da curvatura da superfície, ou seja, o produto das principais curvaturas ($K = k_1 \cdot k_2 = 1/r_1 \cdot 1/r_2$).

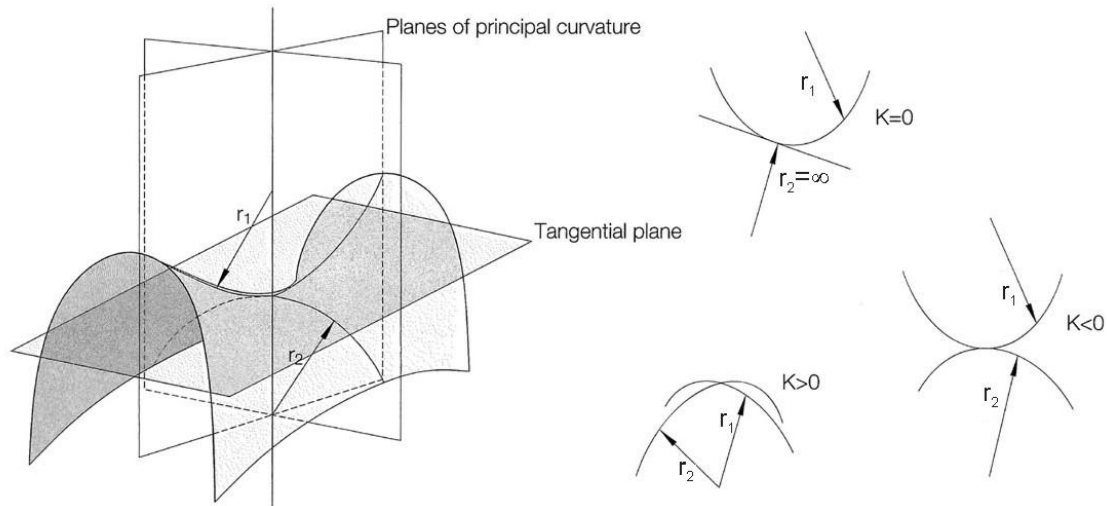
Quando essas curvaturas são orientadas na mesma direção, isto é, quando os centros dessas curvaturas estão no mesmo lado da superfície, são chamadas sinclásticas e a curvatura Gaussiana é positiva ($K>0$). São estruturas pneumáticas estabilizadas com a aplicação de pressão pneumática ou hidráulica em volume.

Quando as curvaturas são orientadas em direções opostas entre si e geram o efeito de empenamento da superfície são denominadas anticlásticas, e a curvatura Gaussiana é negativa ($K<0$). Essas são estabilizadas com a aplicação de pré-tensão no plano da membrana, nas suas extremidades (bordas). Quando os raios dessas curvaturas principais são iguais, a tensão na superfície é uniforme (constante em

todas as direções), conformando uma superfície mínima (mínima área de superfície), como as obtidas com o filme de sabão.

Nas superfícies de uma única curvatura, como cones e cilindros, um dos raios da curvatura tende ao infinito. Então, a curvatura gaussiana é zero.

Figura 2.2-2– Principais curvaturas: r_1 e r_2 e curvatura Gaussiana de superfícies curvas (K)

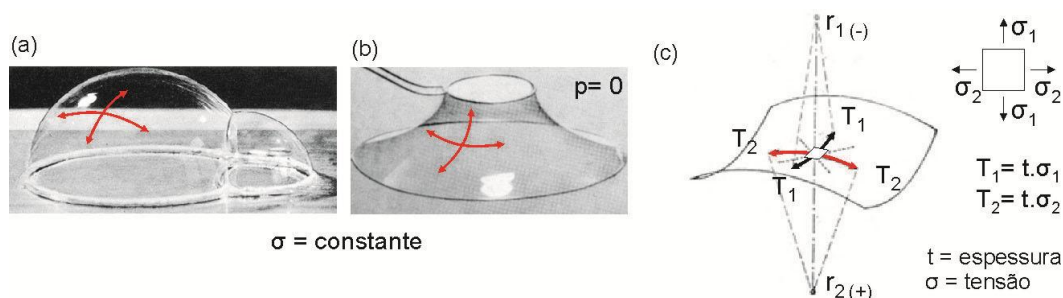


Fonte: adaptado de KNIPPERS *et al.*, 2011, p.136.

O trabalho realizado de forma independente por Young (1805) e Laplace (1806), também considerado para expressar o equilíbrio das membranas, demonstra que a diferença da pressão entre o interior e o exterior da superfície fluida curva (p) é diretamente proporcional à tensão na superfície (σ) e inversamente proporcional aos raios da superfície (r_1 ; r_2) que acontecem em planos perpendiculares entre si, [$p = \sigma (1/r_1 + 1/r_2)$]. No caso do filme de sabão (membranas idealizadas com superfície anticlástica ou plana), a tensão (σ) é constante e a pressão (p) é zero, logo a equação é reduzida ($1/r_1 + 1/r_2 = 0$), (LEWIS, 2003). Pode-se dizer que o campo de tensões da membrana é semelhante ao Estado plano de tensões, mas sobre a superfície curva; a membrana equilibra as cargas mediante a dupla curvatura da superfície, conforme a relação entre as forças de tração (T_1 ; T_2) nas direções principais (direções ortogonais entre si nas quais os raios da curvatura são extremos) e os raios (r_1 ; r_2) das curvaturas principais, ($T_1/r_1 + T_2/r_2 = 0$), (PAULETTI, 2007), conforme (Figura 2.2-3).

Logo, as superfícies que apresentam pequenas curvaturas (grandes raios), necessitam de grandes forças de pré-tensão para estabilizá-las, e as superfícies que apresentam maiores curvaturas (menores raios) são estruturas mais leves. Portanto, o raio da curvatura altera a rigidez da superfície e pode contribuir para minimizar sua deflexão (mudança de forma).

Figura 2.2-3 – Bolhas (a) e filme (b) de sabão; (c) Comportamento das membranas anticlásticas



Fonte: (a,b) Adaptado de OTTO; TROSTEL, 1967, p.13; OTTO; TROSTEL, 1969, p.70; (c) Adaptado de ROLAND, 1973, p.15; e adaptado de PAULETTI, 2007.

2.3 PRINCÍPIOS DO SISTEMA

Segundo Lewis (2003), as membranas têm como referência formas estruturais que seguem o princípio de leveza, ou seja, formas que apresentam a menor quantidade de material, grande estabilidade global e resistência.

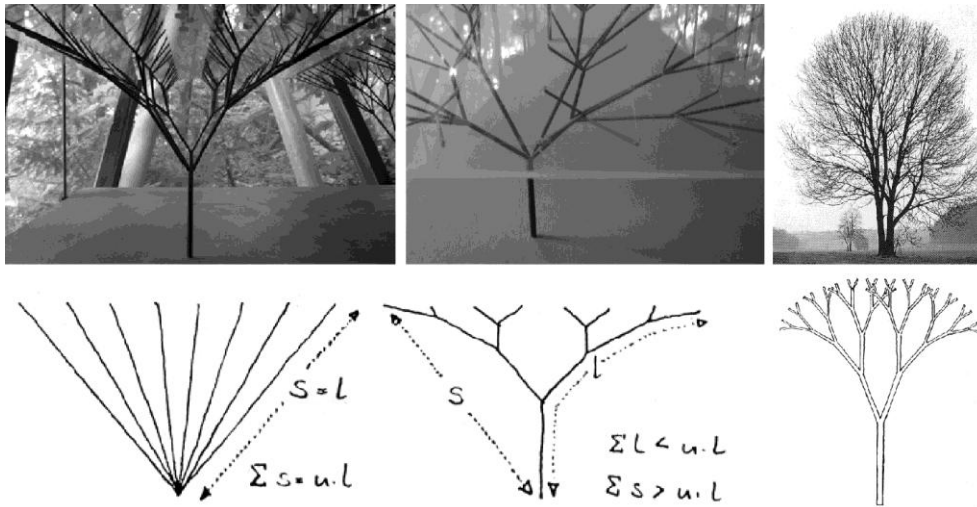
Então, para compreender o comportamento dessas estruturas é importante conhecer os princípios que norteiam esse sistema. Destacam-se os estudos realizados por Prof Dr Frei Otto juntamente com seu grupo de estudos, e os Buckminster Fuller. Ambos buscaram compreender como as estruturas da natureza maximizam sua estabilidade e resistência, e como esse conhecimento pode contribuir para o aprimoramento das estruturas.

Frei Otto – Princípio de leveza

O princípio de leveza, segundo Otto *et al.* (1997), está associado à capacidade de um objeto ou de uma estrutura suportar ou transmitir, relativamente, grandes forças com pouca massa ao longo de certa distância. Além disso, a massa de um objeto ou uma estrutura depende da forma, do material utilizado, do tipo de carga atuante, de como essa é aplicada e do arranjo estrutural. Assim, o conhecimento da relação entre massa, força e forma fundamenta as estruturas leves e possibilita compreender que a leveza raramente é acidental.

Esse princípio resulta de um processo de otimização das estruturas, ou seja, do aprimoramento da geometria dos componentes construtivos e da forma como se organizam, de modo a reduzir a própria massa e suportar as mais críticas combinações de cargas (Figura 2.3-1). Portanto, é considerado uma das bases da evolução dos objetos naturais e tecnológicos.

Figura 2.3-1 – Processo de otimização das estruturas: modelo físico, foto de árvore e desenhos



Fonte: OTTO et al., 1990, p.2.38, 2.40 (foto de árvore e desenhos); foto da autora (maquete do *Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design - ILEK, University of Stuttgart*).

Esse processo de aperfeiçoamento e seleção tem suas raízes na natureza, como pode ser observado nas conchas e nas árvores. Segundo D'Arcy Thomson (D'ARCY THOMSON, 1917 apud LEWIS, 2003), as conchas crescem de forma harmoniosa, sem alterar sua forma e de modo assimétrico. Esse crescimento se caracteriza por uma progressão geométrica, podendo ser descrita por um espiral logarítmico.

As árvores, segundo Mattheck (MATTHECK, 1990 apud LEWIS, 2003), são estruturas vivas altamente otimizadas. Caracterizadas por mínimo peso, apresentam resistência para sustentar todas as cargas relevantes, equilibrando-as com grandes movimentos. Além disso, compensam as mudanças de carregamento por crescimento adaptativo, e no caso da quebra de um galho, verifica-se que o processo de regeneração minimiza a área do corte da superfície. Estas características se referem à mínima área da superfície e a tensão constante na superfície e, também podem ser observadas nas superfícies nos filmes de sabão (Figura 2.2-3b). Tais superfícies, consideradas membranas idealizadas, adotam a configuração de mínima energia potencial que significa menor ação. Assim, como a energia potencial é mínima, apresentam configuração estável.

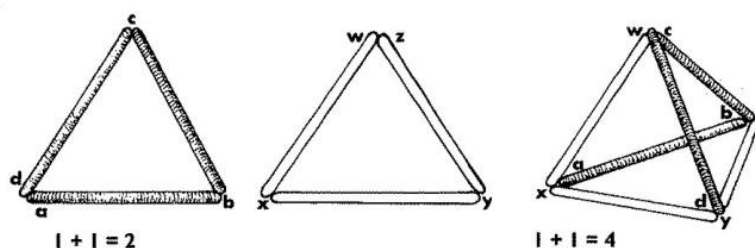
Buckminster Fuller - Sinergia

Buckminster Fuller investigou como organizar os componentes em busca da maior eficiência, ou seja, a relação entre a geometria e as forças que atuam nos componentes da estrutura e o comportamento conjunto desses. Observou que o

desempenho dos componentes (partes) quando trabalham em conjunto e simultaneamente supera o desempenho individual dos mesmos (partes ou sub partes).

Segundo Baldwin (1933), para B. Fuller essa ação imprevisível que resulta da associação de elementos (conjunto) amplia o comportamento das partes e pode ser definida como sinergia, sendo observada na geometria, na configuração dos componentes químicos e na natureza. Na química, tem-se como exemplo o desempenho da liga de cromo-níquel-aço, que exibe dez vezes a resistência à tração do seu componente mais fraco e seis vezes a resistência do seu componente mais forte, sendo muito maior que a soma das resistências dos seus componentes. Na geometria, tem-se como exemplo a forma como se conectam seis barras. Essas podem formar dois ou quatro triângulos, sendo respectivamente planos ou um volume (tetraedro) se as barras forem organizadas sinergicamente (Figura 2.3-2).

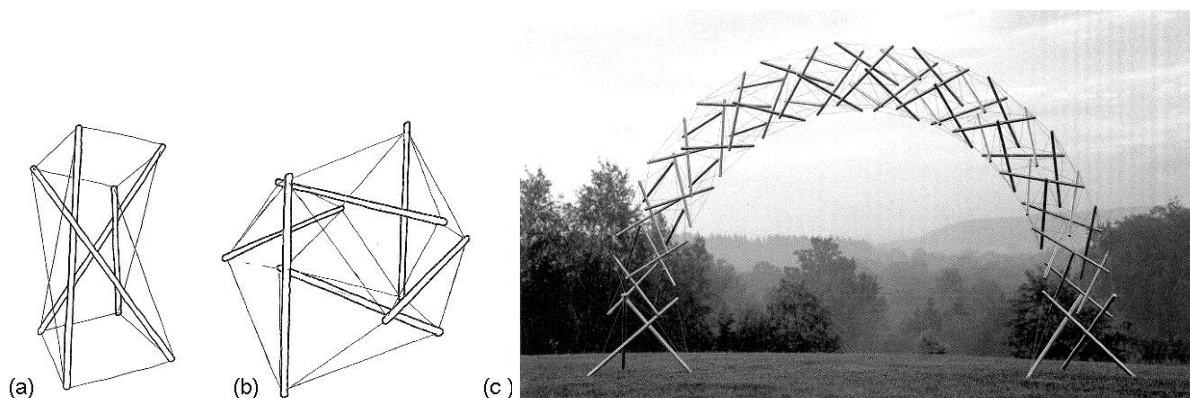
Figura 2.3-2 – Forma como se conectam seis barras: podem formar dois triângulos ou tetraedro



Fonte: BALDWIN, 1933, p.68.

Dentre suas invenções, destaca-se o sistema espacial composto por barras comprimidas descontínuas, inseridas numa rede contínua de cabos formando um volume estável no espaço, denominado *Tensegrity* (Figura 2.3-3). Nesse sistema busca-se organizar a estrutura de forma mais econômica, usando pequenos componentes e priorizando o uso de componentes trabalhando sob tração.

Figura 2.3-3 – Tensegrity realizado a partir de prisma (a) e de octaedro (b); (c) arco tensegrítico



Fonte: (a,b) REBELLO, 2000, p.136; (c) GOMES JÁUREGUI, 2007, p.118 (imagem cortesia Bob Burkhardt, Mascit y Kenneth Snelson).

2.4 ESTRATÉGIAS QUE BALIZAM O ÓTIMO DESEMPENHO DESSE SISTEMA

Após compreender os princípios que norteiam esse sistema, surge a pergunta: como alcançar a eficiência ou o ótimo desempenho desse sistema?

Para respondê-la, foi proposta a análise de edificações leves construídas, ou seja, de coberturas em rede de cabos e membranas, cascas em madeira e aço revestidas em membrana e vidro, e estrutura em aço revestida com telhas.

A escolha dessas edificações teve como objetivo avaliar qualitativamente o desempenho das membranas estruturais no contexto das estruturas leves.

A primeira etapa dessa investigação envolveu a observação *in loco*, o registro fotográfico, a realização dos croquis (sem escala) e a análise do conceito estrutural das edificações selecionadas, conforme apresentado neste trabalho. Em seguida, foram identificadas as estratégias ou regras que os arquitetos e engenheiros utilizam para que essas estruturas tenham um ótimo desempenho. São apresentadas, a seguir, as análises de algumas dessas edificações e as estratégias identificadas (itens 2.4.1 e 2.4.2).

2.4.1 OBSERVAÇÃO E ANÁLISE DE EDIFICAÇÕES CONSTRUIDAS

Cobertura do pátio interno - Museum of Hamburg History, Hamburg, 1989

Arquitetos: von Gerkan, Marg und Partner, Hamburg; Engenheiros: J. Schlaich, R. Bergermann

A cobertura do pátio interno desse Museu, composto por duas áreas retangulares com dimensões distintas (forma de L), é feita por duas cascas cilíndricas, cujo encontro apresenta a forma de um domo (dupla curvatura), conforme Figura 2.4-1.

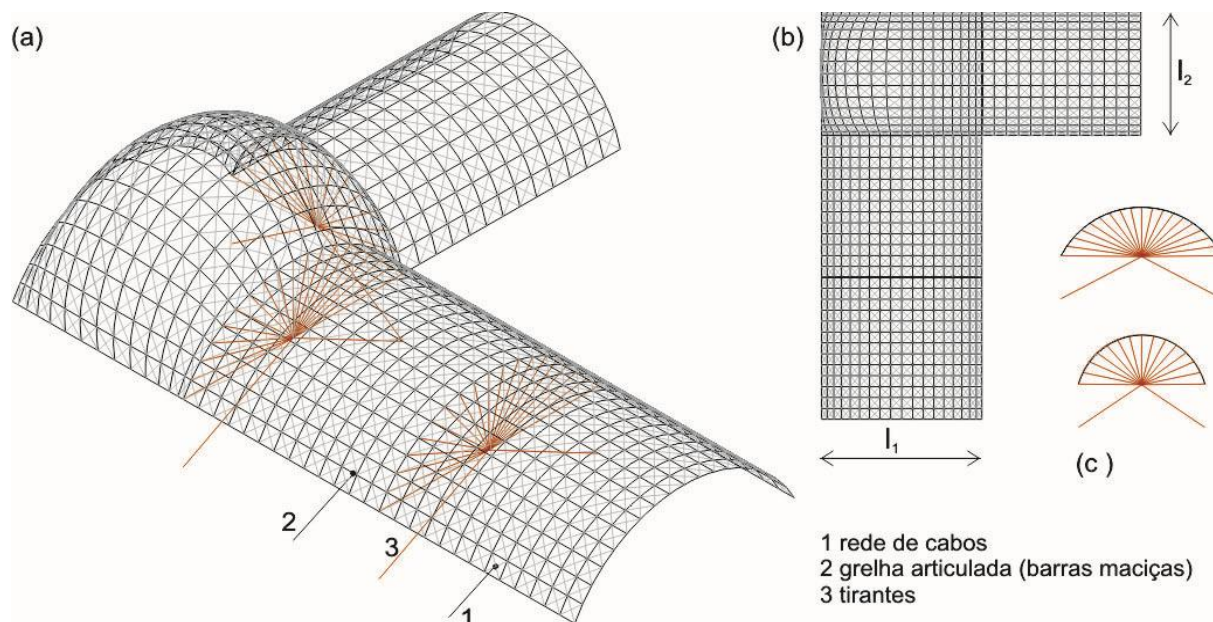
O sistema dessas superfícies curvas, conhecido como *grid shell*, é formado pela combinação de uma grelha plana articulada e a rede de cabos tensionada, sendo revestido por placas vidro laminada. A grelha é composta de barras¹ de aço (maciças) de comprimento similar com conexões que giram em torno do seu eixo. Essas conexões possibilitam a adaptação das barras à geometria da superfície, formando malhas quadradas (área cilíndrica) e em forma de losângulo (domo). As extremidades das barras conectam-se com cabos diagonais contínuos pré-tensionados, aumentando a rigidez da casca e evitando a flexão.

Além da combinação de duas malhas com comportamentos distintos – cabos de aço (tração) e barras (compressão) –, observou-se que os arcos cilíndricos

¹ Barras de aço (117x 60 x 40 mm), segundo Schlaich e Bergermann (2003).

apresentam tirantes (cabos radiais sob pré-tensão) para controlar a deformação do arco e eliminar a reação horizontal.

Figura 2.4-1– Cobertura do pátio interno - Museum of Hamburg History



(a, b) vistas 3D, planta sist. suporte, (c) tirantes, (d) vista interna; (e) tirantes, (f) apoio da cobertura (croquis e fotos da autora).

Exhibition hall, Hückelhoven, 1996, (2800m²)

Arquitetos: Prof Dr Bernd Baier, Leo Graff, Aachen; Engenheiros: Prof Dr Wilfried Führer, Prof Friedhelm Stein, Ulrich Kosch, Aachen.

A cobertura desse Salão de Exposições em Hückelhoven (base aprox. 42 x 96m) é composta de cinco selas (paraboloides hiperbólicos), sendo suportada por quatro grandes arcos triarticulados em madeira que ancoram em pilares de concreto, vencendo vãos de aproximadamente de 42m, conforme Figura 2.4-2.

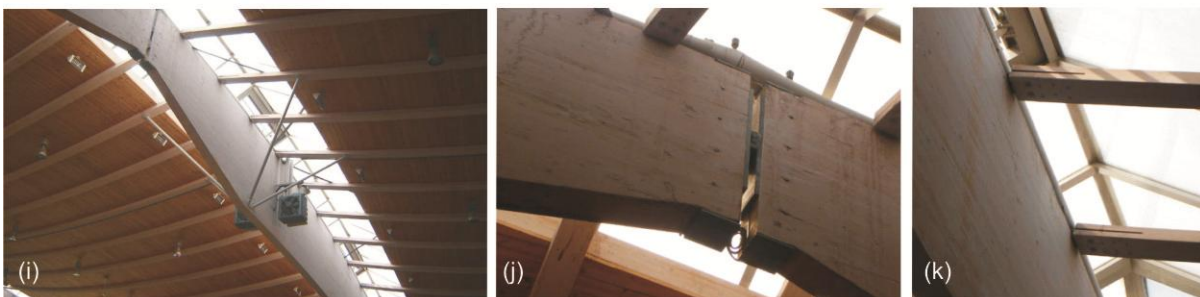
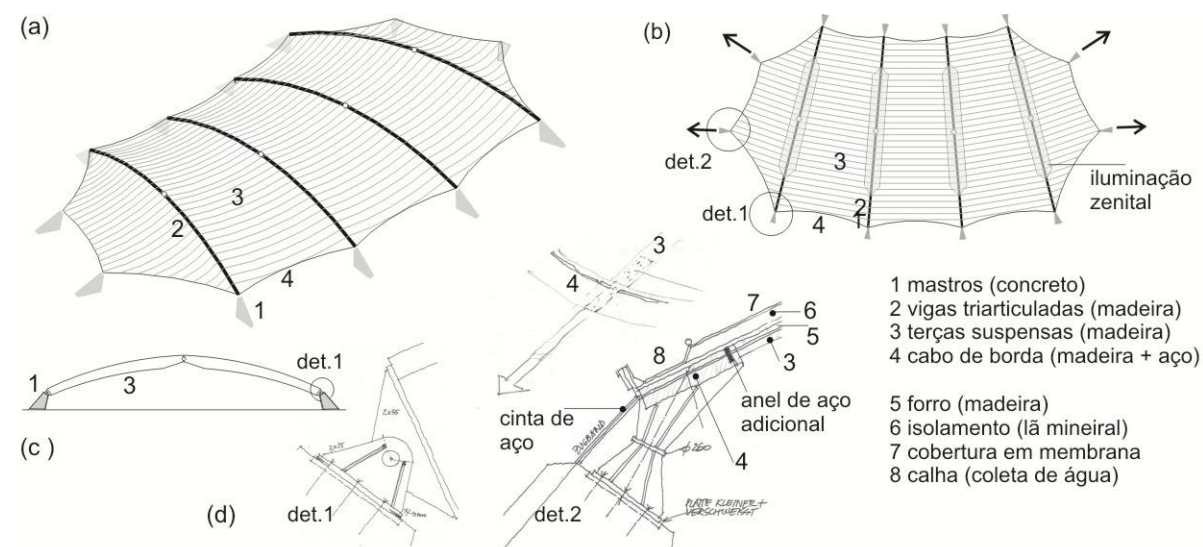
Nesses arcos triarticulados estão penduradas terças de madeira esbeltas (seção transversal: 20x10cm), que se curvam como cabos suspensos, trabalhando apenas sob a tração e definindo a geometria (dupla curvatura anticlástica) da superfície. Além disso, as extremidades desses arcos triarticulados são tracionadas por arcos de borda compostos de madeira e aço. Dessa forma, a casca de madeira de pequena espessura com dupla curvatura anticlástica e sob pré-tensão, apresenta comportamento de membrana, absorve apenas os esforços na forma de tensões de tração no seu próprio plano.

Como esse salão de exposições é um ambiente fechado, apresenta isolamento térmico acústico, bem como ventilação e iluminação zenital, objetivando o ótimo controle da temperatura interna. Portanto, as terças suportam o forro de madeira laminada (que conta com um filme de proteção à umidade) e o isolamento térmico e acústico (colchões de lã mineral), bem como a estrutura de iluminação e ventilação zenital. O revestimento externo da cobertura é feito com o material da membrana PVC/poliéster² (que foi soldado no local da obra).

Esse salão de exposições foi premiado em 1994 com o *International GLULAM Award* e em 1996 com o *Holzbaupreis Nordrhein-Westfalen*.

² PVC/poliéster – material da membrana composto de fios de poliéster com cobertura em PVC, ver item 2.5.2.

Figura 2.4-2– Exhibition hall, Hückelhoven



(a, b, c) vista 3D, planta e seção vertical do sist. suporte; (d- det1, h) ancoragem do arco treliçado; (d- det2, f) pontos de tração do cabo de borda; (e) vista lateral externa; (g) vista interna; (i) iluminação zenital sobre anel triarticulado, (j, k) anel triarticulado e terças; (e, f, i, j, k) fotos da autora; (g, h) fotos de Friedhelm Thomas, Krefeld (*Informationsdienst Hols*, 1996); (a, b, c) croquis da autora; (d1 e d2) detalhes realizados pelo Prof Dr Baier.

RheinEnergie Stadion, Köln, 2003

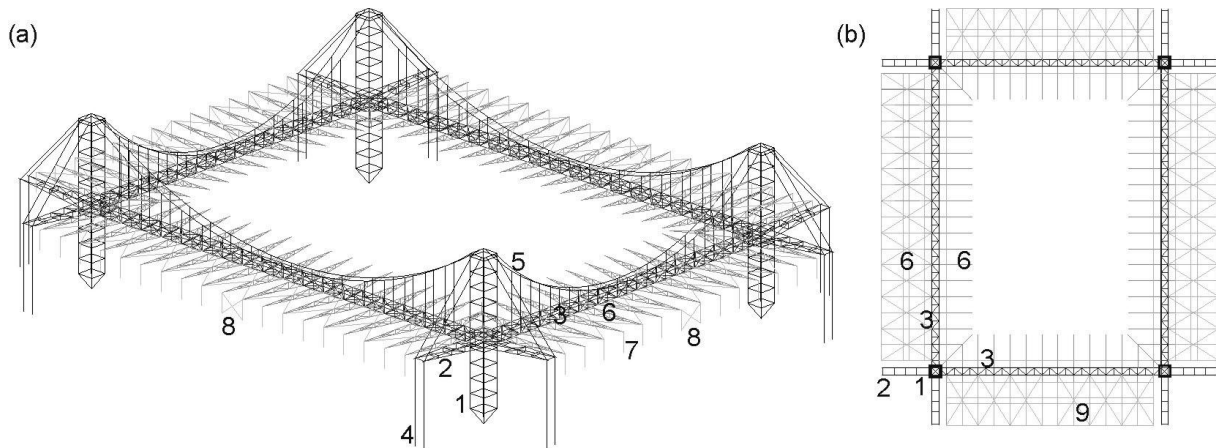
Arquitetos: von Gerkan, Marg und Partner; Engenheiros: Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart

O estádio em Köln apresenta base retangular. As arquibancadas em concreto estão posicionadas em cada lado desse polígono e cobertas por telhas metálicas e translúcidas (Figura 2.4-3, Figura 2.4-4).

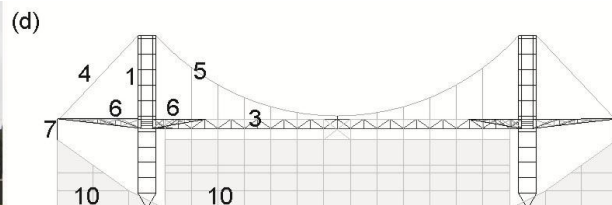
O arranjo do sistema suporte (em aço) da cobertura caracteriza-se pela combinação entre sistemas: pórticos e estrutura de ponte suspensa. Os mastros (com seção transversal vazada, formada pelo arranjo de perfis tubulares) posicionados nos cantos dos polígonos, vinculam-se a grandes vigas treliçadas (composta de perfis I), formando quatro grandes pórticos. Essas grandes vigas treliçadas são também suspensas por cabos como uma ponte, minimizando a flexão. Além disso, a seção transversal quadrangular confere à viga a estabilidade a torção.

Os mastros são rotulados e contam com a presença de braços treliçados, que são atirantados por cabos ao topo do mastro e na base, diminuindo o comprimento de flambagem e aumentando a estabilidade do conjunto estrutural.

Figura 2.4-3 – RheinEnergie Stadium, Köln



1 mastros treliçados rotulados 2 braço treliçado 3 viga treliçada 4 estais dos mastros 5 cabos
6 viga treliçada (tesouras) 7 tirantes (perfis tubulares) 8 contraventamento (plano vertical)
9 contraventamento (plano horizontal) 10 arquibancadas em concreto



(a) vista 3D, (b) planta e seção vertical sist. suporte; (c) vista frontal; (croquis e foto da autora).

Nessa grande viga treliçada suspensa, apoiam-se vigas treliçadas em balanço (tesouras composta por perfis I e cabos) que suportam a cobertura (telhas). Essa grande viga treliçada também suporta a calha de coleta de água/ neve das coberturas.

Para resistir à sucção do vento, as extremidades das vigas em balanço que suportam as telhas metálicas, foram conectadas à estrutura da arquibancada em concreto por perfis tubulares esbeltos, possibilitando também a conexão entre a estrutura em aço e a estrutura em concreto da arquibancada. Essas vigas em balanço são contraventadas. Há também contraventamento no plano vertical, entre os perfis tubulares esbeltos, na parte central das faces externas do estádio.

Figura 2.4-4 – RheinEnergie Stadium, Köln



(a) vista interna; (b) cobertura arquibancadas; (c) mastro; (d,e) detalhe de ancoragem dos perfis tubulares esbeltos da cobertura; (f, g) ancoragens dos cabos e mastro; (fotos da autora).

Imtech Arena (Volksparkstadion), Hamburg, 1998

Arquitetos; Mos Architekten; Engenheiros: SBP Engineers

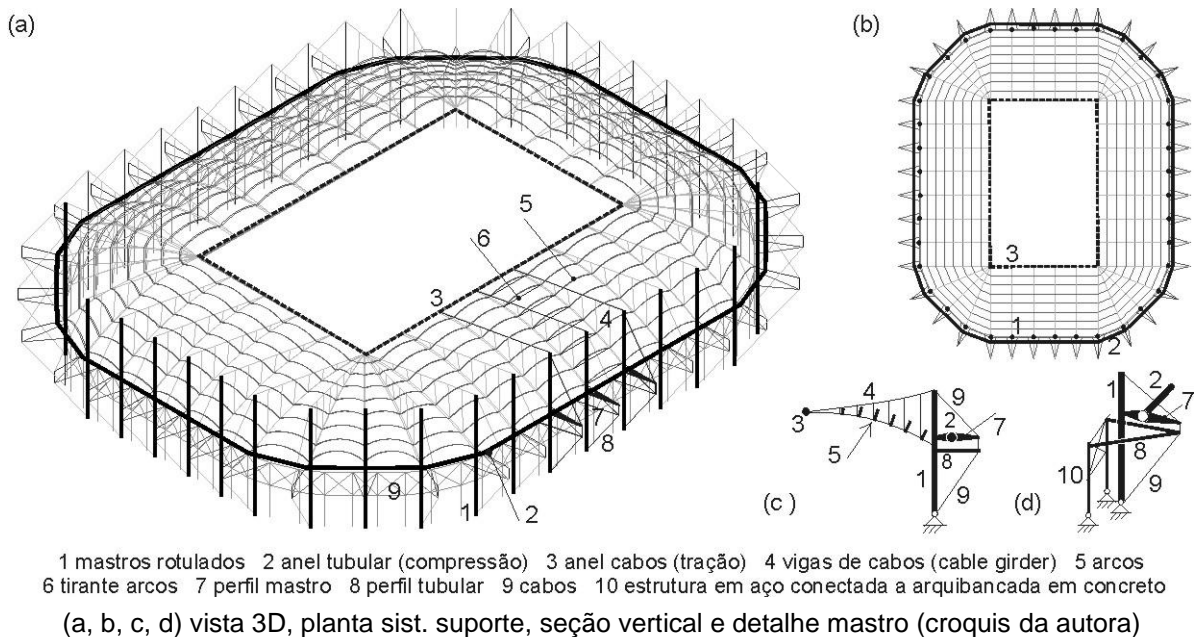
Esse estádio em Hamburg apresenta base poligonal, composta de 40 segmentos. As arquibancadas são em concreto e a cobertura em membrana (PVC/poliéster) é suportada por perfis e cabos de aço (Figura 2.4-5, Figura 2.4-6).

O sistema suporte da cobertura é composto de *cable girders*³, aqui tratado como vigas de cabo, posicionadas perpendicularmente às faces desse polígono, vinculadas ao anel interno de tração e aos mastros tubulares (conectados ao anel externo de compressão), apresentando comportamento similar à roda de bicicleta.

Os cabos inferiores dessas vigas de cabos suportam arcos tubulares. Esses arcos contam com tirantes, permitindo eliminar a reação horizontal. Além disso, os arcos tubulares e os cabos inferiores suportam os módulos em forma de sela da cobertura. As vigas de cabo dividem a cobertura em 40 módulos. Cada módulo é subdividido em oito módulos em forma de selas, totalizando 320 selas.

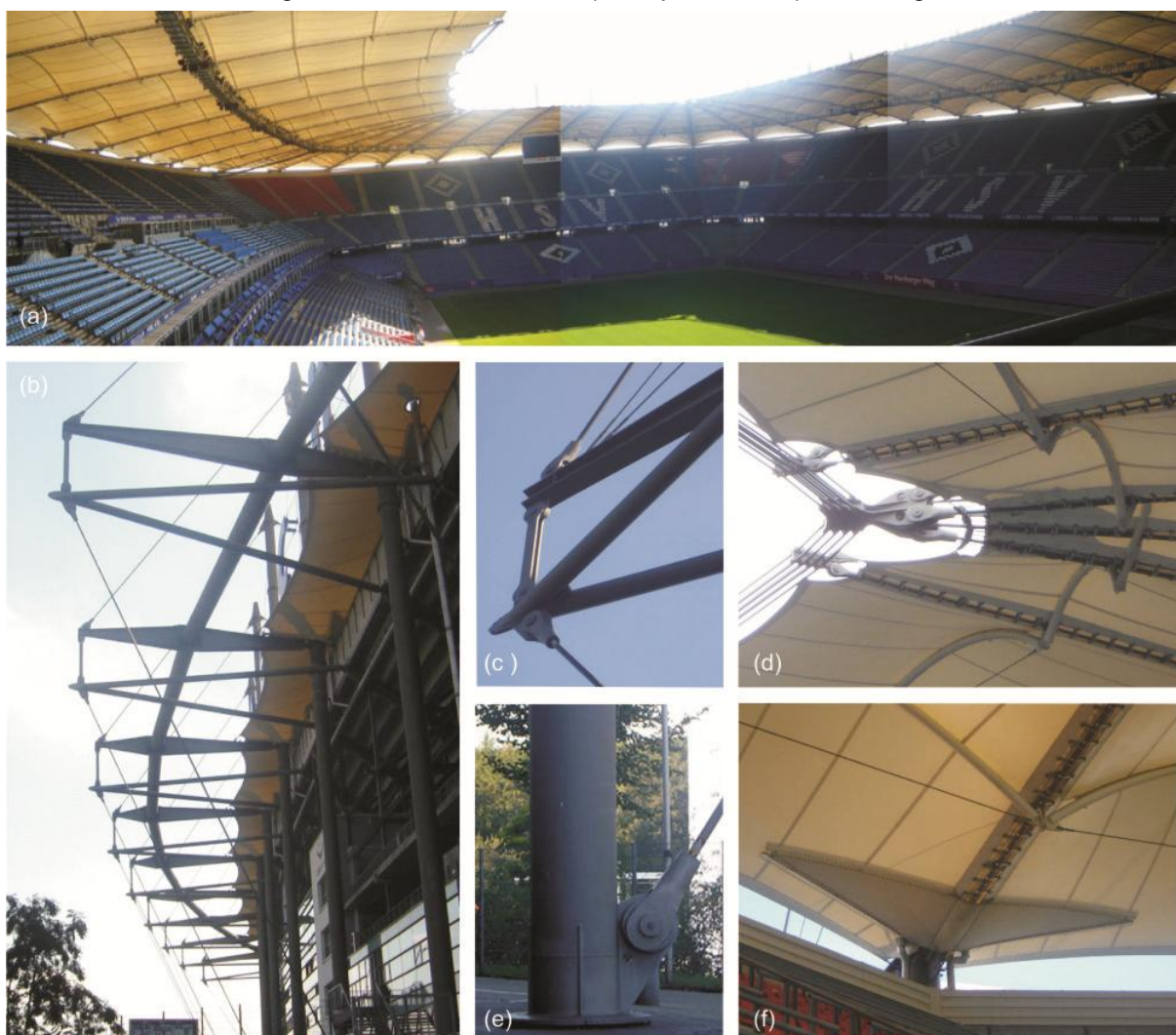
Os mastros são rotulados e apresentam travamento lateral (perfil com seção transversal variável atirantado por cabos ao topo e à base do mastro) diminuindo o seu comprimento de flambagem e aumentando sua estabilidade. Esses cabos também se vinculam a dois braços tubulares, que se conectam à estrutura em aço (contraventada) que envolve a arquibancada em concreto.

Figura 2.4-5 – *Imtech Arena (Volksparkstadion), Hamburg*



³ Cable girder são vigas compostas de cabos radiais superiores e inferiores curvos, conectados por cabos verticais sob pré-tensão. Todos os componentes trabalham sob a tração (OTTO; TROSTEL, 1969).

Figura 2.4-6 – Imtech Arena (Volksparkstadion), Hamburg



(a) vista interna; (b) vista externa (c) detalhe barras mastro, (e) base mastro; (d,f) união entre superfícies e arcos com tirantes; (fotos da autora).

Cobertura retrátil, Castelo de Kufstein, 2006 (2000m²)

Arquiteto: N. Kugel; Engenheiro: A. Rein

A cobertura retrátil em membrana (PTFE/PTFE⁴) situada no pátio do Castelo medieval de Kufstein é suportada por mastros tubulares e um sistema suporte espacial (em aço). Apresenta forma poligonal, aproximadamente circular, composta de 15 segmentos iguais (Figura 2.4-7, Figura 2.4-8).

O sistema suporte espacial é composto de vigas de cabo radiais (*cabre girders*) associados aos anéis (em aço), sendo o anel interno de tração e o externo de compressão apresentando comportamento similar à roda de bicicleta. Os cabos

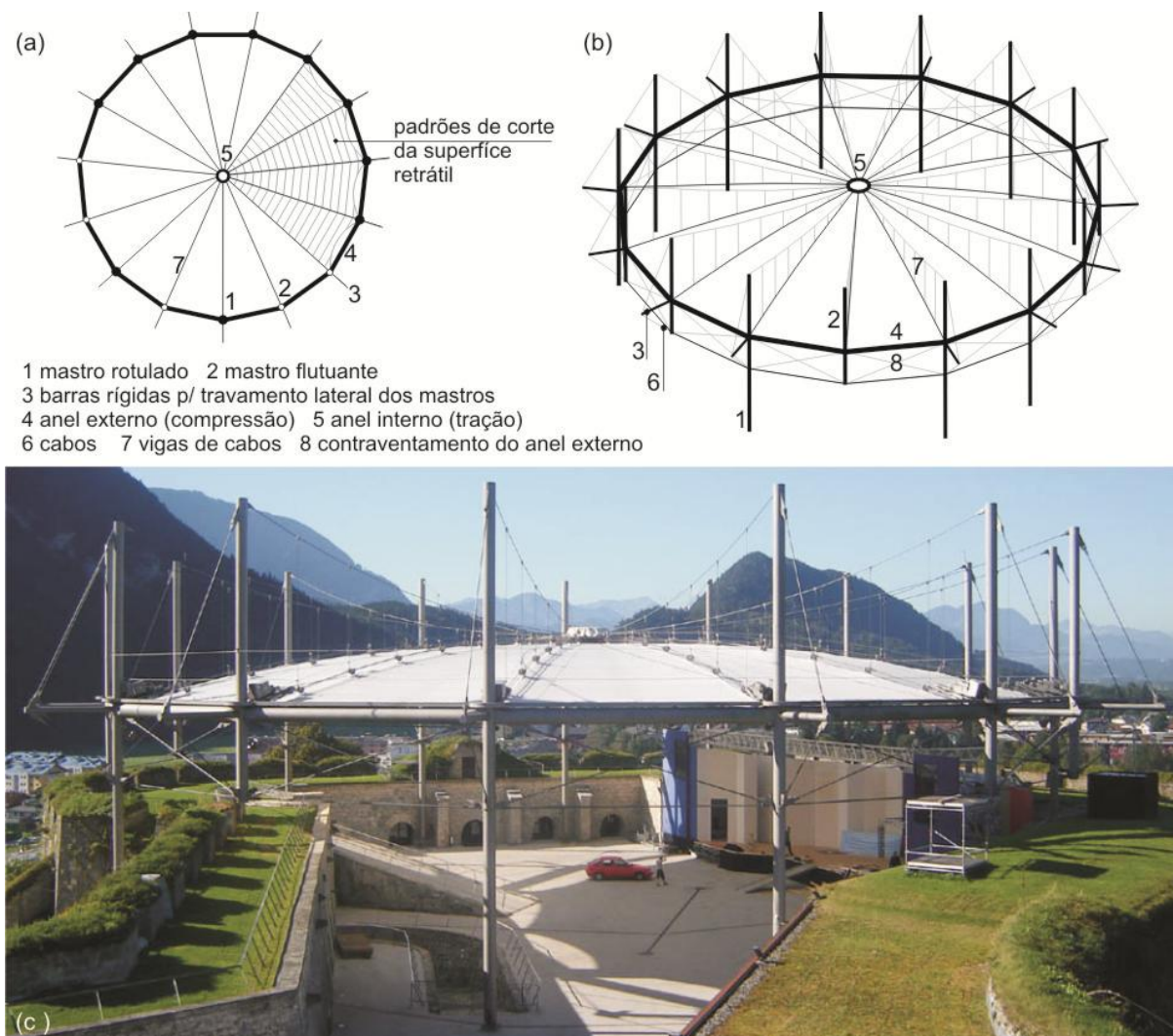
4 PTFE/PTFE – material da membrana composto de fios de PTFE com cobertura em PTFE, ver item 2.5.2

superiores das vigas de cabo vinculam-se ao topo dos mastros, e os inferiores no encontro entre o anel externo de compressão e os mastros.

Esse sistema é suportado por dez mastros rotulados e cinco mastros flutuantes. Os flutuantes derivam de restrições de ancoragem, já que essa cobertura está situada em uma área de preservação histórica. Assim, para garantir a rigidez e estabilidade global do conjunto estrutural, os módulos poligonais estão contraventados e contam também com anel de tração (externo) formado por cabos. Os mastros contam com travamentos laterais, diminuindo seu comprimento de flambagem e aumentando sua estabilidade.

A cobertura é formada por módulos radiais em forma de sela com suave curvatura. A cobertura retrátil apresenta recolhimento central, realizado pelo deslizamento dos tratores de força no cabo inferior duplo da viga de cabos.

Figura 2.4-7 – Anfiteatro Cobertura retrátil, Castelo de Kufstein



(a, b) vista 3D e planta sistema suporte; (c) vista externa; (croquis e foto da autora).

Figura 2.4-8 – Anfiteatro Cobertura retrátil, Castelo de Kufstein



(a) anel de compressão com contraventamento; (b, d) ancoragem membrana retrátil; (c) mastros com barras rígidas conectadas por estais aos mastros; (e, f) detalhe mastro rotulado com tubulação interna para recolhimento de água de chuva; (g) anel de compressão; (fotos da autora).

New Waldstadion, Frankfurt/ Main, 2005

Arquitetos: von Gerkan, Marg & Partner; Engenheiros: Schlaich Bergermann & Partner, Stuttgart.

Esse estádio em Frankfurt/Main apresenta base poligonal, composta de 44 segmentos, e duas coberturas em membrana independentes (interna e externa) cujo sistema suporte apoia-se na estrutura em concreto da arquibancada (Figura 2.4-9, Figura 2.4-10). A cobertura interna (PVC/poliéster) é retrátil, e a externa (PTFE/fibra de vidro⁵) é fixa e composta de 264 módulos em forma de sela. A transição entre as coberturas é coberta com placas planas translúcidas. Nessa transição situam a calha para coleta de água de chuva/ neve, e os equipamentos (pressão hidráulica) de abertura e fechamento da cobertura interna.

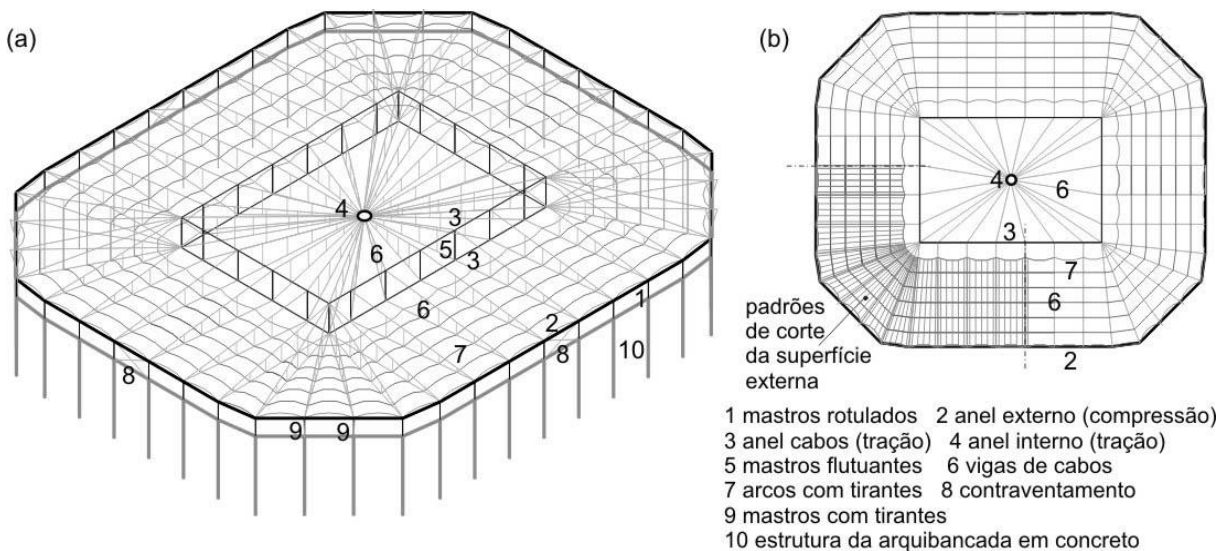
O sistema suporte da cobertura em aço é composto por mastros e um sistema suporte espacial. Este apresenta perfis tubulares esbeltos descontínuos (sob compressão) inseridos numa malha de cabos contínuos (sob tração), seguindo o princípio *Tensegrity*. Os cabos vinculam-se aos anéis interno (tracionado) e externo (sob compressão). O anel externo está conectado nos mastros tubulares rotulados, que se apoiam na estrutura em concreto. Os mastros são estabilizados por contraventamentos no plano vertical, nos cantos e na parte central de cada face do polígono.

⁵ PTFE/fibra de vidro – material composto de fibras de vidro com cobertura em PTFE (produto de marca nomeada *Teflon*), ver item 2.5.2

Para aumentar a rigidez do sistema, os cantos do polígono retangular interno (definido pelos perfis tubulares esbeltos ou mastros flutuantes) estão atirantados à estrutura de concreto da arquibancada, por perfis tubulares. Paralelamente, a esses perfis tubulares correm tubos que transportam de água de chuva e neve, coletada pela calha situada entre as coberturas externa e interna.

Os cabos contínuos internos (superior e inferior) são conectados por suportes verticais, ou seja, também trabalham como vigas de cabo (*cable girders*). Os cabos inferiores internos são duplos permitindo o deslizamento dos tratores de força para a abertura e fechamento da cobertura interna. Os cabos inferiores externos suportam arcos tubulares (com tirantes). Os arcos tubulares e os cabos inferiores suportam os módulos em forma de sela da cobertura externa.

Figura 2.4-9 – New Waldstadion, Frankfurt/ Main



(a, b) vista 3D, planta; (c, d) vistas: interna, externa; (croquis e fotos da autora).

Figura 2.4-10 – New Waldstadion, Frankfurt/ Main



(a) cobertura interna; (b) cantos do polígono interno atirantados à estrutura de concreto da arquibancada (perfis tubulares); (c) mastro com estais (cantos do polígono); (d, g, h) detalhes mastro; (e, f) união entre os módulos da cobertura; (fotos da autora).

Rothenbaum Tennis Stadion, Hamburg, 1997 (total 8500m²; interna 3200m²)

Arquitetos: ASP Architects Schweger & Partner, Hamburg; Engenheiros: Sobek & Rieger, Stuttgart.

Essa arena em Hamburg apresenta base poligonal composta de 18 segmentos, aproximando-se de um círculo. A cobertura em membrana (PVC/poliéster) é composta de superfícies independentes, interna e externa. A cobertura externa é fixa e composta de módulos triangulares em forma de conóide, e a cobertura interna é retrátil, um domo com suave curvatura (Figura 2.4-11, Figura 2.4-12).

O sistema suporte da cobertura em aço é independente da estrutura em concreto da arquibancada, sendo composto por mastros e o sistema suporte espacial. Este apresenta perfis tubulares esbeltos (sob a compressão) descontínuos inseridos numa malha de cabos contínuos (princípio *Tensegrity*) vinculados aos anéis interno (tração) e externo (compressão). O anel externo também se vincula aos mastros.

O anel externo (compressão) e o anel intermediário (definido pelos perfis tubulares esbeltos ou mastros flutuantes) apresentam a mesma modulação, porém os mastros e os perfis não estão alinhados radialmente. Assim, no topo de cada mastro conectam-se dois cabos que se vinculam a dois perfis (mastros flutuantes), criando uma malha triangular de cabos que é a base dos conóides. O topo dos

conóides é suportado por três cabos que se ancoram no topo de um perfil tubular esbelto (mastro flutuante) e no topo de dois mastros.

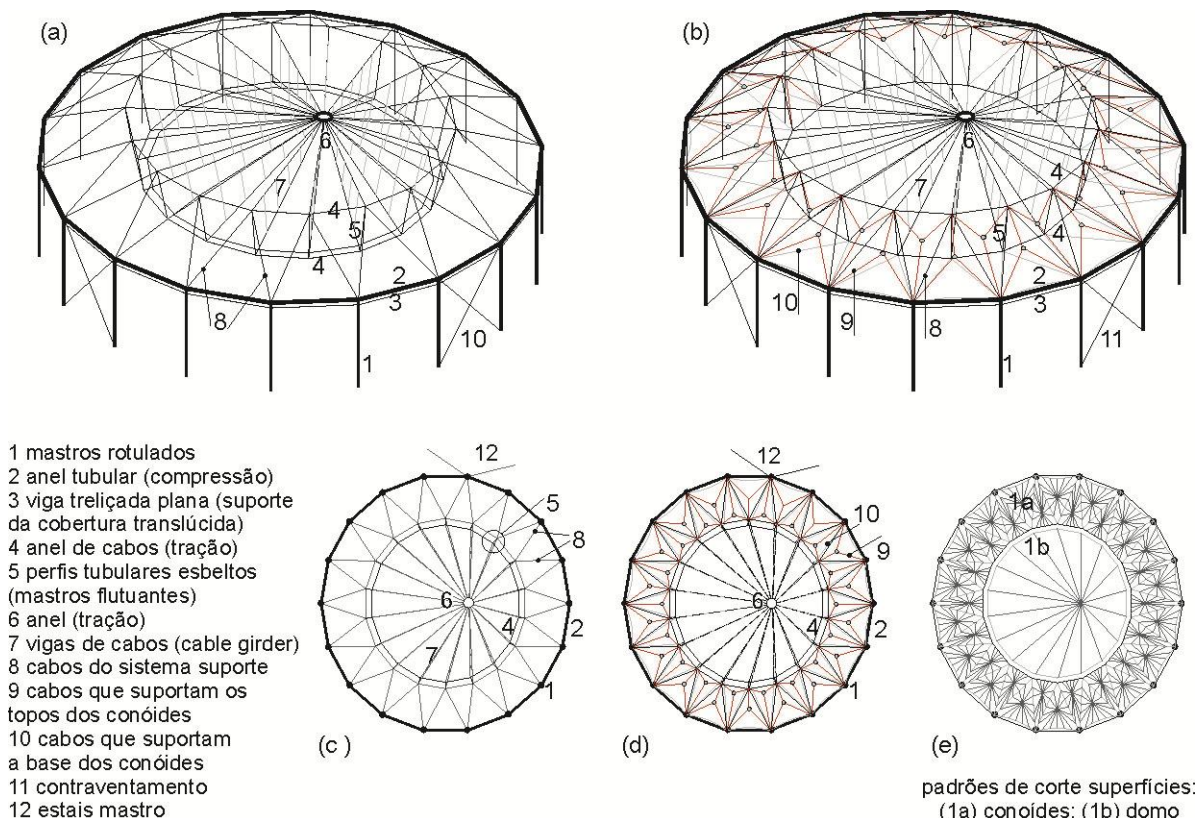
Os cabos contínuos internos (superior e inferior) são conectados por cabos verticais, ou seja, trabalham como vigas de cabo (*cable girders*). Nos cabos inferiores movimentam-se os tratores de força permitindo a abertura e fechamento da cobertura interna.

Os mastros tubulares são rotulados e estabilizados pelo anel externo de compressão e contraentramentos no plano vertical.

Como as arquibancadas em concreto ultrapassam os limites da cobertura em membrana, as extremidades externas são cobertas por placas translúcidas (placas de policarbonato), que são suportadas por vigas planas treliçadas, conectadas aos mastros.

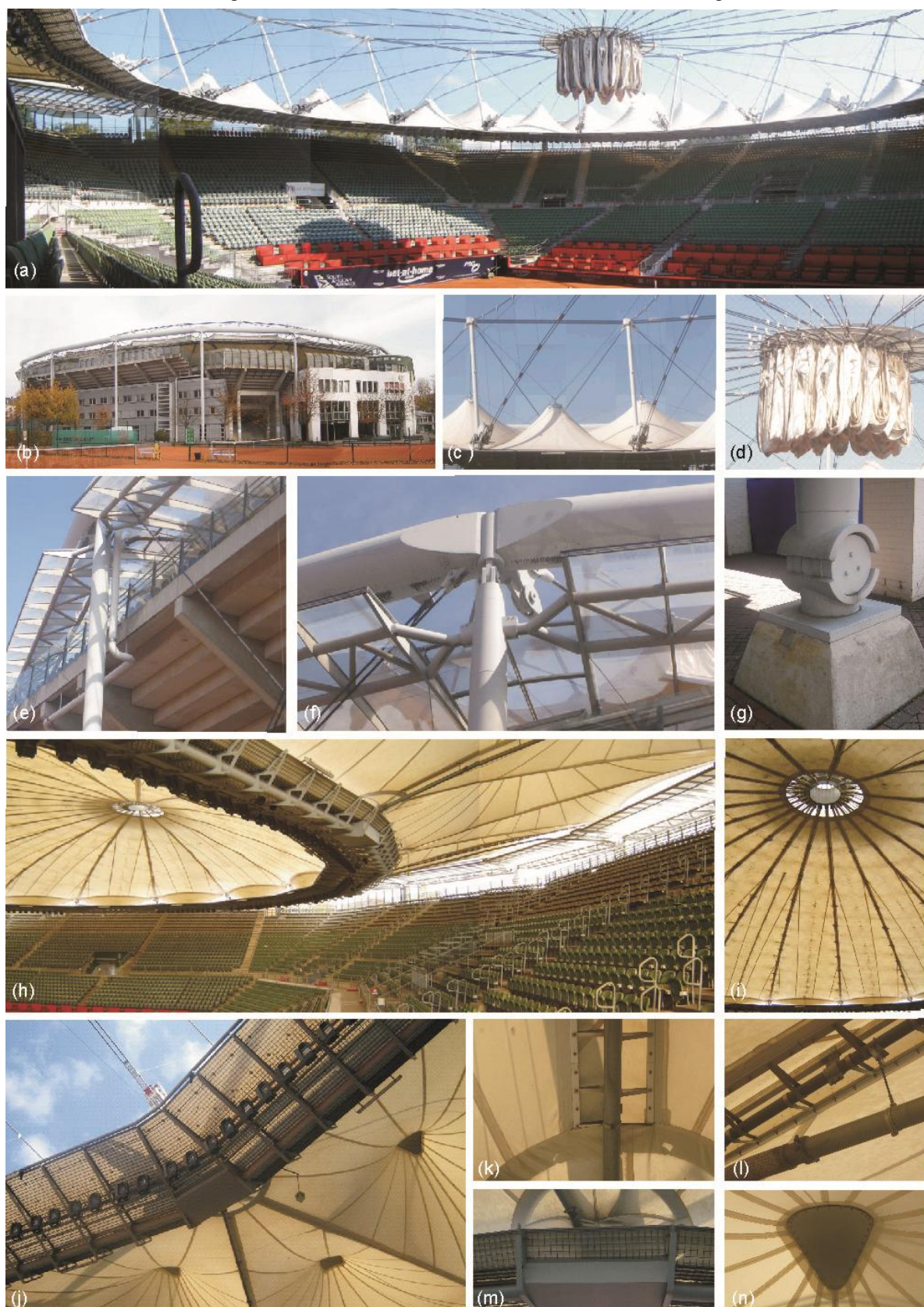
Na transição entre as coberturas externa e interna (coberta por placas planas translúcidas placas) situam a calha para coleta de água de chuva/ neve, e os equipamentos (pressão hidráulica) de abertura e fechamento da cobertura interna. Essa água é sugada mecanicamente e transportada por tubos que correm paralelos aos cabos que suportam a base dos conóides.

Figura 2.4-11– Rothenbaum Tennis Stadium, Hamburg



(a, b, c, d, e) vistas 3D, plantas sist. suporte, padrões de corte superfícies (croquis da autora).

Figura 2.4-12 – Rothenbaum Tennis Stadium, Hamburg



(a) vista interna; (b) vista externa; (c, d) vistas: conóides e cobertura interna recolhida; (e, f, g) detalhes do mastro (topo e base); (f) anel de compressão e viga treliçada plana; (h, i) vistas internas com a cobertura interna aberta; (j, m) conóides e transição entre coberturas; (n) topo do conóide; (k, l) união entre conóides; (e) detalhe do tubo de recolhimento de água; (fotos da autora).

Ice rink (Wolfgang Meyer Sports Arena), Hamburg, 1997, (7000m²)

Arquit.: ASW Silcher, Werner + Redante, Hamburg; Eng.: Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart

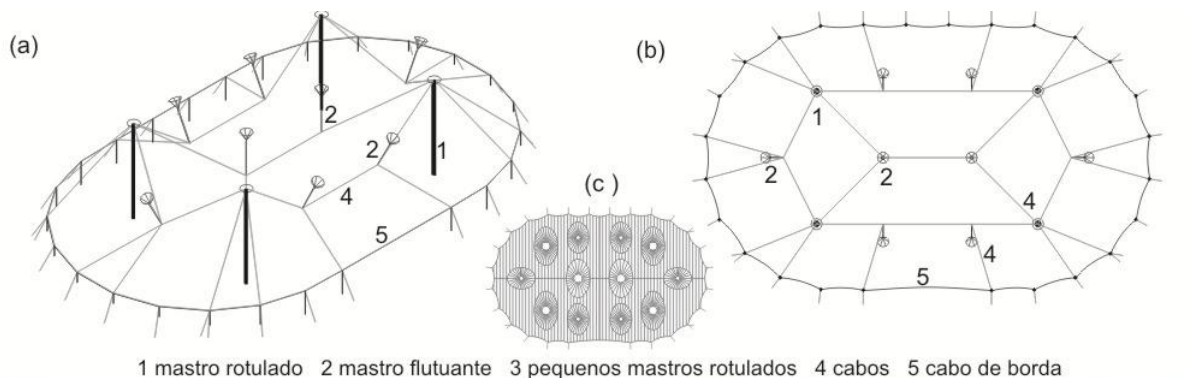
A cobertura desse rink de patinação, em membrana tensionada (PVC/ poliéster), com simetria no eixo transversal, apoia-se em quatro grandes mastros e oito mastros flutuantes em aço. Essa cobertura é pré-tensionada pelos cabos de borda que ancoram em 26 pequenos mastros (Figura 2.4-13, Figura 2.4-14).

Os grandes e pequenos mastros são rotulados e atirantados por cabos a base. O topo dos mastros flutuantes e dos grandes mastros apresenta terminação com barras radiais que se conectam a um anel. Essa terminação permite o apoio e a melhor distribuição da tensão no topo da membrana, bem como a iluminação zenital. A base dos mastros flutuantes apoia-se no encontro de três ou quatro cabos.

O arranjo espacial do sistema apresenta grande simplicidade e propicia a completa integração entre a membrana e o sistema suporte na distribuição dos esforços, garantindo a rigidez e a estabilidade da estrutura.

A dupla curvatura da superfície é alcançada com a formação de vários conóides (ancoragem da superfície ao topo dos mastros). A forma desses conóides é enfatizada pelos padrões de corte radiais, inseridos na malha de faixas paralelas.

Figura 2.4-13 – Rinique de patinação (*Eisbahn Stellingen*), Hamburg



(a, b) sist. suporte: vista 3D e planta; (c) modulação cobertura; (d) vista interna; (croquis e foto da autora).

Figura 2.4-14 – Rinque de patinação (*Eisbahn Stellingen*), Hamburg

(a, b) vistas externa e interna; (c, d, e) topo e base dos pequenos mastros (f) ancoragem cabos, (g,h) topo e base do mastro flutuante; (fotos da autora).

Estádio Olímpico, Munich, 1967

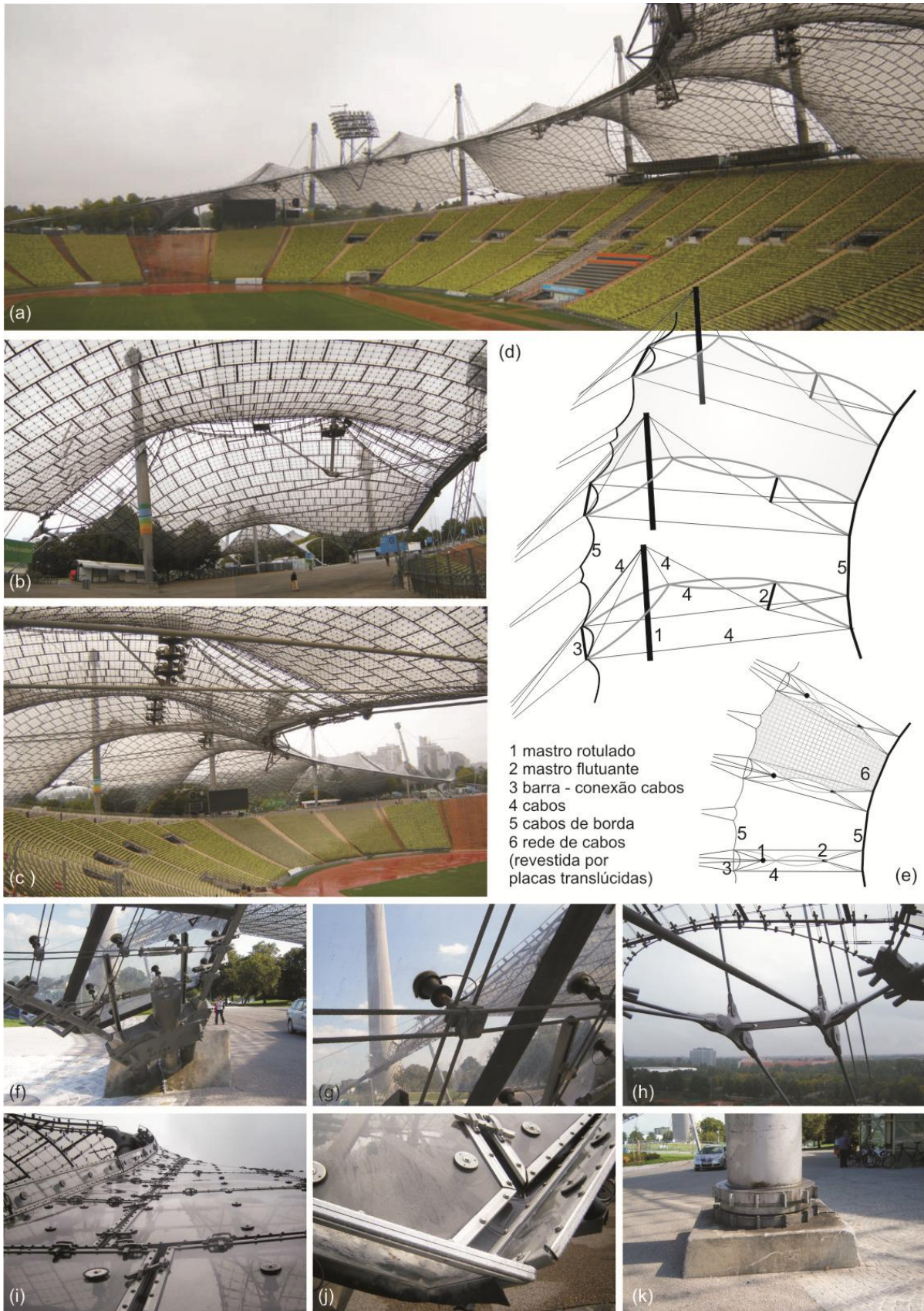
Arquitetos: Behnisch + Partner, Stuttgart; Frei Otto, Warmbronn; Eng.: J. Schlaich und R. Bergermann and Leonhardt und Andrä.

Esse estádio olímpico apresenta cobertura em rede de cabos (pares de cabos), revestida por placas translúcidas de policarbonado (Figura 2.4-15). Essas placas apoiam-se em ventosas que estão conectadas a rede de cabos, nos cruzamentos entre os cabos. A união das placas é feita por perfis plásticos (pretos) e permite a drenagem da água.

A cobertura em rede de cabos é composta de módulos radiais que se unem por cabos de borda. Esses módulos são suportados por mastros flutuantes, grandes mastros e cabos. Os grandes mastros são rotulados e contam com estais. A cobertura é pré-tensionada pelo arco interno de tração (formado por cabos) e o cabo de borda externo.

A configuração espacial dos cabos garante a rigidez e propicia a completa integração entre a rede de cabos e o sistema suporte.

Figura 2.4-15 – Estádio Olímpico, Munich



(a, b, c) vistas internas; (d, e) vista 3D e planta; (f, g, i, j) vista interna e externa da rede de cabos revestida com placas translúcidas de policarbonato; (h) barra de conexão cabos; (k) ancoragem mastro rotulado; (croquis e fotos da autora).

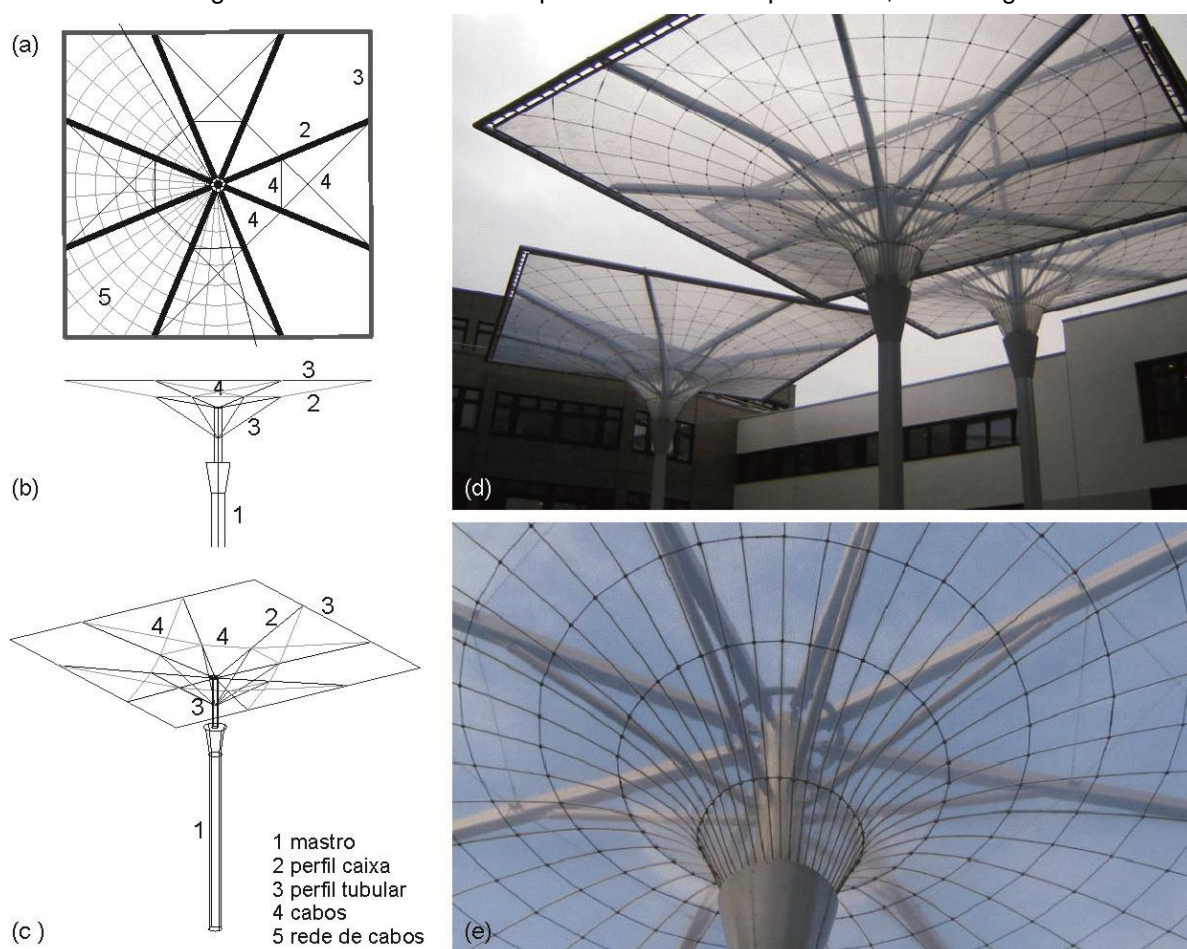
Umbrellas - pátio interno da empresa IHK, Würzburg, 2003 (aprox. 475m²)

Arquitetos: Franz Gröger, Georg Redelbach; Eng.: SMP Schöne/ Maatz + Partner (IPZ, Berlin).

As coberturas (sombriñas invertidas - *umbrellas*) situadas no pátio da empresa IHK, apresentam base quadrada e forma de conoíde invertido (Figura 2.4-16, Figura 2.4-17). Utilizam o filme ETFE⁶ e a rede de cabos (trabalhando de forma conjunta) estabilizados sob pré-tensão. Nesse caso, a rede e o filme apresentam a mesma modulação. O filme é impresso com bolinhas para minimizar a incidência da luz.

Esse filme apresenta tendências ao alongamento, necessitando o ajuste de pré-tensão, durante a vida útil da estrutura. Assim, quando utilizado em estruturas pneumáticas (superfícies sinclásticas), esse comportamento é compensado com o aumento da pressão interna. Entretanto, quando empregado em superfícies anticlásticas, esse comportamento pode ser minimizado com restrição imposta pela rede de cabos, formada de pequenos elementos lineares, como neste caso.

Figura 2.4-16 – Cobertura do pátio interno da empresa IHK, Würzburg



6 Filme translúcido de ETFE, ver item 2.5.2.4.

Essa cobertura é suportada por oito vigas em balanço, dispostas radialmente, vinculadas em base tubular quadrada e apoiadas em um único mastro, rigidamente apoiado a sua base. Essas vigas (perfil quadrado) apresentam travamento lateral com perfis tubulares e são contraventadas.

Figura 2.4-17 – Cobertura do pátio interno da empresa IHK, Würzburg



(a, b, c) detalhes da estrutura suporte da cobertura; (fotos da autora).

2.4.2 ESTRATÉGIAS OU REGRAS IDENTIFICADAS

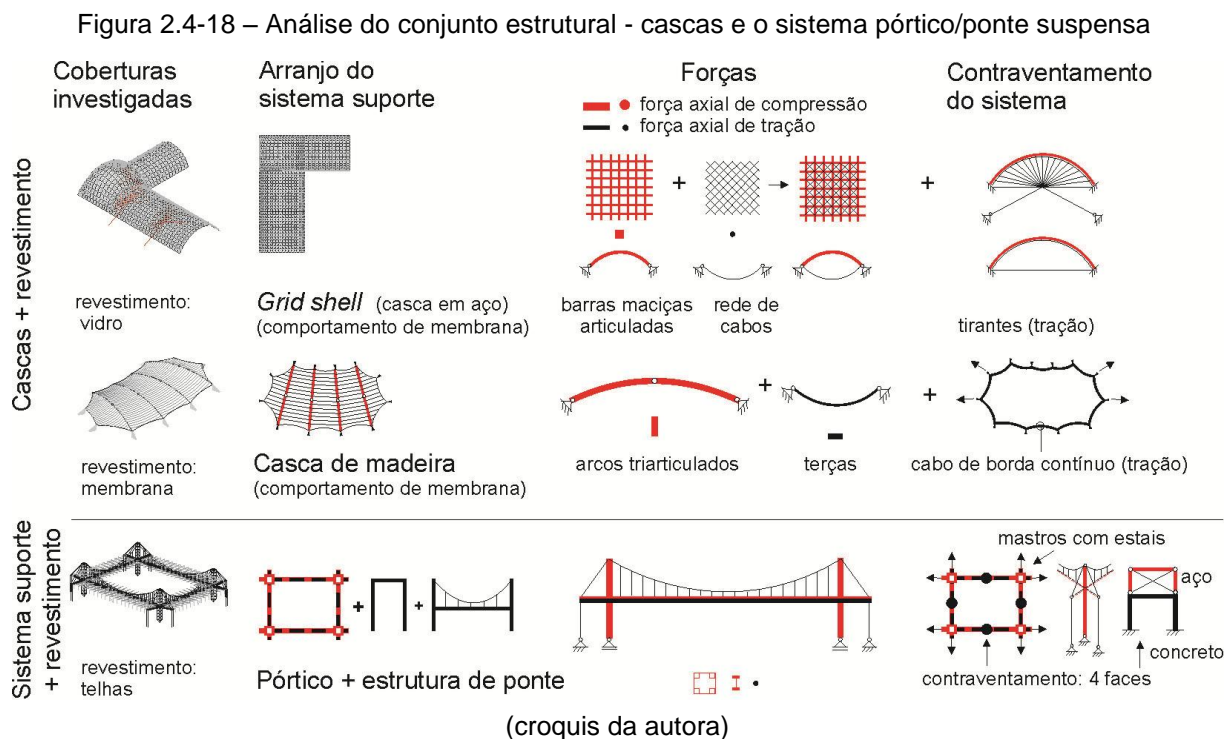
Foram investigadas distintas coberturas: cascas de madeira, *grid shell*, estruturas compostas pela combinação de sistemas (pórtico/ ponte suspensa) revestidas com telhas, bem como coberturas em membrana estrutural e rede de cabos. Essas possibilitaram uma visão geral de como esses sistemas se organizam e quais componentes são utilizados em busca do ótimo desempenho.

2.4.2.1 Organização e desempenho dos sistemas investigados

Nas cascas de madeira e aço (*grid shell*), de pequena espessura, o ótimo desempenho está associado à geometria (curvatura) da superfície, composta por componentes articulados esbeltos, que suportam cargas externas por esforços de tração e compressão, trabalhando em conjunto e sob pré-tensão, definindo o comportamento de membrana da superfície, conforme observação e análise do conjunto estrutural (Figura 2.4-18). Essas cascas são revestidas por membrana e vidro, respectivamente.

No sistema suporte em aço composto por pórticos/estrutura de ponte suspensa e coberto por telhas metálicas e translúcidas, o ótimo desempenho está associado à organização espacial e o trabalho integrado de componentes

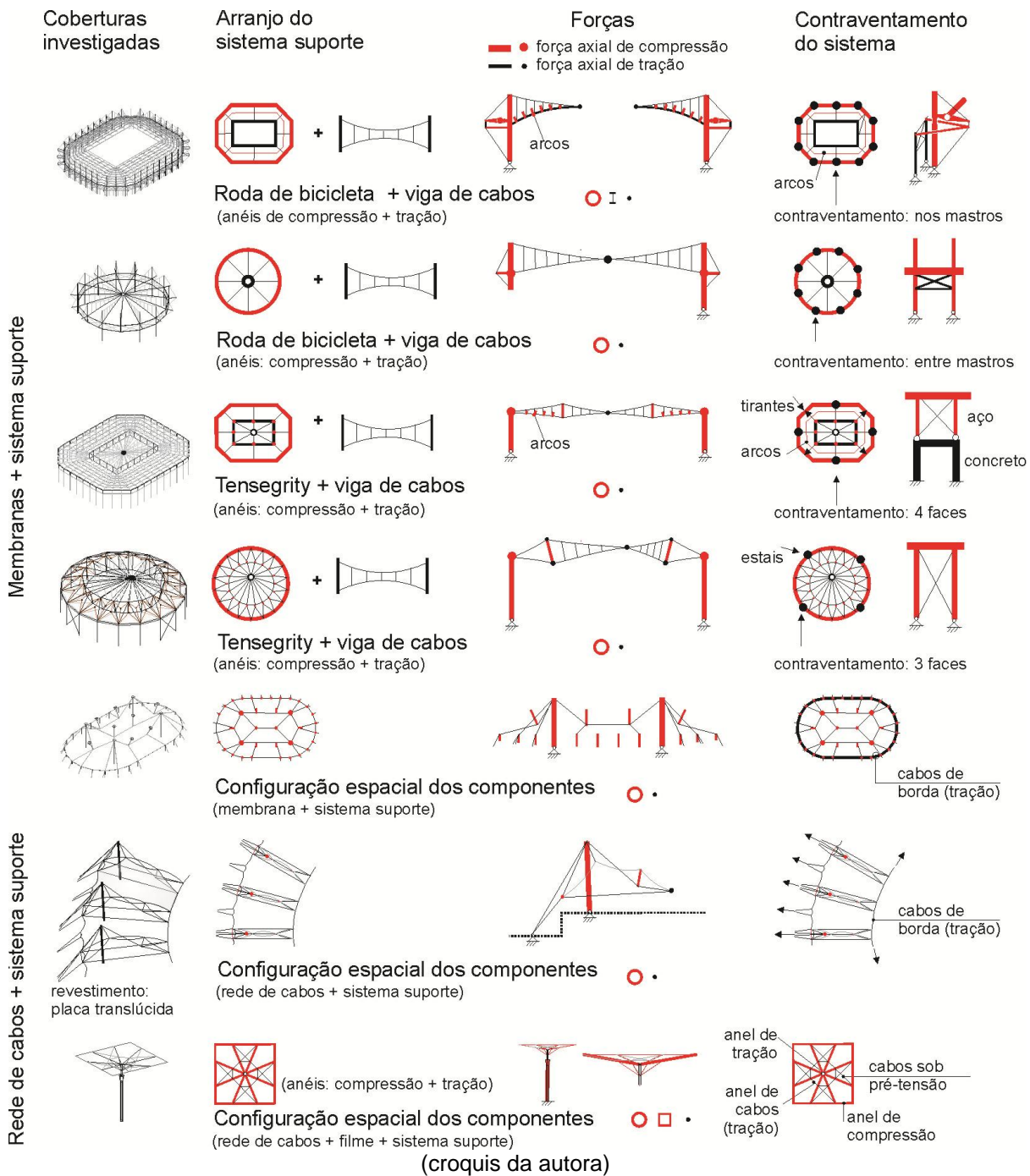
articulados (mastros e vigas) estabilizados por cabos sob pré-tensão, nos planos vertical e horizontal; e uso de componentes com menor densidade (componentes treliçados e ou com seção transversal vazada) equilibrando cargas principalmente sob as forças axiais de compressão e tração, conforme observação e análise do conjunto estrutural (Figura 2.4-18).



Nas coberturas de membrana de grandes vãos o ótimo desempenho está associado à geometria e ao estado de tensão das membranas, trabalhando em conjunto e de forma integrada com o sistema suporte. O sistema suporte é composto por mastros (rotulados e contraventados no plano vertical) e o sistema suporte espacial composto de vigas de cabo ou sistema *Tensegrity* associado aos anéis: interno (sob a tração) e externo (sob a compressão), apresentando grande rigidez, leveza e estabilidade global, conforme análise do conjunto estrutural (Figura 2.4-19).

Nas coberturas de membrana de médio e pequenos vãos, o ótimo desempenho está relacionado à mínima quantidade de apoios do sistema suporte (ex.: mastros rotulados com estais, mastros flutuantes e cabos), a geometria e pré-tensão da membrana (e ou rede de cabos) estabilizada por cabos de borda, e a cooperação e trabalho contínuo dos componentes conforme análise do conjunto estrutural (Figura 2.4-19).

Figura 2.4-19 – Análise do conjunto estrutural das membranas e rede de cabos



2.4.2.2 Coberturas em membrana – geometria e arranjo dos componentes

Dentre as estruturas investigadas, destacam-se as coberturas em membrana estrutural. Essas são cobertura e estrutura, além de trabalhar de forma integrada com o sistema suporte, contribuindo para equilibrar os carregamentos, sob pré-tensão. Nas demais coberturas, as telhas, o vidro, a membrana e as placas de policarbonato têm apenas função de cobertura.

Arranjo da membrana

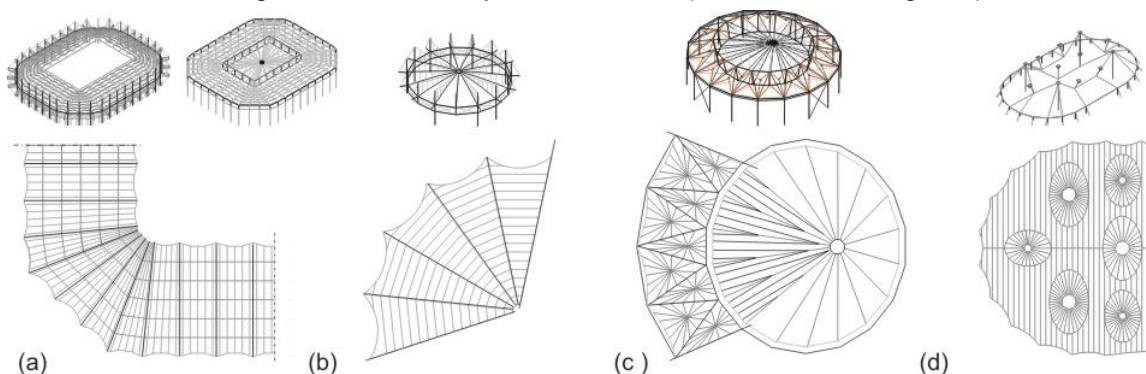
Observou-se que o arranjo tridimensional do sistema suporte (arcos, mastros, cabos, cabos de borda, etc) está associado ao arranjo e à geometria da membrana.

Nas coberturas de membrana de grandes vãos a grande área coberta da superfície é composta por módulos de selas e conóides (suportados por arcos e pontos altos) organizados radialmente ou paralelamente (Figura 2.4-20 a-b-c).

Nas coberturas de membrana de pequeno e médio porte, verificou-se também o ajuste e organização da forma, buscando a simetria e a modulação. Entretanto, explora-se mais a expressividade formal desse sistema (Figura 2.4-20 d).

Os módulos das superfícies (conóides, selas, etc) são geralmente subdivididos em faixas (padrões de corte) radiais ou paralelos que se alinham ao fluxo das forças e às curvaturas principais da superfície. Observou-se nas áreas de maior tensão da superfície da membrana (proximidade dos pontos de ancoragem) a retirada de material, e no entorno dessas áreas o uso de dupla camada de material.

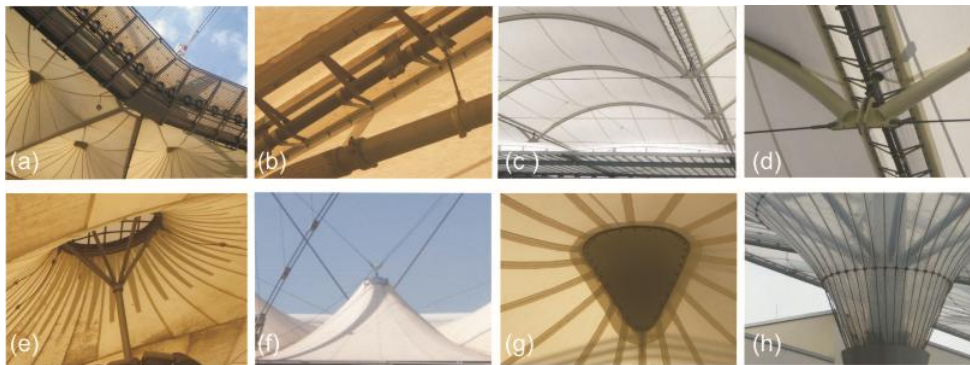
Figura 2.4-20 – Arranjo da membrana (coberturas investigadas)



(a) módulos de selas organizados paralelamente e fios do material paralelos à união; (b) módulos de selas dispostos radialmente, predominam fios do material paralelo à união; (c) domo com padrões de corte radiais e conóides (com base triangular) dispostos radialmente e com padrões de corte radiais (fios do material com pequena rotação em relação à união); (d) combinação de padrões de corte paralelos e radiais; (croquis e fotos da autora).

Em relação às características do sistema e pontos de ancoragem das superfícies (Figura 2.4-21) foram observados topos e vales, pontos altos e baixos, conforme organizado por Bubner (2005). Em relação à união entre os painéis foram observadas uniões soldadas em membranas (Figura 2.4-22-1a,1c) e filmes translúcidos (Figura 2.4-22-1b). Em relação às bordas e cantos das superfícies, foram observadas terminações flexíveis e rígidas, conforme Figura 2.4-22 (2a-2e, 3a-3d).

Figura 2.4-21– (a-d) Topos e vales; (e-h) Pontos altos e baixos



(fotos da autora)

Figura 2.4-22 - União entre componentes

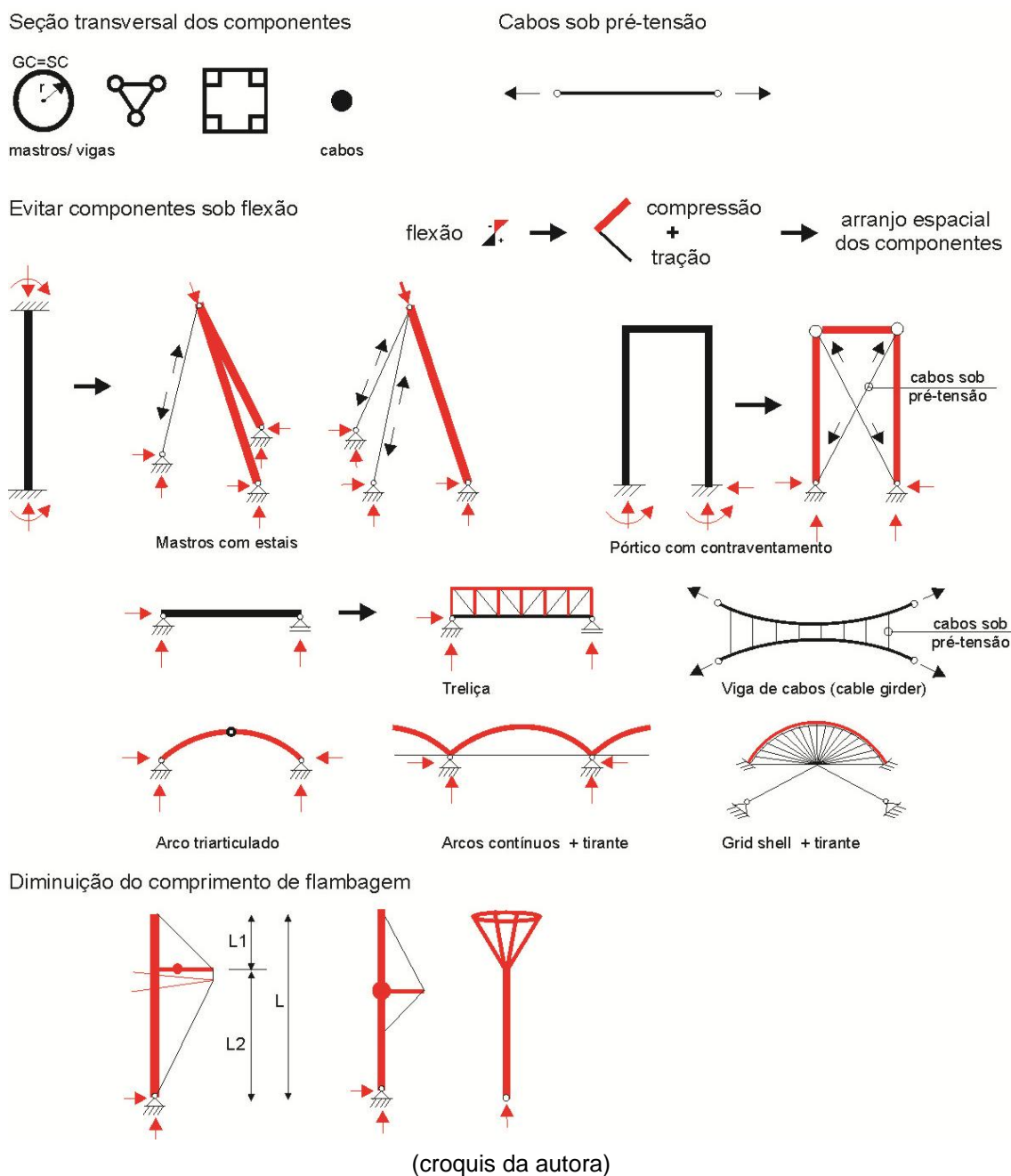


(1a-1c) união entre painéis nas membranas/ filmes; (2a-2c) bordas e (3a-3d) cantos da superfície (fotos da autora)

Arranjo dos componentes do sistema suporte

No sistema suporte predominam arranjos de componentes articulados sob pré-tensão (ex. mastros com estais, vigas de cabo), ancoragens rotuladas para mastros e cabos, e componentes com seção transversal vazada (Figura 2.4-23, Figura 2.4-24a-l). Em outras palavras, busca-se compreender o comportamento global do sistema, combinar e organizar tridimensionalmente componentes lineares (ex. cabos, mastros) principalmente sob a ação de esforços axiais (tração, compressão), escolhendo a forma da seção transversal dos componentes adequada aos esforços atuantes, o que possibilita reduzir a massa do sistema para o mesmo volume, ou seja, sua densidade.

Figura 2.4-23 – Geometria e arranjo dos componentes do sistema suporte



Dentre os componentes e arranjos destacam-se:

- Cabos sob pré-tensão: o cabo é um elemento leve, flexível, com comprimento ilimitado e massa concentrada próxima ao centro de gravidade que não tem rigidez à flexão e compressão. Sua ruptura acontece quando é atingido o limite de resistência do material, ou seja, está associada à quantidade e não a forma como o material está distribuído na seção. Assim, sob a tração o cabo apresenta forma mais estável e utiliza de maneira mais eficiente toda sua seção.

- Seção transversal circular para mastros e vigas sob compressão: na seção circular o material está distribuído de forma simétrica e com a mesma distância do centro de gravidade da seção, além disso, o centro de gravidade da seção transversal coincide com o centro de cisalhamento por causa da completa simetria da seção. Assim, é mais difícil o mastro girar ou perder a estabilidade.

- Seção transversal vazada para mastros e vigas (composta pelo arranjo de perfis tubulares) evita peças robustas, possibilita economia de material e maior estabilidade.

- Arranjo espacial dos componentes (mastros, vigas e pórticos) para evitar a flexão:

. Mastros com estais: apresentam base rotulada e são estabilizados por cabos sob pré-tensão. Essa configuração espacial rotulada decompõe o momento fletor em um conjunto de forças de tração e compressão, possibilitando reduzir a massa dos componentes e aumentar a eficiência estrutural.

. Mastros e vigas treliçados: sistema que possibilita a utilização de elementos mais esbeltos, equilibrando cargas sem desenvolver esforços de flexão, apenas sob as forças axiais de compressão e tração (efeito combinado de cabo e arco).

. Travamento lateral do mastro com barras rígidas e cabos: nos componentes submetidos à compressão simples, pode ocorrer o deslocamento lateral (flambagem). Como a carga crítica de flambagem de Euler⁷ é inversamente proporcional ao quadrado do comprimento do mastro, travamentos laterais do mastro possibilitam reduzir o comprimento de flambagem e aumentar a estabilidade.

. Pórticos contraventados: as diagonais sob pré-tensão dividem o carregamento e possibilitam transformar por meio da pré-tensão o esforço de compressão em tração.

. Vigas formadas por arcos tubulares rotulados e com tirantes: permitem eliminar a reação horizontal.

⁷ Carga crítica de Euler: $P_c = \pi^2 EI / (kL)^2$, sendo: k - coeficiente de flambagem (fator de comprimento efetivo), E - módulo de elasticidade, I - momento de inércia, L - comprimento da barra.

. *Cable girder* aqui tratadas por vigas de cabo: compostas por cabos externos superiores e inferiores com curvaturas opostas, conectados por cabos verticais internos (OTTO; TROSTEL, 1969): ts os componentes trabalham sob a tração. Os cabos internos garantem a pré-tensão dos cabos externos.

Figura 2.4-24 – Ancoragens dos componentes



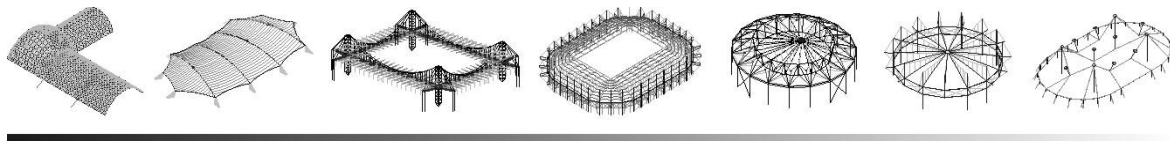
(a, b, c, d, e, f, g) ancoragem dos mastros; (h) ancoragem do mastro flutuante; (i, j, k, l) ancoragem dos cabos; (m, n, o, p) ancoragem de componentes no topo dos mastros.
Fotos da autora, exceto foto (a) rótula dos mastros, ref.: SCHLAICH; BERGERMANN (2003), p.109.

É importante destacar que as conexões observadas entre as membranas e componentes do sistema suporte permitem a transmissão do fluxo das cargas e são também um meio de aplicar a pré-tensão aos componentes. Possibilitam rotações e ou deslocamentos, já que as estruturas de membrana estão sujeitas a grandes movimentos sob as cargas, têm baixa resistência ao cisalhamento e não suportam flexão e compressão. Essas conexões ficam normalmente expostas na estrutura e revelam grande precisão de detalhamento e manufatura, conforme Figura 2.4-22(2a-2e, 3a-3b) e Figura 2.4-24(m-n).

2.4.2.3 Estratégias para o ótimo desempenho do sistema

Observou-se que a progressiva capacidade dessas estruturas leves apresentarem ótimo desempenho – suportar e transmitir grandes forças com pouca massa –, está associada à estabilidade espacial do conjunto estrutural, à grande resistência dos materiais utilizados (ex.: fibras sintéticas e aço), bem como à baixa densidade⁸ do conjunto estrutural, Figura 2.4-25.

Figura 2.4-25 – Progressiva capacidade das estruturas leves suportar grandes forças com pouca massa



Esse desempenho deriva da geometria tridimensional da superfície da membrana em estado de retesamento, do arranjo dos componentes do sistema suporte, bem como da organização espacial e interação dos componentes do conjunto estrutural (membrana e sistema suporte), trabalhando em conjunto e de forma contínua sob pré-tensão.

As superfícies das membranas são organizadas em módulos e ou subdivididas em faixas que se alinham ao fluxo das forças e às curvaturas principais da superfície.

O sistema suporte caracteriza-se pela combinação de sistemas e ou uso de componentes esbeltos articulados organizados tridimensionalmente. Nesse arranjo predominam: maior quantidade de componentes que suportam as cargas externas por forças axiais de tração e compressão, até os limites de resistência do material (tração) e estabilidade do componente (compressão); subdivisão ou organização modular dos componentes, buscando reduzir os vãos, evitar peças robustas, favorecer a fabricação e montagem dos componentes; maior uso de uniões flexíveis.

Pode-se dizer que as estratégias utilizadas pelos arquitetos e engenheiros para alcançar o ótimo desempenho desse sistema estão relacionadas:

- ao arranjo do conjunto estrutural: configuração tridimensional cuja estabilidade global deriva do trabalho conjunto e contínuo dos componentes, e revela o menor caminho das forças;
- à geometria e ao arranjo de todos os componentes: forma que revela o melhor uso do material e o menor caminho das forças.

⁸ A baixa densidade do conjunto estrutural resulta do uso de tecidos constituídos de fibras sintéticas que suportam grandes tensões com baixo peso específico, e do arranjo/ geometria dos componentes do sistema suporte (ex. componentes treliçados, componentes com seção transversal vazada, mastros com estais).

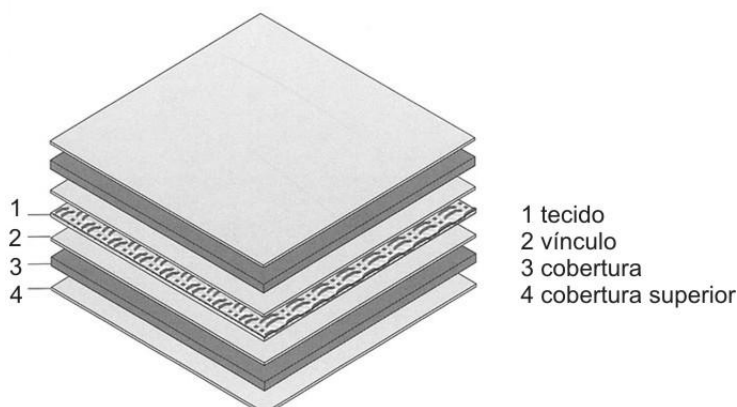
2.5 MATERIAL DA MEMBRANA

2.5.1 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL DA MEMBRANA

O material utilizado nas membranas, conhecido como *technical membrane* e tratado aqui por tecido estrutural, é normalmente de um material compósito. Segundo definição dada pela Engenharia de Materiais, compósito é um material multifásico, feito artificialmente, onde as fases ou materiais constituintes devem ser quimicamente diferentes e estar separadas por uma interface distinta. A combinação desses é realizada em escala macroscópica, formando uma unidade e visando obter uma melhor combinação de propriedades (CALLISTER, 2009).

Esse tecido estrutural é constituído por duas fases: a matriz (camada protetora) que é contínua e envolve a fase dispersa (fibras). A matriz e as fibras trabalham juntas, mas desempenham diferentes tarefas estruturais (Figura 2.5-1).

Figura 2.5-1– Estrutura do tecido de PVC (tecido + cobertura)



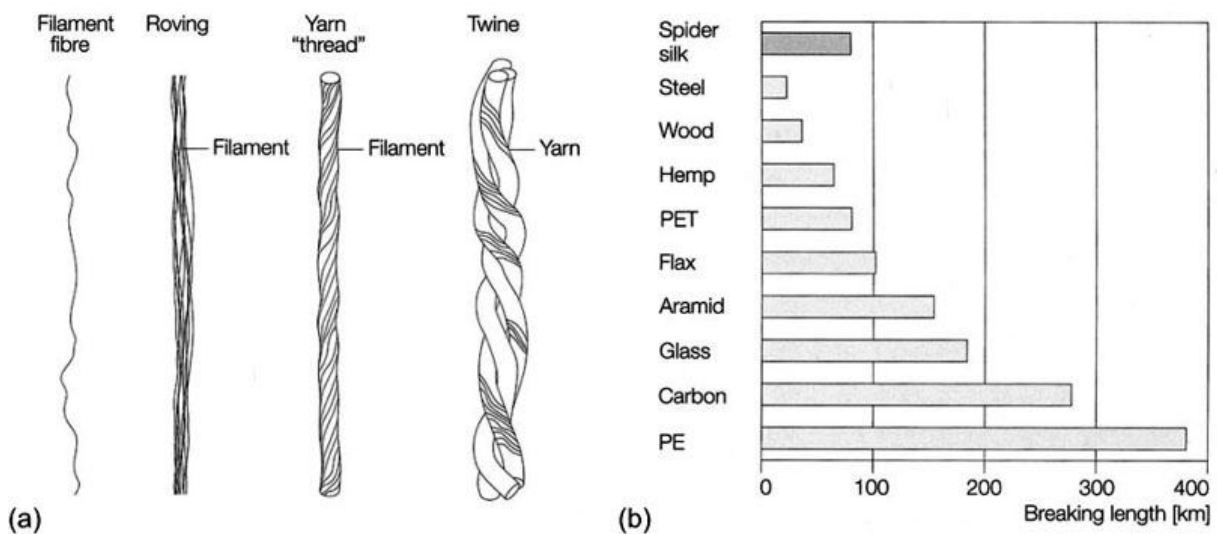
Fonte: KINIPPERS *et al.*, 2011, p.101.

As fibras são responsáveis pela grande resistência à tração e pela capacidade do material de suportar cargas. São filamentos de infinito comprimento obtidos por extrusão em giro de materiais derretidos (poliéster, vidro) ou solução (aramida), (BÖGNER-BALZ; BLUM, 2008). Esses filamentos, posicionados paralelos, são reunidos em feixes (*roving*), que são torcidos para compor os fios (*yarn/ thread*), conforme mostra a Figura 2.5-2a. Nesse procedimento, os filamentos individuais são carregados com mais uniformidade, aumentando a resistência desse feixe de filamentos (KNIPPERS *et al.*, 2011).

Posteriormente, os fios são entrelaçados (ou sobrepostos) no processo de tecelagem e formam a malha uniforme e fina do tecido. As fibras mais usadas nos tecidos estruturais são: fibra de poliéster, fibra de vidro e, atualmente, a fibra de PTFE (Politetrafluoro-etileno).

Segundo Knippers *et al.* (2011), a relação entre a resistência e o peso próprio das fibras é um parâmetro interessante ao se planejar estruturas leves. Pode-se usar como indicador para a escolha do material, o comprimento de ruptura da fibra. Esse valor corresponde ao comprimento que a fibra pode alcançar antes de romper, suspensa sob o seu próprio peso. Segundo Roland (1973), esse comprimento independe do tamanho e da forma da seção transversal do material. As fibras mais eficazes são as que suportam tensões mais elevadas com menor peso específico. Na Figura 2.5-2b pode-se observar o comprimento de ruptura e o ótimo desempenho das fibras de poliéster (PET) e principalmente das fibras de vidro, usadas nos tecidos das membranas, comparadas ao aço.

Figura 2.5-2 – (a) Formação dos fios; (b) Gráfico: comprimento de ruptura das fibras



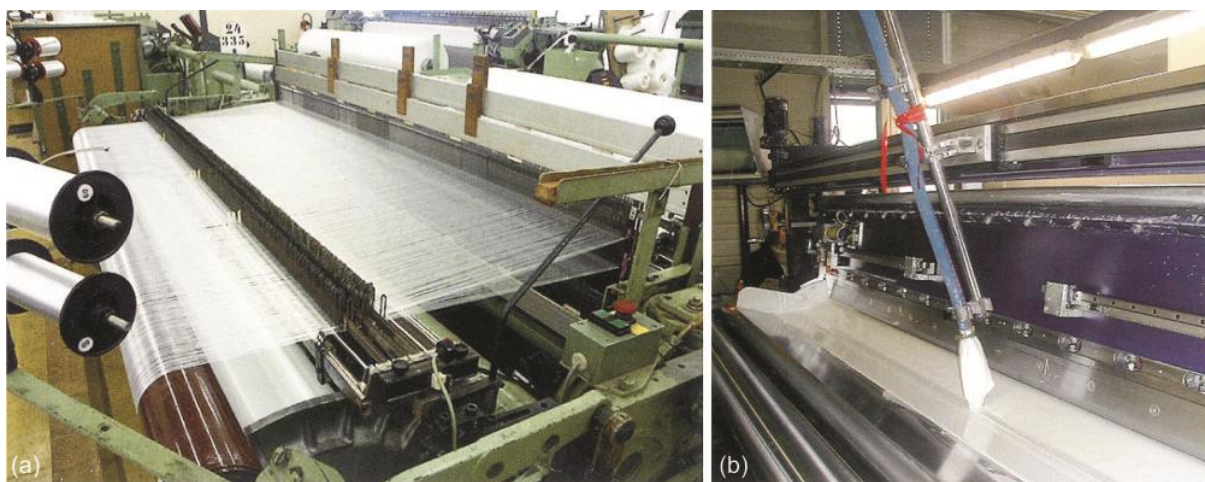
Fonte: KNIPPERS *et al.*, 2011, p.49.

A matriz contínua é constituída por diferentes camadas superpostas de materiais poliméricos que se incrustam, predominantemente, em ambos os lados do tecido (Figura 2.5-1). Propicia a proteção a ataques químicos e o tratamento da superfície contra a radiação ultravioleta (UV), abrasão, atmosfera e fungos. Além disso, retarda chamas e possibilita sua impermeabilização, a soldagem, e a estabilidade à radiação. Segundo Bögner-Balz; Blum (2008), a cobertura além de proteger os fios das influências externas, possibilita estabilizar a geometria do tecido

garantindo sua durabilidade. Dentre as camadas protetoras, destacam-se o PVC - Poli (cloreto de vinila) e o PTFE - Poli (tetraflúor-etileno).

O processo de fabricação dos tecidos usados na arquitetura têxtil é industrial e de alta qualidade. Envolve a produção dos fios, a tecelagem e a aplicação da cobertura (Figura 2.5-3). É importante destacar que a primeira camada da cobertura propicia a compatibilidade (física e química) e a resistência da adesão entre o tecido e a cobertura. Essa adesão entre o tecido e a cobertura contribui de forma significativa para aumentar a resistência do material ao rasgo e, de acordo com Seidel (2009) possibilita aumentar a resistência da solda.

Figura 2.5-3 – (a-b) Processo de tecelagem do tecido poliéster e aplicação de cobertura em PVC



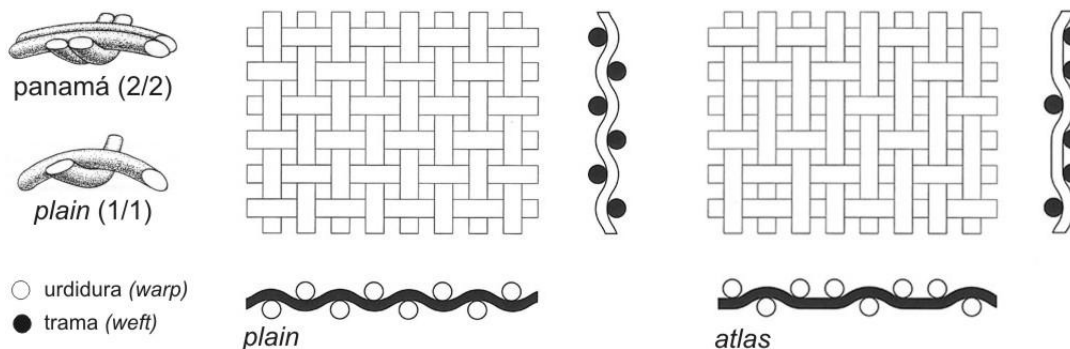
Fonte: SEIDEL, 2009, p.29 e 31.

Nas construções têxteis predominam tecidos entrelaçados e cobertos. Entretanto, são utilizados também tecidos entrelaçados sem matriz e materiais sem fibras (filmes). Segundo Milwich (2010), os tecidos entrelaçados são caracterizados na sua maioria pelo peso/m². Os tecidos mais pesados geralmente oferecem maior resistência, pois apresentam mais fibras.

Os tecidos entrelaçados são sistemas planos formados por dois tipos de fios, urdidura e trama. A direção dos fios retos, longitudinais, esticados ao longo do comprimento do material (geralmente com maior rigidez) é a direção da urdidura, e perpendicularmente são inseridos os fios da trama, possibilitando o entrelaçamento (Figura 2.5-4). Os entrelaçamentos mais importantes são *plain* (ou *canvas*, *tabby*, *linen* ou *taffeta*) e atlas (ou *satim* ou *twill*), sendo que a maioria dos tecidos usados na construção têxtil utiliza o entrelaçamento *plain* ou panamá (*basket*), (BAIER, 2010).

O entrelaçamento resulta de diferentes arranjos dos fios da urdidura durante a inserção da trama e influenciam as propriedades mecânicas dos materiais. O entrelaçamento tipo *plain* resulta do movimento alternado da trama abaixo e acima dos fios da urdidura. O entrelaçamento panamá (*basket*) é uma forma especial de *plain* em que dois ou três fios da urdidura e trama são entrelaçados juntos. O entrelaçamento *twill* (*atlas*) é o resultado de um ritmo irregular em que os fios da trama passam acima e depois abaixo de pelo menos dois fios da urdidura produzindo costelas na diagonal (KNIPPERS *et al.*, 2011), conforme Figura 2.5-4.

Figura 2.5-4 – Tecidos entrelaçados (*plain* e *atlas*): direção e modulação dos fios



Fonte: MOLLAERT; HEBBELINK; HAASE, 2002, p.70; Adaptado de KNIPPERS *et al.*, 2011, p.70.

2.5.2 MATERIAIS MAIS USADOS

Os materiais mais usados na construção são feitos de fibras de poliéster cobertas por PVC - Poli (cloreto de vinila), fibras de vidro cobertas por PTFE - Poli(tetraflúor-etileno), e atualmente de fibras de PTFE - Poli(tetraflúor-etileno), podendo ser cobertas ou não.

2.5.2.1 Tecidos sem cobertura

Tecido de poliéster

O poliéster é um polímero⁹ sintético que contém o grupo funcional Ester na cadeia principal. O tipo de poliéster utilizado como base dos tecidos refere-se ao Poli(tereftalato de etileno) ou PET, sendo também referenciado na terminologia têxtil como PES. Assim, os filamentos, formados de granulados de PET, são convertidos

⁹ Polímero é um composto de elevado peso molecular (macromolécula), cuja estrutura (longa cadeia principal) apresenta unidades químicas simples (meros) repetidas. Apresenta origem mineral (ex.: petróleo, hulha, gás natural), vegetal (ex.: látex de árvores tropicais) ou animal (ex.: caseína), podendo ser natural ou sintético. Alguns polímeros podem ser usados em aplicações de engenharia, permitindo seu uso em substituição a materiais tradicionais e segundo alguns autores são chamados de plásticos de engenharia (MANO; MENDES, 1991).

em fios para a produção dos tecidos. As fibras de poliéster têm alta tenacidade e módulo de elasticidade, bem como baixa absorção de água e mínimo encolhimento comparável a outras fibras (BAIER, 2010). Esse comportamento resulta da cristalização e orientação das cadeias das macromoléculas de forma organizada (FOSTER; MOLLAERT, 2004). Apresentam também baixa resistência à radiação UV e são combustíveis em altas temperaturas, mas auto-extinguíveis após ignição. Essas desvantagens são reduzidas com o revestimento em PVC. É necessário também o tratamento das fibras de poliéster (sensitivas a hidrólise) com substância que não absorve água e umidade para evitar a capilaridade.

Tecido de fibra de vidro

Segundo Milwich (2010), o tecido de fibra de vidro é manufaturado desde 1930. As fibras de vidro são produzidas pela mistura de materiais inorgânicos¹⁰ (minerais) moldados a 1600°C, para posterior extrusão em giro e resfriamento dos filamentos (BAIER, 2010). Essas têm grande resistência, baixo alongamento, baixo *creep* e não são facilmente inflamáveis. Entretanto, são sensíveis à umidade e quebradiças (não sendo adequadas para uso em estruturas retráteis). As fibras de vidro são isotrópicas, por causa da sua estrutura amorfa. Apresentam seção transversal uniforme (aprox. circular) e exibem comportamento linear elástico até sua falha por quebra (KNIPPERS *et al.*, 2010). Segundo Baier (2010), os fios mais usados nas membranas são feitos de *E-glass* (elétrico). O tecido de fibra de vidro apresenta baixa resistência à radiação UV e à sujeira, e necessita de tratamento especial. Essas desvantagens são reduzidas com o revestimento em PTFE ou silicone.

Tecidos de PTFE

O Poli(tetraflúor-etileno) ou PTFE é um polímero cuja estrutura molecular contém átomos de flúor¹¹ fortemente ligados a átomos de carbono. Esse flúor-polímero (também conhecido como Teflon) foi inventado em 1938, pelo engenheiro Roy J. Plunkett, mas só começou a ser usado como cobertura dos tecidos de fibras de vidro a partir dos anos 70 (KOCH, 2004). Os tecidos, feitos de 100% de fibras de alta resistência de PTFE expandindo, são completamente imunes à radiação UV, produtos químicos e poluição, e apresenta facilidade de limpeza. Resistem a altas temperaturas e têm propriedades inflamáveis. A transmissão de luz é

10 Areia /quartzo (SiO₂), limestone (CaO₃ e MgO), alumina (AL₂O₃), soda, bório (BAIER, 2010).

11 Fluor é proveniente do mineral fluorita (Sefar Architecture, 2011).

aproximadamente 30% e as cores são verdadeiras (o branco fica branco). Esse tecido é flexível e pode ser usado em membranas retráteis e permanentes de alta qualidade que não necessitam ser totalmente herméticas à água, ou seja, pode também ser usado sem cobertura. É reciclável, mas não eco-degradável. Tem expectativa de vida útil de mais de 25 anos (BAIER, 2010). Esses tecidos apresentam tendência ao *creep*, mas em contrapartida, têm alta resistência à propagação do rasgo (KNIPPERS *et al.*, 2011).

2.5.2.2 Camadas protetoras

Cobertura em PVC

O Poli(cloreto de vinila) ou PVC é um polímero sintético que tem alta resistência e módulo elástico. Entretanto é quebradiço, necessitando de plastificantes para aumentar sua flexibilidade (KNIPPERS *et al.*, 2011). Para ser aplicado como revestimento, garantindo a impermeabilidade do material, necessita ser dissolvido formando uma pasta que é espalhada no tecido. Apresenta formulação química que conta com aditivos para otimizar suas propriedades como agentes retardantes de chama, plastificantes, pigmentos (controlam a translucidez, transparência, alcance de UV, luz visível e cores), amaciantes (evitam que o revestimento fique quebradiço) e estabilizantes (térmicos, oxidantes e de radiação UV).

Apesar das qualidades e características de impermeabilidade da camada de PVC, o plastificante utilizado em sua composição tem a tendência de migrar para a superfície. Assim, favorece o acúmulo da sujeira, sendo susceptível ao crescimento de bactérias e fungos na superfície. Contribui também para a perda de ductilidade do material, podendo levar ao aparecimento de trincas na cobertura e à exposição das fibras de poliéster. Então, são utilizadas camadas finais de proteção (verniz). Entre os materiais usados, destaca-se o flúor-polímero PVDF – Poli (fluoreto de vinilideno). Esse verniz tem característica similar ao PTFE, garante a limpeza e oferece uma barreira mais eficiente à migração do plastificante e às influências do clima, aumentando a qualidade da cobertura.

Cobertura em PTFE

Conforme abordado, o PTFE – Poli(tetraflúor-etileno) é um polímero com excepcionais propriedades químicas. A cobertura em PTFE é geralmente aplicada ao tecido de fibra de vidro por imersão. O material seco é sinterizado a temperaturas de 350° a 380°C. Isso quer dizer que a cobertura em PTFE tem comportamento

aproximado de um material cerâmico (BÖGNER-BALZ; BLUM, 2008). Logo, sua utilização com substratos de poliéster não é possível. É disponível na cor bege, mas fica branco após a exposição à radiação UV (MILWICH, 2010). Não é combustível sob as condições normais, resistente à radiação UV (ultravioleta) e IR (infravermelho), a substâncias corrosivas e inertes a poluentes. Exibe propriedades autolimpantes sendo repelente à água (FOSTER; MOLLAERT, 2004).

2.5.2.3 Tecidos cobertos

Os tecidos cobertos e filmes são classificados na Europa, de acordo com a resistência a tração e peso/m², em aproximadamente cinco tipos. Na Tabela 2.5-1 pode-se observar o peso/m², a resistência e alongamento dos materiais.

Tabela 2.5-1 – Características técnicas dos tecidos e filmes selecionados

<i>Fabric/ coating foils</i> Tecido/ cobertura	<i>Quality type thickness</i> Tipo de qualidade espessura	<i>Weight</i> Peso (g/m ²)	<i>Tensile strength warp/weft</i> Resistência a tração urdidura/ trama (N/50mm)	<i>Elongation at rupture - warp/weft</i> Alongamento na ruptura urdidura/ trama (%)
<i>Polyester/PVC-coating</i> Tecido em Poliéster revestido por PVC	Type I	600- 800	3000/3000	15/20
	Type II	900	4400/4000	15/20
	Type III	1100	5750/5200	15/25
	Type IV	1300	7400/ 6400	15/25
	Type V	1450	9800/ 8300	15/25
<i>Fibreglass/PTFE-coating</i> Tecido em fibra de vidro revestido por PTFE	Type I	800	3500/3000	3-12
	Type II	1050	5000/4400	3-12
	Type III	1250	6900/5900	3-12
	Type IV	1500	7300/ 6500	3-12
<i>PTFE- fabric non-coated</i> Tecido de PTFE não revestido		300- 800	3880/3500	30/40
<i>ETFE foils</i> Filme de ETFE	50µm	87.5	64/56	450-500
	80µm	140	58/54	500-600
	100µm	175	58/57	550-600
	150µm	262.5	58/57	600-650
	200µm	350	52/52	600

Fonte: BAIER, 2004 *apud* BAIER, 2010, p.60.

É importante destacar que polímeros sintéticos usados na fabricação dos tecidos, coberturas e filme aqui mencionados (poliéster, PVC, PTFE, PTFE, PDVF, ETFE), são classificados como termoplásticos, ou seja, são plásticos que têm como característica a fusibilidade. Então, podem ser fundidos e solidificados várias vezes

sem a modificação significativa das suas propriedades básicas. Portanto, são sólidos à temperatura ambiente (estado final) e fluidos em algum estágio do processamento. Por essa razão, esses materiais podem ser reciclados ou reutilizados como matéria-prima de outros produtos, já que o descarte é um dos maiores problemas dos materiais plásticos, pois necessitam aproximadamente de 400 a 500 anos para se degradar.

No Brasil, os materiais em PVC/PES são reutilizados como matéria-prima de outros produtos (ex. mangueiras, interruptores). Na Europa, segundo Baier (2010), os principais fabricantes europeus de membranas de PVC/PES, tem se unido para reciclar resíduos pós-consumo (membranas e material de PVC), na maioria das fábricas modernas que contam com procedimentos termo físicos. Nesse procedimento, a preparação e classificação dos materiais é muito importante.

Tecido de poliéster coberto com PVC

O tecido de poliéster revestido de PVC tem sido o material mais usado nas membranas estruturais desde os anos 50, por causa do seu desempenho e custo. Tem transmitância de luz de aproximadamente 5 a 15% (Figura 2.5-5a), conforme Knippers *et al.*, 2011. É classificado como material construtivo classe B1, de acordo com o comportamento ao fogo (inflamável com dificuldade), segundo a norma DIN 4102 (*Germany Industrial Standard*). Tem expectativa de vida útil aproximada de 25 anos. Possui também flexibilidade e facilidade de manuseio e pode ser usado para coberturas permanentes e retráteis (BAIER, 2010).

Tecido de fibra de vidro coberto com PTFE

O tecido de fibra de vidro revestido com PTFE apresenta grande durabilidade e economia, sendo auto-limpante e estável em relação à umidade. Tem transmitância de luz de aproximadamente 8 a 20% (Figura 2.5-5b). É classificado como de material de construção classe A2 (não combustível) para os materiais tipos I e II, e classe B1 (inflamável com dificuldade) para os tipos III e IV, de acordo a norma DIN 4102 (KNIPPERS *et al.*, 2011). É geralmente disponível na cor branca. Tem expectativa de vida útil aproximada de 40 anos (BAIER, 2010).

Tecidos de PTFE coberto com PTFE

Os tecidos de PTFE com revestimento termoplástico de flúor-polímero aplicado por método de extrusão podem ser soldados e ficam completamente herméticos. Tem transmitância de luz de aproximadamente 20 a 40% (Figura 2.5-5c). É classificado

como material construtivo classe B1 (DIN 4102) e S1-d0 (sem produção de fumo, gotas/partículas inflamadas) de acordo com a EN13501 (*European Standard to fire resistance*) e tem expectativa de vida útil de mais de 25 anos (KNIPPERS *et al.*, 2011).

Figura 2.5-5 – Transmissão da luz de tecidos cobertos (a, b, c); filme ETFE (d)



os tecidos cobertos (a, b, c) foram fotografados sob luz direta para permitir a comparação qualitativa da transmissão da luz: (a) tecido Poliéster coberto por PVC; (b) tecido de Fibra de vidro coberto por PTFE; (c) tecido de PTFE coberto por PTFE; (d) filmes de ETFE: translúcido e impresso.

Fonte: adaptado de KNIPPERS *et al.*, 2011, p.97, p.103.

2.5.2.4 Filme ETFE

O filme¹² translúcido de ETFE - (Etileno-tetrafluoroetileno) (Figura 2.5-5d) foi lançado em 1970, mas começou a ser utilizado de forma significativa nas fachadas pneumáticas das edificações, no início dos anos 80. É um copolímero¹³ sintético que apresenta estrutura molecular semi-cristalina, classificado como material construtivo classe B1 (inflamável com dificuldade) de acordo com a norma DIN 4102 (*Germany Industrial Standard*) (SCHIEMANN; MORITZ, 2010). É um material estável, ideal para uso em ambientes com ações agressivas (ácidos, álcalis, radiação UV). Tem grande resistência à sujeira e ao calor. Dificilmente absorve radiação UV, assim, nunca fica amarelo ou quebradiço. Pode ser produzido em cores variadas e ser impresso. Como tem grande transmitância de luz e permeabilidade à radiação UV (Figura 2.5-5d), é usado em coberturas de piscinas, zoológicos e *greenhouses*, possibilitando o crescimento das plantas e limitando o crescimento de bactérias (KNIPPERS *et al.*, 2011).

Apresenta baixa resistência quando comparado às fibras de poliéster e vidro, e tendência ao alongamento, mas grande resistência à propagação de rasgos. Por esse motivo é mais utilizado em coberturas e fachadas pneumáticas infladas em que o alongamento não influencia significativamente a pré-tensão aplicada. Também é

¹² A denominação filme, usado para designar chapas finas de aço, também é empregado na indústria construtiva para os materiais poliméricos homogêneos que tem mínima espessura em relação a sua área de superfície (KNIPPERS *et al.*, 2011).

¹³ Copolímero é um composto de elevado peso molecular (macromolécula), cuja estrutura (longa cadeia principal) apresenta unidades químicas diferentes (meros) repetidas, organizadas de forma alternada, aleatória ou em bloco. (MANO; MENDES, 1991).

usado com rede de cabos e cabos individuais, o que possibilita aumentar a capacidade de carregamento do material. Tem expectativa de vida útil aproximada de 25 anos (SCHIEMANN; MORITZ, 2010).

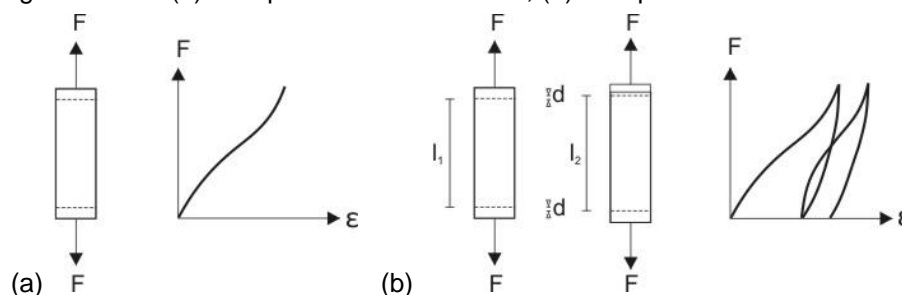
2.5.3 COMPORTAMENTO DO MATERIAL

Esse material quando solicitado, apresenta comportamento não linear, não elástico, visco-elástico e, na maioria das vezes, propriedades anisotrópicas. Essas propriedades mecânicas variam com a composição do material, número e diâmetro dos fios, tipo de película adotada, tipo de entrelaçamento dos fios e a espessura total do tecido (ALVIM; PAULETTI, 2004).

O comportamento não linear (Figura 2.5-6a) pode ser observado quando o material é submetido à tração no teste uniaxial. As tensões não são proporcionais às deformações, ou seja, a relação tensão-deformação do material não pode ser determinada por uma equação linear (SEIDEL, 2009). No caso dos polímeros como o poliéster, esse comportamento está associado ao deslizamento das longas cadeias (lineares e ou ramificadas) entrelaçadas (ligações não rígidas), sob a ação de forças (WAGNER, 2008).

O comportamento não elástico pode ser observado quando o material é submetido a vários ciclos de carga e descarga (Figura 2.5-6b). Quando o carregamento tende a zero, permanecem no material as deformações residuais. Observa-se também que as curvas de carregamento são diferentes das curvas de descarregamento (SEIDEL, 2009).

Figura 2.5-6 – (a) Comportamento não linear; (b) Comportamento não elástico



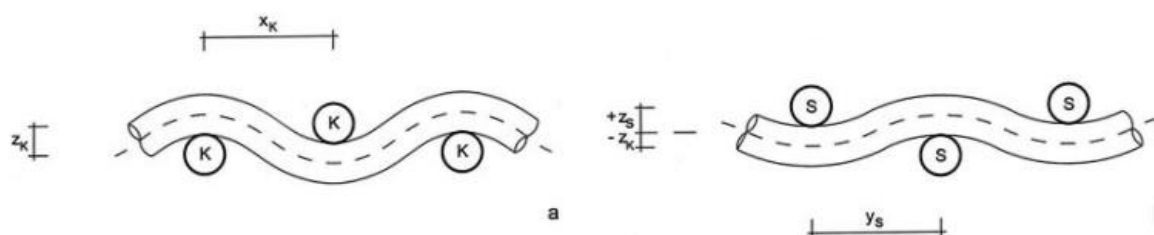
Fonte: adaptado de SEIDEL (2009), p, 40.

O material elástico que apresenta as mesmas propriedades mecânicas em todas as direções é denominado isotrópico. Entretanto, as membranas entrelaçadas têm dois eixos simétricos ortogonais e, geralmente, comportamento mecânico

diferentes nas suas direções. Nesse caso, o comportamento é descrito como anisotrópico ortogonal (SEIDEL, 2009).

A anisotropia resulta do processo de tecelagem por meio do qual a geometria dos fios é definida. Conforme Figura 2.5-7, o fio da urdidura apresenta menor curvatura e deformação que o fio da trama. A diferença na curvatura dos fios faz com que as direções do tecido tenham comportamento mecânico distinto. Assim, a maior curvatura do fio da trama é a razão da baixa rigidez nessa direção (SEIDEL, 2009).

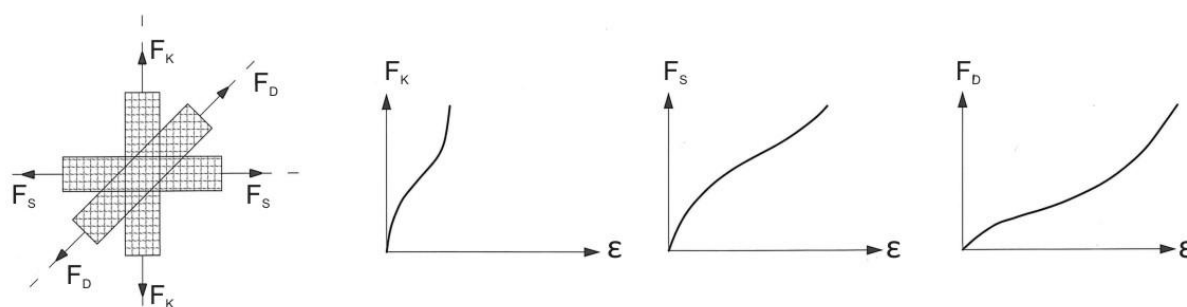
Figura 2.5-7– Curvatura dos fios: (a) trama; (b) urdidura



Fonte: adaptado de SEIDEL, 2009. p.42

Esse comportamento pode ser observado no teste uniaxial do tecido em que as direções do tecido (0° urdidura, 90° trama e 45°) foram submetidas à mesma força. Observou-se maior rigidez na direção da urdidura (90°), grande deformação na direção da trama (0°), sendo a máxima deformação a 45° (Figura 2.5-8).

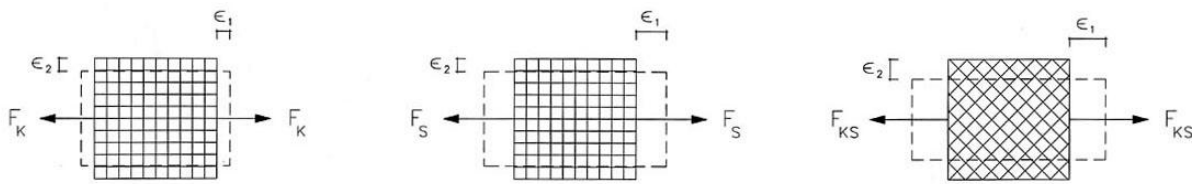
Figura 2.5-8 – Comportamento do tecido em relação à orientação dos fios: 90° , 0° e 45°



Fonte: SEIDEL, 2009. p.41

Nesse tecido anisotrópico, quando a direção da urdidura é esticada, verifica-se o alongamento e a alteração da curvatura dos fios da urdidura (Figura 2.5-9). Entretanto, por causa da interação entre os fios, a curvatura da trama também será alterada. Conseqüentemente, verificam-se diferentes deformações nessas direções (ex. alongamento na direção de aplicação da carga e contração na direção transversal), cuja relação é descrita pelo coeficiente de Poisson e depende do nível de força aplicada nessas direções (SEIDEL, 2009).

Figura 2.5-9 – Diferentes deformações nas direções do tecido (90°, 0° e 45°) quando solicitado



Fonte: SEIDEL, 2009, p.42

A rigidez ou o comportamento tensão-deformação não linear do material das membranas depende muito da relação das forças (magnitude, duração e série de cargas) aplicadas às direções do tecido. Este comportamento também varia de acordo com o tipo, fabricante e lote do material selecionado. Por causa dessas características, é usual avaliar o comportamento biaxial de cada estrutura de membrana experimentalmente (UHLEMANN *et al.*, 2011).

Os tecidos e filmes também apresentam um comportamento que combina características de sólido¹⁴ e líquido¹⁵ (fluido viscoso), ou seja, um comportamento visco-elástico, que depende do tempo e da temperatura (BÖGNER-BALZ, 2008).

Para compreender esse comportamento é importante observar como esses materiais se deformam¹⁶. O fluido sob a tensão se deforma continuamente. O sólido, no comportamento elástico, não. Portanto, o comportamento visco-elástico combina deformações viscosas irreversíveis (causadas pelo deslizamento das cadeias dos polímeros) e deformações elásticas reversíveis (as quais dependem do tempo e dos entrelaçamentos das cadeias que impedem o movimento macromolecular). (KROSCWITZ,1990).

Então, nos sólidos macios como tecidos e filmes, a relação tensão-deformação não segue a lei de Hooke. A deformação não está relacionada apenas com a magnitude da tensão, mas é função também do tempo. Isso quer dizer que a deformação do material sob a tensão constante (ex. carga de longo prazo) aumenta com o tempo (*creep*), conforme pode ser observado na Figura 2.5-10a. Consequentemente, a tensão necessária para manter esse material sob a deformação constante, diminui gradualmente com o tempo (*relaxation*), de acordo com o que esclarece a Figura 2.5-10b. Essas deformações também são

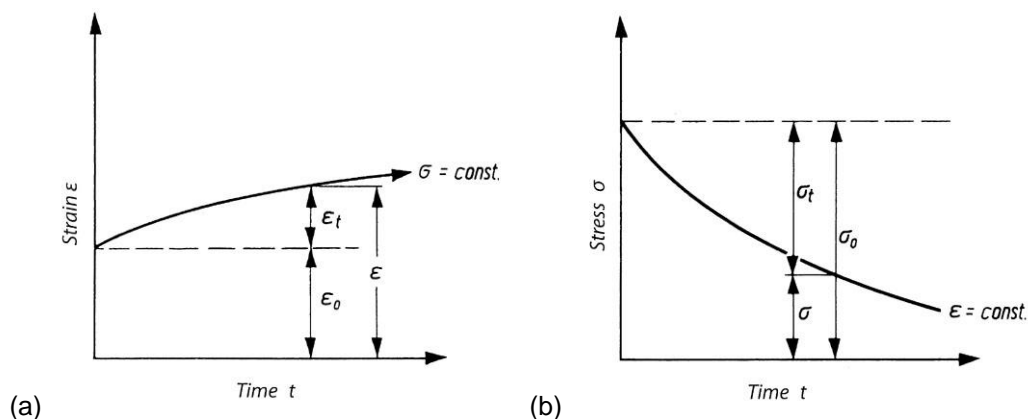
14 Nos sólidos a tensão é diretamente proporcional a deformação para pequenas deformações, conforme teoria clássica da elasticidade (lei de Hooke), (KROSCWITZ, 1990).

15 Nos líquidos viscosos a tensão é sempre diretamente proporcional a taxa temporal de deformação, mas independente da deformação, segundo teoria clássica da hidrodinâmica (Lei de Newton), (KROSCWITZ, 1990).

16 A ciência que estuda a da deformação (reversível) e o fluxo (irreversível) é a Reologia, sendo a deformação interpretada como a resposta do material a força aplicada. (KROSCWITZ,1990).

influenciadas pela temperatura. Sob as baixas temperaturas o material fica quebradiço e com o aumento da temperatura, há redução da rigidez (SEIDEL, 2009).

Figura 2.5-10 – (a) *Creep* (fluência); (b) Relaxação



Fonte: SEIDEL, 2009, p.48.

Segundo Lewis (2004), para otimizar o *creep* (fluência) e a fadiga no tecido, é desejável ter na urdidura e na trama o mesmo estado de tensão. Assim, as cargas tendem a surgir de forma equivalente no conjunto de fios, e tem-se como resultado o envelhecimento comparável nas duas direções.

2.6 PROCESSO DE PROJETO

Nas estruturas de membrana e rede de cabos, que se caracterizam pela leveza e flexibilidade, o equilíbrio acontece na posição deformada e em estado de pré-tensão, (Figura 2.2-1).

Tais estruturas equilibram os carregamentos externos apresentando grandes deslocamentos que alteram sua geometria, mesmo que as cargas atuantes estejam no limite elástico (Lei de Hooke), ou seja, apresentam comportamento não linear geométrico (LEWIS, 2003). Esses movimentos permitem uma distribuição da tensão mais uniforme na superfície e melhor uso do material. Tal comportamento pode ser compreendido por analogia observando-se as árvores sob a ação do vento; o movimento permite que elas resistam às cargas reduzindo a tensão interna. Entretanto, devem ser controlados para evitar a rigidez repentina e falhas (WAGNER, 2005).

Observa-se também, que as formas das superfícies das membranas e redes de cabos não são formas livres, mas seguem as forças que atuam sobre ela, ou seja, são formas de equilíbrio (LINKWITZ, 1999), definidas por equações diferenciais.

Além disso, o material da membrana apresenta comportamento complexo e propriedades anisotrópicas.

Por causa dessas particularidades, são dificilmente analisadas por métodos tradicionais. O processo do projeto envolve a busca da forma de equilíbrio das superfícies (*form-finding*), a análise estática e o procedimento de definição dos padrões de corte dessa forma de equilíbrio (*patterning*).

A etapa inicial de busca da forma de equilíbrio distingue as tensoestruturas das estruturas rígidas (em concreto, aço ou madeira) nas quais a forma pode ser previamente determinada (LEWIS, 2003). Essa etapa compreende a busca do equilíbrio tridimensional da superfície da membrana para certo estado de tensão e condições de borda definidas (pontos altos, cabos de borda flexíveis, bordas rígidas, etc), não considerando o comportamento do material (WAGNER, 2005).

Posteriormente, é realizada a análise do comportamento do conjunto estrutural (da forma de equilíbrio da membrana e do sistema suporte) sob a ação de cargas previstas. Segundo Lewis (2003), caso a configuração da superfície proposta não satisfaça a condição de equilíbrio estático, o procedimento inicial de busca da forma de equilíbrio é repetido alterando as configurações da geometria da superfície (condições de borda e ou níveis de pré-tensão).

As análises das estruturas de membrana são geralmente realizadas em modernos softwares baseados nos elementos finitos capazes de avaliar a não linearidade geometria da estrutura, bem como a não linearidade do material considerando que a membrana não suporta compressão. Para simplicidade, o comportamento tensão-deformação do material da membrana tensionada é geralmente tratado como linear elástico, o que significa que o comportamento tensão-deformação não linear não é considerado no processo de projeto. Isso passa a impressão de existir uma grande falta de conhecimento sobre como simular e, ao mesmo tempo, como incluir a não linearidade do material da membrana no processo de projeto (UHLEMANN *et al.*, 2011, p.2, tradução nossa).

Nas etapas descritas previamente podem ser observadas a pré-tensão inicial imposta à forma de equilíbrio durante o procedimento de *form-finding* e a pré-tensão introduzida durante a análise para controlar o comportamento do sistema (superfícies e do sistema suporte) sob a ação de cargas (SAITOH, 1997).

Segundo Wagner (2005), a definição dos padrões de corte da superfície é um procedimento geométrico que possibilita a planificação e manufatura da superfície

(forma de equilíbrio). Na maioria dos casos, esse procedimento não considera a distribuição das tensões na superfície da membrana e o comportamento do material da membrana. Entretanto, os procedimentos de projeto recentes têm buscado simular o comportamento dessas estruturas de forma mais realística. Assim, a avaliação da estrutura sob a ação de cargas também considera os padrões de corte (largura das faixas), a orientação do tecido e o processo de pré-tensão, pois esses parâmetros e procedimentos exercem grande influência na distribuição das tensões na superfície. Essa simulação busca aproximar a geometria e a distribuição de tensões da forma de equilíbrio à forma da estrutura real, e contribuir para minimizar rugas e regiões de pico de tensão na superfície.

Por causa das características dessas estruturas, é importante que o processo de projeto seja desenvolvido por equipe interdisciplinar, formada por arquitetos, engenheiros e construtores, desde a etapa inicial, possibilitando a integração e a qualidade dos procedimentos de projeto e de construção.

É importante destacar que os procedimentos iniciais de busca da forma podem utilizar também modelos físicos flexíveis (ex. tecido, filme de sabão). Os procedimentos de construção, observação e a análise dos modelos flexíveis possibilitam a visão global do sistema e a compreensão imediata do aspecto qualitativo do comportamento estrutural. Permitem também o desenvolvimento espontâneo da concepção do conjunto estrutural no contexto físico em que se insere, potencializando a elaboração de configurações viáveis a serem estudadas (NUNES, 2008).

Dentre os métodos utilizados para a representação e a simulação dessas estruturas destacam-se o Método Densidade de Força (MDF), o Método da Relaxação Dinâmica e o Método dos Elementos Finitos (MEF). Nessa investigação foram abordados o MDF e o MEF.

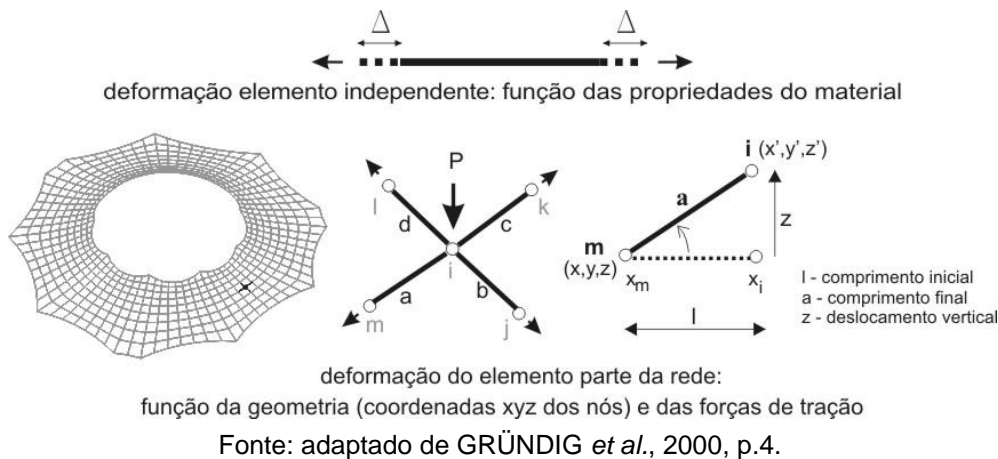
2.6.1 DEFINIÇÃO DA FORMA – MÉTODO DE DENSIDADE DE FORÇA

Esse método foi desenvolvido por Klaus Linkwitz e seu grupo de trabalho para modelar as coberturas do Complexo Olímpico de Munich nos anos 60 (LEWIS, 2003).

Essa aproximação matemática não contém parâmetros que fazem referência ao material da rede. Permite apenas a definição da configuração inicial de equilíbrio estático da superfície, representada como uma rede de cabos. Segundo Linkwitz (1999), o princípio dessa aproximação pode ser demonstrado ao observar o

comportamento elástico de um elemento de barra independente e como parte de uma rede de cabos. Considera-se que a rede de cabos seja formada por elementos individuais articulados, fixa nos seus pontos de ancoragem e sob pré-tensão, e que a Lei de Hooke é válida, (Figura 2.6-1).

Figura 2.6-1 – Comportamento elástico do elemento de barra: independente e parte da rede de cabos

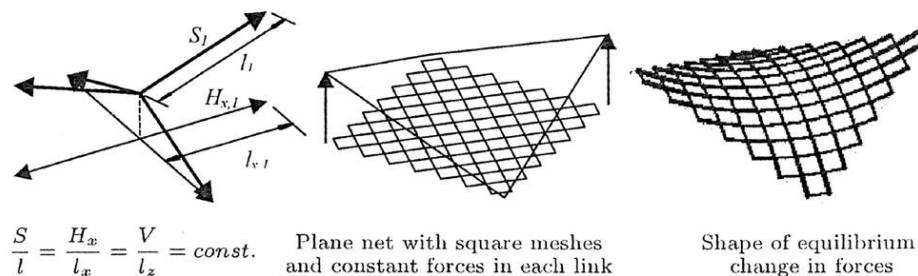


Quando o elemento de barra individual é tracionado, ele se deforma longitudinalmente e a diferença entre o comprimento inicial e o deformado elasticamente é determinada pelas propriedades do material da barra. Entretanto, quando o elemento é parte de uma rede de cabos, e essa é tracionada, os elementos trabalham em conjunto. Na rede anticlástica, passam em cada nó curvaturas em direções opostas entre si. Assim, cada nó é um ponto fixo no espaço. Logo, a geometria da rede de cabos resulta do equilíbrio das forças que atuam simultaneamente em cada nó, e o comprimento de cada elemento elasticamente alongado equivale à distância espacial entre os nós.

Nesse método, as forças de tração que atuam em cada nó são representadas por um sistema de equações lineares. Essa aproximação parte do princípio que a componente vertical da força de pré-tensão que atua em cada elemento de barra (definida por seus nós inicial e final) depende do ângulo e da componente horizontal dessa força. Assim, assume-se como parâmetro constante a componente horizontal da força de pré-tensão atuante em cada elemento de barra para qualquer ângulo. Esse parâmetro é denominado densidade de força e é descrito como a relação da força pelo comprimento de cada elemento. Logo, apenas os deslocamentos verticais são calculados e a configuração de equilíbrio resulta da geometria e pré-tensão imposta (Figura 2.6-2 e Figura 2.6-3, ver Anexo A), (KOENEN, 2012). Assim,

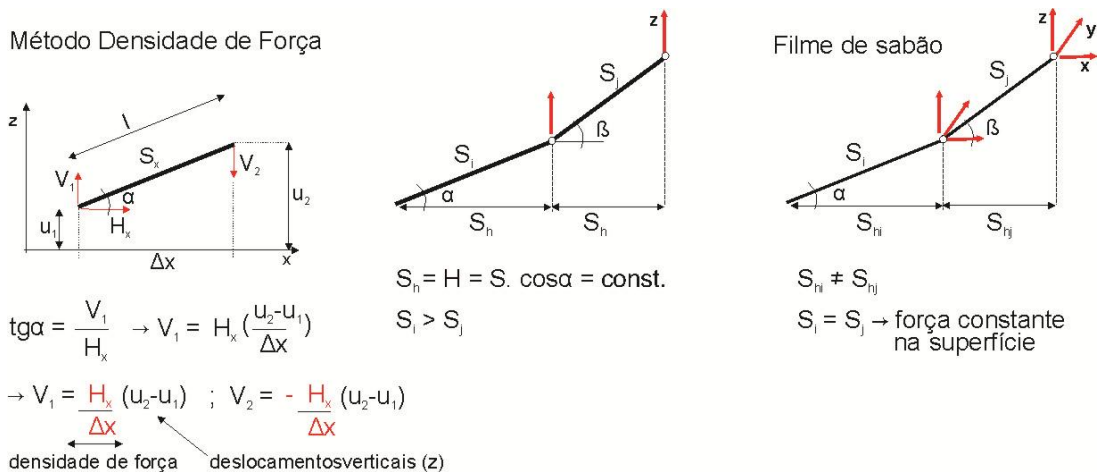
segundo Wagner (2005), a força e o comprimento de cada elemento são parâmetros livres na busca do equilíbrio tridimensional.

Figura 2.6-2 – Forma de equilíbrio encontrando o equilíbrio vertical



Fonte: WAGNER (2005), p.4.

Figura 2.6-3 – Método densidade de força



Fonte: KONEN (2011), KONEN (2012).

É interessante comparar essa aproximação com o comportamento da superfície do filme de sabão (superfície mínima). Enquanto, no MDF considera-se constante a componente horizontal da força de pré-tensão atuante em cada elemento de barra (para qualquer ângulo), no filme de sabão, a variação das componentes XYZ das forças de tração, que atuam em cada nó, define o equilíbrio e a tensão constante nessa superfície, conforme Figura 2.6-3 (informação verbal)¹⁷.

17 KOENEN, Reinhold. Institut für Metall-und Leichtbau. Universität Duisburg Essen - Design of lightweight shell structures – Master course, elective module, 2011. [explicação pessoal e croquis do autor]

2.6.2 ANÁLISE NUMÉRICA – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos Elementos Finitos fornece recursos à simulação estrutural da forma de equilíbrio da membrana e de toda a estrutura, considerando as propriedades dos materiais e a ação de carregamentos.

Segundo Azevedo (2003), o MEF fundamenta-se da discretização ou subdivisão de uma estrutura (todo) em subestruturas (partes ou elementos), sendo que cada elemento apresenta comportamento conhecido ou assumido. Assim, o comportamento aproximado de toda a estrutura é avaliado como a soma do comportamento das partes.

No caso não linear, a solução é obtida por um método em geral iterativo, ou seja, são necessárias várias etapas de cálculo em que a solução é continuamente aproximada até estar 'correta' dentro de determinada tolerância.

2.6.3 DEFINIÇÃO DOS PADRÕES DE CORTE DA SUPERFÍCIE

Como o tecido estrutural é produzido por um processo industrial, em larguras que variam aproximadamente de dois a cinco metros, a forma tridimensional da superfície da membrana (forma de equilíbrio) é modulada e planificada para sua manufatura.

Nesse procedimento, a superfície tridimensional é inicialmente dividida em padrões ou faixas em dupla curvatura. Para definição desses padrões, é necessário encontrar as linhas geodésicas na superfície. Esse processo usa, na maioria dos casos, trajetórias geodésicas¹⁸ (WAGNER, 2005). Essas faixas em dupla curvatura são projetadas no plano bidimensional, sendo os moldes de corte do material, definindo os painéis planos (Figura 2.6-4). Esses painéis planos são unidos (ex. solda e/ou costura) para compor a forma final da superfície (SEIDEL, 2009).

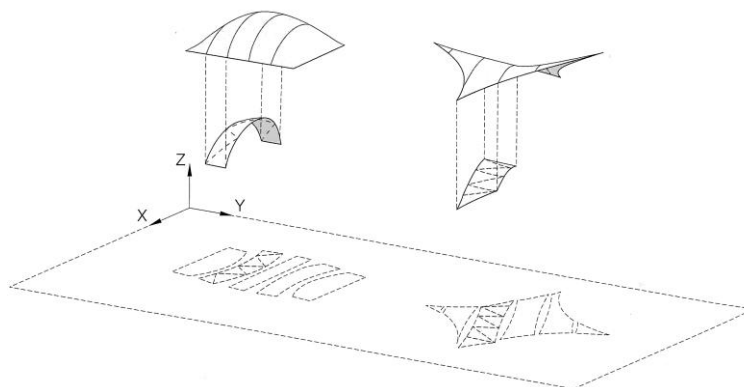
O procedimento de planificação da superfície de dupla curvatura anticlástica causa distorções dimensionais (LEWIS, 2003). Isso ocorre porque a superfície anticlástica não é desenvolvível¹⁹, ou seja, não pode ser aberta e projetada de modo

18 A trajetória geodésica pode ser descrita como a menor distância entre dois pontos numa superfície. Na superfície bidimensional, são linhas retas e na superfície esférica, arcos de grandes círculos formados pela intersecção da esfera com o plano (que passa por dois pontos e o centro da esfera), por exemplo, a linha do equador. Além disso, pode ser “definida como a projeção ortogonal do raio de curvatura sobre o plano tangente à superfície, no ponto considerado” (ZHANG E LUO, 2002 apud DIAS JUNIOR, 2006, p.18).

19 Considerando a superfície representada por uma rede de cabos com malha triangular, “a superfície desenvolvível é caracterizada pela seguinte condição matemática: a soma dos ângulos de triângulos que se encontram num ponto é igual a 360°... Nas superfícies com mesma curvatura (ex. esfera) a soma dos ângulos é

que toda sua superfície esteja contida sobre o plano, como os cones e cilindros. Conforme Otto *et al.*(1983), essas distorções dependem do grau da curvatura da superfície, dos limites do segmento projetado e do método de projeção escolhido. Em geral pode-se dizer que as distorções aumentam com o tamanho do segmento projetado.

Figura 2.6-4 – Definição dos padrões de corte e planificação da superfície



Fonte: KNIPPERS *et al.*, 2011, p.146.

Conforme observado no item 2.6.1, a forma de equilíbrio é a base dos padrões de corte. Entretanto, essa forma resulta do procedimento de busca do equilíbrio tridimensional da superfície, e não considera o comportamento do material. Conforme Wagner (2005), o comportamento da forma de equilíbrio assemelha-se ao comportamento do filme de sabão, ou seja, não tem resistência ao cisalhamento.

Entretanto, a forma real das estruturas de membranas tensionadas é influenciada pelo comportamento do material e pelas distorções do processo de planificação. Assim, a geometria e a distribuição das tensões da forma real são diferentes das previstas na forma de equilíbrio. Essas diferenças podem ser vistas nas rugas e distorções da superfície e são causadas pela orientação e pela deformação de cisalhamento do material, rigidez das uniões e do processo de pré-tensão (WAGNER, 2005).

Então, para definir de forma adequada os padrões de corte da superfície, é importante conhecer as deformações nas direções do material. Tal informação se respalda nos testes do material e guiam o procedimento conhecido como compensação. Esse possibilita corrigir ou compensar o tamanho dos painéis bidimensionais, de tal forma que a membrana possa adotar a forma especificada no

menor que 360°, e nas superfícies com curvaturas opostas (ex. parabolóide hiperbólico) a soma é maior que 360°” (OTTO, *et al.*, 1983, 246-247p. tradução nossa).

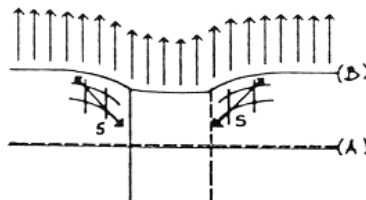
tempo. Isso quer dizer que no estado relaxado, o painel plano deve ser menor pela mesma quantidade que esse vai se deformar sob pré-tensão (BLUM, 1982).

União dos painéis

A união dos painéis tem a função de aplicar ou transportar forças. Entretanto, esta “representa uma descontinuidade geométrica no fluxo de forças na superfície curva da membrana” (SEIDEL, 2009, p.45), e interfere no comportamento da membrana.

Além disso, a união é uma área que tem mais material e maior rigidez que o painel plano. Portanto, apresenta menor deformação. Assim, na região adjacente à união podem-se observar rugas por causa da menor deformação da união (OTTO *et al.*, 1983), conforme Figura 2.6-5.

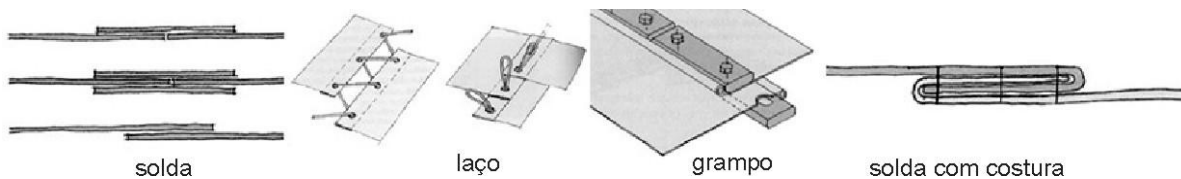
Figura 2.6-5 – Detalhe da união: região menor deformação



Fonte: OTTO *et al.*, 1983, p.78.

A união dos painéis planos pode ser realizada por solda, adesivos, costura, laços ou grampos (Figura 2.6-6). A solda a quente é o tipo de união mais utilizada, por causa da sua resistência a água e facilidade de controle do processo de soldagem durante a manufatura da superfície (FOSTER; MOLLAERT, 2004).

Figura 2.6-6 – União de tecidos



Fonte: FOSTER; MOLLAERT, 2004, p.152, p.154, p.153, p.151.

No processo de união dos materiais por meio de soldagem, as extremidades dos painéis são superpostas e o calor e a pressão aplicados fundem a cobertura dos materiais. Não há conexão mecânica entre os fios do tecido. A aderência da cobertura é que transporta a tensão dos fios do tecido de um lado da união para o outro lado.

Segundo Seidel (2009), a força e a qualidade da solda dependem da aderência do revestimento ao tecido, da largura da solda e das condições de produção. Entretanto, com o aumento da temperatura a cobertura tende a amolecer e a adesão tem sua eficiência reduzida.

2.7 DESAFIOS DO PROCESSO DE PROJETO E DE CONSTRUÇÃO NO BRASIL

Durante a fase inicial da pesquisa foi realizado o acompanhamento de coberturas em membrana em construção, aqui tratados como estudos de campo. Teve-se por objetivo compreender as interfaces e os procedimentos de trabalho (projeto e construção) dessas estruturas no Brasil, e investigar os fatores que afetam a geometria e o comportamento da membrana estrutural.

Essa investigação se apoiou em entrevistas realizadas com as equipes de projeto, construção e com os coordenadores dos empreendimentos, bem como pelo acompanhamento e registro fotográfico dos processos construtivos. A etapa final abrangeu a análise dos procedimentos e dos desafios encontrados.

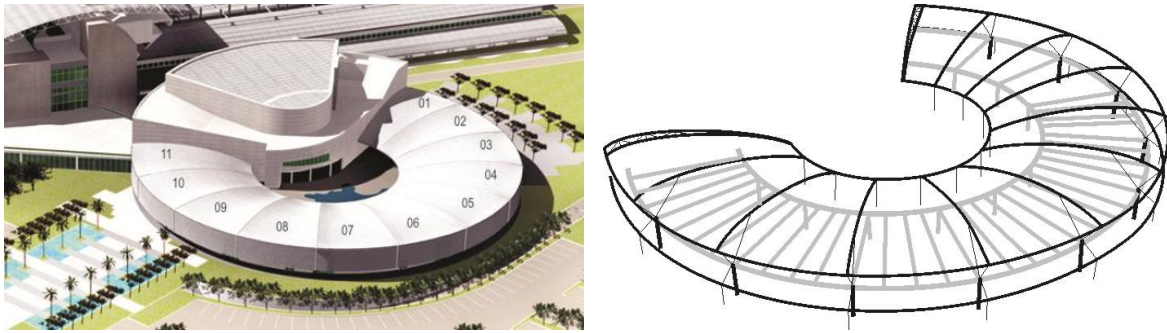
O primeiro estudo compreende a cobertura em membrana tensionada do Centro de Convenções/Cenpes II, Petrobras, RJ, empreendimento Petrobras/CNC; o projeto foi elaborado pelos arquitetos Siegbert Zanettini e José Wagner Garcia, desenvolvido pela Zanettini Arquitetura, sendo a cobertura construída pela Fiedler-Tensoestrutura no período de agosto/2009 a janeiro/2010. O segundo envolve a cobertura da Praça do Boulevard Cidade Nova, RJ, empreendimento Grupo Synthesis/Confidere, cujo projeto foi elaborado e desenvolvido pela Ruy Rezende Arquitetura, sendo a cobertura construída pela Tensitex no período de setembro a outubro de 2009. Ambas as coberturas, tiveram cálculo estrutural da membrana realizado pelo engenheiro Prof. Ruy Marcelo Pauletti e do sistema suporte pela engenheira Prof^a. Heloísa Maringoni.

2.7.1 DESCRIÇÃO DAS COBERTURAS EM MEMBRANA

A cobertura em membrana do Centro de convenções do Cenpes II apresenta forma de um anel circular, dividida em 11 módulos de selas, com suave curvatura (área total 3741m²). Esses módulos são independentes e rigidamente vinculados ao sistema suporte. O volume da edificação também é envolvido por uma superfície em membrana, tratada como membrana lateral, e produzida como módulo único (Figura 2.7-1).

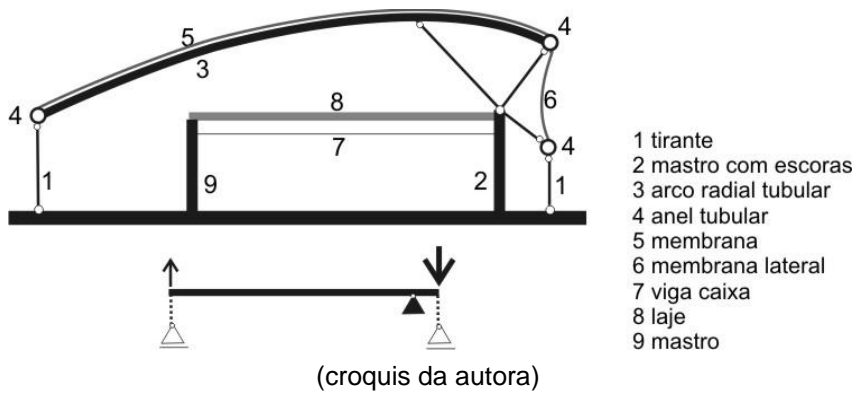
O sistema suporte é composto por arcos radiais apoiados em mastros com escoras e barras sob pré-tensão. Esses são envolvidos por anéis tubulares periféricos concêntricos (interno e externo) cujas extremidades vinculam-se a estrutura do auditório (Figura 2.7-2).

Figura 2.7-1 – Vista aérea da cobertura do Centro de Convenções Cenpes II; Sistema suporte cobertura.



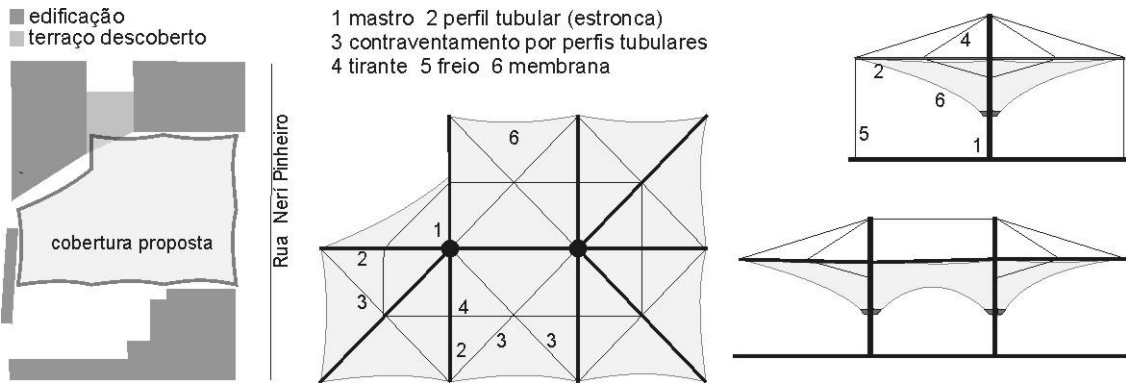
Fonte vista aérea: ZANETTINI; GARCIA, 2006; sistema suporte: croquis da autora

Figura 2.7-2 – Corte esquemático – sistema suporte da cobertura do Centro de Convenções Cenpes II



A cobertura da Praça do Boulevard Cidade Nova é um duplo conóide invertido (área 524m²). É suportada por perfis tubulares (estroncas) conectados de forma articulada a dois mastros tubulares rigidamente vinculados à placa de base. Esses perfis são sustentados por estais no plano vertical (sendo proposto inicialmente, o contraventamento desses perfis no plano horizontal). O topo da cobertura vincula-se ao sistema suporte por meio de cabos de borda que se ancoram nas extremidades dos perfis, e a base conecta-se aos anéis cônicos vinculados aos mastros. (Figura 2.7-3).

Figura 2.7-3 – Cobertura da Praça, Boulevard Cidade Nova



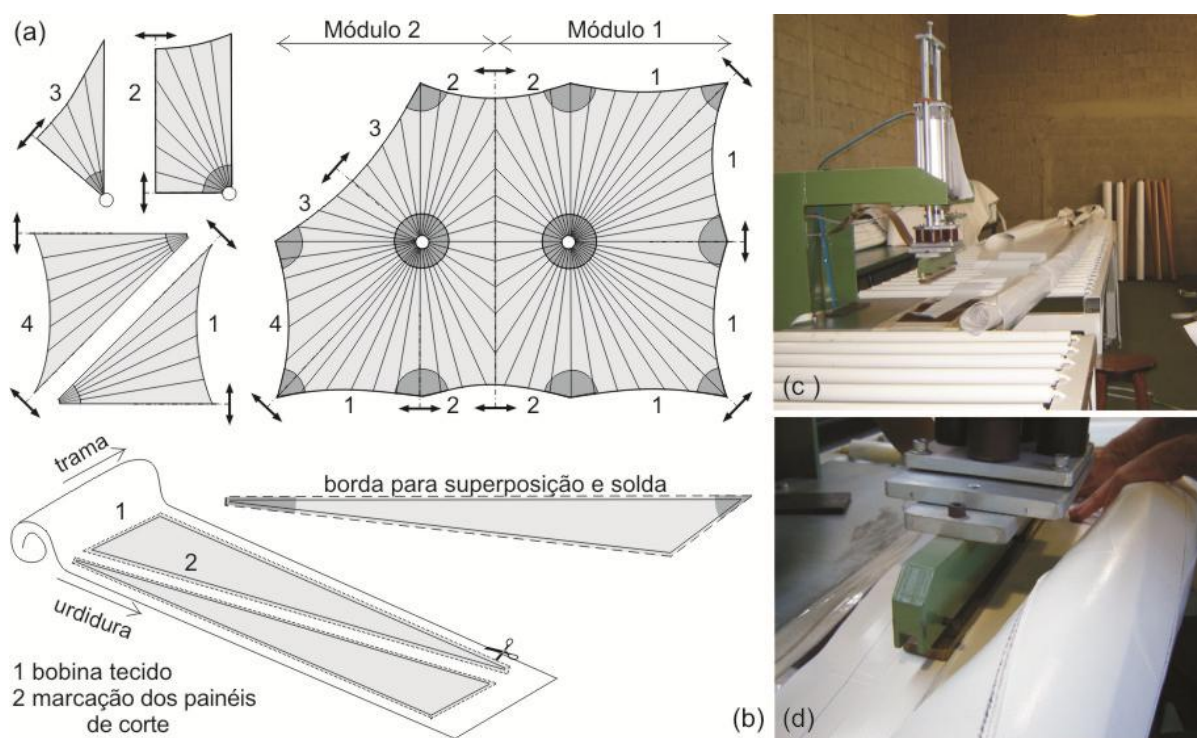
Plantas: situação, e cobertura, cortes: transversal e longitudinal; (croquis da autora).

2.7.2 PROCEDIMENTOS DE MANUFATURA E MONTAGEM

O procedimento de manufatura das superfícies das membranas foi similar. Foram realizados em fábrica e envolveram a marcação, o corte e a união dos painéis (soldagem a quente com pressão, de 180° a 220°C, por radiofrequência), conforme Figura 2.7-4. Em seguida, foram realizados os acabamentos das bordas. Posteriormente, as superfícies planificadas foram dobradas (em zigue-zague para não danificar o tecido e facilitar sua abertura) e embaladas para o transporte.

Ambas as superfícies de membrana utilizaram tecido em poliéster coberto por PVC. Entretanto, o material especificado para as superfícies do Centro de convenções apresentava também uma camada de tratamento de superfície em PVDF. Nesse caso foi necessário realizar a abrasão das bordas dos painéis planos para a retirada desta camada antes da soldagem. Além disso, as extremidades dos painéis foram sobrepostas e tensionadas durante o procedimento de soldagem.

Figura 2.7-4 – Procedimento de manufatura da superfície – cobertura da Praça



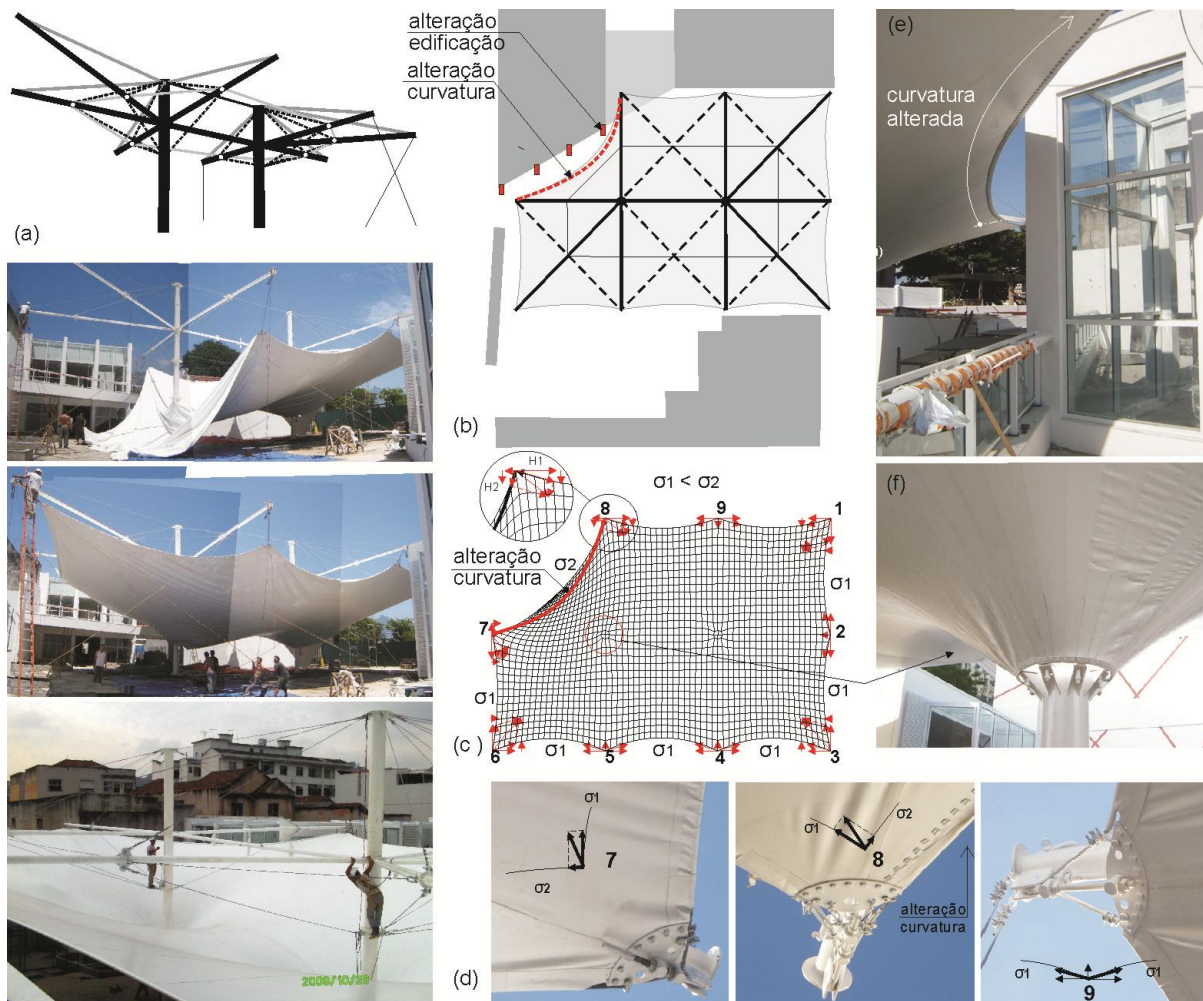
(a, b) marcação dos painéis no tecido para corte; (c, d) soldagem dos painéis; (fotos e croquis da autora).

A cobertura da Praça foi realizada como módulo único, sendo posicionada no local da obra antes da montagem do sistema suporte. No Centro de convenções, os

módulos da cobertura (em forma de sela) foram montados de forma independente e a membrana lateral como módulo único.

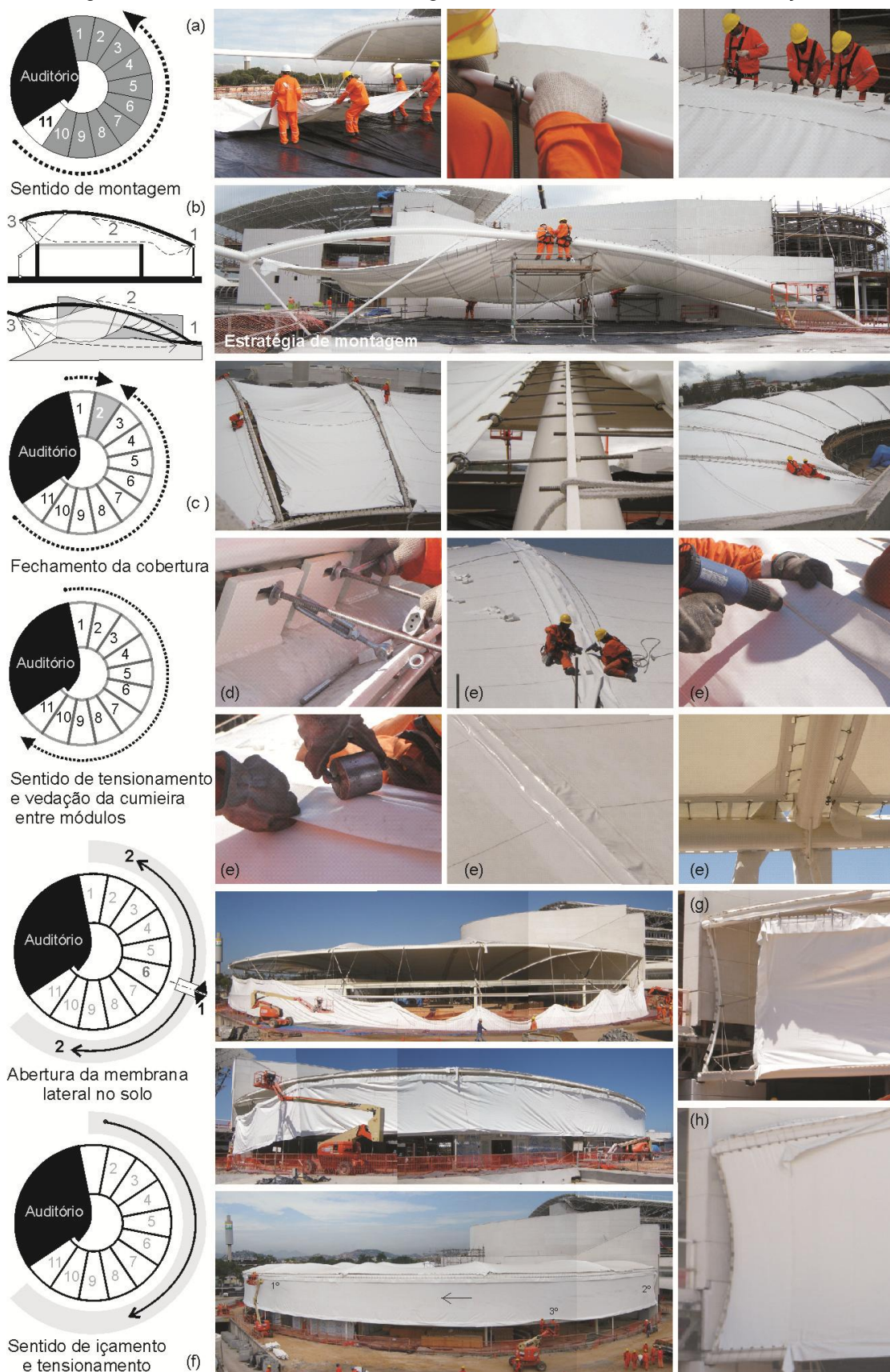
O procedimento de montagem das coberturas também foi similar e envolveu os seguintes passos: a abertura, o içamento e a conexão da superfície da membrana ao sistema suporte, e o tensionamento da superfície. O içamento e a conexão inicial da superfície ao sistema suporte foram realizados manualmente, por meio de cordas. Essas facilitam o manuseio desse material flexível e são de fácil remoção da estrutura. O ajuste da superfície à estrutura suporte foi realizado em etapas sequenciais de tensionamento e pausa, objetivando a acomodação e o alongamento do material conforme pode ser observado na Figura 2.7-5 e Figura 2.7-6.

Figura 2.7-5 – Procedimento de montagem – cobertura da Praça



(a) içamento da superfície; (b) alterações da edificação (pilares posicionados no plano externo da edificação) causaram a modificação da borda da superfície no local da obra; (c) direção das forças que atuam no cabo de borda; (d, f) conexões e base mastro após a alteração da curvatura (e) curvatura alterada; fotos e desenhos da autora, exceto da foto da vista superior da cobertura de Ozana Vieira; malha da cobertura realizada pelo construtor (Tensitex).

Figura 2.7-6 - Procedimento de montagem – cobertura do Centro de convenções



(a,b) sentido e estratégia de montagem dos módulos da cobertura; (c) fechamento da cobertura; (d) tensionamento; (e) vedação da cumieira entre módulos; (f) montagem da superfície lateral; (g,h) acréscimo de painel à membrana lateral via solda no local; (fotos e croquis da autora).

Na cobertura de borda flexível, como a cobertura da Praça, o ajuste de cada conexão foi desafiador. O trabalho aéreo envolveu o correto posicionamento das extremidades das superfícies às conexões situadas nas extremidades das estroncas para sua vinculação. Em seguida, foi realizada sua conexão aos anéis cônicos. O ajuste das conexões possibilitou pre-tensionar o cabo contínuo e toda a superfície.

Na cobertura de borda rígida, como a cobertura do Centro de convenções, a montagem compreendeu o posicionamento e o ajuste sequencial dos parafusos em pequenos trechos de forma minuciosa.

Observou-se também que as etapas iniciais de içamento e tensionamento inicial não podem ser executadas em determinadas condições climáticas (chuva e vento), pois a superfície ainda não se encontra em equilíbrio e pode ser danificada.

2.7.3 PROCEDIMENTOS DE TRABALHO E DESAFIOS

Desafios da etapa de projeto

Verificou-se a contratação independente das etapas de projeto e de construção, pelos responsáveis pelos empreendimentos, dificultando o diálogo entre estas equipes.

Observou-se também, que no Brasil ainda não é usual monitorar o procedimento de projeto de estruturas de pequeno e médio porte com dados provenientes de testes do material e de vento. Por causa das incertezas dos dados avaliados (material, vento), é usual adotar simplificações nas simulações numéricas.

Desafios da etapa construtiva

Observou-se que as incertezas em relação ao comportamento do material afetam principalmente o procedimento de planificação da superfície, dificultando o trabalho dos engenheiros e principalmente dos construtores (responsáveis pela manufatura e montagem da estrutura de membrana).

Essas incertezas reduzem a precisão da etapa de projeto e dificultam o correto ajuste da forma dos painéis. Conseqüentemente o corte excessivo de material pode dificultar na montagem, e mínimos ajustes podem requerer novas etapas de pré-tensão da superfície durante a sua vida útil.

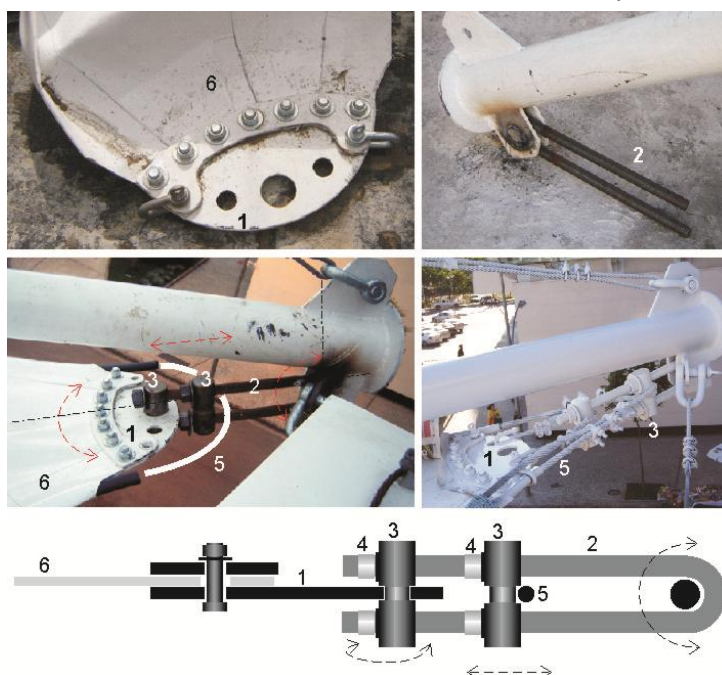
Então, para lidar com as deformações do material e as imprecisões construtivas que porventura podem ocorrer, foram observadas algumas estratégias como a elaboração de conexões com grande capacidade de ajuste (Figura 2.7-7, Figura 2.7-8). Essas se caracterizam pelo arranjo modular de componentes de fácil fabricação, transporte e montagem.

Figura 2.7-7 – Conexão de borda rígida desenvolvida pelo eng. Prof. Ruy Pauletti



componentes: esticador com olhal, porcas, vergalhão (fotos da autora).

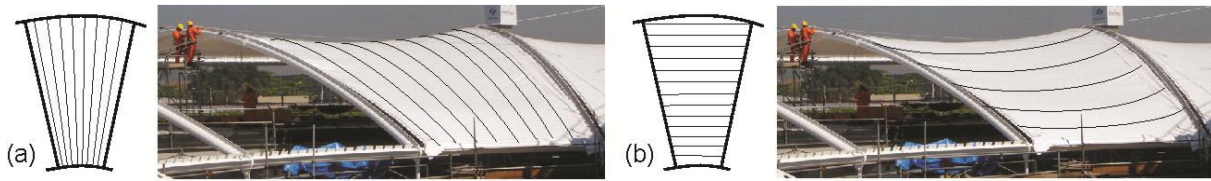
Figura 2.7-8 – Conexão de borda flexível desenvolvida pela Tensitex



componentes: (1) terminal; (2) barra rosqueada; (3) cilindro de aço; (4) porca; (5) cabo de aço; (6) membrana (desenho esquemático da conexão e fotos da autora).

Algumas dessas estratégias, propostas pelos construtores, resultam também em alterações na geometria da membrana planificada e do sistema suporte, o que causa retrabalho nas etapas de projeto. Tem-se como exemplo a nova modulação proposta para a superfície na cobertura do Centro de convenções, onde os fios do material foram orientados paralelos à união, buscando minimizar as distorções do material (Figura 2.7-9).

Figura 2.7-9 – Modulação da superfície (alteração proposta) – cobertura do Centro de convenções



(a) proposta inicial: modulação radial, (b) alteração proposta e realizada: modulação circunferencial; (desenho esquemático sobre foto, realizado pela autora).

Na cobertura do Centro de convenções foi também proposta a inclusão de arcos tubulares nas extremidades dos anéis circunferenciais para ancoragem da membrana lateral, e a alteração das vigas treliçadas situadas nas extremidades da cobertura por perfis tubulares (Figura 2.7-10).

Figura 2.7-10 – Sistema suporte da cobertura do Centro de Convenções – alteração proposta

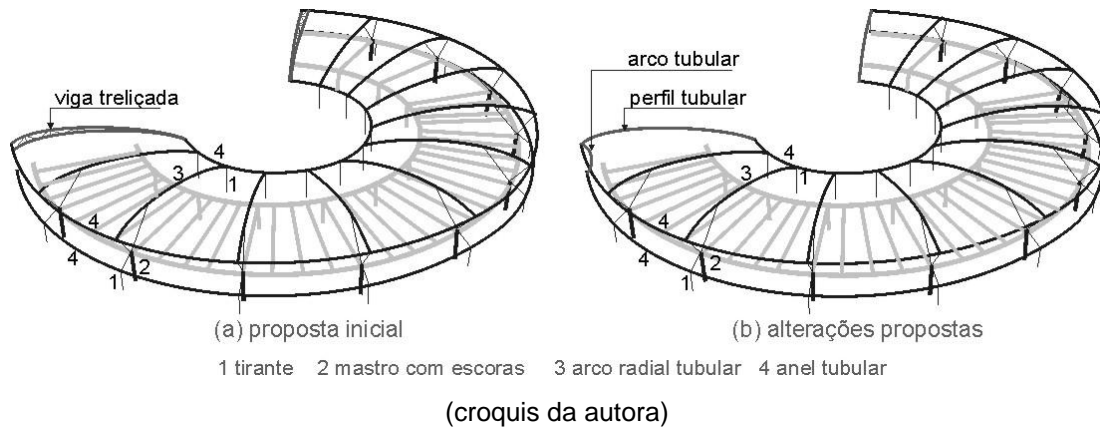
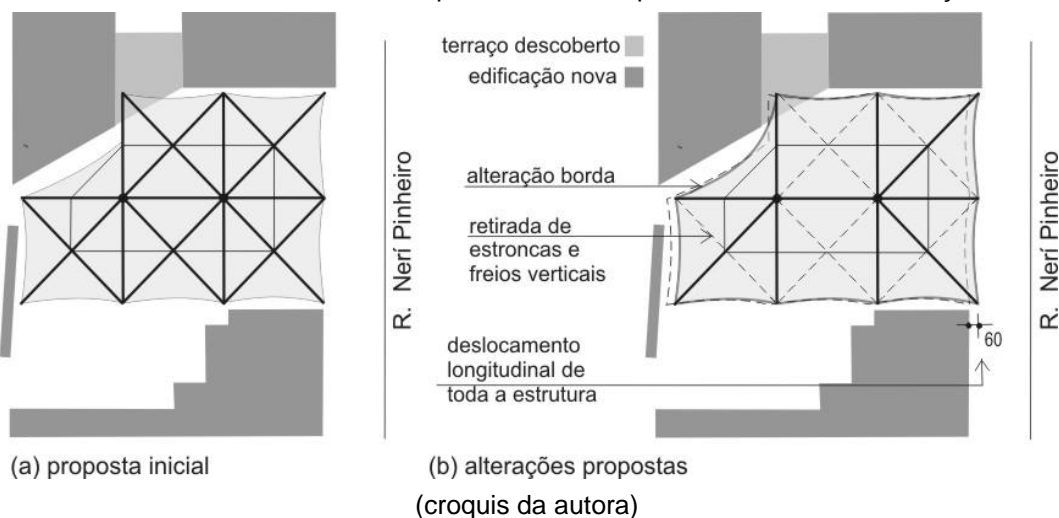


Figura 2.7-11 – Geometria da borda da superfície e sist. suporte da cobertura da Praça - alterações

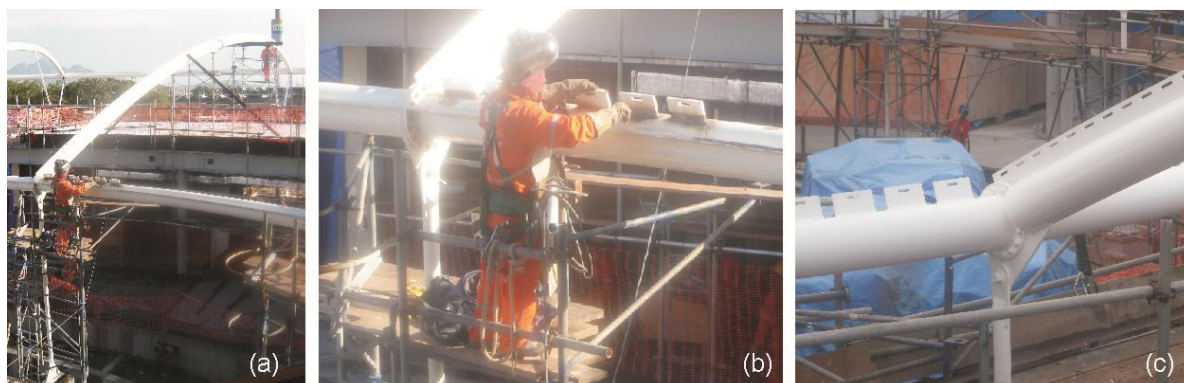


Na cobertura da Praça, observaram-se ajustes na geometria da borda da superfície. Verificou-se também a retirada do contraventamento dos perfis tubulares

(estroncas) no plano horizontal e freios verticais, conforme Figura 2.7-11, dificultando o ajuste inicial do sistema suporte durante a montagem. Houve também a alteração da especificação do material previamente especificado, por causa dos prazos de importação do produto.

Verificaram-se imprecisões de fabricação dos componentes do sistema suporte, em ambas as estruturas. Na cobertura do Centro de convenções, foi necessária a soldagem de nova fileira de placas ao anel periférico interno (Figura 2.7-12). Verificou-se também ausência de furos nessas placas, previstos para conexão da vedação entre os módulos da superfície. Então, essa vedação em membrana foi soldada (Figura 2.7-6-d-e). Registrou-se também a diferença de dimensão da membrana lateral em relação ao perímetro da edificação, necessitando a solda de um painel na obra (Figura 2.7-6-g-h).

Figura 2.7-12 – Imprecisão do sistema suporte – cobertura do Centro de convenções



(a, b, c) inclusão e soldagem de nova fileira de placas ao anel periférico interno.

Na cobertura da Praça, verificou-se imprecisão de fabricação do mastro. A conexão da estronca apresentou desnível, dificultando seu nivelamento (Figura 2.7-13).

Figura 2.7-13 – Imprecisão do sistema suporte – cobertura da Praça



conexão das estroncas no mastro 1 em desnível com o mastro 2 (desenho sobre foto, realizado pela autora).

Constatou-se também a modificação construtiva na edificação situada nas proximidades da cobertura da Praça (pilares posicionados no plano externo da edificação). Então, foi necessário afastar a superfície dessa edificação, ocasionando o ajuste da curvatura de borda da superfície durante a montagem. Essa intervenção ocorreu uma região de elevada tensão na superfície e no cabo de borda. A modificação da geometria alterou de forma significativa o campo de tensões da superfície, dificultando o ajuste da superfície aos pontos de ancoragem e causando deformações visíveis (Figura 2.7-5– b,c,d,e,f).

Esses estudos evidenciaram que erros ou modificações geometria das membranas alteram o fluxo das forças, causando distorções e ou deformações visíveis que não são camufladas. Observou-se também que o comportamento dessas estruturas é influenciado pela organização, forma e dimensões dos painéis planos, bem como pelo comportamento do material da membrana.

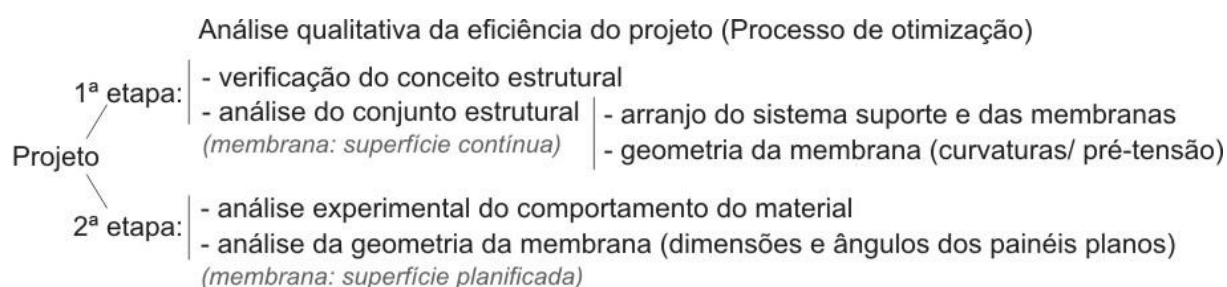
As imprecisões observadas demonstraram que nem sempre as estratégias propostas pelos engenheiros e construtores conseguem abranger todas as incertezas, como foi observado. Além disso, confirmaram a importância do detalhamento com maior precisão dos componentes, bem como do acompanhamento da sua manufatura, evitando alterações na membrana na etapa de montagem.

Verificou-se que é importante também conhecer o comportamento do material da membrana e as particularidades construtivas (manufatura e montagem) desse sistema, bem como favorecer trabalho em equipe formada por arquitetos, engenheiros e construtores, somando conhecimento e experiências que contribuem para otimizar a configuração proposta e para o desempenho da construção.

3 ESTUDO DE CASO

Conforme as estratégias identificadas na análise qualitativa de estruturas leves construídas (item 2.4.2.3), o ótimo desempenho das estruturas de membrana e redes de cabos está associado ao arranjo do conjunto estrutural, e a geometria e arranjo de todos os componentes. Verificaram-se também nos estudos de campo (item 2.7), que as incertezas em relação ao comportamento do material diminuem a precisão do modelo teórico e dificultam o correto ajuste da geometria dos painéis planos, ou seja, contribuem para reduzir a precisão da construção e o desempenho da superfície ao longo da sua vida útil.

Portanto, nessa parte do trabalho, foi realizada a análise qualitativa da eficiência de um projeto de cobertura em membrana estrutural, ou seja, a análise de desempenho de uma situação em particular, como exemplo. Este estudo de caso visou avaliar a influência da geometria da membrana e do arranjo do conjunto estrutural, bem como do comportamento do material da membrana no desempenho do sistema. Investigaram-se também os procedimentos que podem contribuir para cercar as falhas metodológicas da etapa preliminar de projeto. Foi realizado em duas etapas.



A primeira etapa dessa análise envolveu a verificação do conceito estrutural desse projeto (aqui denominado modelo original ou A1) e a busca do seu ótimo desempenho. Para a análise do modelo original foi investigado um conjunto de variáveis. Estas geraram alterações no arranjo do conjunto estrutural (sistema suporte e membrana) e na geometria da membrana (superfície tridimensional contínua) do modelo original e deram origem a modelos com geometrias distintas. Em seguida, foi investigado o comportamento e o desempenho destes modelos sob a ação de cargas. Tal investigação ou processo de otimização do modelo original envolveu a análise estrutural preliminar e a comparação destes modelos, buscando

identificar qual apresentou melhores resultados e quais variáveis contribuíram para o ótimo desempenho deste projeto.

A segunda etapa dessa análise compreendeu a análise da geometria da membrana planificada. Esta análise apoiou-se na investigação experimental do comportamento material da membrana e na análise preliminar realizada na primeira etapa. Buscou-se ampliar a compreensão das particularidades do material selecionado e verificar a influência do seu comportamento (deformações e distorções) e da distribuição das tensões na geometria da superfície final, formada por painéis planos. Investigaram-se também os parâmetros e procedimentos que podem contribuir para minimizar as diferenças entre a modelo real e modelo teórico e cercar as falhas metodológicas dessa etapa preliminar de trabalho.

3.1 1ª ETAPA DA ANÁLISE QUALITATIVA DA EFICIÊNCIA DE UM PROJETO

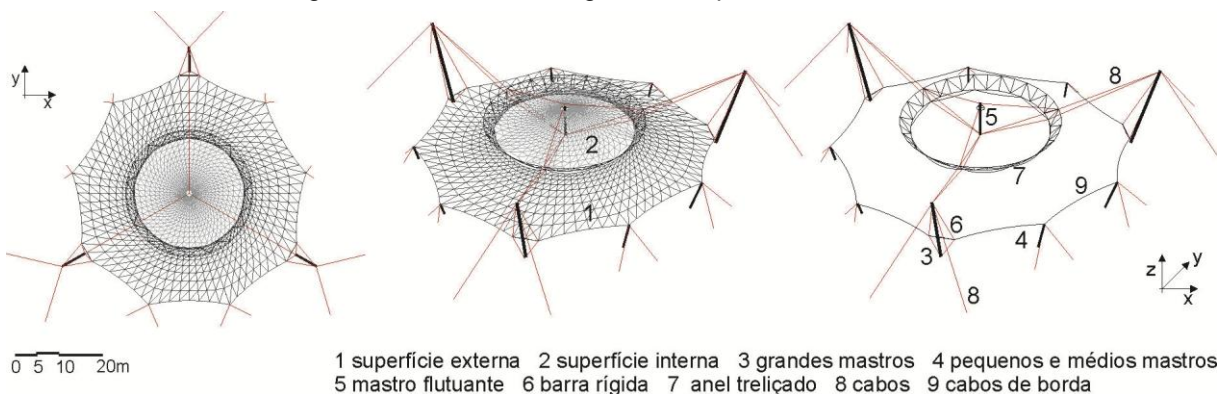
3.1.1 CONCEITO ESTRUTURAL DO PROJETO QUE NORTEIA A ANÁLISE

O projeto que norteia essa investigação é o modelo de cobertura para o anfiteatro da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), elaborado durante a pesquisa de mestrado da autora, aqui denominado como modelo original ou A1, com área coberta de aproximadamente 2000m², (Figura 3.1-1, Apêndice A).

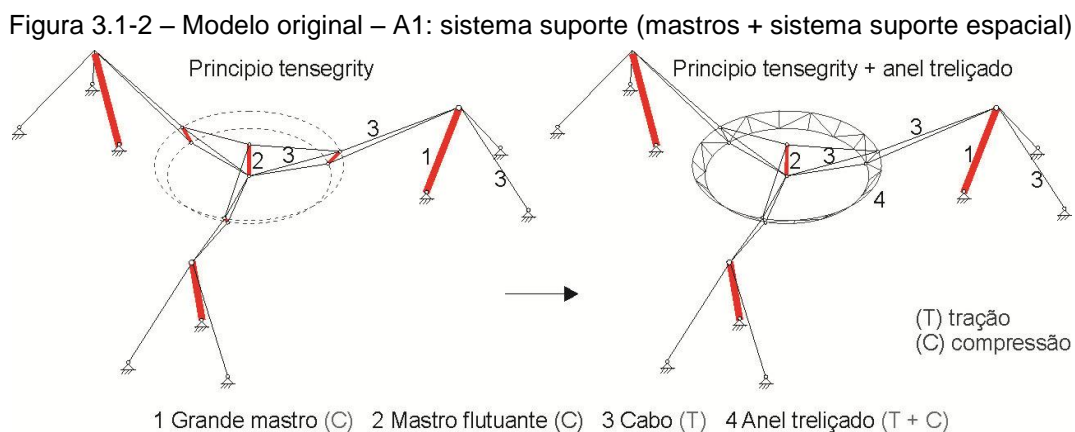
Modelo original – conceito estrutural e estratégias identificadas

O arranjo do conjunto estrutural do modelo A1 caracteriza-se pela combinação e trabalho conjunto de membranas e o sistema suporte em estado de pré-tensão.

Figura 3.1-1 – Modelo original – A1: planta e vistas 3D



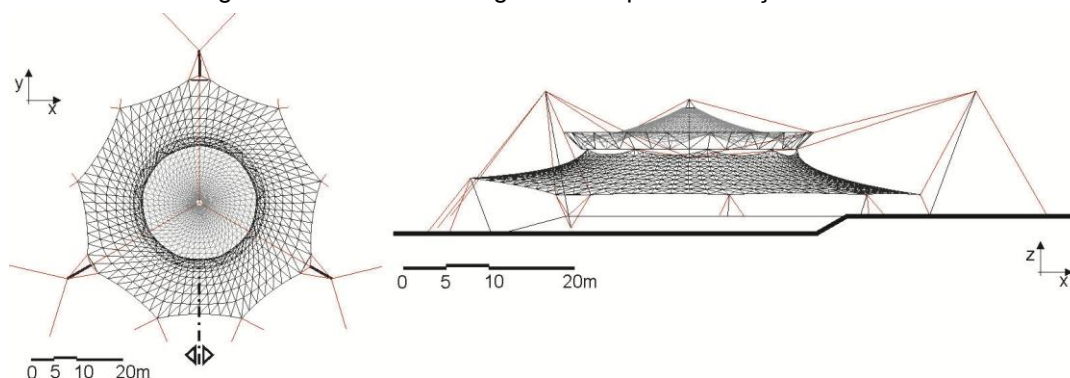
O sistema suporte compõe-se de três grandes mastros que sustentam o sistema suporte espacial, bem como pequenos e médios mastros. O sistema suporte espacial, se orienta pelo princípio *tensegrity*, sendo composto pelo arranjo espacial do mastro flutuante e anel treliçado, inseridos numa rede contínua de cabos formando um volume estável no espaço (Figura 3.1-2).



Esse modelo tem duas superfícies de membrana anticlástica, com suave curvatura, formas e comportamentos distintos, possibilitando um grande vão livre interno. A superfície interna é retrátil e composta pelo arranjo radial de nove módulos em forma de sela, e a externa é fixa, em forma de um conóide. O topo da superfície externa ancora-se no anel treliçado, e a base apoia-se no topo dos pequenos e médios mastros e nas barras flutuantes (apoiadas em cabos conectados ao topo e base dos grandes mastros).

Essa estrutura apresenta forma radial com simetria no eixo Y, por causa dos diferentes níveis de apoio da base da superfície externa, bem como diferentes níveis de ancoragem dos mastros e estais (Figura 3.1-3).

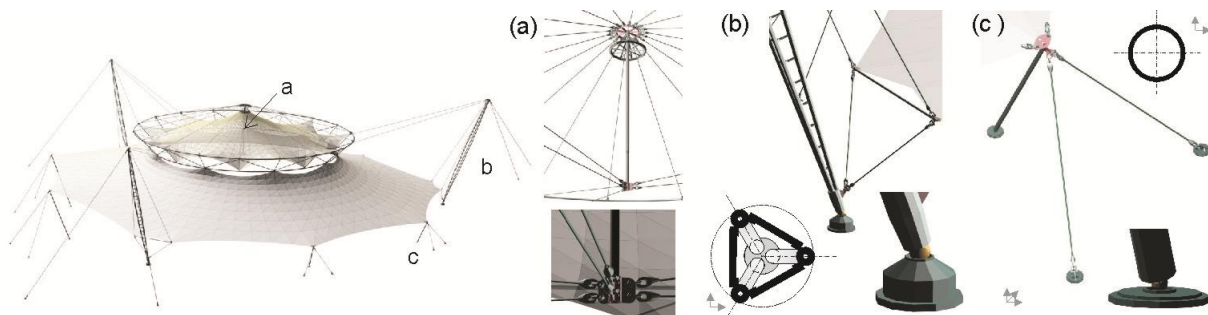
Figura 3.1-3 – Modelo original – A1: planta e seção vertical



O arranjo do conjunto estrutural apresenta similaridade à configuração de coberturas em membranas de grandes vãos (nas quais o sistema suporte é composto de mastros e o sistema suporte espacial) conforme estratégias identificadas (item 2.4.2.1, Figura 2.4-19).

No sistema suporte predominam também componentes com seção transversal circular e vazada (composta de perfis tubulares), e arranjos para evitar a flexão (ex. mastros rotulados com estais; anel trelaçado), conforme Figura 3.1-4 e estratégias identificadas (item 2.4.2.2). Entretanto, na análise preliminar proposta, todos os mastros foram avaliados com seção transversal circular.

Figura 3.1-4 – Modelo original – vista 3D e detalhe dos mastros



(a) mastro flutuante; (b) grande mastro com seção vazada e barra flutuante vinculada aos cabos; (c) mastro pequeno e médio com seção circular; Fonte: adaptado de NUNES, 2008 p.115, 116, 118, 121.

3.1.2 VARIÁVEIS QUE BALIZAM A ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DO PROJETO

A análise qualitativa da eficiência deste projeto ou a investigação do seu ótimo desempenho fundamentou-se nas estratégias de desempenho identificadas, ou seja, na busca do arranjo do conjunto estrutural cuja estabilidade global resulta do trabalho conjunto e contínuo dos componentes, e da geometria e arranjo dos componentes cuja forma revela o melhor uso do material e o menor caminho das forças (item 2.4.2.3).

Nessa investigação ou processo de otimização do modelo A1 (submetido à ação de cargas) objetivou-se maximizar a rigidez e a estabilidade global do sistema, e a capacidade das membranas de acomodação das cargas e distribuição das tensões de forma mais homogênea, com o menor peso do sistema.

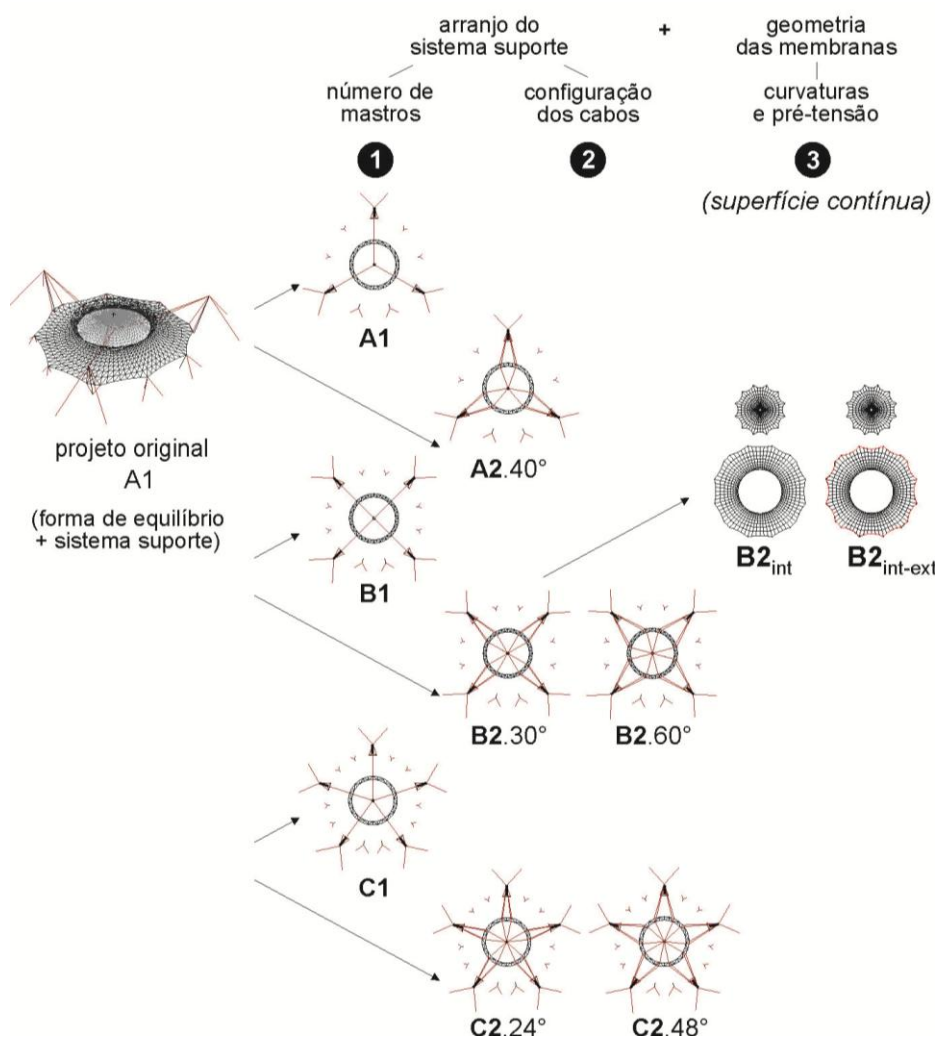
Assim, foi investigado um conjunto de variáveis que geraram alterações no arranjo do conjunto estrutural e na geometria das membranas do modelo A1. Essas variáveis são: número de mastros, configuração dos cabos, pré-tensão e curvaturas da superfície da membrana, conforme mostra a Figura 3.1-5.

Cada variável foi adicionada gradualmente ao modelo original, possibilitando observar a influência particular e do conjunto de variáveis a cada caso de análise. Assim, estas variáveis geraram ajustes na modulação das superfícies (internas e externas) e do sistema suporte (anel treliçado, mastros e cabos), e conseqüentemente modelos com geometrias distintas. Entretanto, as superfícies destes modelos conservam uma relação de proporcionalidade em relação ao campo de tensão aplicado, conforme o procedimento de definição da forma de equilíbrio das superfícies (item 3.1.4.1).

3.1.3 CASOS (VARIÁVEIS) INVESTIGADOS E MODELOS AVALIADOS

Os modelos que resultaram dos ajustes na modulação das superfícies e do sistema suporte foram reunidos em três casos de análise, de acordo com a(s) variável (eis) investigada (s) para análise e comparação (Figura 3.1-5):

Figura 3.1-5 – 1ª Etapa da análise qualitativa da eficiência do projeto - variáveis investigadas

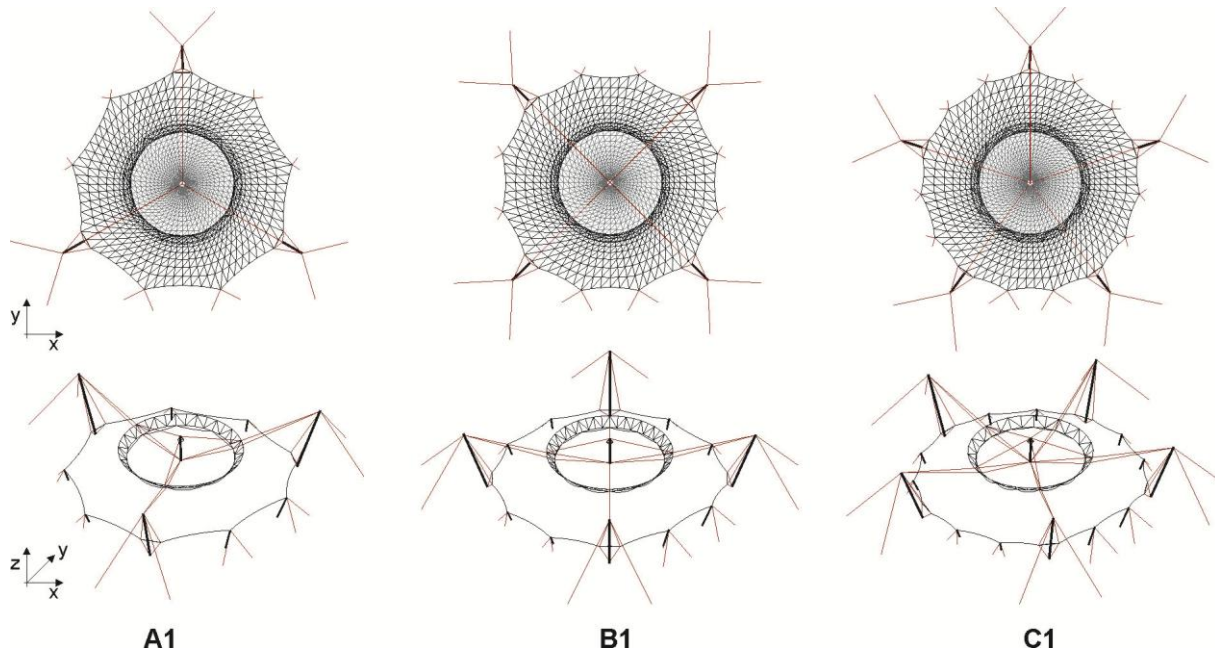


número de mastros (caso1); configuração dos cabos (caso2); geometria da membrana (caso3)

Caso 1: Número de mastros - modelos: A1, B1, C1

Avaliou-se a influência do número de mastros que sustentam o sistema suporte espacial (mastro flutuante e anel treliçado suportados por cabos). Foram propostas configurações com três, quatro e cinco grandes mastros, sendo que cada grande mastro ancora um par de cabos posicionado perpendicularmente ao anel treliçado (Figura 3.1-6).

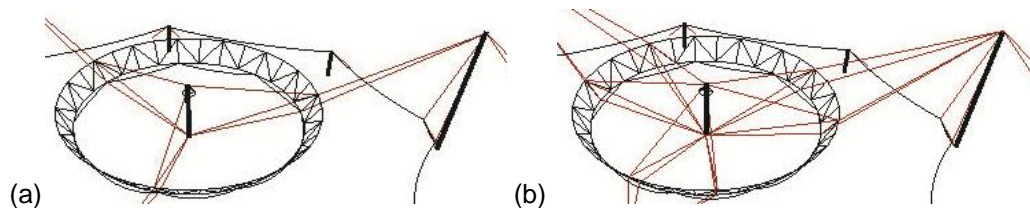
Figura 3.1-6 – Caso 1: número de mastros (variável investigada) - modelos A1, B1, C1



Caso 2: Número de mastros + configuração dos cabos - modelos A2-40°, B2-30°, C2-24°, B2-60°, C2-48°

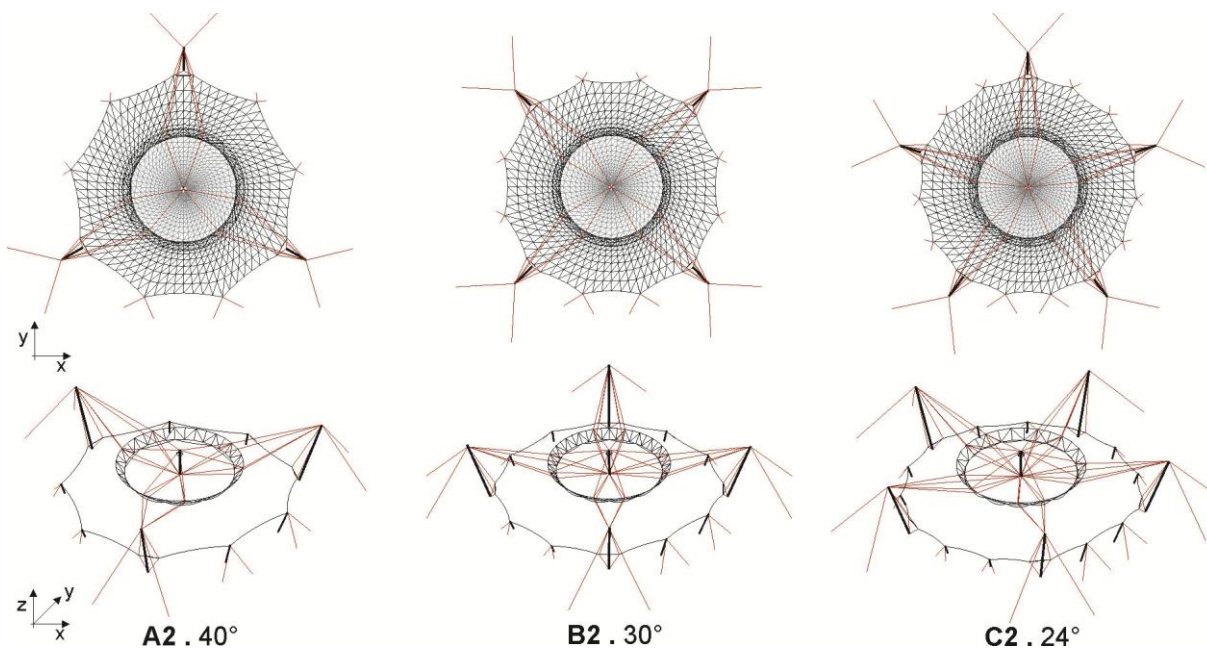
Avaliou-se, a influência da configuração dos cabos que suportam o anel treliçado e o mastro flutuante, ou seja, o arranjo dos cabos do sistema suporte espacial. Nesse caso, dois pares de cabos ancoram em três, quatro e cinco grandes mastros (Figura 3.1-7b). Verificaram-se modelos cujo ângulo entre os pares de cabos é definido por um e dois módulos da superfície interna (Figura 3.1-8, Figura 3.1-9, Figura 3.1-10, Figura 3.1-11).

Figura 3.1-7 – Configuração dos cabos que suportam o anel treliçado e o mastro flutuante (ex. modelo A1)



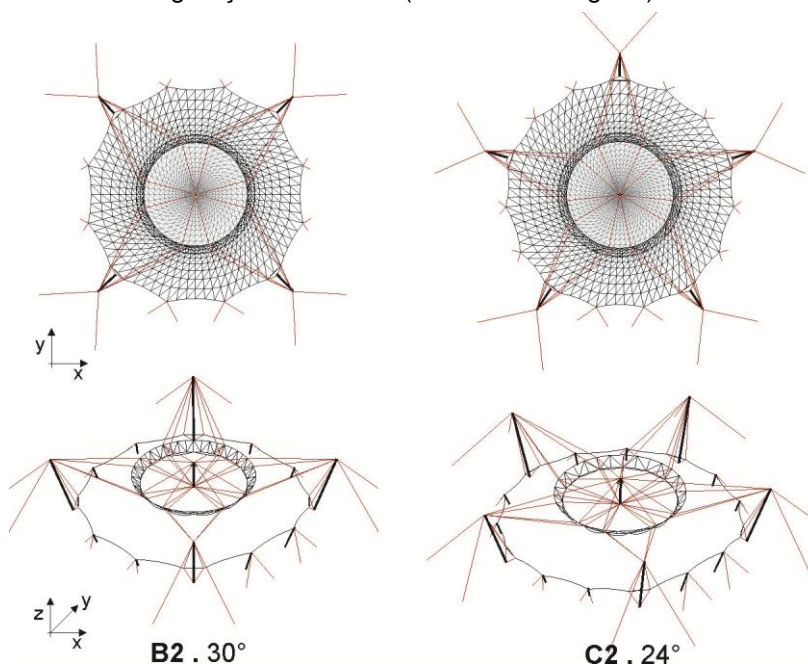
(a) caso 1 - um par de cabos, e (b) caso 2 - dois pares de cabos ancoram em cada grande mastro.

Figura 3.1-8 – Caso 2: configuração dos cabos (variável investigada) - modelos: A2.40°, B2.30°, C2.24°



(ângulo entre pares de cabos definido por um módulo da superfície interna; configuração dos cabos)

Figura 3.1-9 – Caso 2: configuração dos cabos (variável investigada) - modelos: B2.60° e C2.48°



(ângulo entre pares de cabos definido por dois módulos da superfície interna)

Figura 3.1-10 – Caso 2: ângulo entre pares de cabos definido por um módulo da superfície interna

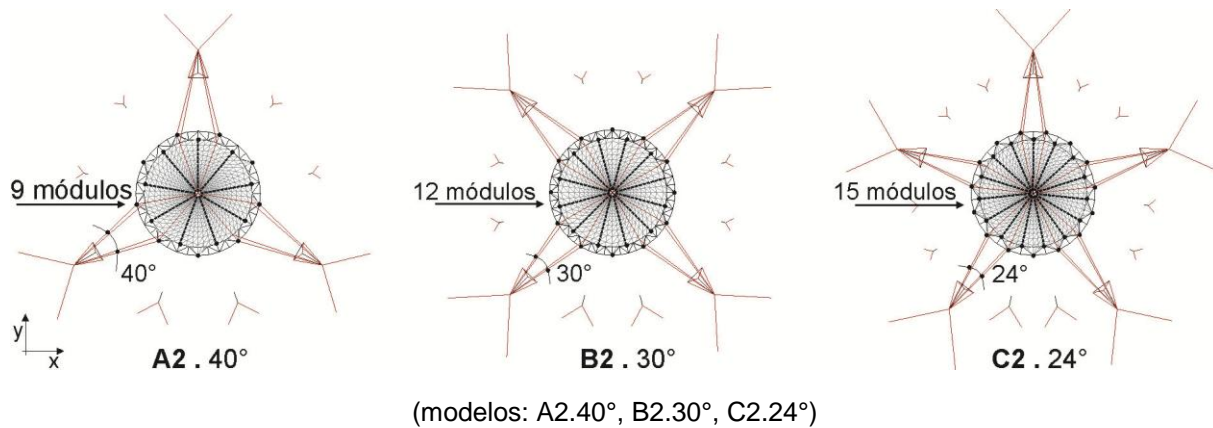
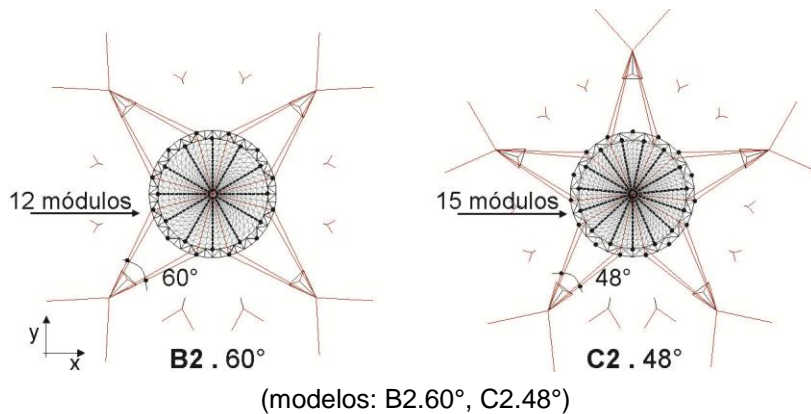


Figura 3.1-11 – Caso 2: ângulo entre pares de cabos definido por dois módulos da superfície interna



Caso 3: Número de mastros + configuração dos cabos + geometria da membrana – modelos: B2_{int}, B2_{int-ext}

Para essa investigação foi selecionado o modelo em que o anel treliçado e o mastro flutuante são suportados por dois pares de cabos que se ancoram em quatro grandes mastros, ou seja, o modelo B2-30° (Figura 3.1-8). Assim, avaliou-se a influência de alterações na geometria (pré-tensão e nas curvaturas) das membranas.

Inicialmente, alterou-se a relação da pré-tensão aplicada nas direções radial (R) e circunferencial (C) da superfície interna dando origem ao modelo B2_{int} (Figura 3.1-12).

Em seguida, modificou-se também a relação (f/l) entre a flecha das curvaturas de borda (f) e o vão entre os pontos de ancoragem (l) da superfície externa, resultando no modelo B2_{int-ext} (Figura 3.1-13). Teve-se como referência a relação flecha/vão (1/8 a 1/10) entre apoios da cobertura do Estádio Olímpico de Munich (informação verbal)²⁰.

²⁰ Informação (flecha/vão da cobertura do Estádio Olímpico) fornecida pelo Prof Dr. Baier, em dezembro de 2011.

Figura 3.1-12 – Caso 3: geometria da membrana interna (variável investigada)

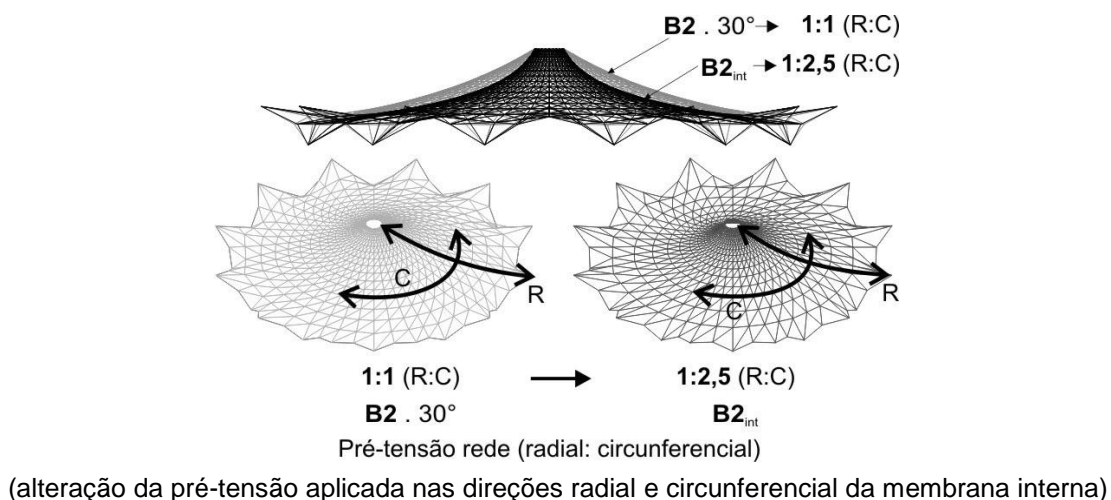
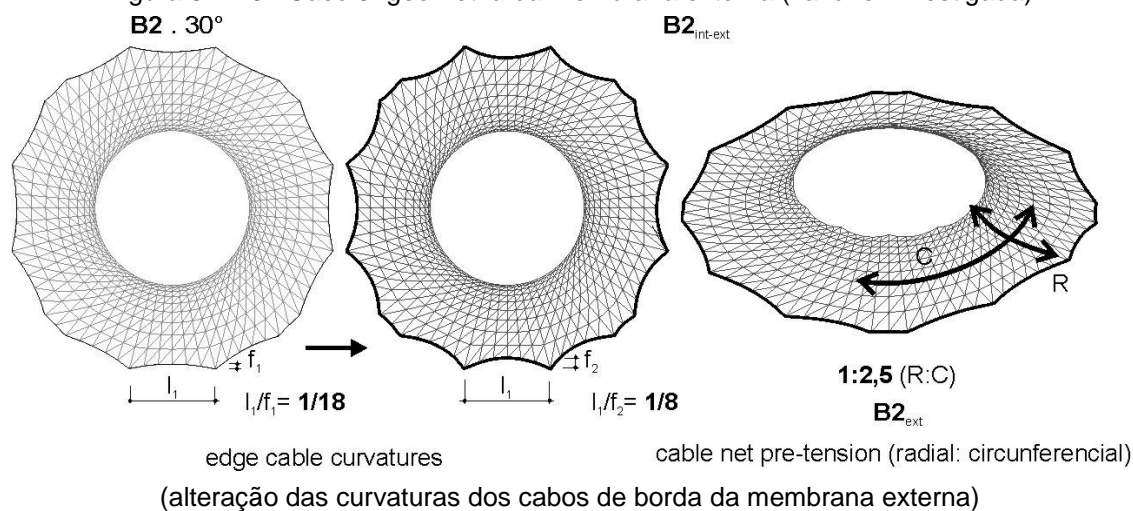


Figura 3.1-13 – Caso 3: geometria da membrana externa (variável investigada)



Esse processo de otimização do modelo original envolveu inicialmente:

- a definição dos métodos de representação e simulação preliminar dos modelos;
- o procedimento de representação e simulação dos modelos;
- a definição do material da membrana e dos carregamentos impostos;
- a definição das restrições e das avaliações de desempenho propostas para a membrana e o sistema suporte.

Em seguida, foi avaliada a resposta de cada modelo, ou seja, a distribuição das tensões na membrana (a capacidade de acomodação das cargas, a existência de áreas de compressão), a rigidez do sistema (os deslocamentos da membrana e sistema suporte) e a relação massa/ área de cada modelo.

Posteriormente, foi realizada a comparação dos modelos, buscando identificar qual deles apresentou melhores resultados.

3.1.4 PROCEDIMENTO DE REPRESENTAÇÃO/ SIMULAÇÃO DOS MODELOS

No estudo desenvolvido, a etapa de definição da forma de equilíbrio das superfícies (*form finding*) foi realizada utilizando o Método Densidade de Força (MDF) e o programa DENSALFA²¹ e a etapa de análise preliminar dos modelos foi realizada utilizando o Método dos Elementos Finitos e o programa STRAUS7²².

Os procedimentos de representação e a simulação de cada modelo em estudo foram desenvolvidos em três etapas: definição da forma de equilíbrio das superfícies, modelagem tridimensional e simulação estrutural preliminar do conjunto estrutural. Posteriormente, foi realizada a avaliação e comparação entre eles.

3.1.4.1 Etapa 1 – Definição da forma de equilíbrio das superfícies

A primeira etapa abrange a representação e a definição da forma de equilíbrio das superfícies das membranas dos modelos em estudo, tendo como referência a geometria do modelo original (A1).

Esse procedimento utilizou, inicialmente, modelos físicos (Figura 3.1-14). Em seguida, foram definidas as formas de equilíbrio das superfícies interna e externa utilizando o MDF. Essas superfícies foram representadas como rede de cabos, ou seja, dividida em pequenos e articulados elementos de barra (conectividade entre nós).

O primeiro passo compreendeu a definição inicial do número de nós e elementos, bem como a demarcação das coordenadas XYZ dos pontos de ancoragem (nós restritos) da rede de cabos (Figura 3.1-15, Tabela 3.1-1). Os nós internos da rede ficam livres para transladar.

Posteriormente, foi realizado o ajuste da pré-tensão aplicada aos elementos de barra que compõem a rede (circunferenciais e radiais) e as curvaturas de borda. Buscou-se aproximar as curvaturas das redes de cabo às curvaturas das superfícies do modelo físico, por meio da superposição das redes de cabos e da imagem do modelo físico (Figura 3.1-16). Teve-se como resultado redes de cabo (interna e

21 DENSALFA foi desenvolvido pelo engenheiro Vinícius Maia Barreto de Oliveira tese de doutorado na COPPE/ UFRJ (OLIVEIRA, 2003) e gentilmente cedido para a pesquisa de mestrado e para a atual.

22 STRAUS7 é comercializado fora Europa como STRAND 7- <http://www.straus7.com/> Esse programa apresenta uma interface gráfica amigável e intuitiva, favorecendo o estudo das estruturas de membrana integradas ao sistema suporte.

externa) com geometrias distintas em razão da variação da malha, pontos de ancoragem e pré-tensão aplicada.

Figura 3.1-14 – Imagens dos modelos físicos realizados (escalas 1/1500, 1/200, 1/100) - modelo A1



Fonte: NUNES, 2008, 73, 79, 111.

A definição das superfícies dos demais modelos em estudo utilizou o também o MDF e o mesmo procedimento. O campo de tração (densidade de força) aplicado nas superfícies desses modelos também manteve uma relação de proporcionalidade com as superfícies do modelo A1 (Tabela 3.1-1).

Figura 3.1-15 – Informações: nós, elementos da rede e pré-tensão aplicada

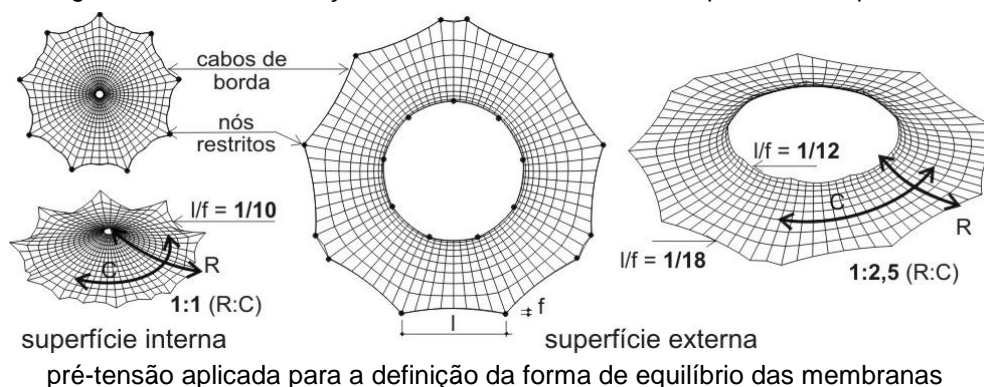
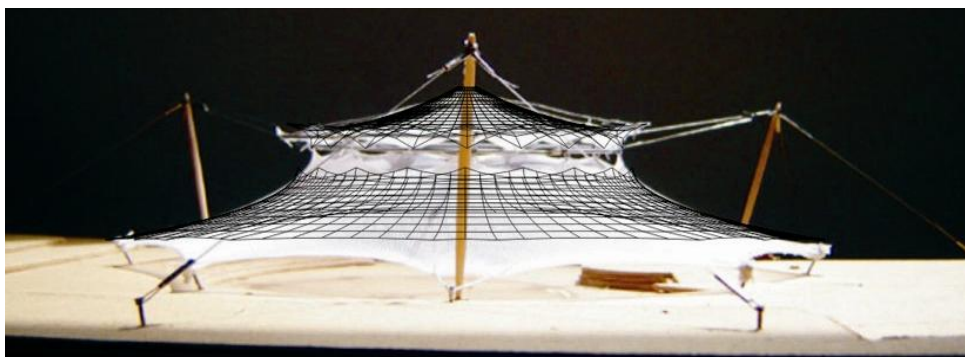


Figura 3.1-16 – Superposição da rede de cabos (modelo computacional) e modelo físico



Fonte: NUNES, 2008, p.87.

Relação de proporcionalidade das superfícies

O campo de tensão das superfícies dos modelos foi definido pela pré-tensão aplicada aos elementos da rede e as curvaturas de borda (Tabela 3.1-1). Esse campo de tensão teve como referência as curvaturas do modelo físico (Figura 3.1-16) e as coordenadas dos pontos de ancoragem das superfícies de cada modelo.

Tabela 3.1-1 – Características e campo de tensão aplicado às superfícies na modelagem pelo MDF

Informações		Superfície externa				Superfície interna					
		A	B	B2-ext modif.	C	A	B	B2-int modif.	C		
Características	Apoios no topo da superfície	9	12	12	15	18	24	24	30		
	Apoios na base da superfície	12	16	16	20	18	24	24	30		
	Elementos radiais	72	72	72	75	54	48	48	60		
	Elementos circunferenciais	10	10	10	10	15	15	15	15		
	Nós	720	720	720	750	818	720	720	900		
	Total de elementos	1368	1368	1368	1425	1566	1392	1392	1740		
	Nós restritos/ deslocamentos impostos	21	28	28	35	36	48	48	60		
Campo de tensão densidade de força (DF) aplicada	Rede interna	DF elementos radiais (R)	10	10	10	10	10	10	10		
		DF elementos circunferenciais (C)	25	25	25	25	10	10	25	10	
		campo de tensão na rede R:C	1,0: 2,5	1,0: 2,5	1,0: 2,5	1,0: 2,5	1,0: 1,0	1,0: 1,0	1,0: 2,5	1,0: 1,0	
	Cabos de borda	Topo	DF cabo de borda	45	34	34	27.5	60	41	41	39
			relação da curvatura do cabo de borda (f/l)*	1/12	1/12	1/12	1/12	1/3	1/3	1/3	1/3
		Base	DF cabo de borda	200	151	59	121	20	16	16	14
			relação da curvatura do cabo de borda (f/l)*	1/18	1/18	1/8	1/18	1/10	1/10	1/10	1/10
				0,06	0,06	0,12	0,06	0,10	0,10	0,10	0,10

* f/l: relação entre a flecha (f) e o vão entre apoios (l) dos cabos de borda

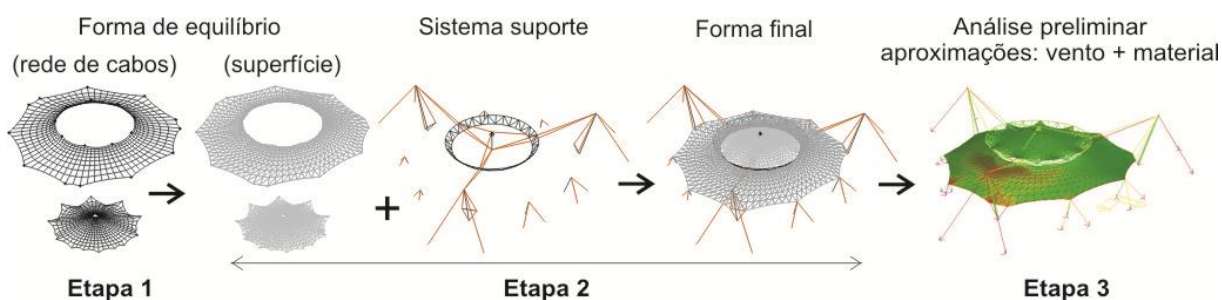
O campo de tensão dos modelos foi definido da seguinte forma:

- a relação de pré-tensão aplicada nas redes de cabo dos modelos nas direções radial/ circunferencial foi 1,0/2,5 na superfície externa e 1,0/1,0 na superfície interna; exceto nos modelos B2_{int} e B2_{intext} (Caso 3), cuja relação de pré-tensão aplicada na superfície interna foi 1,0/2,5;
- a pré-tensão aplicada aos cabos de bordas do topo e base das superfícies externa e interna dos modelos avaliados objetivou manter a similaridade das curvaturas de borda das superfícies (externa e interna) do modelo físico, ou seja, a mesma razão entre a flecha e o vão entre apoios (f/l); porém, no modelo B2_{int-ext} (Caso 3) a pré-tensão aplicada aos cabos de bordas da base da superfície externa foi alterada.

3.1.4.2 Etapa 2 – Modelagem tridimensional do conjunto estrutural

Nessa etapa, as formas de equilíbrio, representadas por rede de cabos foram convertidas em superfícies (com faces triangulares), e conectadas ao sistema suporte (definido via eixos), procedimento que possibilitou a modelagem tridimensional de cada modelo em estudo (Figura 3.1-17). Esse procedimento foi realizado empregando a plataforma gráfica AutoCAD®, e foi a base da análise preliminar subsequente.

Figura 3.1-17 – Representação e simulação dos modelos - Etapas de trabalho



3.1.4.3 Etapa 3 – Análise preliminar do conjunto estrutural

O terceiro passo compreendeu a simulação estrutural preliminar (não linear estática) de cada modelo em estudo sob a ação de cargas; foi realizada a partir da definição:

- da geometria tridimensional do conjunto estrutural de cada modelo (Etapa 2);
- dos materiais da membrana (escolha inicial) e do sistema suporte;
- dos carregamentos impostos (chuva e vento).

Além disso, foram propostas:

- as avaliações de desempenho para a membrana e sistema suporte;
- os parâmetros de análise e comparação dos modelos.

Portanto, com base nesses dados e parâmetros, foi realizada a modelagem das informações da estrutura, isto é, a definição das propriedades de todos os componentes da estrutura, das restrições impostas aos nós de ancoragem e dos passos de carga a serem analisados.

As primeiras análises avaliaram o desempenho do material da membrana.

Posteriormente, foram realizadas as análises preliminares de cada modelo em estudo para posterior comparação entre eles. Nesse procedimento foi avaliado o comportamento (tensões e deslocamentos) da membrana e do sistema suporte, a relação massa/área total e a estabilidade global de cada modelo em estudo.

Esta análise preliminar foi também base dos testes experimentais do material.

Sugere-se que as análises refinadas finais possam contar com maior refinamento da malha da superfície da membrana, com informação obtida diretamente de testes experimentais (material e vento) e a definição dos padrões de corte, possibilitando aumentar a qualidade da simulação da estrutura e minimizar as diferenças entre o modelo numérico e real.

3.1.5 DADOS/ PARÂMETROS QUE BALIZAM A SIMULAÇÃO DOS MODELOS

3.1.5.1 Dados iniciais do material da membrana

Para a escolha do material da membrana, foram realizadas análises preliminares tendo como referência o modelo A2, e as características dos materiais tipo III e IV (classificação dos materiais de acordo com a resistência a tração e peso/m², Tabela 3.1-2). Essas análises tiveram como objetivo identificar qual desses materiais apresentou melhor desempenho em relação ao campo de tensões previsto pelo modelo numérico, segundo os carregamentos considerados (pré-tensão, gravidade, vento e chuva). Verificou-se que o material tipo IV foi o mais adequado, sendo considerado para as demais análises.

Tabela 3.1-2 – Informações sobre os materiais tipo III e IV

Material da membrana (ref. Mehler Technologies)		FR 1000 - tipo III	FR 1400 - tipo IV
Material da cobertura: PVC (acabamento: PVDF + proteção UV, low-wick)			
Material do tecido: PES (entrelaçamento tipo: panamá)			
Massa	g/m ²	1050	1350
Resistência a tração (urdidura/trama)	N/50mm	6000/5500	7500/6500
	N/m	120/110	150/130
Resistência ao rasgo	N	900/800	1200/1200
Resistência de adesão da cobertura	N/cm	26	26

Fonte: MEHLER (2008)

O módulo de elasticidade dos materiais (tipo III e IV) adotados nessas análises teve como referência os valores apresentados na tese de doutorado de Meeß-Olsohn, 2004 (Tabela 3.1-3).

Entretanto, nas análises preliminares foi considerado o comportamento do material isotrópico e linear. Então, foram assumidos os seguintes valores para os módulos de elasticidade:

- . Material tipo III: $E=1100\text{kN/m}$ (ref. tabela 3.1.3: $E_{\text{urdidura}}=1200\text{kN/m}$; $E_{\text{trama}}=800\text{kN/m}$);
- . Material tipo IV: $E=1300\text{kN/m}$ (ref. tabela 3.1.3: $E_{\text{urdidura}}=1500\text{kN/m}$; $E_{\text{trama}}=1100\text{kN/m}$).

As constantes elásticas do material foram reavaliadas para a superfície externa, com o teste experimental biaxial do material (item 3.2.1.1), ou seja, após a prévia simulação e a verificação das tensões atuantes na superfície do modelo durante sua vida útil.

Tabela 3.1-3 – Tabela com a rigidez tangencial das membranas técnicas

<i>Gewebematerial/ Beschichtung</i> Material do tecido/ revestimento		<i>Faden-Richtung/ Direção</i> do fio		<i>Bruchdehnung/</i> Alongamento a ruptura
	<i>Typ/</i> Tipo	<i>Kette/</i> urdidura [kN/m]	<i>Schuß/</i> trama [kN/m]	in %
Polyester/ PVC	1	60 (800)	58 (500)	15-20
	2	84 (1000)	80 (600)	15-20
	3	114 (1200)	104 (800)	15-25
	4	146 (1500)	126 (1100)	15-25
	5	196 (1800)	166 (1200)	15-25
<i>Glasfaser/PTFE</i> Fibra de vidro (2400 ,2400) (<i>Handelsname/</i> nome comercial: Teflon, Hostafon)	1	70	60	3-12
	2	100	88	3-12
	3	138	118	3-12
	4	146	130	3-12

Fonte: MEEß-OLSOHN (2004), Tabelle 6, p.34.

3.1.5.2 Carga de vento

O vento geralmente é considerado o carregamento crítico nessas estruturas leves, demandando uma análise criteriosa da sua ação. Entretanto, conhecer e estimar com precisão como o vento se distribuiu e qual a sua intensidade nas estruturas de membrana é complexo. Primeiro, por causa da geometria (dupla curvatura) e comportamento (não linear geométrico) dessas estruturas. Segundo, em razão das particularidades do vento, “um carregamento aleatório, cujas características somente são conhecidas de modo estatístico, com grande margem de incerteza” (PAULETTI, 2003, 186p.). Além disso, as normas de vento, descritas para edificações com forma e comportamento padronizados, não são aplicáveis nessas estruturas.

A simulação das cargas de vento nessas estruturas considerando a interação fluido estrutura (dinâmica dos fluidos computacional: CFD) tem desenvolvido muito recentemente, mas até agora nem todos resultados apresentaram precisão (FOSTER; MOLLAERT, 2004). Assim, o método usual de obter informações sobre os efeitos dinâmicos de vento nessas estruturas resultam de testes experimentais em túnel de vento. Nesses testes, utilizando modelos reduzidos, são obtidos os coeficientes de pressão usados no cálculo das forças estáticas utilizadas na análise (aproximada) e

dimensionamento dessas estruturas. Além da confiabilidade dos resultados, o custo desses testes é menor que os valores gastos com o superdimensionamento das estruturas, ademais contribuem para maximizar a segurança das mesmas (VILELA, 2011).

Para compreender a relevância da análise considerando os coeficientes de pressão é importante entender a ação do vento nas edificações. Segundo Gonçalves *et al.* (2004), a ação do vento nas edificações está associada a dois aspectos: meteorológicos e aerodinâmicos. Os aspectos meteorológicos resultam da velocidade do vento. Esta depende do local da edificação, da topografia do terreno, altura da edificação, rugosidade do terreno (tipo e altura dos obstáculos à passagem do vento), do uso e ocupação. Os aspectos aerodinâmicos definem o comportamento e a trajetória do vento em relação à forma da edificação (as dimensões, inclinação e altura relativa, aberturas). Logo, possibilitam identificar as pressões (externas e internas), descritas pelos coeficientes de pressão de vento, que atuam na geometria da superfície da edificação, a partir das direções de incidência do vento.

Segundo Vilela (2011), o vento geralmente é considerado um carregamento estático, definido por uma pressão dinâmica de referência (q) multiplicada pelo coeficiente de pressão (C_p). Esse coeficiente é adimensional, e resulta da razão entre a pressão efetiva provocada pelo vento em uma pequena área sobre a superfície de um corpo e a pressão dinâmica de referência do vento:

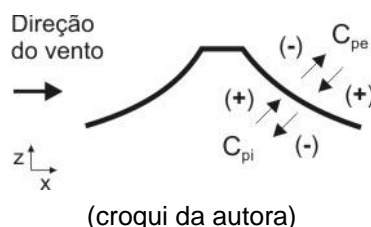
$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad C_{pe} = \frac{\Delta p_e}{q} \quad C_{pi} = \frac{\Delta p_i}{q} \quad C_p = C_{pe} + C_{pi}$$

Sendo: 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 ou resultante); Δp_e - coeficiente de pressão estática efetiva média no ponto em estudo na face superior da cobertura; Δp_i - coeficiente de pressão estática efetiva média no ponto em estudo na face inferior da cobertura; q - pressão dinâmica de referência; ρ - massa específica do ar; V - velocidade média do escoamento.

A representação e a análise do carregamento do vento nas estruturas de membrana, parte do princípio que a ação do vento é aplicada nas duas faces do elemento de única camada, simultaneamente (Figura 3.1-18). Consideram-se os efeitos dos coeficientes de pressão interna e externa na superfície do modelo (Vilela, 2011).

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 (ABNT, 1988, *apud* VILELA, 2011).

Figura 3.1-18 – Desenho esquemático: pressões que atuam na geometria da superfície



Como não foram previstos testes em túnel de vento nessa investigação preliminar, a simulação do carregamento do vento, teve como referência o procedimento previsto pela norma brasileira de vento NBR 6123 (ABNT1988) e os coeficientes de pressão interna e externa resultante dos ensaios de modelos de estruturas de membrana (conóides de um pico abertos) em testes em túnel de vento realizados por Cristina Vilela em sua tese de doutorado (VILELA, 2011).

Cargas de vento - parâmetros de referência

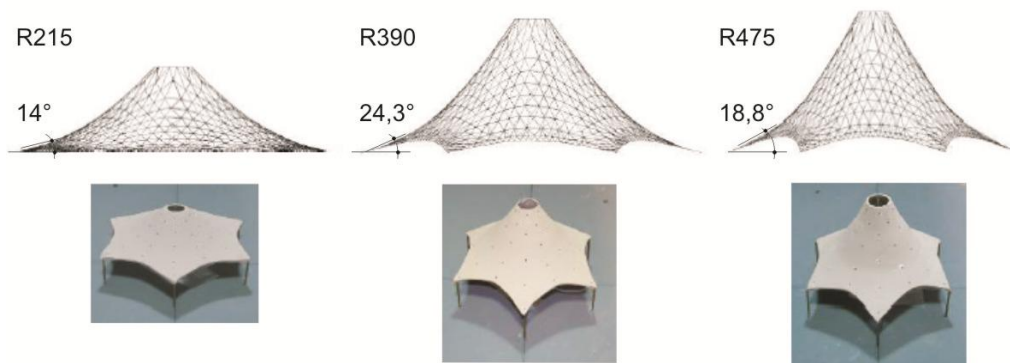
Os ensaios realizados por Cristina Vilela (VILELA, 2011) de modelos de estruturas de membrana (conóides de um, dois e três picos) foram feitos no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade do Rio Grande do Sul – LAC/UFRGS, Brasil.

Utilizou-se o método de medição de pressões instantâneas, ou seja, um método tradicional de medição das pressões flutuantes na superfície externa e interna de modelos rígidos. Foram realizados ensaios com modelos na escala 1/75 (conoídes de um pico sem cone, com diferentes razões altura/diâmetro; e conóides de um, dois e três picos com cone), em escoamento de baixa turbulência com número de Reynolds subcrítico, e cobertura do modelo com superfície lisa.

Os conóides de um pico (denominados de acordo com a relação altura/diâmetro) apresentam base hexagonal (diâmetro: 9m) e o topo em anel circular (diâmetro: 1,5m). Na escala geométrica 1/75, o diâmetro base é 20cm.

Foram selecionados os modelos ensaiados R215, R390 e R475 (Figura 3.1-19 e Tabela 3.1-4), cujos ângulos de inclinação da membrana aproximam-se dos ângulos das curvaturas dos modelos em estudo (Figura 3.1-21).

Figura 3.1-19 – Modelos ensaiados (R215, R30, R475) utilizados como referência ao estudo de caso



Fonte: VILELA, 2011, p.77.

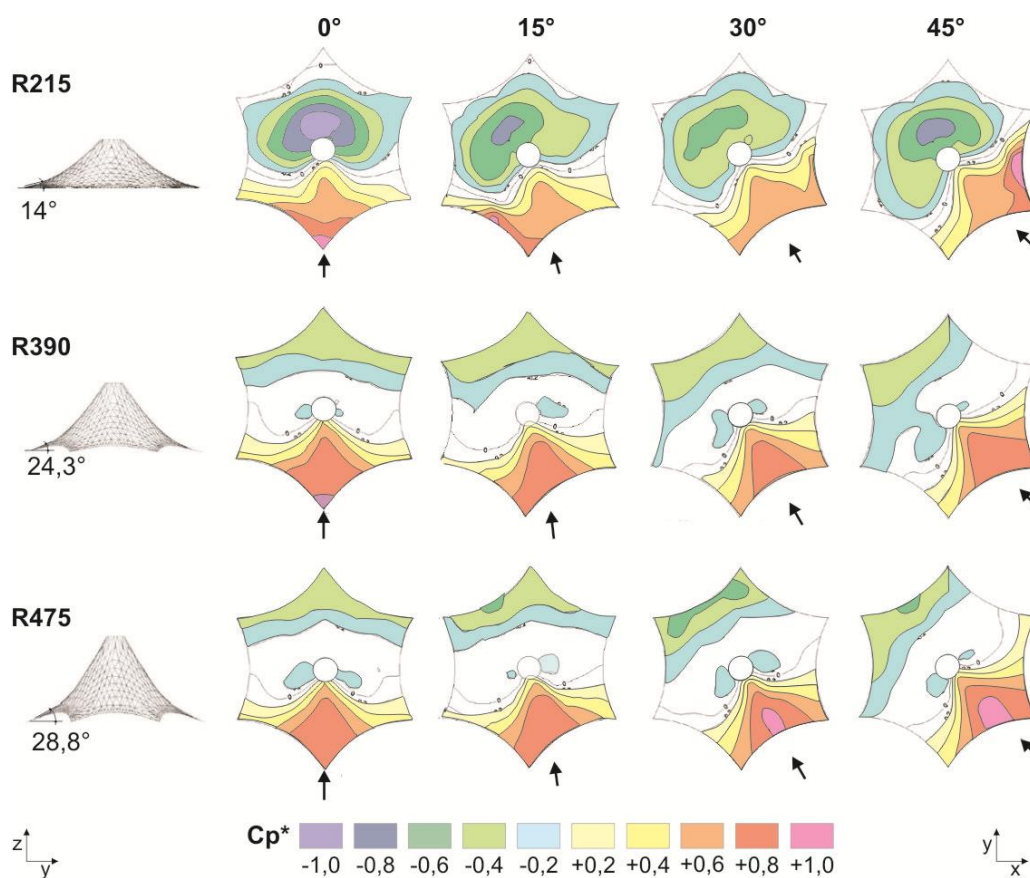
Tabela 3.1-4 – Características dos modelos R215, R390 e R475 e direção de incidência do vento

Modelo	Ø base = 9m			Ø base (1/75) = 20cm	
	altura/ diâmetro (h/d)	ângulo de inclinação membrana	deslocamento vertical do anel (m)	altura (cm) da membrana (escala 1/75)	
R0215	0,215	14,0°	6,25	4,3	
R0390	0,390	24,3°	8,85	7,8	
R0475	0,475	28,8°	10,15	9,5	

Os ensaios foram realizados variando-se o ângulo de incidência do vento, entre 0° e 180°, com a realização de leituras de pressões externas e internas a cada 15°. Como os modelos ensaiados R215, R390 e R475 têm base simétrica (padrão que se repete a cada 60°), foram calculados os valores de coeficiente de pressão média resultante (C_p^*) para os ângulos 0°, 15°, 30° e 45°.

Portanto, verificou-se como o vento se distribuiu e qual a sua intensidade na geometria dos modelos (com diferentes ângulos de inclinação da superfície) de acordo com as seguintes direções de incidência: perpendicular ao ponto de ancoragem (0°); na metade do vão entre dois pontos de ancoragem da superfície (30°); na quarta parte do vão entre dois pontos de ancoragem da superfície (15° e 45°).

Os resultados foram apresentados com gráficos de linhas isobáricas de C_p^* média resultante (Anexo B; Tabela 3.1-5). Para facilitar a análise e a aplicação dos coeficientes de pressão nos modelos do estudo de caso, os gráficos de linhas isobáricas de C_p^* dos modelos ensaiados (R215, R390, R475) foram representados com cores (Figura 3.1-20).

Figura 3.1-20 – Gráficos de linhas isobáricas de C_p^* (em cores) – modelos R215, R390, R475

Fonte: adaptado de VILELA, 2011, p.77, 91, 94, 95, 96.

Tabela 3.1-5 – Valores limites de C_p^* média resultante dos modelos R215, R390, R475

Modelo	ângulo de incidência do vento							
	0°		15°		30°		45°	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
R0215	1,08	-1,13	1,06	-0,87	0,74	-0,70	1,35	-0,91
R0390	1,03	-0,67	0,94	-0,65	1,00	-0,68	0,94	-0,68
R0475	0,99	-0,71	0,95	-0,69	1,05	-0,73	0,99	0,68

Fonte: adaptado de VILELA (2011), p.89.

Observou-se nos gráficos de linhas isobáricas (Figura 3.1-20) e na Tabela 3.1-5 que:

- os ângulos de incidência do vento a 0°, 15°; e 45° são os mais desfavoráveis, pois a ação do vento ocorre diretamente ou nas proximidades dos pontos de ancoragem da estrutura;
- o ângulo de incidência a 30°, é o mais favorável, pois a ação do vento ocorre entre dois pontos de ancoragem da estrutura, que dividem a pressão incidente do vento;
- as superfícies com menor ângulo de inclinação apresentaram os maiores valores de sucção e sobrepessão nos ângulos de incidência de vento a 0°, 15° e 45°.

Cargas de vento – parâmetros adotados

As cargas de vento, utilizadas na simulação dos modelos, tiveram como referência o cálculo pressão de vento da norma NBR 6123 (ABNT1988) e o mapeamento dos coeficientes de pressão do vento nas superfícies dos modelos em estudo, conforme parâmetros definidos por Vilela (2011).

O cálculo da velocidade do vento envolveu inicialmente, a definição da velocidade característica (V_k), considerando os seguintes aspectos do terreno (anfiteatro do campus da UFOP) e do uso da edificação:

- velocidade básica do vento (V_0): 35m/s, segundo curvas Isopletas (NBR 6123);
- fator topográfico ($S_1= 1$): terreno plano com poucas ondulações;
- fator de rugosidade do terreno/ obstáculos ($S_2=0,96$): terrenos planos ou ondulados com obstáculos (Categoria III); dimensão horizontal da edificação maior 50m (classe C) e cota média de 20m;
- fator estatístico ($S_3=1$): edificações com alto fator de ocupação.

$$\text{Assim: } V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = 33,6\text{m/s}$$

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot V_k^2 = 0,69 C_p \text{ kN/m}^2 = 0,00069 C_p \text{ MPa}$$

Sendo: V_0 (velocidade básica do vento); S_1 (fator de topográfico); S_2 (fator de rugosidade); S_3 (fator estatístico); V_k (velocidade característica do vento); q_0 (pressão dinâmica); ρ (densidade do ar: $1,226\text{Ns}^2/\text{m}^4$); C_p (coeficiente de pressão).

Teve-se como resultado uma pressão dinâmica de 0,00069MPa, que foi multiplicada ao valor dos coeficientes de pressão do vento (definidos nos ensaios realizados por Vilela, 2011), e aplicada perpendicularmente às superfícies dos modelos em estudo, conforme o mapeamento dos coeficientes de pressão (Tabela 3.1-6, Figura 3.1-23, Apêndice C), para identificar as pressões que atuam na geometria da superfície, a partir das direções de incidência do vento.

Tabela 3.1-6 – Coeficientes de pressão e pressão dinâmica aplicada aos modelos

coeficientes de pressão	sobrepessão (+)				
	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
pressão dinâmica [MPa]	0,000690	0,000552	0,000414	0,000276	0,000138
coeficientes de pressão	sucção (-)				
	-1,00	-0,80	-0,60	-0,40	-0,20
pressão dinâmica [MPa]	-0,000690	-0,000552	-0,000414	-0,000276	-0,000138

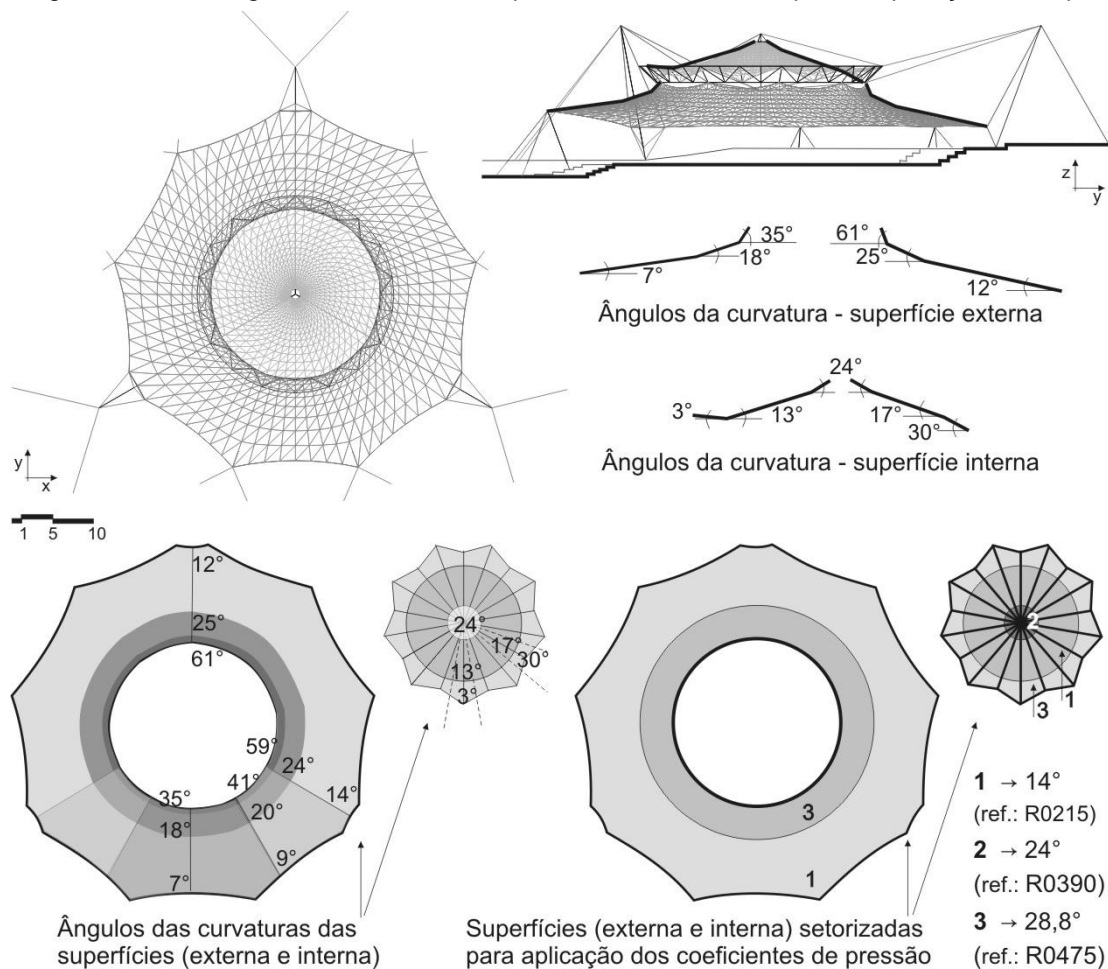
O mapeamento dos coeficientes de vento nas superfícies (externa e interna) dos distintos modelos em estudo teve como referência os seguintes parâmetros

definidos por Vilela (2011): o (s) ângulo (s) de inclinação (s) da superfície e a direção de incidência do vento nos modelos.

Esse procedimento foi realizado inicialmente com o modelo original (A1) e adotado para os demais modelos, de acordo com os seguintes passos:

- Passo 1: verificaram-se inicialmente, os ângulos (aproximados) de inclinação das superfícies externa e interna do modelo A1 (Figura 3.1-21);

Figura 3.1-21 – Ângulos e setores das superfícies do Modelo A1 para a aplicação dos Cps



- Passo 2: identificaram-se os modelos ensaiados por Vilela (2011) cujos ângulos aproximavam-se dos ângulos das curvaturas superfícies em estudo, ou seja, os modelos R0215, R0390 e R475 (Figura 3.1-19);

- Passo 3: as superfícies (externa/ interna do modelo A1) foram setorizadas (circunferencialmente) de acordo com os ângulos selecionados para a aplicação dos coeficientes de pressão. Assim, a superfície externa foi dividida em dois anéis com ângulos de 14° e 28,8°, e a superfície interna em três anéis com ângulos de 14°, 24° e 28,8° (Figura 3.1-21).

- Passo 4: foram definidas as direções de incidência do vento (Figura 3.1-22, Apêndice B). Como o modelo A1 (original) tem simetria apenas no eixo Y, foram selecionadas as seguintes direções -X, Y, -Y e -Y2 (apenas para o modelo B), que nesse estudo foram denominadas direção global. Além disso, verificou-se a direção de incidência do vento em relação aos pontos de ancoragem da superfície de cada modelo: perpendicular ao ponto de ancoragem, na metade do vão entre dois pontos de ancoragem, na quarta parte do vão entre dois pontos de ancoragem, que nesse estudo foram denominadas direção local.

Assim, o mapeamento dos coeficientes de pressão nas superfícies (externa e interna) de cada modelo (Figura 3.1-23, Apêndice C) foi definido pelas inclinações de cada anel da superfície e pelas direções do vento (global e local).

Figura 3.1-22 – Direções (global e local) de incidência do vento (superf. externas, modelos: A, B, C)

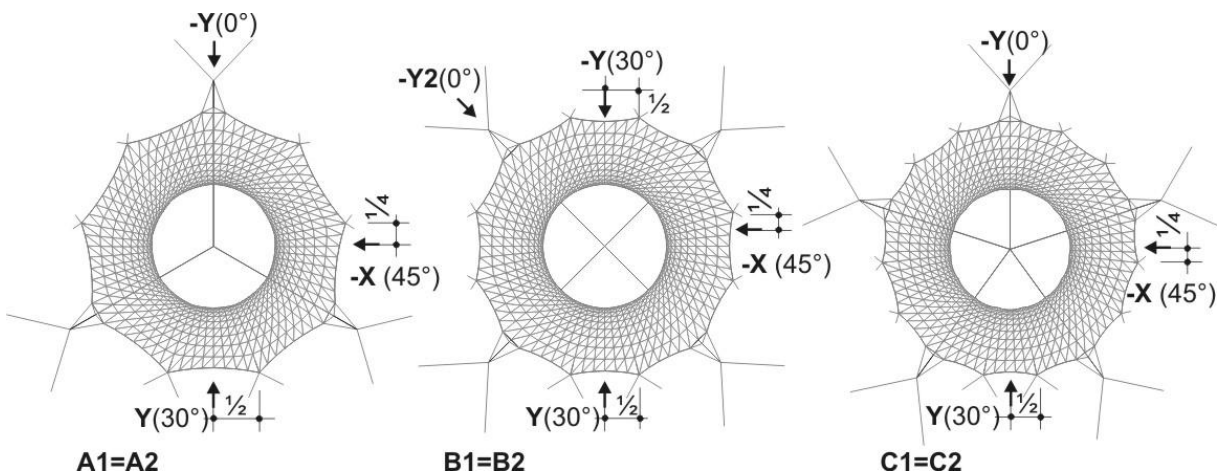
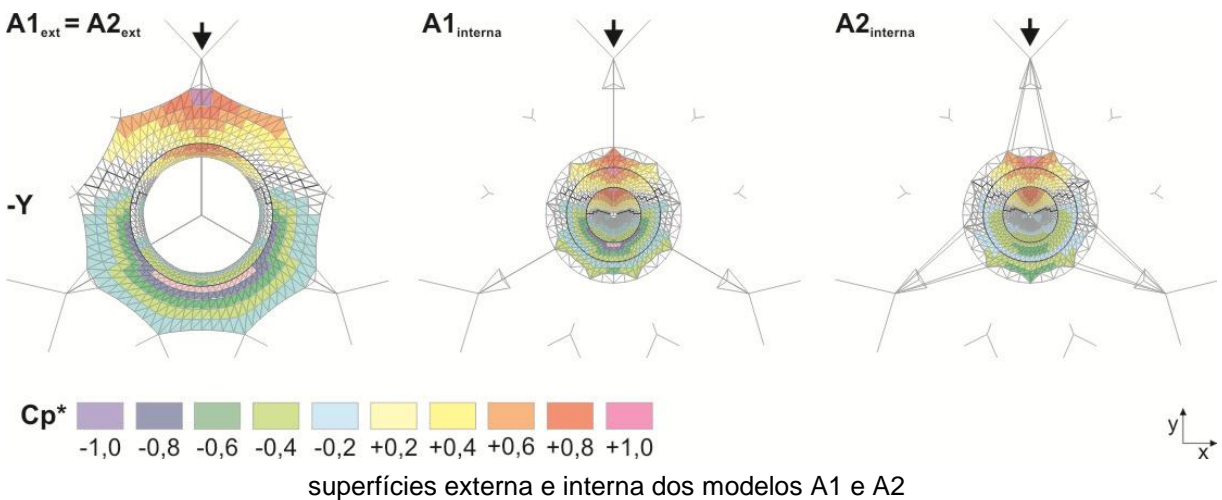


Figura 3.1-23 – Mapeamento dos coeficientes pressão de vento (direção -Y)



3.1.5.3 Carga de chuva

Foi proposta a avaliação do carregamento da chuva. Essa foi calculada considerando a pressão de 0,01m de água sobre a superfície.

Considerando:

- Peso específico da água (1m^3) = 1000kgf/m^3 ;
- Volume da água ($h=0,01\text{m}$) = $0,01\text{ m}^3$
- Força (peso específico x volume) = 10kgf

Tem-se uma pressão (força/área) de 10kgf/m^2 ($0,0001\text{MPa}$), que foi aplicada á superfície, na direção -Z.

3.1.5.4 Avaliação de desempenho proposta

Segundo Knippers *et al.* (2011), os métodos de análise das membranas estruturais geralmente consideram a influência dos seguintes fatores ou incertezas: a duração e a magnitude das cargas, a temperatura e as condições do ambiente (ex. umidade, poluição), a vida útil da estrutura e o comportamento do material (*creep*). Entretanto, como esses fatores afetam a resistência das membranas estruturais depende do material usado, dos detalhes construtivos realizados, do procedimento de manufatura das uniões, das dimensões e da vida útil da estrutura.

Como essas incertezas somam-se ao comportamento não linear geométrico do sistema e não linear do material, estimar a segurança das membranas estruturais é complexo (GOSLING; ZHANG, 2010). Essas incertezas e as particularidades do sistema têm dificultado estabelecer um único método de análise para todos os materiais das membranas e tipos de construção. Assim, engenheiros de vários países e instituições têm adotado diferentes fatores de segurança, sendo que esses fatores resultam das incertezas avaliadas e combinadas (KINIPPERS *et al.*, 2011).

Na Alemanha, até o momento, não há regulamentação para o projeto de membranas e filmes. Há apenas normas para edificações temporárias (DIN4112: 1983-02) e para edificações pneumáticas (DIN4131: 1983-02).

A DIN 4112 é baseada nas tensões admissíveis e considera carregamento 1:1 (não majorado), sendo que os valores de pré-tensão recomendados são referendados pela experiência dos engenheiros. A DIN 4131 é baseada nas deformações admissíveis e adota a combinação de fatores de segurança, sendo que esses fatores foram determinados com base na dissertação de Jörg Minte (1981), (KOENEN, 2012).

No Brasil, até o momento, também não há normas que balizam a segurança e o desempenho das estruturas de membrana. Assim, nessa análise preliminar, foram propostas duas avaliações de desempenho para dar sustentação à simulação estrutural preliminar dos modelos:

- avaliação de desempenho da membrana, baseada na tensão admissível, sendo aplicada a carga real 1:1 (não majorada), baseada nas tensões admissíveis;
- avaliação de desempenho do sistema suporte em aço, considerando combinação de ações (cargas majoradas), tendo como referência a norma americana AISC (2010; 2000).

Avaliação de desempenho da estrutura de membrana

Essa avaliação utilizou como referência valores de carga (pré-tensão) recomendados segundo a experiência dos engenheiros (KOENEN, 2012).

Verificou-se a influência da magnitude e da duração das cargas permanentes (peso próprio; pré-tensão) e variáveis (vento, chuva, sendo o vento a carga crítica), no comportamento do material da membrana na estrutura avaliada. Essa avaliação considera que deformação do material da membrana (visco-elástico) não está relacionada apenas com a magnitude da tensão, mas é função também do tempo (item 2.5.3). Não se considerou nessa análise a influência da carga de neve.

Em relação à duração das cargas, Knippers *et al.* (2011) destaca que a carga de vento ocorre com relativa frequência podendo ter grande intensidade, porém a rajada de vento tem duração de apenas alguns segundos. Assim, durante a vida útil da estrutura, o vento tem relativamente menor duração (curto prazo), e conseqüentemente menor influência na deformação do material, sob a tensão constante no tempo (*creep*). Entretanto, o peso próprio e a pré-tensão que atuam em estado constante (longo prazo) têm influência significativa na deformação do material.

Além disso, considerou-se o trecho em que os materiais das membranas podem apresentar um comportamento linear razoável, ou seja, entre o nível de pré-tensão e aproximadamente 25% da tensão de tração do material selecionado (KOCK, 2004). Assim, a resistência do material foi reduzida a um valor admissível.

Então, a tensão máxima prevista pelo modelo numérico sob a ação de vento (carga de curto prazo) foi 25% da resistência de tração (ou de ruptura) do material, nas direções do tecido (urdidura e trama), (Tabela 3.1-7).

É importante também controlar os valores de pré-tensão (carga permanente ou longo prazo) para a durabilidade do material da membrana e para minimizar os deslocamentos da superfície sob a ação do vento. Então, a pré-tensão máxima, prevista pelo modelo numérico, foi limitada a 5% da resistência à tração do material selecionado, nas direções do tecido (urdidura e trama), ou seja, a 20% da tensão máxima prevista pelo modelo numérico sob a ação de vento, conforme Tabela 3.1-7.

Portanto, para a avaliação da ação dos carregamentos é necessário definir previamente os padrões de corte da superfície e a orientação do material de acordo com esses padrões.

Tabela 3.1-7 – Tensões máximas na estrutura de membrana em estudo; padrões de corte das superfícies

Resistência do material - Tipo 4 (tensão de ruptura) [kN/m]*		Tensão máxima na membrana (carga não majorada)			
		pré-tensão inicial 5% [kN/m]*		ação crítica 25% [kN/m]*	
urdidura	trama	urdidura	trama	urdidura	trama
150	130	7,5	6,5	37,5	32,5

(*) 1kN/m= 1MPa, considerando espessura do material 1mm

Avaliação de desempenho do sistema suporte em aço

A avaliação de segurança e desempenho do sistema suporte em aço foi baseada na combinação de ações mais desfavorável aos modelos em estudos, tendo como referência a norma americana AISC (2010).

Inicialmente, foram avaliadas as seguintes combinações de ações:

$$1,2PP + 1,6V + 0,5C + 1PT \quad (1)$$

$$1,2PP + 0,8V + 1,6C + 1PT \quad (2)$$

sendo, PP: peso próprio; V: vento; C: chuva; PT: pré-tensão.

A combinação de ações (1) foi selecionada, pois foi a mais severa aos modelos.

O fator de desempenho (carga/resistência) considerado para os componentes do sistema suporte foi aproximadamente 80%. Entretanto, os cabos apresentaram maior variação desse fator, por causa das dimensões e características dos componentes utilizados como referência nessa análise (Apêndices E, F).

3.1.5.5 Parâmetros adotados para a análise e comparação dos modelos

Para a análise e comparação dos modelos em estudo, foram considerados os mesmos carregamentos.

Além disso, foi aplicada a mesma magnitude de pré-tensão nas superfícies das membranas e nos cabos de borda (a cada passo de carga) de todos os modelos.

Entretanto, a magnitude de pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte alterou-se em cada modelo, conforme Tabela 3.1-8. Deste modo, foi possível avaliar o nível de pré-tensão dos cabos do sistema suporte e o dimensionamento dos componentes do sistema suporte necessários ao equilíbrio de cada modelo sob a ação das cargas aplicadas, considerando a tensão máxima na membrana aproximadamente 25% da resistência de tração (ruptura) do material selecionado.

Tabela 3.1-8 – Parâmetros para análise e comparação dos modelos: pré-tensão aplicada

casos de carga		análise da membrana									análise do sistema suporte (cargas majoradas)			
		Tensão máxima na membrana												
		5%		25% da resistência de tração do material										
		1º passo		vento (carga crítica)				vento + chuva						
pré + grav		-X	Y	-Y	-Y2	-X	Y	-Y	-Y2	-X	Y	-Y	-Y2	
pré-tensão	membrana*	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	cabos de borda*	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	cabos sist. suporte	variável												
gravidade		1,0	1,0	1,0	1,0	—	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	1,2
cargas	chuva	—	—	—	—	—	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
	vento: -X	—	1,0	—	—	—	1,0	—	—	—	1,6	—	—	—
	vento: Y	—	—	1,0	—	—	—	1,0	—	—	—	1,6	—	—
	vento: -Y	—	—	—	1,0	—	—	—	1,0	—	—	—	1,6	—
	vento: -Y2	—	—	—	—	1,0	—	—	—	1,0	—	—	—	1,6

(*) pré-tensão na membrana e cabos de borda: similar para todos os modelos

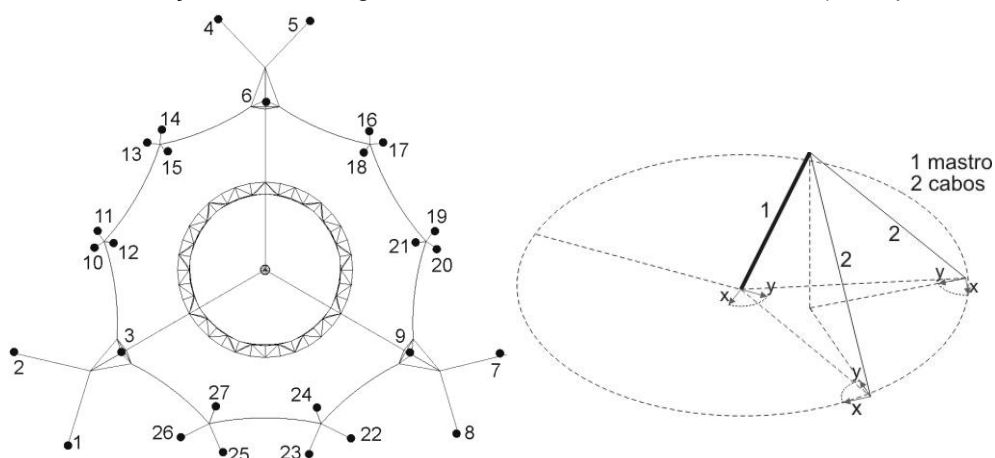
Para identificar a pré-tensão, a ser adotada para a membrana e cabos de borda de todos os modelos, foi realizada previamente a análise preliminar dos modelos dos casos 1 e 2. Para o equilíbrio dos modelos do caso 1 sob a carga de vento, verificou-se o valor aproximado de 2,8 vezes a pré-tensão inicial aplicada (1º passo); no caso 2, essa foi 3,5 vezes a pré-tensão inicial. Portanto, foi considerada a pré-tensão verificada no caso 2, possibilitando a sua aplicação em todos os modelos, e conseqüentemente a comparação entre eles.

3.1.5.6 Informações gerais para a análise preliminar do conjunto estrutural

Restrições da ancoragem

As ancoragens da estrutura (base dos mastros e estais) apresentam a translação restrita nas direções XYZ (local) e rotação livre nas direções XYZ (local). Isso quer dizer que para a fixação dessas restrições, foram definidas inicialmente, as coordenadas locais desses apoios, para cada modelo, conforme Figura 3.1-24, Apêndice D.

Figura 3.1-24 – Restrições da ancoragem considerando coordenadas locais (exemplo: modelo A1)



Especificação dos componentes estruturais

O pré-dimensionamento e a especificação preliminar dos componentes que compõem o sistema suporte (mastros, anel treliçado e cabos) de cada modelo em estudo não são estritamente rigorosos. Resultam do procedimento de análise preliminar considerando a combinação de ações (Apêndices E e F) e guiam a comparação dos modelos.

Cargas aplicadas

A pré-tensão inicial aplicada na membrana foi 1,00MPa (considerando espessura do material 1mm) e nos cabos de borda e estais foi 10,00kN. Na Tabela 3.1-9 podem-se verificar os incrementos de pré-tensão na membrana, cabos de borda e estais necessários em cada modelo, para equilibrar a carga crítica de vento.

3.1.6 INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DOS MODELOS

Para fazer a avaliação proposta os modelos foram reunidos em grupos ou casos de análise, de acordo com a(s) variável (eis) investigada (s).

Foram verificadas: a pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte dos modelos (Tabela 3.1-9), a relação massa/área total dos modelos (Tabela 3.1-10) e os deslocamentos das membranas e do sistema suporte (Tabela 3.1-11) para posterior comparação. Foram também avaliadas as trajetórias (máximas e mínimas) de tensão na superfície da membrana, bem como a tensão de Von Mises.

O cálculo de tensões de *Von Mises* identifica se o material está trabalhando no regime elástico. A análise do comportamento do material da membrana é realizada no regime elástico, pois no regime plástico, o material dos tecidos e filmes se deforma permanentemente, ou seja, não retorna a forma original após a retirada da força aplicada. Então, este cálculo parte do princípio que um corpo elástico, submetido a carregamentos nas direções XYZ, apresenta um complexo sistema de tensões. Assim, em qualquer ponto deste corpo há tensões em diferentes direções e, de um ponto para outro, mudam-se as direções e as magnitudes das tensões. Esse cálculo, segundo Lewis (2003) relaciona esse campo de tensão tridimensional que atua sobre um corpo elástico a um valor equivalente de tensão uniaxial. Assim, um valor acima dessa tensão indica a falha dúctil do material.

Observou-se também que vento foi o carregamento crítico nessas estruturas, conforme análises dos modelos e Tabela 3.1-11. Na direção Y, o vento incide entre dois pontos de apoio da superfície, sendo suportado de forma mais equilibrada. Nas direções -X, -Y e -Y2, a incidência do vento ocorre diretamente ou nas proximidades dos pontos de ancoragem da superfície, sendo as direções mais desfavoráveis (Figura 3.1-25). Portanto, foram destacadas as direções críticas -Y e -Y2 na análise dos modelos, e ao final de cada caso apresentadas todas as direções avaliadas.

Figura 3.1-25 – Direções do vento

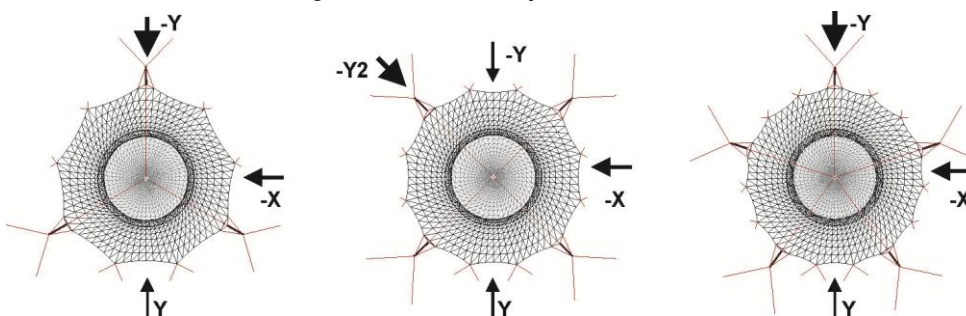


Tabela 3.1-9 – Passos de carga e pré-tensão aplicada aos componentes dos modelos em estudo











casos de carga		análise da membrana									
		1° passo	vento				vento + chuva				
		pré + grav	-X	Y	-Y	-Y2	-X	Y	-Y	-Y2	
pré-tensão	membrana	4,5	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	
	cabos de borda	4,5	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	
	cabos do sistema suporte	A1 	9,5	19,0	19,0	19,0	—	19,0	19,0	19,0	—
		B1 	7,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
		C1 	6,5	2,5	2,5	2,5	—	2,5	2,5	2,5	—
		A2.40° 	7,0	38,0	38,0	38,0	—	38,0	38,0	38,0	—
		B2.30° 	7,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
		C2.24° 	4,5	4,5	4,5	4,5	—	4,5	4,5	4,5	—
		B2.60° 	10,0	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5
		C2.48° 	6,0	13,5	13,5	13,5	—	13,5	13,5	13,5	—
B2 _{int} 		7,3	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	
B2 _{int-ext} 	4,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0		
gravidade		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
cargas	chuva	—	—	—	—	—	1,0	1,0	1,0	1,0	
	vento: -X	—	1,0	—	—	—	1,0	—	—	—	
	vento: Y	—	—	1,0	—	—	—	1,0	—	—	
	vento: -Y	—	—	—	1,0	—	—	—	1,0	—	
	vento: -Y2	—	—	—	—	1,0	—	—	—	1,0	

Tabela 3.1-10 – Relação massa/área total dos modelos em estudo

modelos	sistema suporte		membrana			sistema suporte + membrana		
	massa (kg)	%	massa (kg)	área (m ²)	%	massa (kg)	massa/ área	
							(kg/m ²)	%
 A1	23.850,53	1,00	3.224,79	2.388,73	1,00	27.075,32	11,33	1,00
 B1	23.729,89	0,99	3.394,94	2.514,77	1,05	27.124,83	10,79	0,95
 C1	24.398,18	1,02	3.461,56	2.564,12	1,07	27.859,74	10,87	0,96
 A2 40°	49.089,02	2,06	3.224,79	2.388,73	1,00	52.313,81	21,90	1,93
 B2 30°	33.111,38	1,39	3.394,94	2.514,77	1,05	36.506,32	14,52	1,28
	43.628,78	0,89	3.394,94	2.514,77	1,05	47.023,72	18,70	1,65
 C2 24°	21.672,05	0,91	3.461,56	2.564,12	1,07	25.133,61	9,80	0,86
	28.935,63	1,21	3.461,56	2.564,12	1,07	32.397,19	12,63	1,11
 B2 int	33.047,46	1,39	3.378,64	2.502,70	1,05	36.426,10	14,55	1,28
	27.134,83	1,14	3.260,89	2.415,48	1,01	30.395,72	12,58	1,11

Tabela 3.1-11 – Deslocamentos (sist. suporte/ membranas) dos modelos em estudo (ações: vento, chuva)

			A1	B1	C1	A2 40°	B2 30°	C2 24°	B2 60°	C2 48°	B2 _{int}	B2 _{int-ext}		
deslocamentos [m] resultantes da ação do vento	sistema suporte	-X	(+)	0,98	0,87	0,86	0,26	0,35	0,62	0,23	0,36	0,35	0,46	
			(-)	-0,65	-0,55	-0,35	-0,40	-0,40	-0,27	-0,38	-0,26	-0,40	-0,30	
		Y	(+)	0,72	0,65	0,67	0,16	0,23	0,46	0,12	0,23	0,23	0,23	0,33
			(+)	-0,41	-0,42	-0,23	-0,36	-0,32	-0,20	-0,34	-0,20	-0,32	-0,32	-0,21
		-Y	(+)	0,72	0,84	0,82	0,15	0,29	0,56	0,16	0,34	0,29	0,29	0,40
			(-)	-0,80	-0,47	-0,40	-0,36	-0,35	-0,31	-0,36	-0,29	-0,34	-0,34	-0,24
	-Y2	(+)		0,73				0,25		0,22		0,25	0,38	
		(-)		-0,50				-0,43		-0,35		-0,43	-0,31	
	superfície externa	-X	(+)	1,06	1,06	1,09	0,61	0,63	0,87	0,53	0,62	0,63	0,73	
			(-)	-1,03	-0,94	-0,81	-0,88	-0,88	-0,78	-0,86	-0,76	-0,88	-0,79	
		Y	(+)	0,77	0,72	0,68	0,44	0,40	0,52	0,32	0,33	0,40	0,43	
			(+)	-0,83	-0,78	-0,69	-0,79	-0,76	-0,68	-0,75	-0,67	-0,76	-0,68	
		-Y	(+)	1,04	0,97	1,10	0,49	0,53	0,84	0,44	0,58	0,53	0,59	
			(-)	-1,12	-0,79	-0,86	-0,95	-0,73	-0,83	-0,70	-0,81	-0,73	-0,65	
	-Y2	(+)		0,99				0,57		0,47		0,57	0,70	
		(-)		-1,03				-0,99		-0,95		-0,99	-0,90	
	superfície interna	-X	(+)	0,93	0,86	0,86	0,25	0,34	0,60	0,23	0,36	0,35	0,45	
			(-)	-0,65	-0,55	-0,35	-0,40	-0,40	-0,27	-0,36	-0,26	-0,40	-0,30	
		Y	(+)	0,63	0,62	0,65	0,16	0,23	0,46	0,12	0,45	0,23	0,33	
			(+)	-0,41	-0,41	-0,23	-0,33	-0,32	-0,20	-0,31	-0,19	-0,32	-0,21	
		-Y	(+)	0,71	0,79	0,82	0,14	0,29	0,55	0,15	0,34	0,29	0,40	
			(-)	-0,76	-0,47	-0,40	-0,36	-0,35	-0,31	-0,33	-0,28	-0,34	-0,24	
	-Y2	(+)		0,72				0,23		0,22		0,23	0,37	
		(-)		-0,50				-0,41		-0,35		-0,41	-0,31	
deslocamentos [m] resultantes da ação do vento + chuva	sistema suporte	-X	(+)	1,14	1,02	0,99	0,35	0,44	0,74	0,32	0,46	0,45	0,56	
			(-)	-0,55	-0,48	-0,31	-0,33	-0,33	-0,22	-0,31	-0,19	-0,33	-0,23	
		Y	(+)	0,86	0,77	0,78	0,25	0,32	0,56	0,19	0,32	0,32	0,43	
			(+)	-0,31	-0,35	-0,18	-0,28	-0,24	-0,13	-0,26	-0,12	-0,24	-0,14	
		-Y	(+)	0,85	0,97	0,95	0,24	0,39	0,68	0,24	0,43	0,39	0,51	
			(-)	-0,72	-0,42	-0,37	-0,29	-0,28	-0,26	-0,29	-0,23	-0,27	-0,18	
	-Y2	(+)		0,85				0,35		0,31		0,34	0,48	
		(-)		-0,42				-0,36		-0,28		-0,36	-0,25	
	superfície externa	-X	(+)	1,28	1,24	1,26	0,76	0,78	1,04	0,68	0,76	0,78	0,88	
			(-)	-0,84	-0,76	-0,65	-0,69	-0,70	-0,60	-0,68	-0,58	-0,70	-0,61	
		Y	(+)	0,96	0,89	0,90	0,58	0,53	0,73	0,45	0,51	0,53	0,56	
			(+)	-0,63	-0,60	-0,51	-0,61	-0,58	-0,49	-0,57	-0,49	-0,58	-0,50	
		-Y	(+)	1,25	1,17	1,28	0,65	0,69	1,01	0,59	0,73	0,69	0,75	
			(-)	-0,95	-0,63	-0,71	-0,76	-0,56	-0,65	-0,54	-0,64	-0,56	-0,49	
	-Y2	(+)		1,19				0,73		0,62		0,73	0,87	
		(-)		-0,86				-0,82		-0,77		-0,82	-0,72	
	superfície interna	-X	(+)	1,09	1,00	1,05	0,34	0,44	0,71	0,31	0,45	0,44	0,56	
			(-)	-0,55	-0,47	-0,31	-0,32	0,33	-0,22	-0,29	-0,19	0,33	0,23	
		Y	(+)	0,77	0,74	0,76	0,25	0,32	0,56	0,19	0,31	0,32	0,42	
			(+)	-0,31	-0,34	-0,19	-0,26	-0,24	-0,13	-0,23	-0,12	-0,24	-0,14	
		-Y	(+)	0,95	0,91	0,94	0,24	0,39	0,67	0,23	0,43	0,39	0,51	
			(-)	-0,68	-0,42	-0,36	-0,29	-0,28	-0,26	-0,26	-0,21	-0,27	-0,18	
	-Y2	(+)		0,83				0,33		0,31		0,33	0,47	
		(-)		-0,42				-0,34		-0,28		-0,34	-0,24	

direções do vento: -X, Y, -Y, -Y2; sobrepessão (+), sucção (-)




3.1.6.1 Caso1 – Número de mastros - modelos: A1, B1, C1

No caso 1 avaliou-se a influência do número de mastros que apoiam o sistema suporte espacial (mastro flutuante e anel treliçado suportados por cabos). Foram avaliadas configurações com três, quatro e cinco grandes mastros (Figura 3.1-6).

Pré-tensão do sistema

Conforme Tabela 3.1-12 e Tabela 3.1-9 verificou-se a progressiva redução da magnitude de pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte com o aumento do número de mastros. Portanto o modelo C1 (com cinco grandes mastros) apresentou menor pré-tensão.




Tabela 3.1-12 – Pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte – caso 1

caso de carga			análise da membrana							
			vento				vento + chuva			
			-X	Y	-Y	-Y2	-X	Y	-Y	-Y2
pré-tensão cabos do sist. suporte	 A1	19,0	19,0	19,0	—	19,0	19,0	19,0	—	
	 B1	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	
	 C1	2,5	2,5	2,5	—	2,5	2,5	2,5	—	

Relação massa/área de cada modelo

Observou-se que os modelos apresentaram relação massa/área total similar, conforme Tabela 3.1-13 e Tabela 3.1-10. Verificou-se também que os componentes mais solicitados foram os mastros e mastro flutuante.

Tabela 3.1-13 – Relação massa/área dos modelos – caso 1

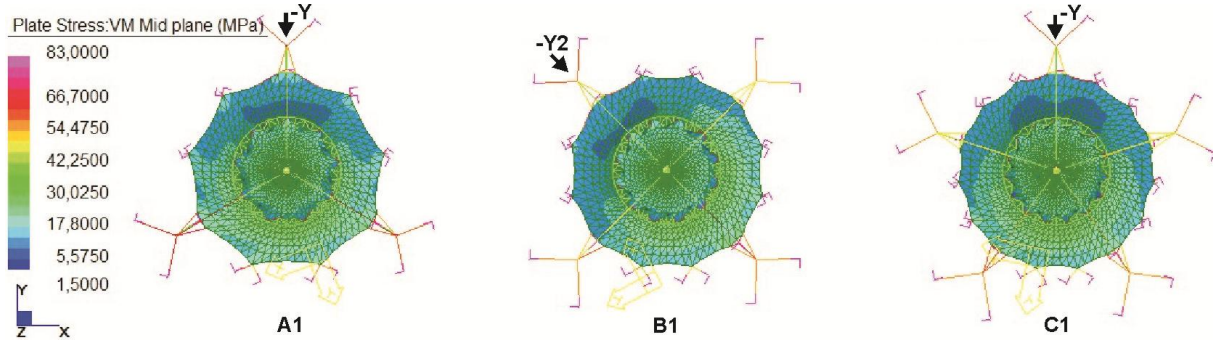
modelos		sistema suporte		membrana			sistema suporte + membrana		
		massa (kg)	%	massa (kg)	área (m ²)	%	massa (kg)	massa/ área	
								(kg/m ²)	%
 A1	23.850,53	1,00	3.224,79	2.388,73	1,00	27.075,32	11,33	1,00	
 B1	23.729,89	0,99	3.394,94	2.514,77	1,05	27.124,83	10,79	0,95	
 C1	24.398,18	1,02	3.461,56	2.564,12	1,07	27.859,74	10,87	0,96	

Distribuição das tensões nas membranas externa e interna

Observou-se que as superfícies (internas e externas) dos modelos A1, B1 e C1 apresentaram comportamento similar, ou seja, predominam áreas de concentração de tensões a sotavento (derivadas de sucção) e nas proximidades dos pontos de ancoragem das superfícies a barlavento (resultantes de sobrepressão). Com o aumento do número de mastros, verificou-se pequena redução das áreas de

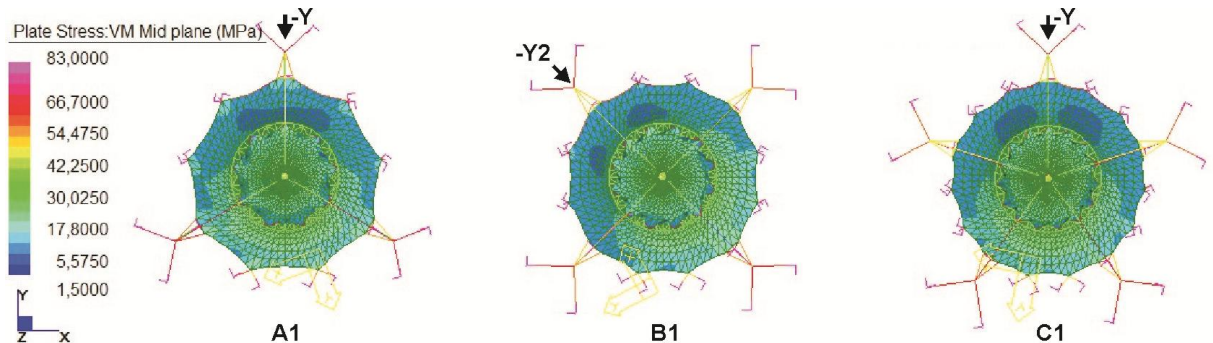
concentração de tensões nas proximidades dos pontos de ancoragem das superfícies, contribuindo para a distribuição mais homogênea das tensões nas mesmas, conforme Figura 3.1-26 e Figura 3.1-37.

Figura 3.1-26 – Tensões Von Mises – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)



Com carga da chuva associada à carga de vento houve redução das pressões negativas e, conseqüentemente das tensões nas superfícies (internas e externas) e no sistema suporte a sotavento. Em contrapartida, houve aumento das tensões nas proximidades dos pontos de ancoragem e base das superfícies a barlavento (Figura 3.1-27, Figura 3.1-38).

Figura 3.1-27 – Tensões Von Mises – A1, B1, C1 (chuva + vento -Y e -Y2)

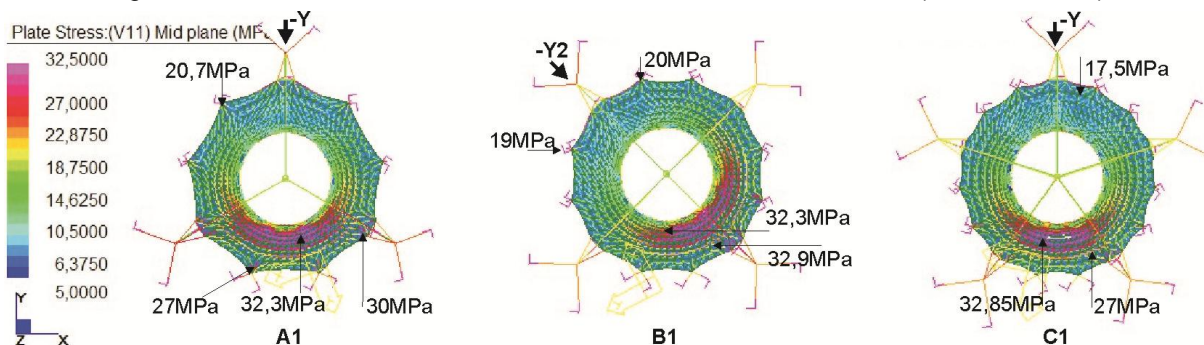


As superfícies externas destes modelos apresentam suave inclinação. Nestas superfícies predominam áreas concentração de tensões nas proximidades do anel treliçado a sotavento (nas áreas onde se observam os grandes deslocamentos de sucção), e nas proximidades dos pontos de ancoragem (mastros) da superfície a sotavento e a barlavento (Figura 3.1-28, Figura 3.1-39).

Na superfície da externa, as trajetórias de tensão máxima ocorrem na direção circunferencial (Figura 3.1-28, Figura 3.1-39). Logo, a direção do material mais solicitada é trama, considerando padrões de corte radiais.

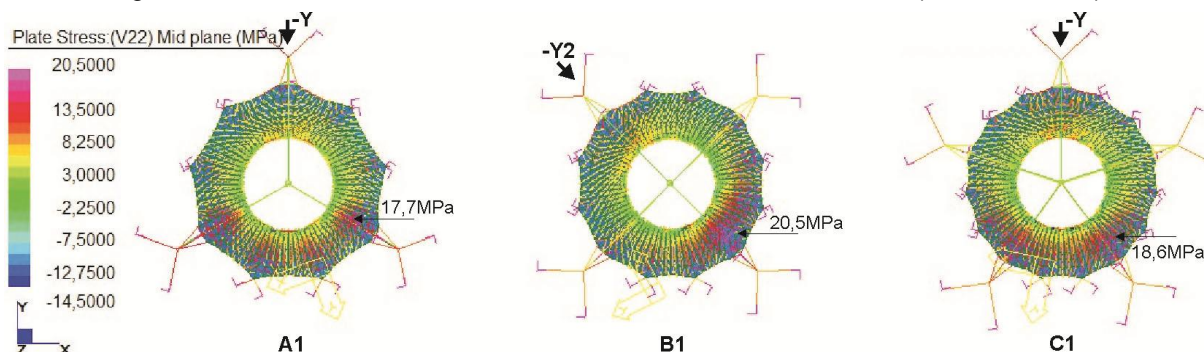
Apesar do maior número de pontos de ancoragem, a superfície externa do modelo C1 apresentou pequeno aumento da magnitude das tensões nas proximidades do anel treliçado (direção -Y) a sotavento (Figura 3.1-28).

Figura 3.1-28 – Tensão máxima na membrana externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)



Não foram verificadas áreas de compressão ou de acúmulo de água na base da superfície externa, conforme as trajetórias de tensão mínima (direção radial), (Figura 3.1-29, Figura 3.1-40). Entretanto, nos pontos de ancoragem destas superfícies ao anel treliçado (no topo) verificou-se a existência de pequenas áreas de compressão ou enrugamento (Figura 3.1-33a).

Figura 3.1-29 – Tensão mínima na membrana externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)



Nas superfícies internas destes modelos observou-se elevada concentração de tensões apenas no topo da superfície, na região de ancoragem desta ao anel, principalmente a barlavento (Figura 3.1-30, Figura 3.1-41). No entorno desta área, predomina um campo de tensões de menor magnitude e mais homogêneo, com áreas de maior tensão somente nas proximidades dos pontos de ancoragem da superfície ao anel treliçado a barlavento.

Na superfície interna, as trajetórias de tensão máxima ocorrem na direção radial (Figura 3.1-30, Figura 3.1-41). Logo, a direção mais solicitada do material é a urdidura, considerando padrões de corte radiais. No topo da superfície a tensão

supera a tensão admissível do material e sinaliza alguns procedimentos: retirada dessa área e uso de duplo material (Figura 3.1-31, Figura 3.1-42).

Figura 3.1-30 – Tensão máxima na membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

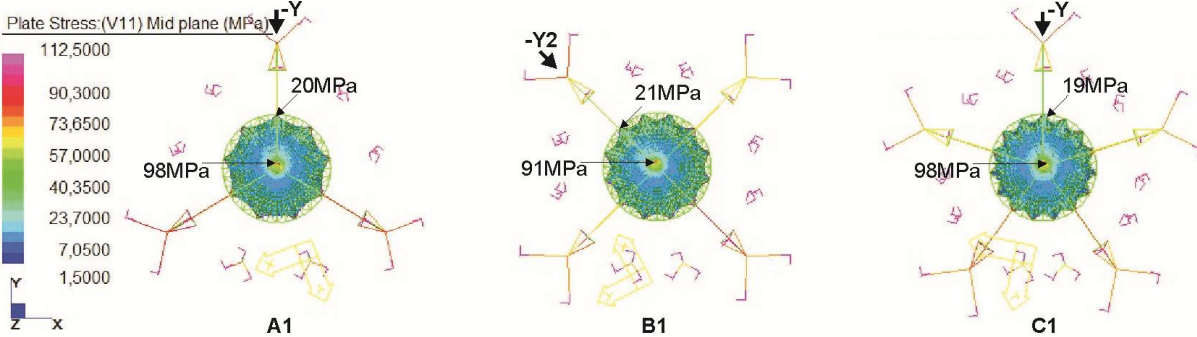
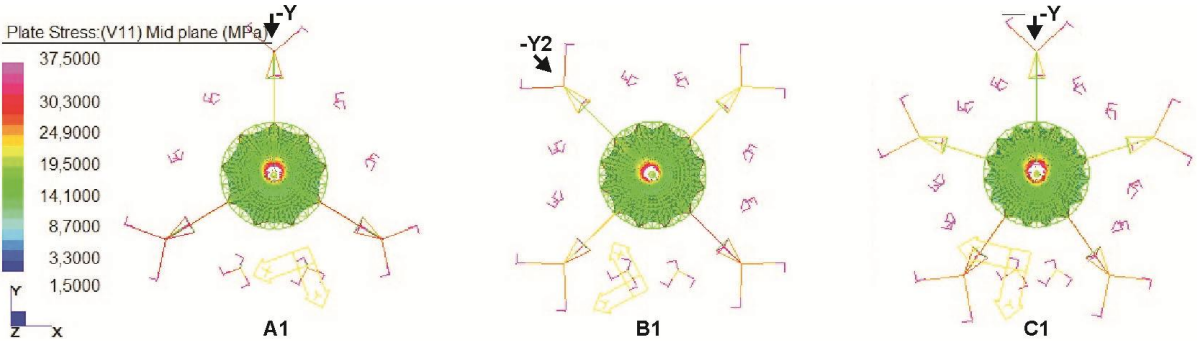


Figura 3.1-31– Tensão máxima na membrana interna – A1, B1, C1 (tensão admissível do material)



(remoção das áreas de tensão superior à tensão admissível do material; vento -Y, -Y2)

Não foram verificadas áreas de compressão ou de acúmulo de água na base da superfície, de acordo com as trajetórias de tensão mínima (direção circunferencial), (Figura 3.1-32, Figura 3.1-43). Entretanto, foi observada a existência de pequenas áreas de compressão ou enrugamento no topo da superfície, conforme Figura 3.1-33b.

Figura 3.1-32 – Tensão mínima na membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

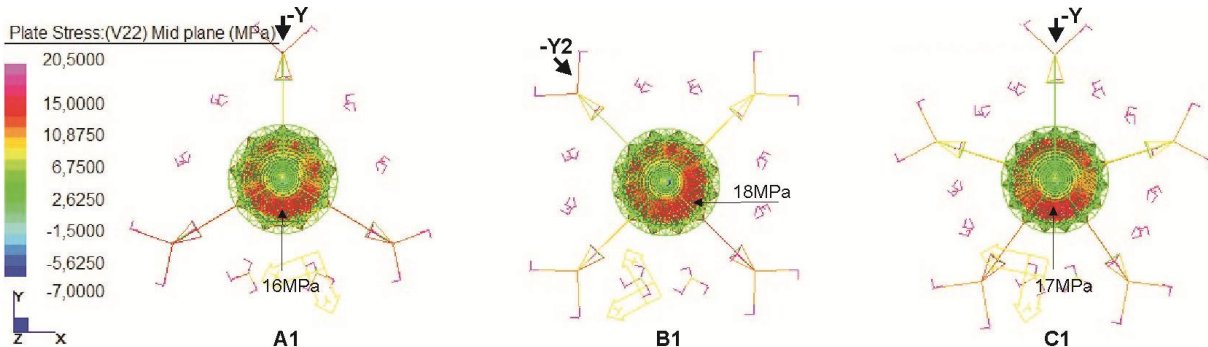
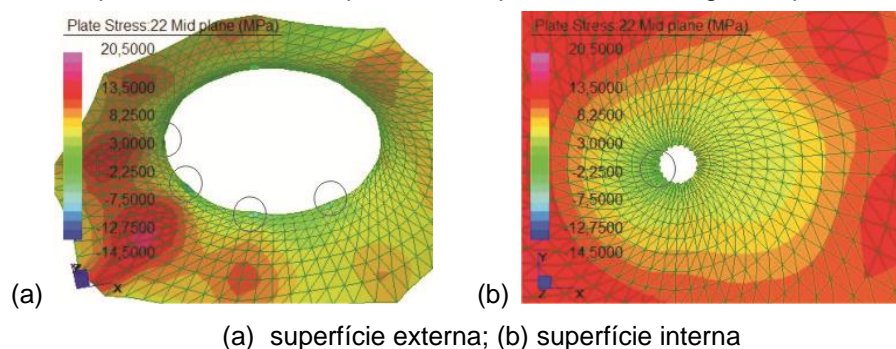


Figura 3.1-33 – Pequenas áreas de compressão nos pontos de ancoragem superior das superfícies

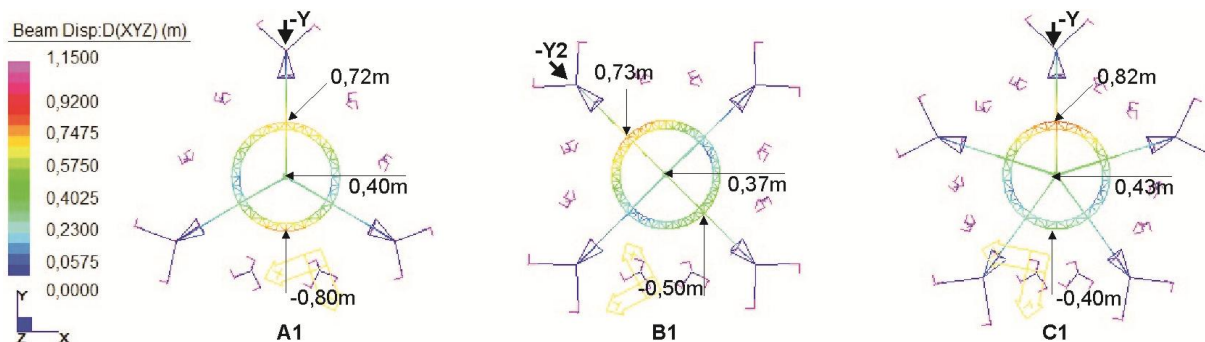


Deslocamentos do sistema suporte

Observaram-se nesses modelos, grandes deslocamentos do sistema suporte, principalmente no anel treliçado e mastro flutuante. Predominam deslocamentos a barlavento em todas as direções. Entretanto, o modelo A1 na direção -Y apresentou também grandes deslocamentos do anel treliçado e mastro flutuante a sotavento, conforme Figura 3.1-34, Figura 3.1-44 e Tabela 3.1-11.

Com o aumento do número de grandes mastros, observou-se a redução da magnitude dos deslocamentos do anel treliçado a sotavento sendo a máxima redução (15% a 30%) observada no modelo C1. Entretanto, com a diminuição da pré-tensão dos cabos do sistema suporte, verificou-se pequeno aumento dos deslocamentos do anel treliçado a barlavento no modelo C1 (direção -Y) em comparação com os modelos A1 e B1.

Figura 3.1-34 – Deslocamentos do sistema suporte – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

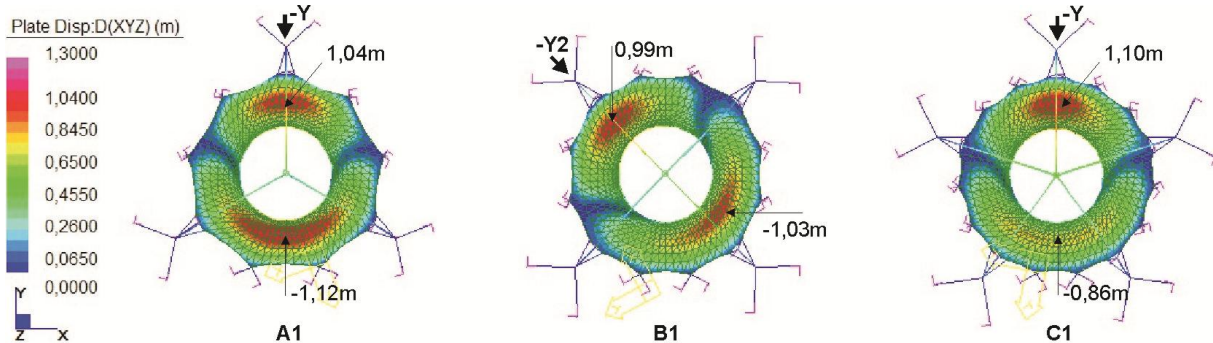


Com carga da chuva associada à carga de vento houve aumento (aprox. 20%) dos deslocamentos do sistema suporte espacial a barlavento e a redução (aprox. 15%) dos deslocamentos do mesmo a sotavento para todas as direções. Esse comportamento foi observado também nas superfícies externas e internas (Tabela 3.1-11).

Deslocamentos da membrana externa

Observaram-se grandes deslocamentos da superfície externa desses modelos a barlavento e a sotavento, derivados de sobrepressão e sucção do vento, respectivamente. Com o aumento do número de mastros, observou-se a redução da magnitude dos deslocamentos a sotavento sendo a máxima (aprox. 10%) observada no modelo C1 (Figura 3.1-35, Figura 3.1-45, Tabela 3.1-11).

Figura 3.1-35 – Deslocamentos da membrana externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

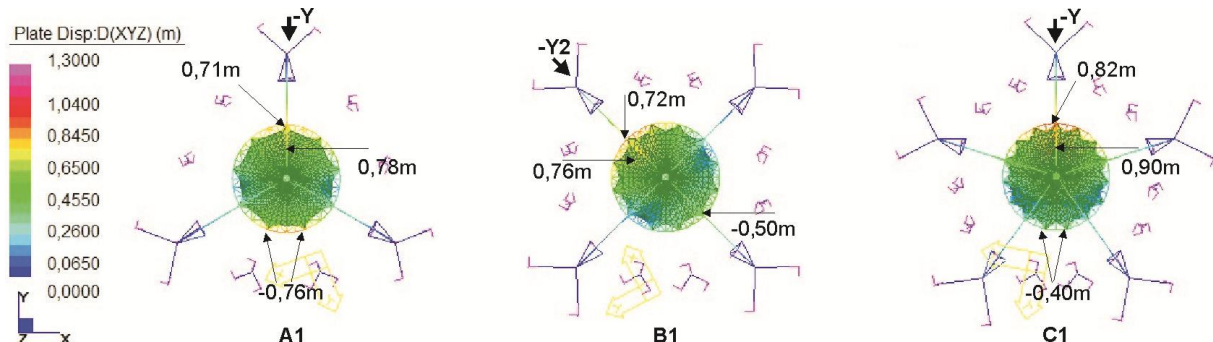


Deslocamentos da membrana interna

A superfície interna desses modelos apresentou comportamento similar ao do sistema suporte. Predominam grandes deslocamentos a barlavento em todas as direções, exceto para o modelo A1 na direção -Y, cuja superfície interna também apresentou grandes deslocamentos a sotavento, conforme Figura 3.1-36, Figura 3.1-46 e Tabela 3.1-11.

Com o aumento do número de grandes mastros, houve também diminuição da magnitude dos deslocamentos na superfície interna sotavento, sendo a máxima observada no modelo C1. Houve pequeno aumento dos deslocamentos desta, a barlavento para o modelo C1, em comparação com os modelos A1 e B1.

Figura 3.1-36 – Deslocamentos da membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)



Comparação dos modelos A1, B1 e C1

Observou-se que a configuração proposta para os modelos do caso 1 (A1, B1 e C1) caracteriza-se por grande flexibilidade, uma vez que o sistema suporte não oferece restrições significativas aos deslocamentos do sistema suporte e das superfícies das membranas. Verificou-se também que os componentes mais solicitados, nestes modelos, foram os mastros.

Entretanto, com o aumento do número de grandes mastros (variável investigada no caso 1) verificou-se a redução dos deslocamentos do sistema suporte e das superfícies a sotavento (resultantes de sucção do vento). Observou-se também a redução das áreas de concentração de tensões nas proximidades dos pontos de ancoragem nas superfícies (mastros) e, portanto o aumento da capacidade dessas de acomodar as cargas.

Com a diminuição da pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte, verificou-se o maior solicitação das superfícies das membranas para alcançar o equilíbrio do sistema. Houve pequeno aumento dos deslocamentos das superfícies e do sistema suporte a barlavento no modelo C1.

Observou-se que o aumento do número de mastros contribuiu para diminuir a flexibilidade do sistema e para a distribuição mais uniforme das tensões nas superfícies. Conseqüentemente, o modelo C1 apresentou melhor desempenho com menor pré-tensão dos cabos do sistema suporte, e a mesma relação massa/ área total que os demais modelos.

Figura 3.1-37 – Tensão Von Mises – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

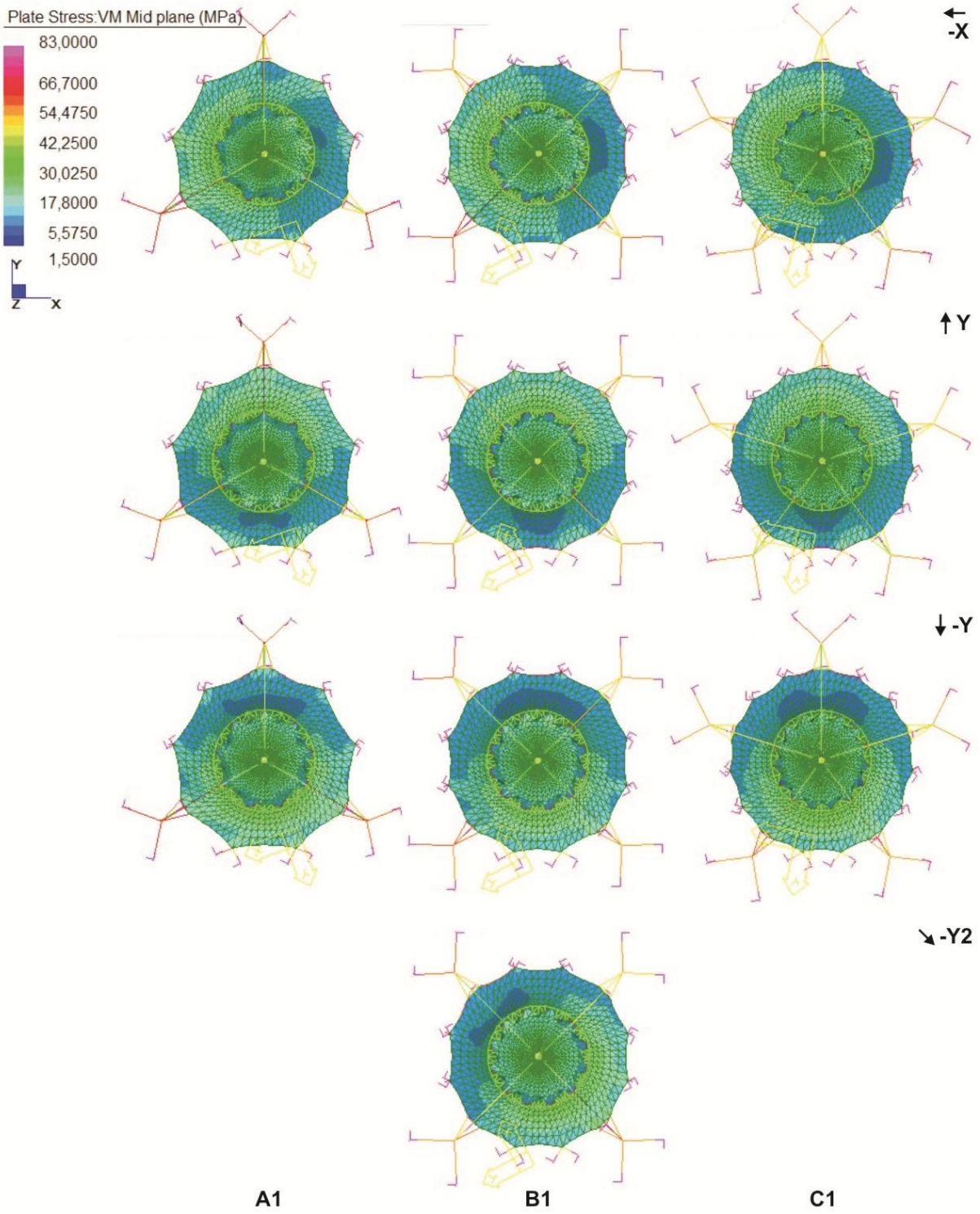


Figura 3.1-38 – Tensão Von Mises – A1, B1, C1 (chuva + vento: -X, Y, -Y, -Y2)

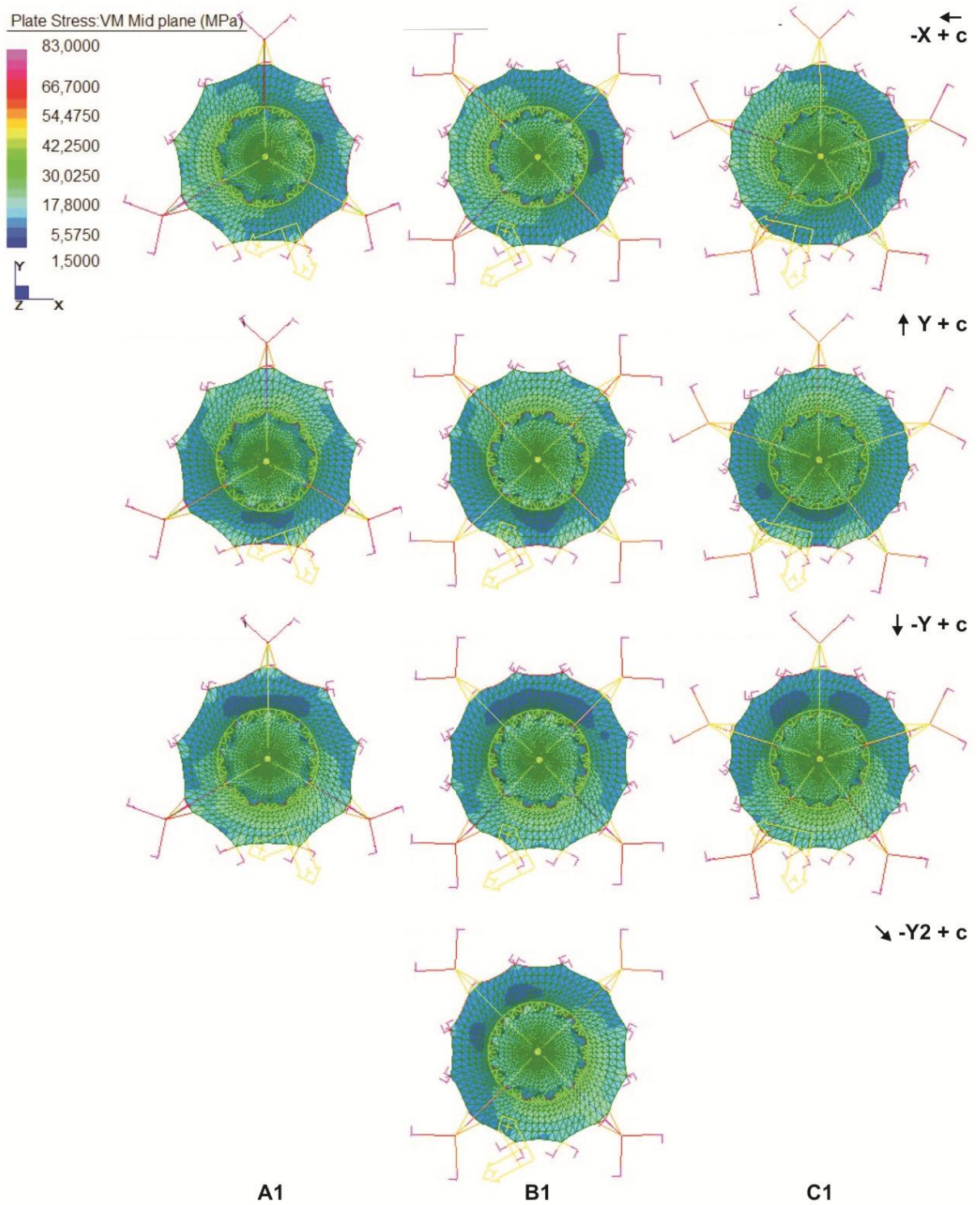


Figura 3.1-39 – Tensão máxima na membrana externa – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

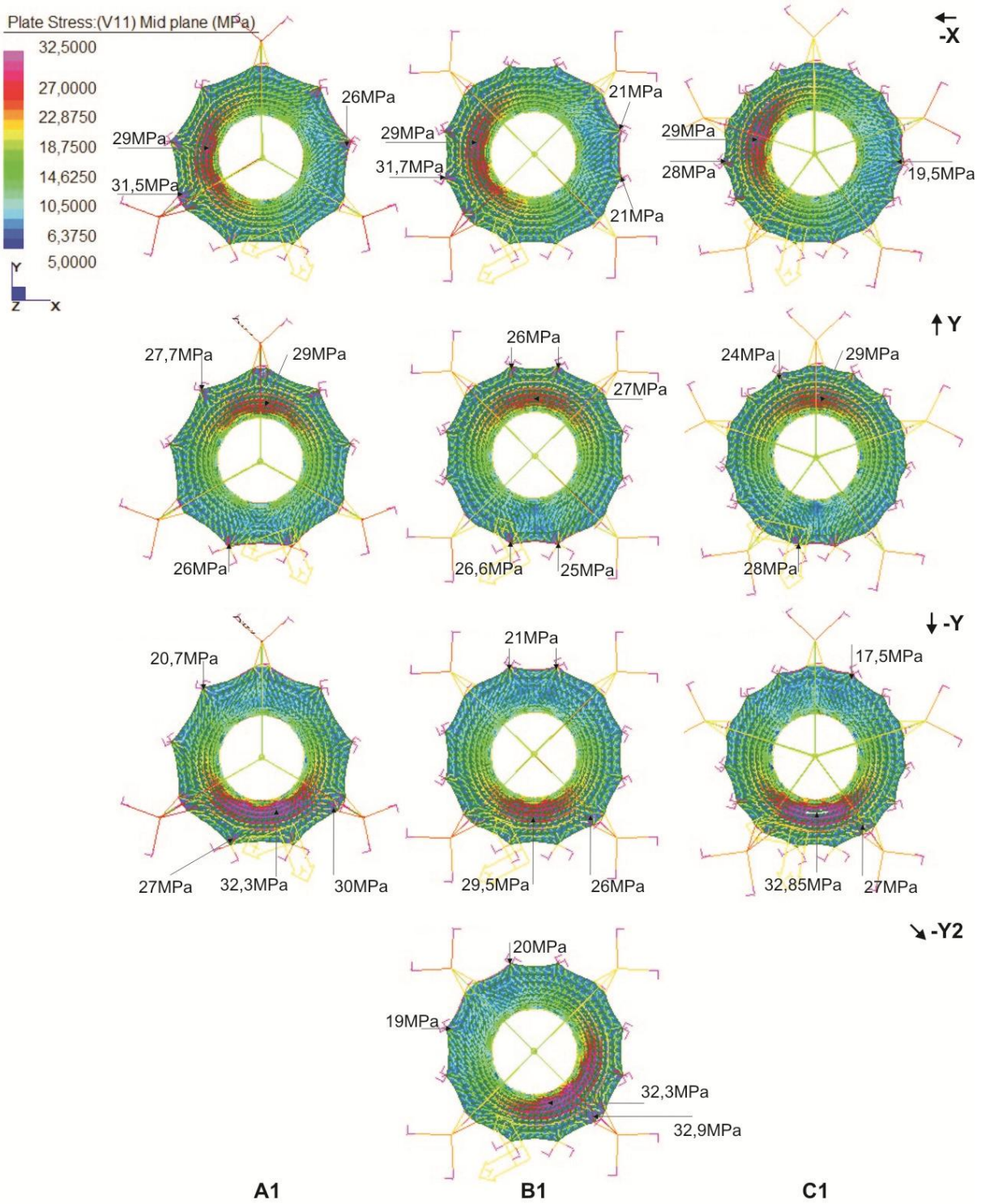


Figura 3.1-40 – Tensão mínima na membrana externa – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

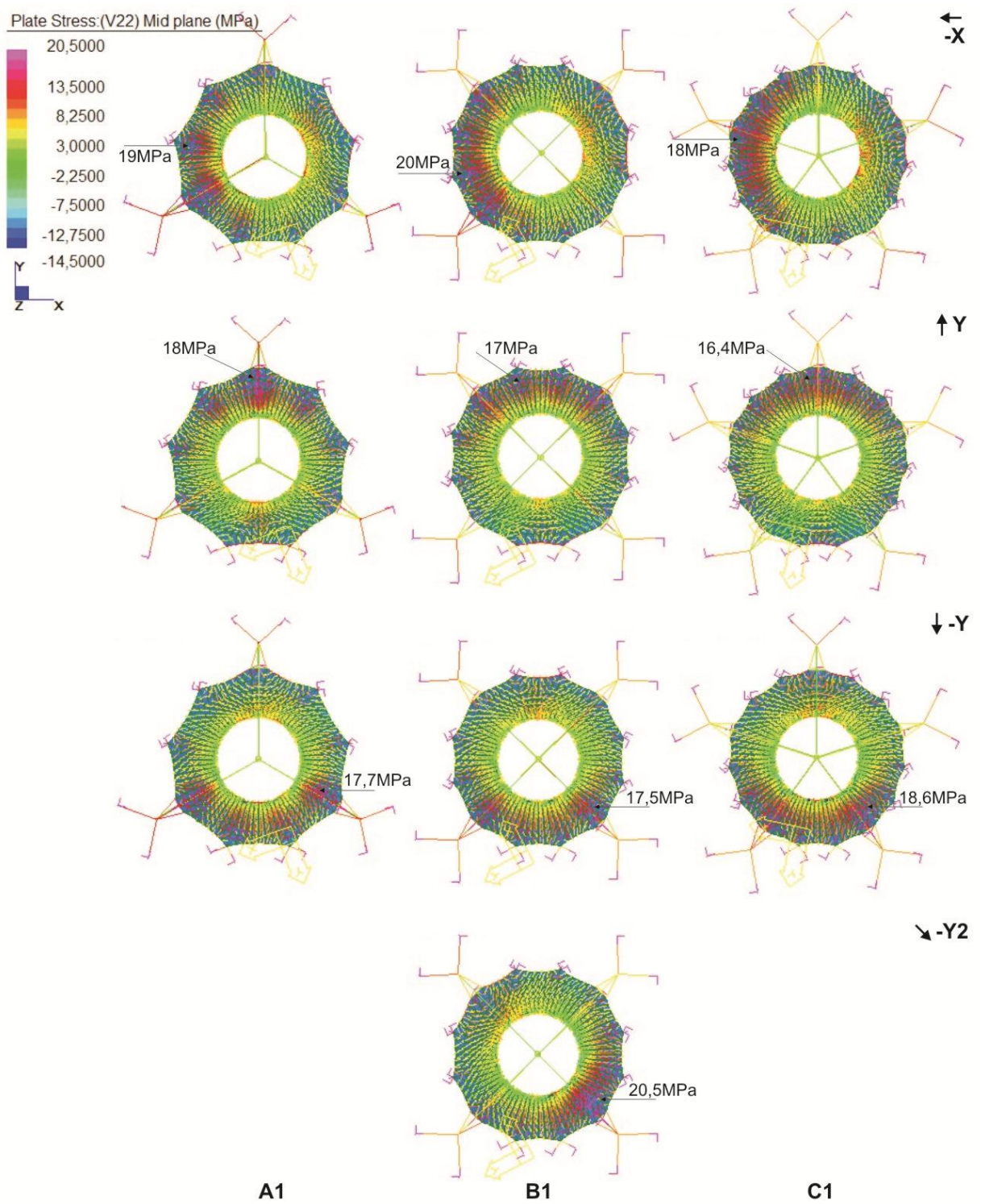


Figura 3.1-41 – Tensão máxima na membrana interna – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

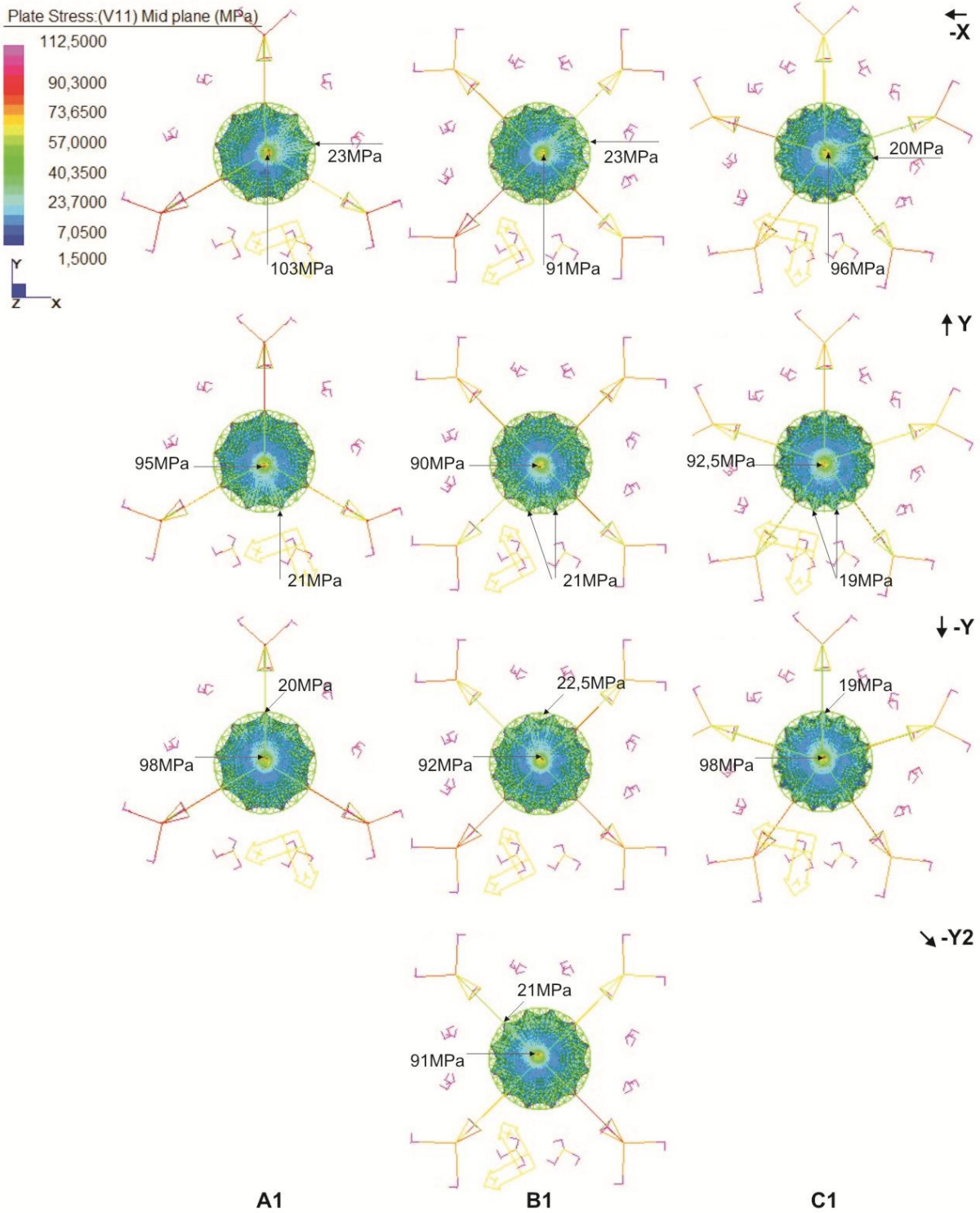
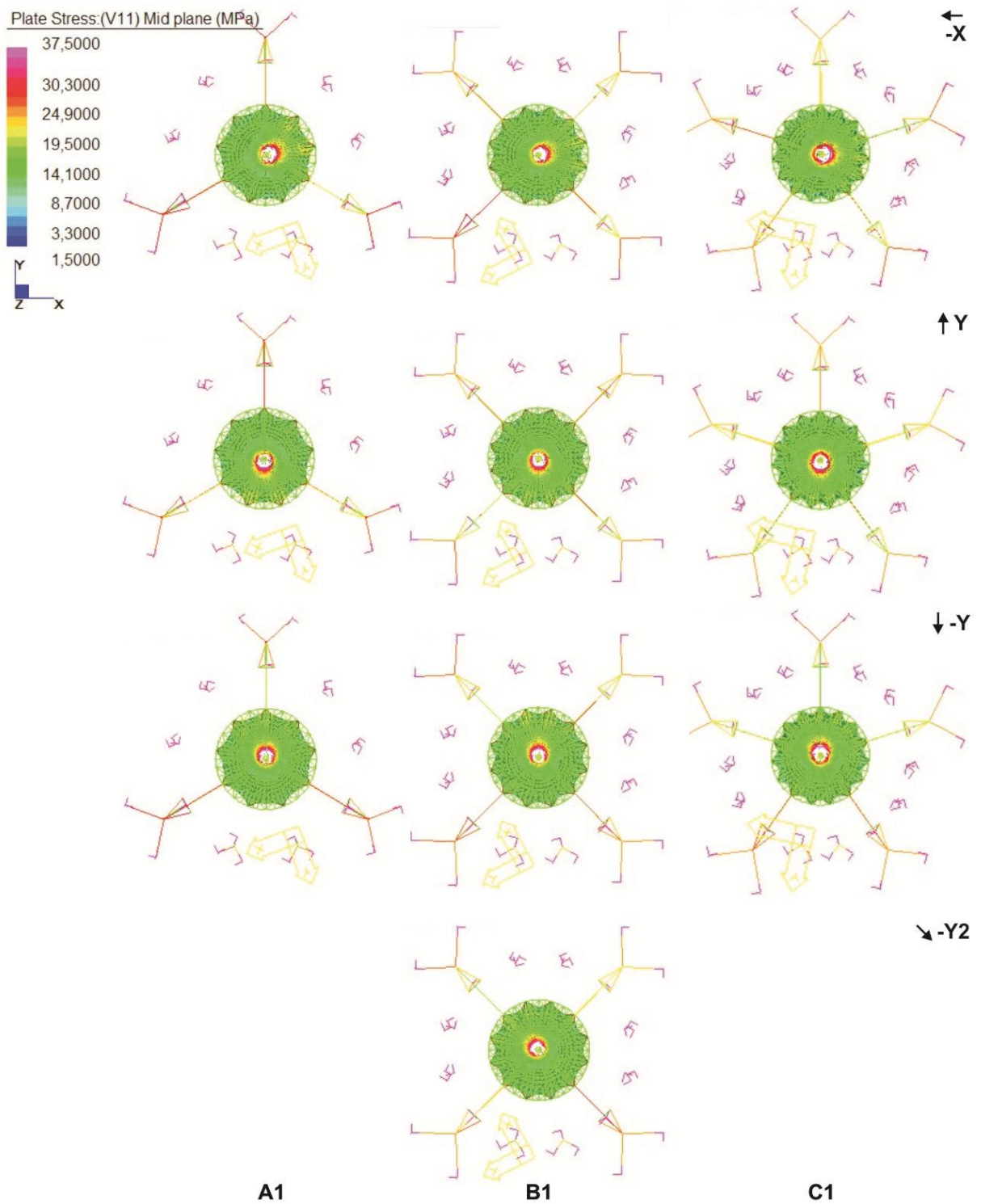


Figura 3.1-42 – Tensão máxima na membrana interna – A1, B1, C1 (tensão máxima do material)



(remoção das áreas de tensão superior à tensão máxima do material) (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

Figura 3.1-43 – Tensão mínima na superfície interna – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

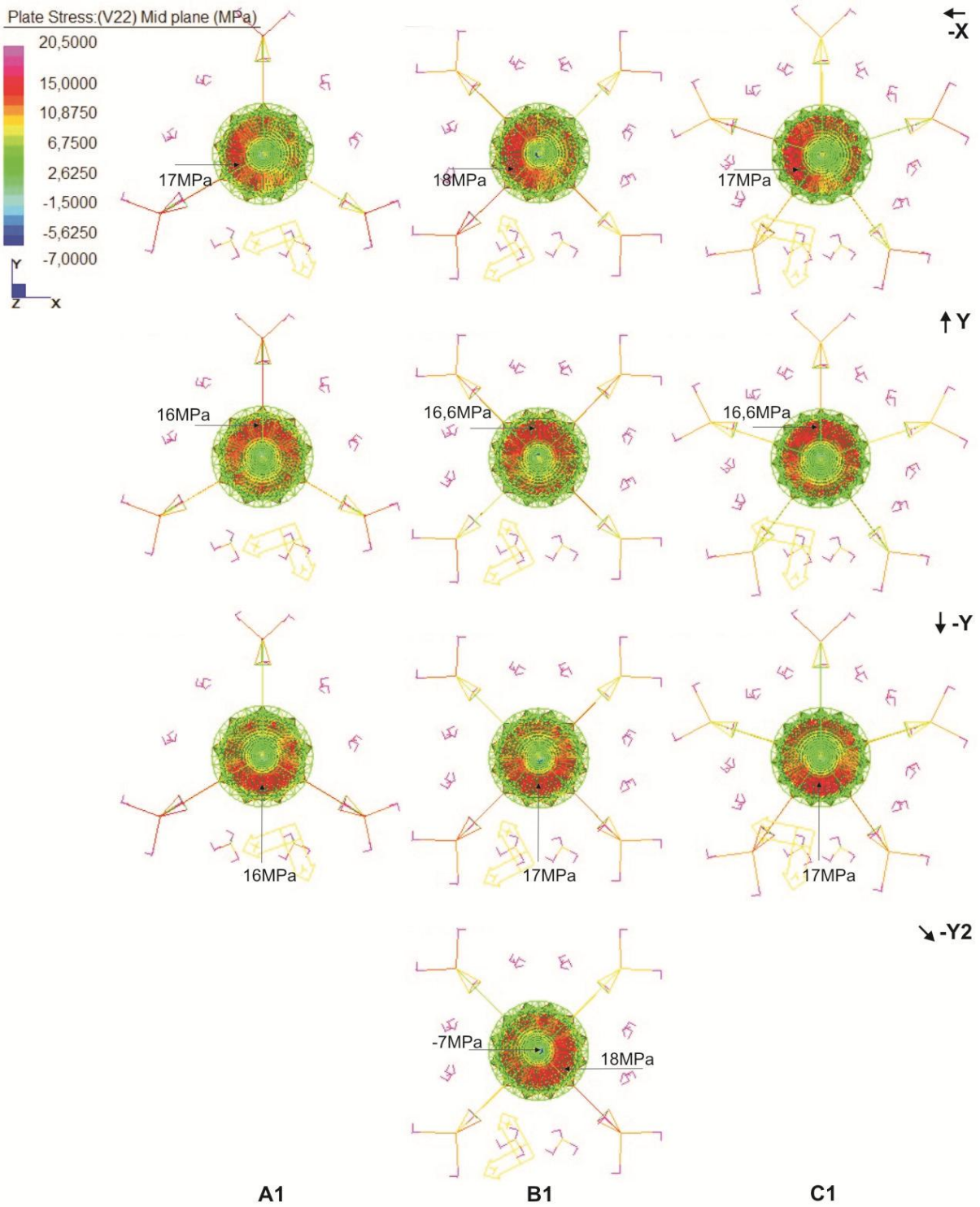


Figura 3.1-44 – Deslocamentos do sistema suporte – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

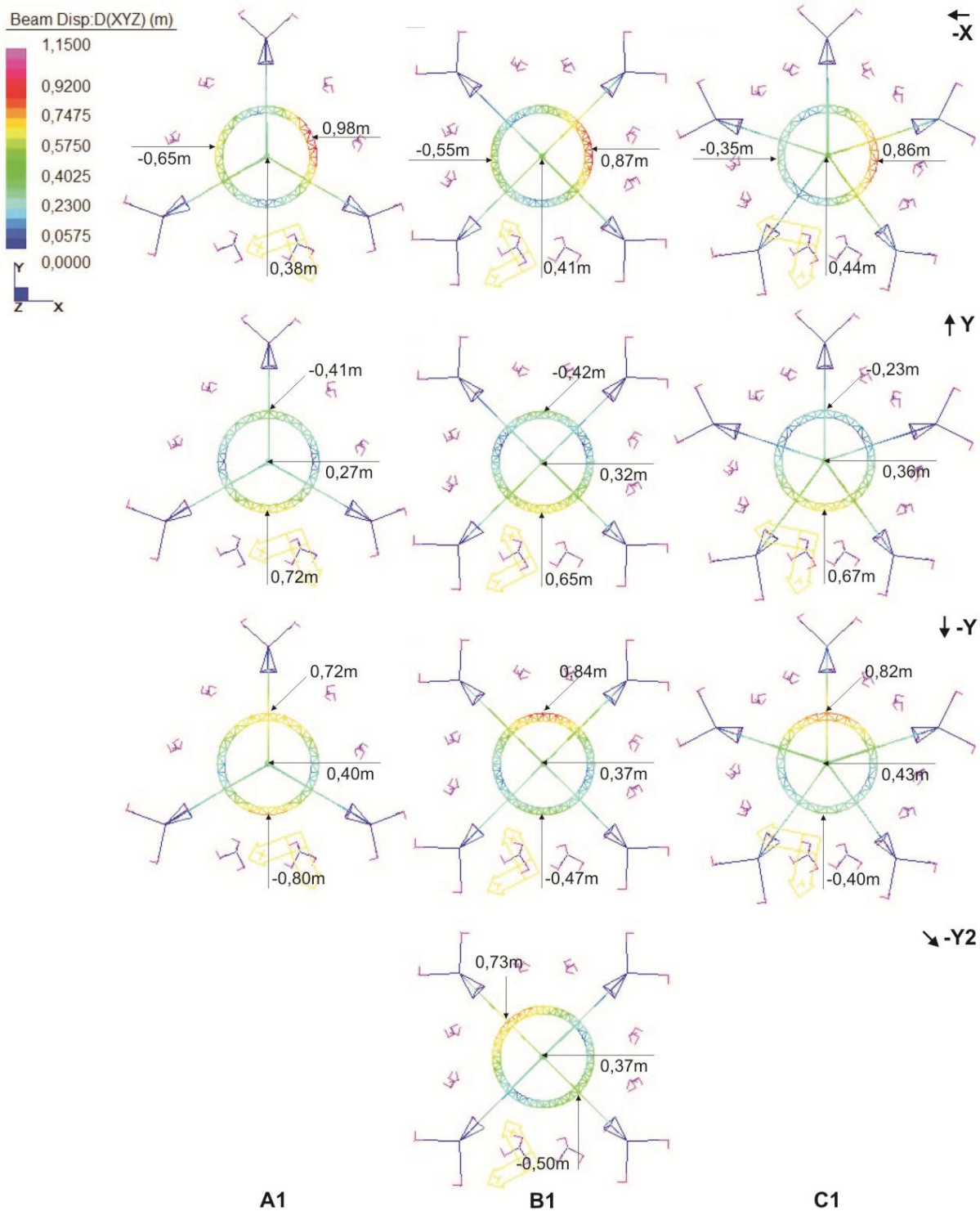


Figura 3.1-45 – Deslocamentos da membrana externa – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

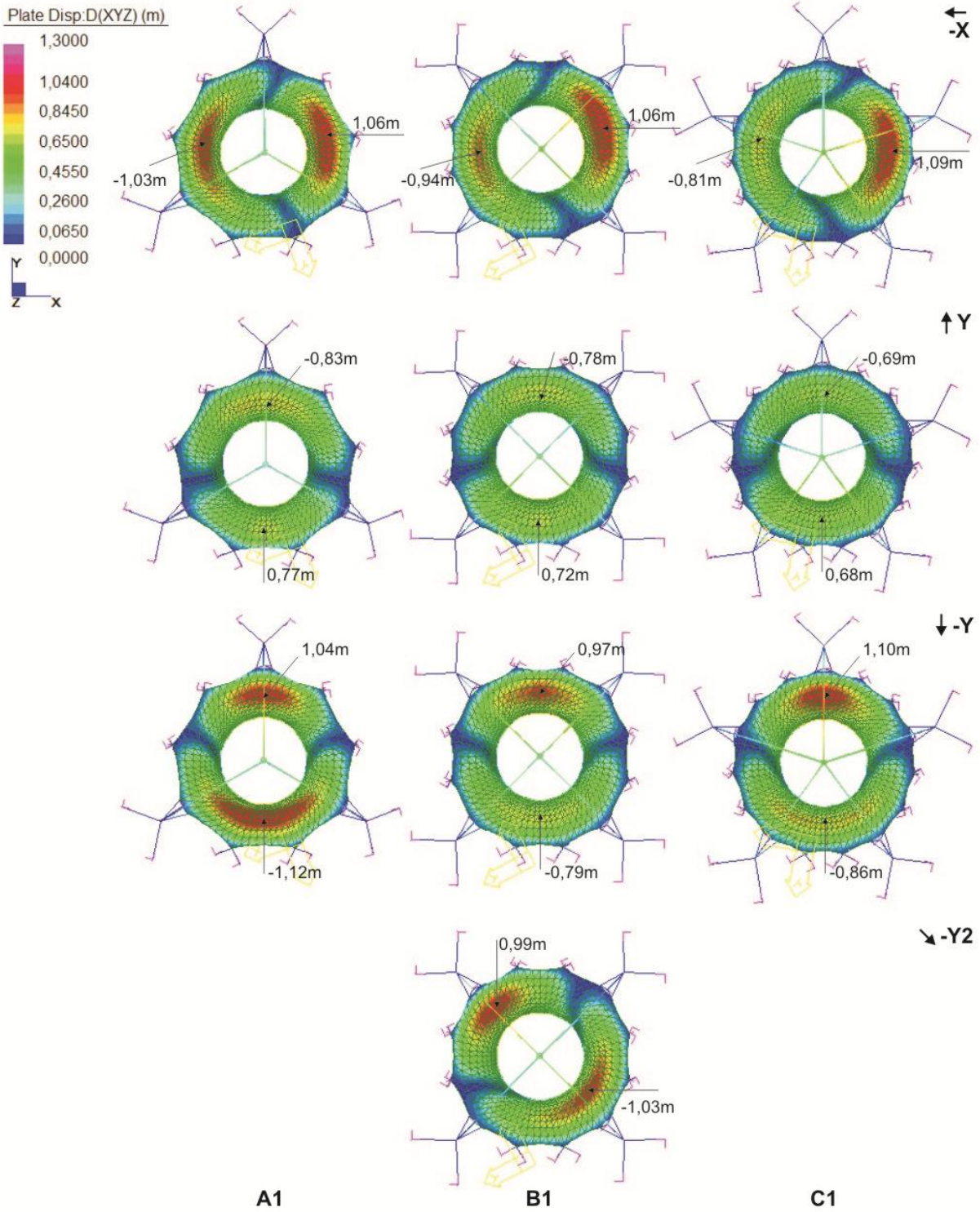
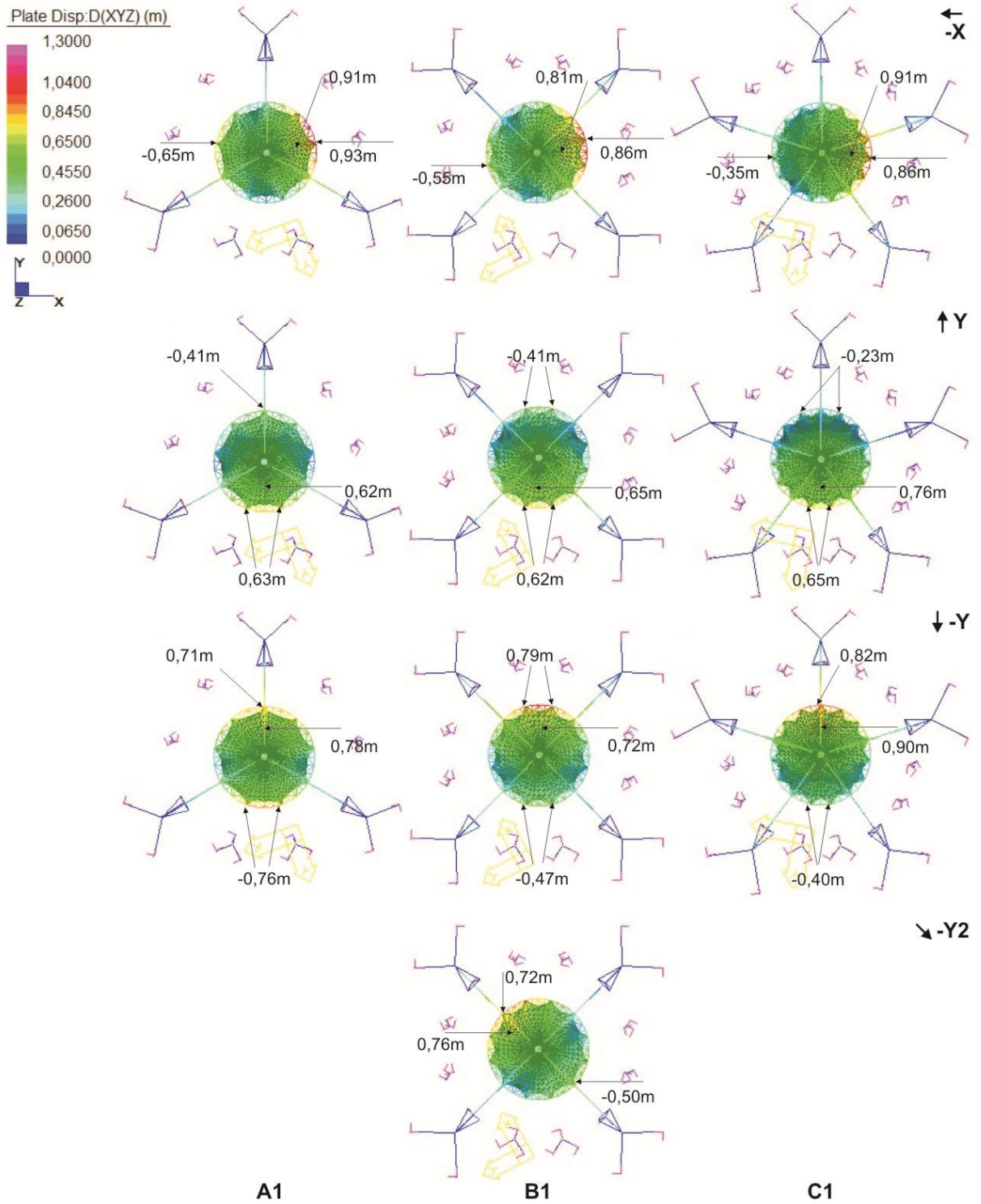


Figura 3.1-46 – Deslocamentos da membrana interna – A1, B1, C1 (vento: -X, Y, -Y, -Y2)



3.1.6.2 Caso 2 – Número de mastros + configuração dos cabos modelos A2-40°, B2-30°, C2-24°, B2-60°, C2-48°









No caso 2 avaliou-se a influência da configuração dos cabos do sistema suporte espacial. Na configuração proposta, o anel treliçado e o mastro flutuante são suportados por dois pares de cabos que se ancoram em três, quatro e cinco grandes mastros. Foram avaliados modelos cujo ângulo entre cabos é definido por um módulo da superfície interna (A2-40°, B2-30°, C2-24°), e por dois módulos da superfície interna (B2-60° C2-48°), Figura 3.1-8 e Figura 3.1-9.

Pré-tensão do sistema

Nos modelos A2-40°, B2-30°, C2-24° (caso 2) verificou-se a redução de pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte com o aumento do número de mastros (variável investigada no caso 1), ou seja, o mesmo comportamento observado nos modelos A1, B1, C1 (caso 1). Além disso, observou-se a mesma relação de pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte nos modelos do caso 1 (A1, B1, C1) e caso 2 (A2-40°, B2-30°, C2-24°). Contudo, a magnitude da pré-tensão no caso 2 aumentou 100%, com a nova configuração dos cabos (Tabela 3.1-14, Tabela 3.1-9).

Os modelos B2-60° e C2-48°, com maior ângulo entre cabos que apoiam o sistema suporte espacial, apresentaram aumento significativo do nível de pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte, em comparação com os modelos B2-30° e C2-24° (Tabela 3.1-14, Tabela 3.1-9).

Tabela 3.1-14 – Pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte nos modelos - casos 1 e 2

caso de carga			análise da membrana							
			vento				vento + chuva			
			-X	Y	-Y	-Y2	-X	Y	-Y	-Y2
pré-tensão cabos do sist. suporte		A1	19,0	19,0	19,0	—	19,0	19,0	19,0	—
		B1	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
		C1	2,5	2,5	2,5	—	2,5	2,5	2,5	—
		A2.40°	38,0	38,0	38,0	—	38,0	38,0	38,0	—
		B2.30°	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
		C2.24°	4,5	4,5	4,5	—	4,5	4,5	4,5	—
		B2.60°	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5
		C2.48°	13,5	13,5	13,5	—	13,5	13,5	13,5	—




Relação massa/ área de cada modelo

Nos modelos A2-40°, B2-30°, B2-60°, C2-48° observou-se o aumento significativo da massa/ área total do sistema, quando comparados aos modelos A1, B1, C1, resultantes da maior solicitação do anel treliçado e grandes mastros (Tabela 3.1-15, Tabela 3.1-10).

Verificou-se que o aumento do ângulo entre cabos que apoiam o sistema suporte espacial, contribuiu para aumentar a massa/ área total dos modelos, principalmente ao se comparar os modelos B2-30° e B2-60°, C2-24° e C2-48°.

Entretanto, com o aumento do número de número de grandes mastros e a redução do ângulo entre cabos do sistema suporte espacial, verificou-se a redução significativa da massa/ área total dos modelos, conforme observado no modelo C2-24° (o qual apresentou massa/área total aproximada a do modelo C1).

Tabela 3.1-15 – Relação massa/área dos modelos - casos 1 e 2

modelos	sistema suporte		membrana			sistema suporte + membrana		
	massa (kg)	%	massa (kg)	área (m ²)	%	massa (kg)	massa/ área	
							(kg/m ²)	%
 A1	23.850,53	1,00	3.224,79	2.388,73	1,00	27.075,32	11,33	1,00
 B1	23.729,89	0,99	3.394,94	2.514,77	1,05	27.124,83	10,79	0,95
 C1	24.398,18	1,02	3.461,56	2.564,12	1,07	27.859,74	10,87	0,96
 A2 40°	49.089,02	2,06	3.224,79	2.388,73	1,00	52.313,81	21,90	1,93
 B2 30°	33.111,38	1,39	3.394,94	2.514,77	1,05	36.506,32	14,52	1,28
 C2 24°	21.672,05	0,91	3.461,56	2.564,12	1,07	25.133,61	9,80	0,86
 B2 60°	43.628,78	0,89	3.394,94	2.514,77	1,05	47.023,72	18,70	1,65
 C2 48°	28.935,63	1,21	3.461,56	2.564,12	1,07	32.397,19	12,63	1,11

Distribuição das tensões nas superfícies das membranas externa e interna

As superfícies dos modelos A2-40°, B2-30° e C2-24° (Figura 3.1-48, Figura 3.1-64) apresentaram comportamento similar às superfícies dos modelos A1, B1 e C1 (Figura 3.1-47, Figura 3.1-37), mas com aumento das áreas de concentração de tensões a barlavento. As superfícies internas também apresentaram aumento das áreas de concentração de tensões a sotavento. Observou-se a redução destas áreas e a distribuição mais homogênea das tensões nas superfícies com o aumento do número de mastros.

No modelo C2-48° e principalmente no modelo B2-60° (Figura 3.1-48, Figura 3.1-65) verificou-se também o aumento das áreas de concentração de tensão nas proximidades dos pontos de ancoragem das superfícies a barlavento, comparados aos modelos B2-30° e C2-24°, (Figura 3.1-48, Figura 3.1-64).

Figura 3.1-47 – Tensões Von Mises – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

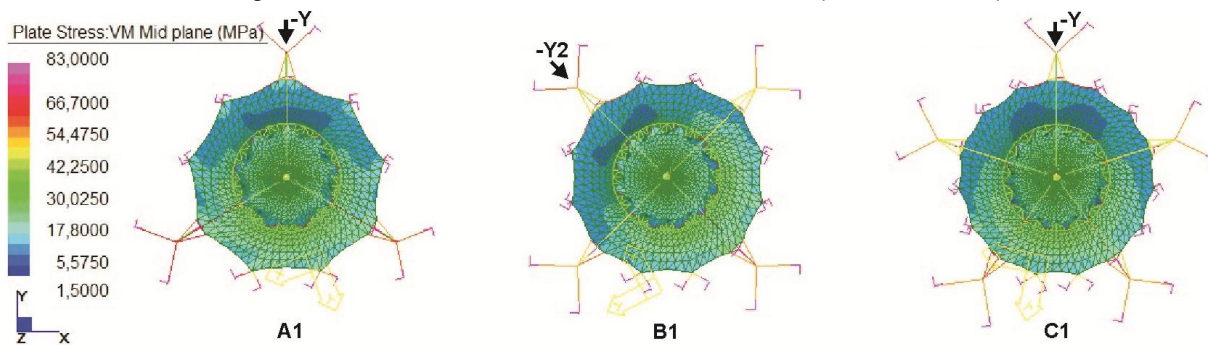
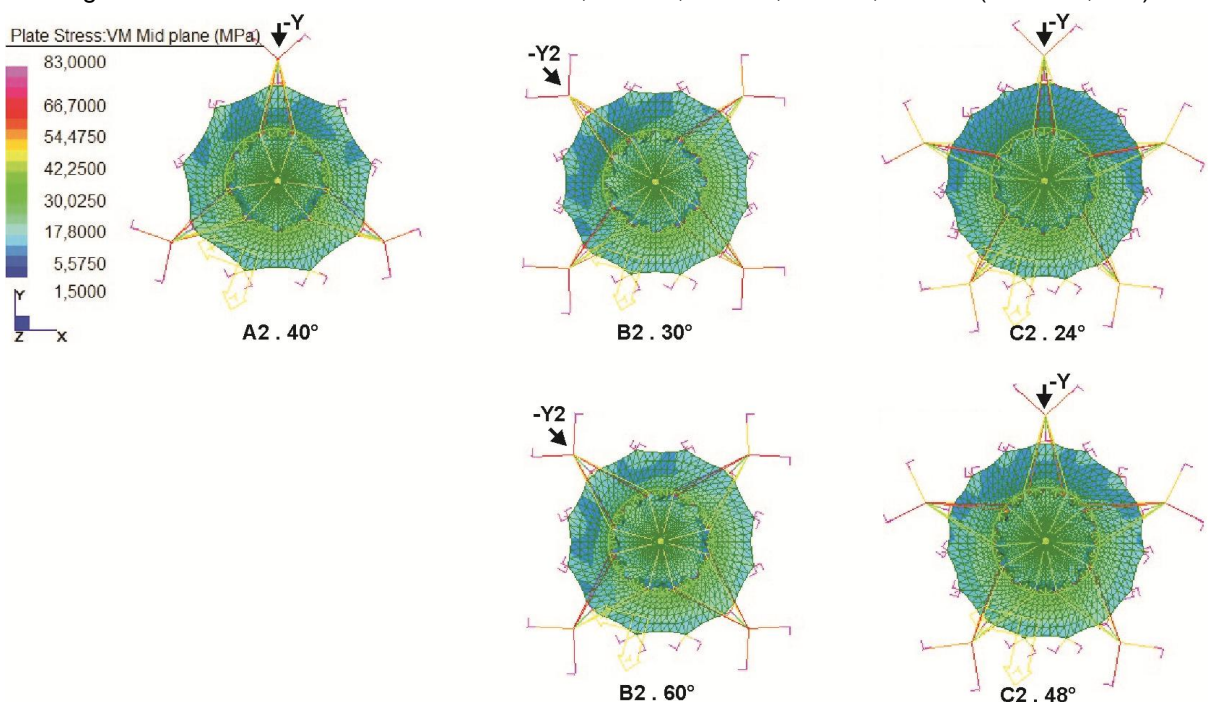


Figura 3.1-48 – Tensão Von Mises – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)



Nas superfícies externas dos modelos A2-40°, B2-30° e C2-24° (Figura 3.1-50, Figura 3.1-66) predominam áreas de concentração de tensões nas proximidades do anel treliçado a sotavento (resultante da sucção), e nas proximidades dos seus pontos de ancoragem (mastros) a barlavento e sotavento, conforme as trajetórias de tensão máxima (direção circunferencial). Houve também aumento da magnitude das tensões nas proximidades dos pontos de ancoragem destas superfícies a barlavento, comparadas aos modelos A1, B1 e C1 (Figura 3.1-49, Figura 3.1-39). Com o aumento do número de mastros houve redução destas tensões e áreas.

Nas superfícies externas do modelo B2-60° e C2-48° (Figura 3.1-50, Figura 3.1-67) verificou-se também o aumento da magnitude das tensões nas proximidades

dos pequenos mastros a barlavento, comparados a B2-30° e C2-24°, conforme as trajetórias de tensão máxima. Registrou-se também no modelo C2-48° o aumento da magnitude das tensões nas proximidades do anel treliçado a sotavento na direção Y.

Figura 3.1-49 – Tensão máxima na membrana externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

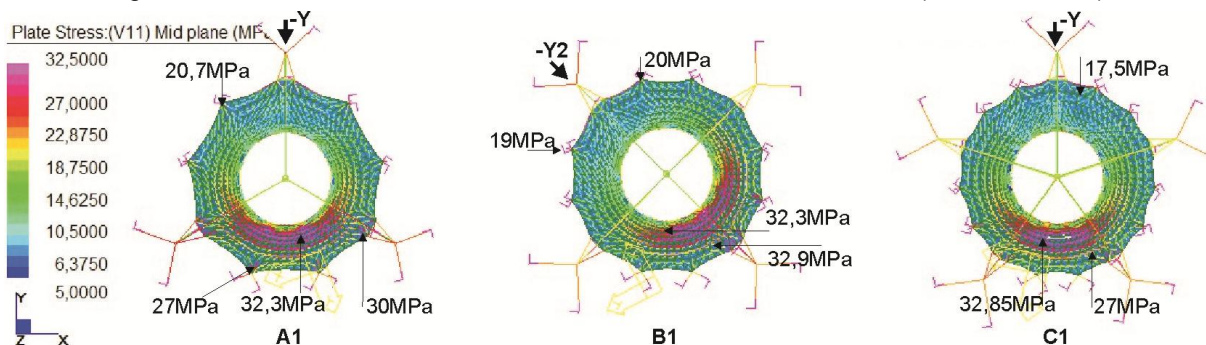
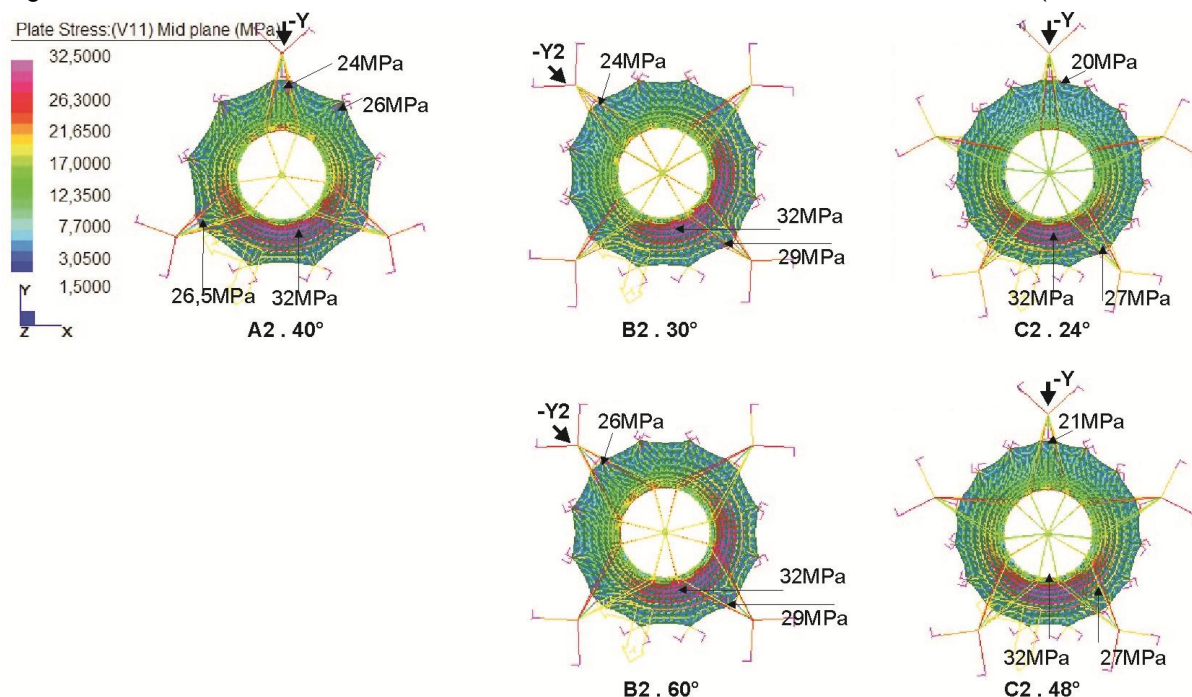


Figura 3.1-50 – Tensão máx. membrana externa – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)



Nos modelos do caso 2 (A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48°) não foram verificadas áreas de compressão ou de acúmulo de água na base das superfícies externas, conforme as trajetórias de tensão mínima (direção radial), (Figura 3.1-52, Figura 3.1-68 e Figura 3.1-69). Nos modelos A1, B1 e C1, predominam áreas de mínimas tensões e grandes deslocamentos a barlavento (Figura 3.1-51, Figura 3.1-40). Porém, nos modelos do caso 2, observou-se maior estabilidade das superfícies nessa direção.

Figura 3.1-51 – Tensão mínima na superfície externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

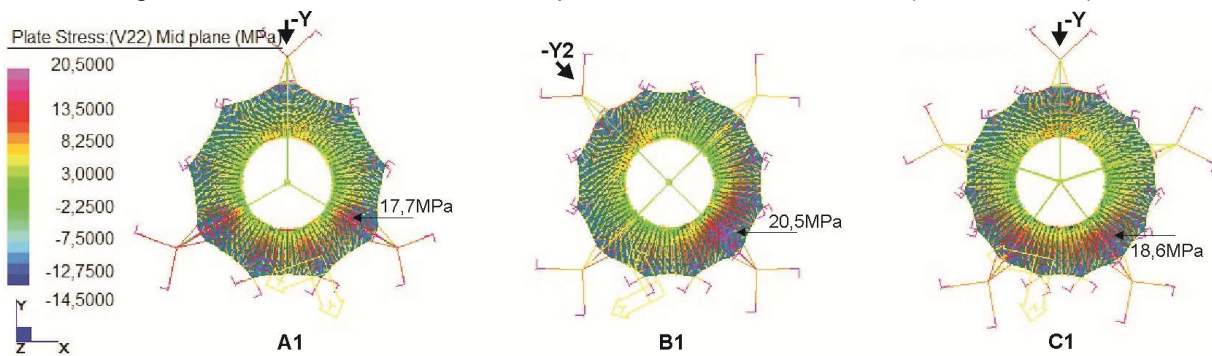
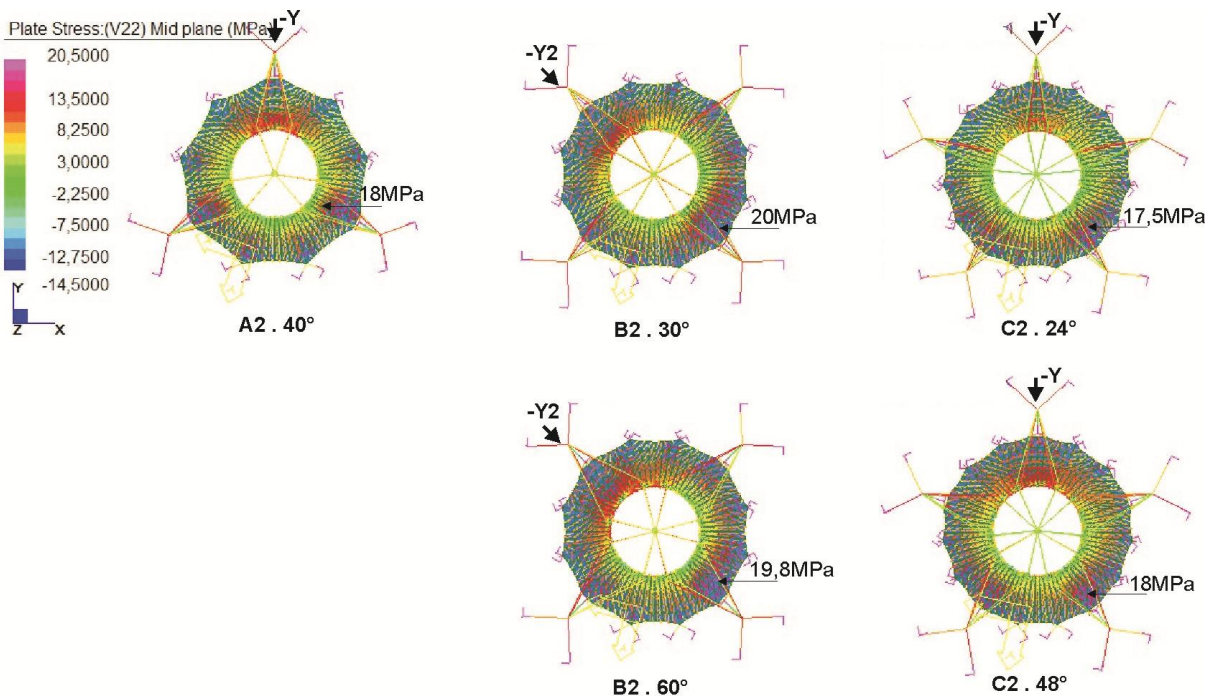


Figura 3.1-52 – Tensão mín. membrana externa – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y; -Y2)



As superfícies internas dos modelos A2-40°, B2-30°, C2-24° (Figura 3.1-54, Figura 3.1-70) também apresentaram elevada concentração de tensões no topo (nas proximidades do anel superior) a barlavento, conforme trajetórias de tensão máxima (direção radial). No entorno dessa região predomina na superfície um campo de tensões de menor magnitude, mas que apresentou pequeno aumento das tensões a barlavento e a sotavento, comparada a dos modelos A1, B1, C1 (Figura 3.1-53, Figura 3.1-41). Verificaram-se também áreas de concentração de tensões nas proximidades dos pontos de ancoragem da superfície ao anel treliçado a barlavento. Na base das superfícies internas do modelo C2-24° predominam tensões mais reduzidas a barlavento.

Nas superfícies internas dos modelos B2-60° e C2-48° (Figura 3.1-54, Figura 3.1-71) observou-se aumento da magnitude das tensões nas proximidades dos seus

pontos de ancoragem ao anel treliçado a barlavento (principalmente) e a sotavento, comparadas as dos modelos B2-30° e C2-24°, conforme trajetórias de tensão máxima (direção radial).

Figura 3.1-53 – Tensão máxima na membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

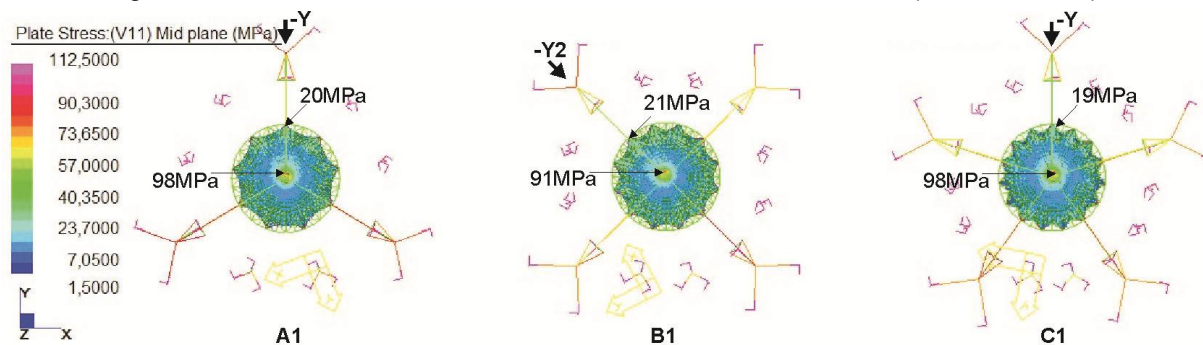
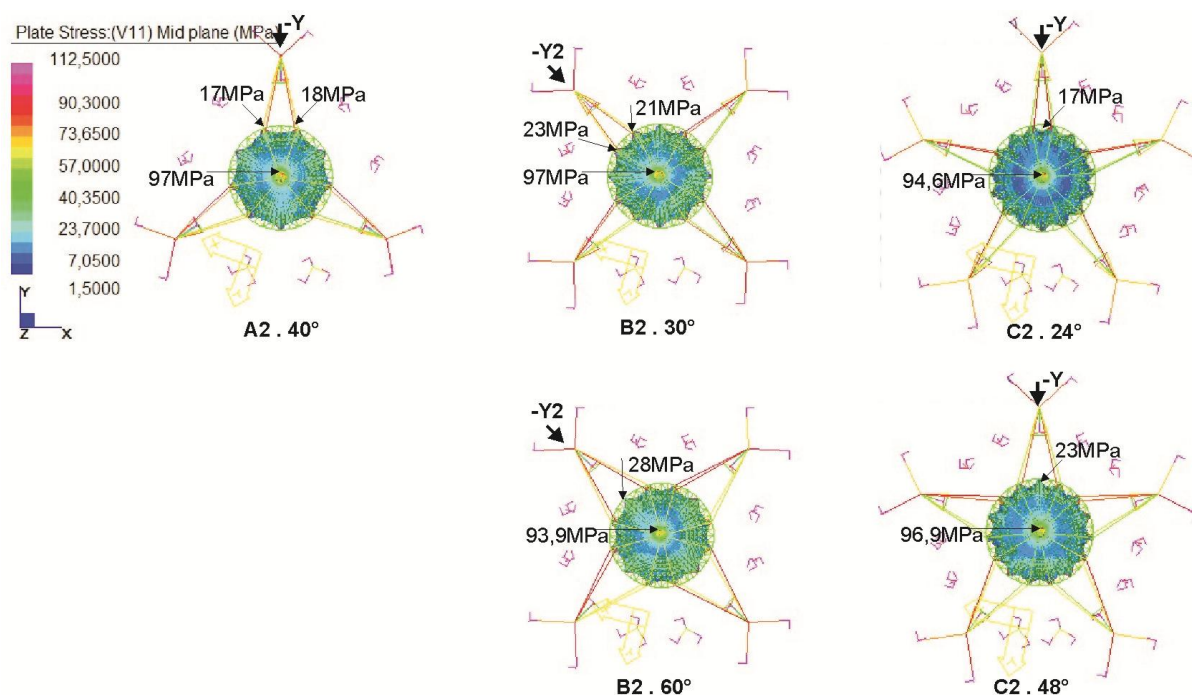


Figura 3.1-54 – Tensão máx. membrana interna – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)



Não foram verificadas áreas de compressão ou de acúmulo de água na base das superfícies internas dos modelos A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48°, conforme as trajetórias de tensão mínima (direção circunferencial), (Figura 3.1-56, Figura 3.1-72 e Figura 3.1-73). As superfícies internas dos modelos dos casos 1 e 2 apresentaram distribuição de tensões similar (Figura 3.1-55, Figura 3.1-43).

Figura 3.1-55 – Tensão mínima na membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

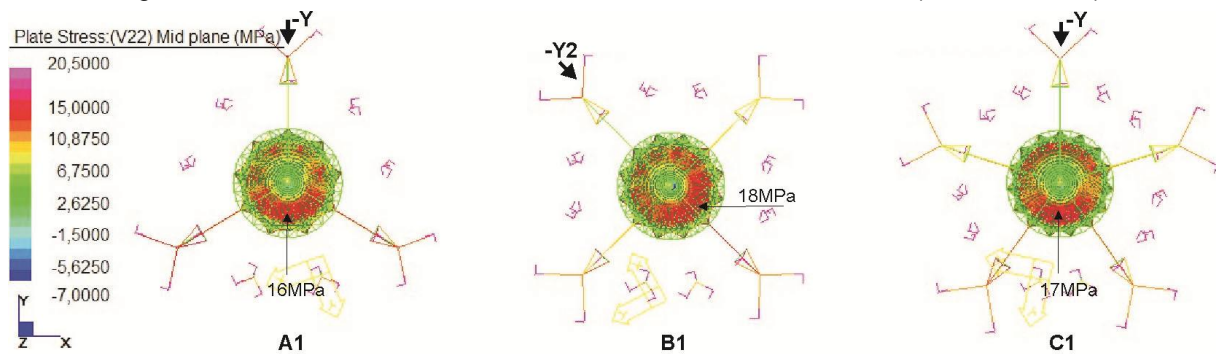
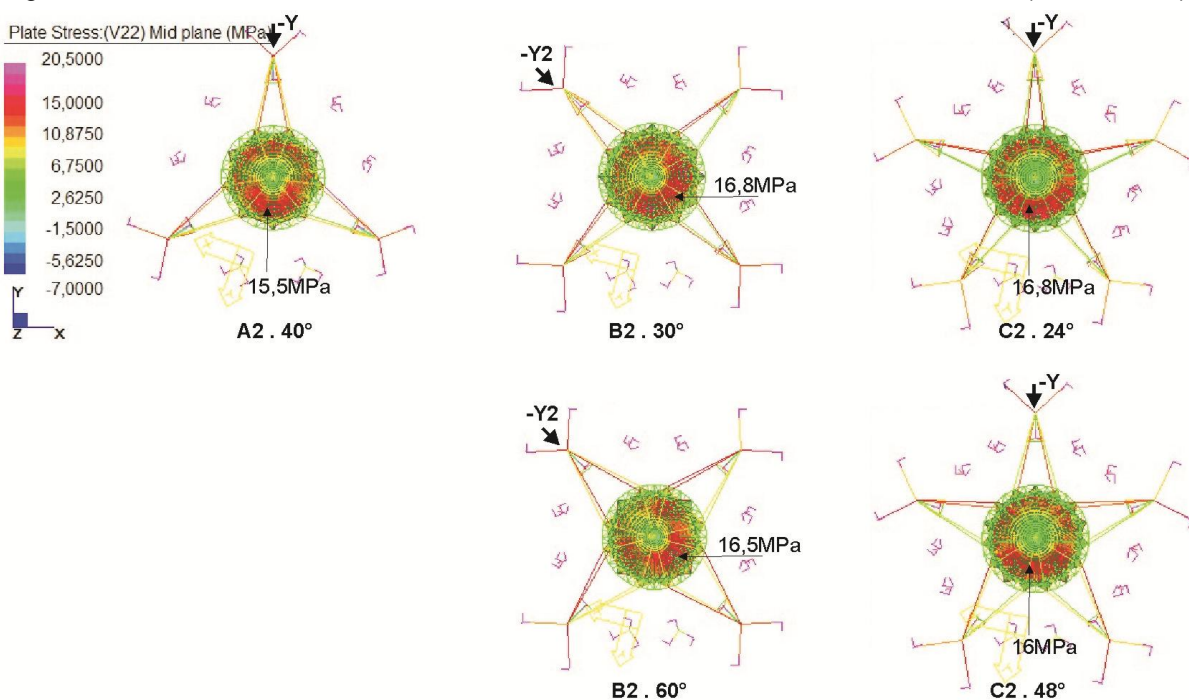


Figura 3.1-56 – Tensão mín. membrana interna – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)



Deslocamentos do sistema suporte

Nos modelos A2-40°, B2-30° e C2-24° (Figura 3.1-58, Figura 3.1-74, Tabela 3.1-11), observou a redução significativa dos deslocamentos do sistema suporte, principalmente a barlavento, comparados aos modelos A1, B1 e C1 (Figura 3.1-57, Figura 3.1-44), como pode ser observado:

- modelo A2-40°: redução aproximada de 75% a barlavento e 30% a sotavento;
- modelo B2-30°: redução aproximada de 65% a barlavento e 25% a sotavento;
- modelo C2-24°: redução aproximada de 30% a barlavento e 20% a sotavento.

Nos modelos A2-40° e B2-30° predominam deslocamentos no anel treliçado a sotavento em todas as direções de vento analisadas. No modelo C2-24° (com menor ângulo entre par de cabos e menor pré-tensão aplicada aos cabos) os maiores

deslocamentos foram verificados a barlavento em todas as direções. No mastro flutuante desses modelos predominam deslocamentos a barlavento.

Com o aumento do ângulo entre cabos, observou-se a redução dos deslocamentos do anel treliçado e do mastro flutuante a barlavento no modelo B2-60° (aprox. 20%) e principalmente no modelo C2-48° (aprox. 50%), comparados aos modelos B2-30° e C2-24° (Figura 3.1-58, Figura 3.1-74, Figura 3.1-75).

Figura 3.1-57 – Deslocamentos do sistema suporte – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

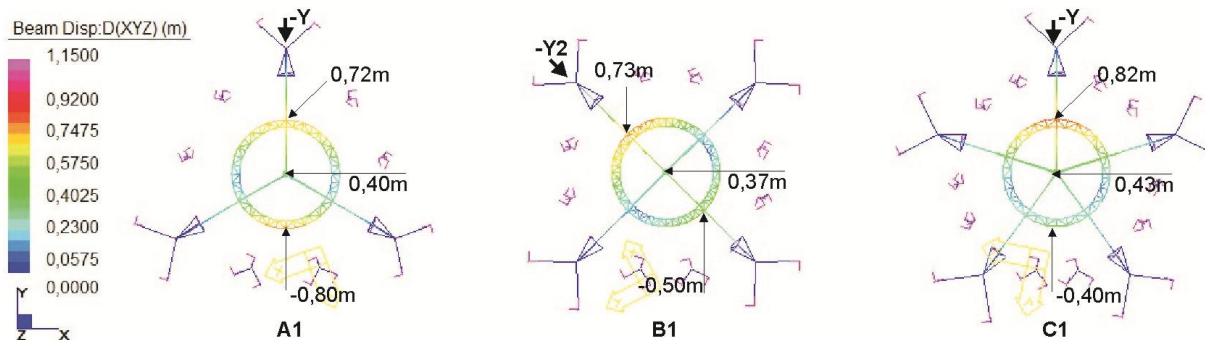
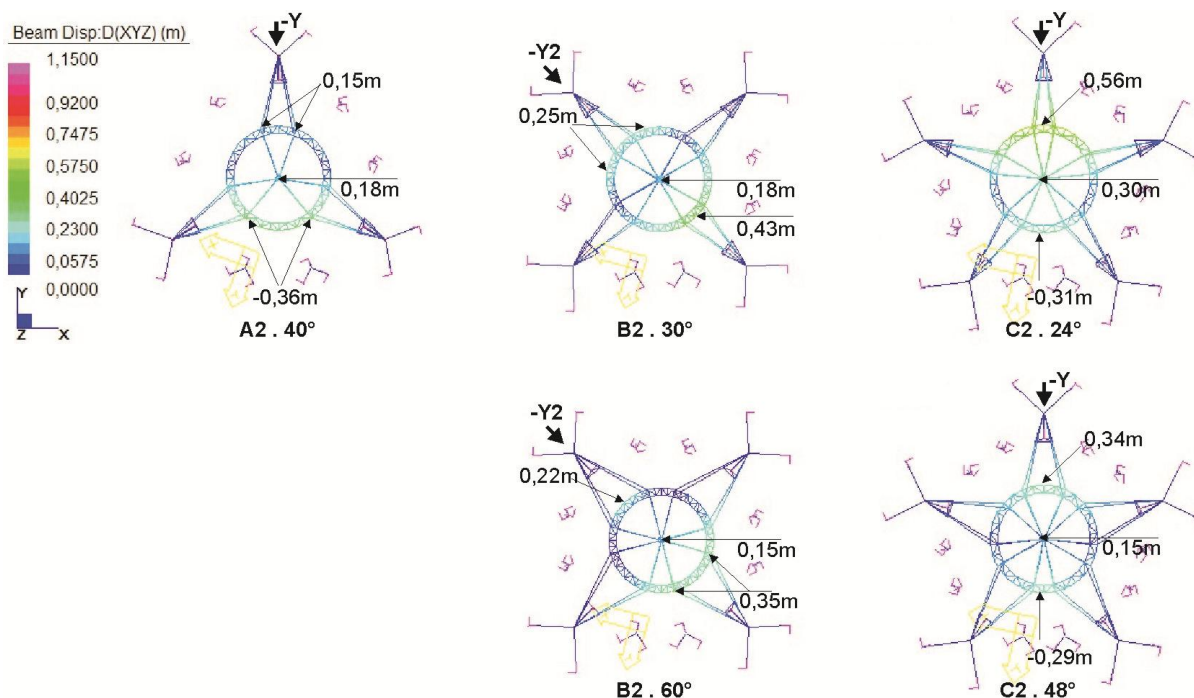


Figura 3.1-58 – Deslocamentos sistema suporte – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)



Com as cargas da chuva e vento, observou-se a redução dos deslocamentos do sistema suporte derivados de sucção (aprox. 20%). Houve também aumento nos deslocamentos de sobrepessão nos modelos A2-40, B2-60° e C2-48° (aprox. 30% a 50%) e nos modelos B2-30° e C2-24° (aprox. 30% a 20%, respectivamente). Tal comportamento também foi observado nas superfícies, conforme Tabela 3.1-11.

Deslocamentos da superfície da membrana externa

Observou-se a redução significativa dos deslocamentos da superfície externa a barlavento nos modelos A2-40°, B2-30° e C2-24° (Figura 3.1-60, Figura 3.1-76, Tabela 3.1-11), comparados aos modelos A1, B1 e C1 (Figura 3.1-59, Figura 3.1-45):

- modelo A2-40°: redução aproximada de 45% a barlavento e 12% a sotavento;
- modelo B2-30°: redução aproximada de 45% a barlavento e 7% a sotavento;
- modelo C2-24°: redução aproximada de 25% a barlavento e 3% a sotavento.

Figura 3.1-59 – Deslocamentos da membrana externa – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

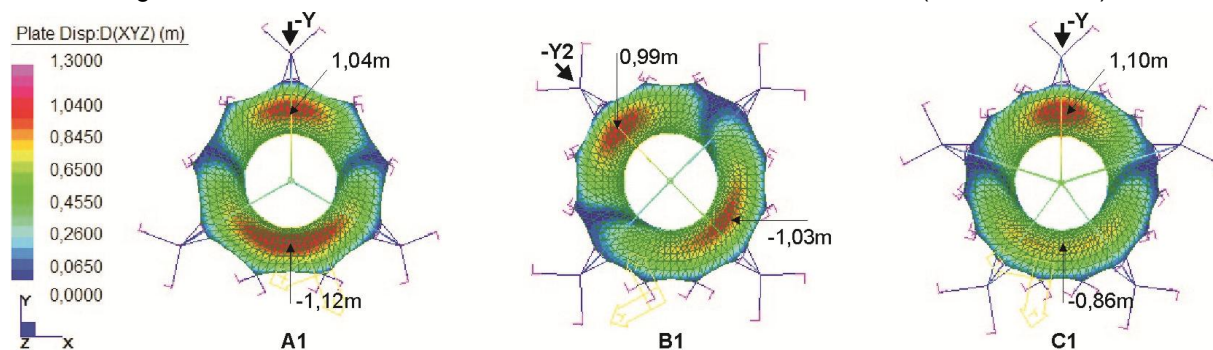
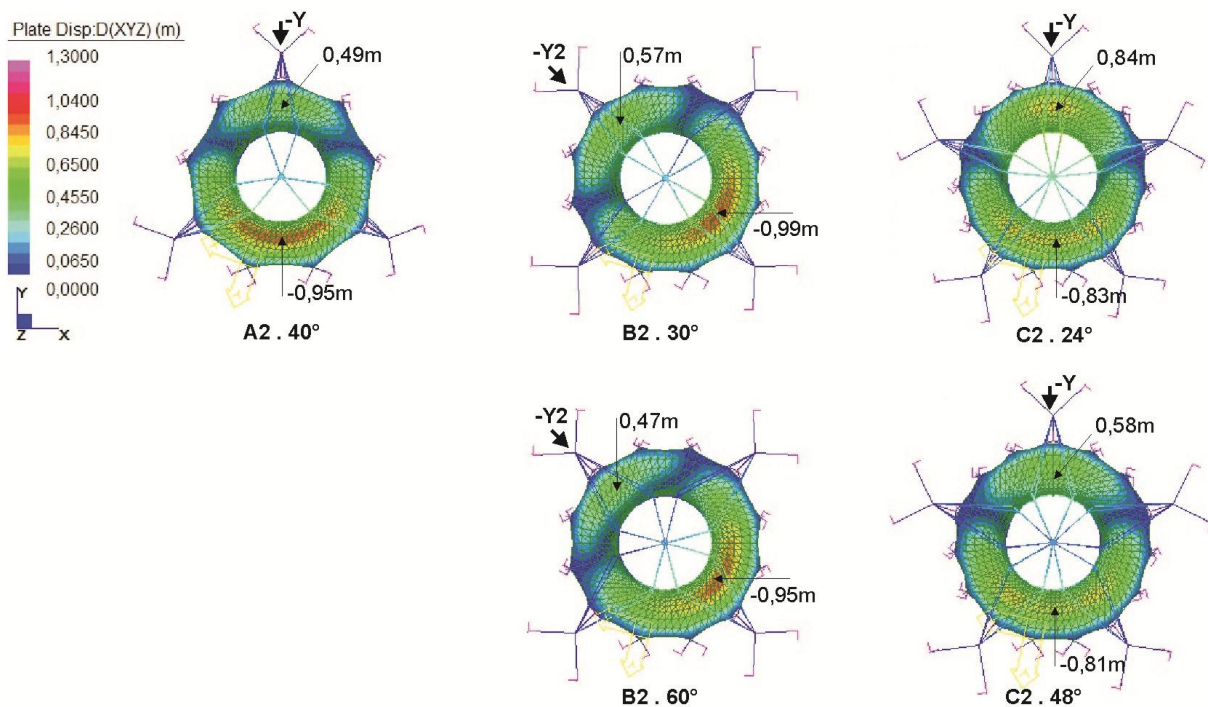


Figura 3.1-60 – Deslocamentos memb. externa – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)



Com o aumento do ângulo entre cabos, houve redução dos deslocamentos na superfície externa a barlavento no modelo B2-60° e principalmente no modelo C2-48°, comparados aos modelos B2-30° e C2-24°(Figura 3.1-60, Figura 3.1-77).

Nos modelos A2-40°, B2-30°, B2-60° e C2-48° predominam deslocamentos da superfície externa a sotavento, para todas as direções de vento. No modelo C2-24° os deslocamentos a barlavento e a sotavento são similares.

Deslocamentos da superfície da membrana interna

Verificou-se a redução dos deslocamentos das superfícies internas, principalmente a barlavento, nos modelos A2-40°, B2-30° e C2-24°(Figura 3.1-62, Figura 3.1-78), comparados aos modelos A1, B1 e C1 (Figura 3.1-61, Figura 3.1-46).

Figura 3.1-61– Deslocamentos da membrana interna – A1, B1, C1 (vento -Y e -Y2)

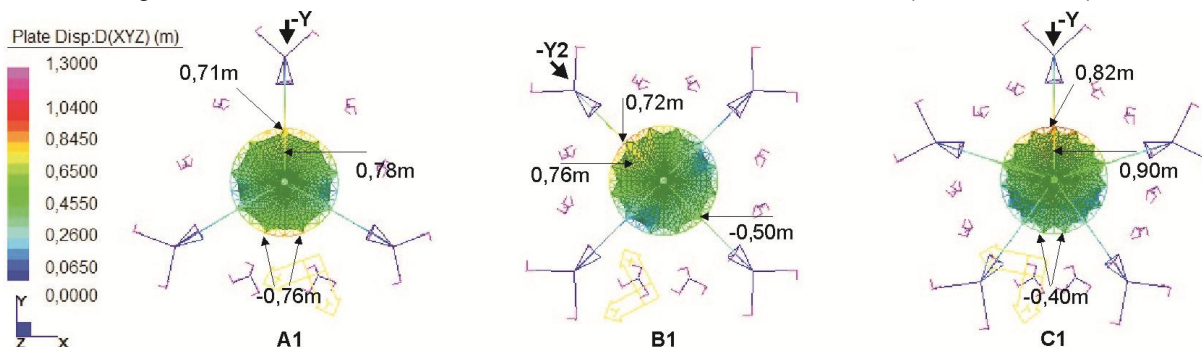
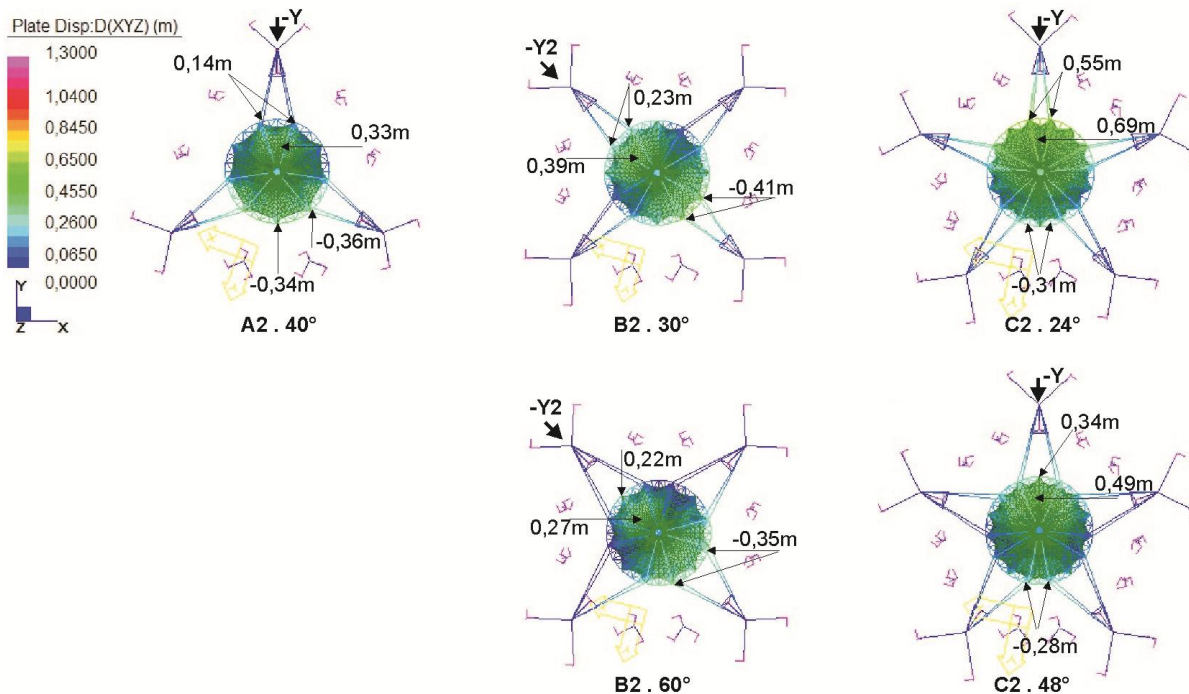


Figura 3.1-62 – Deslocamentos memb. interna – A2-40°, B2-30°, C2-24°; B2-60°, C2-48° (vento -Y, -Y2)



A redução dos deslocamentos da superfície interna foi similar a do sistema suporte:

- modelo A2-40°: aprox. 75% a barlavento e 40% a sotavento;
- modelo B2-30°: aprox. 60% a barlavento e 25% a sotavento;

- modelo C2-24°: aprox. 30% a barlavento e 20% a sotavento.

Com o aumento do ângulo entre cabos, observou-se também a diminuição dos deslocamentos na superfície interna a barlavento nos modelos B2-60° (aprox. 25%) e C2-48° (aprox. 50%), comparados aos modelos B2-30° e C2-24° (Figura 3.1-62, Figura 3.1-79).

No modelo A2-40°, predominam deslocamentos a sotavento; nos modelos B2-30°, B2-60° os deslocamentos são similares a barlavento e sotavento; nos modelos C-24° e C2-48°, predominam deslocamentos a barlavento. No modelo C-24° registraram-se os maiores deslocamentos e no modelo A2-40° os menores.

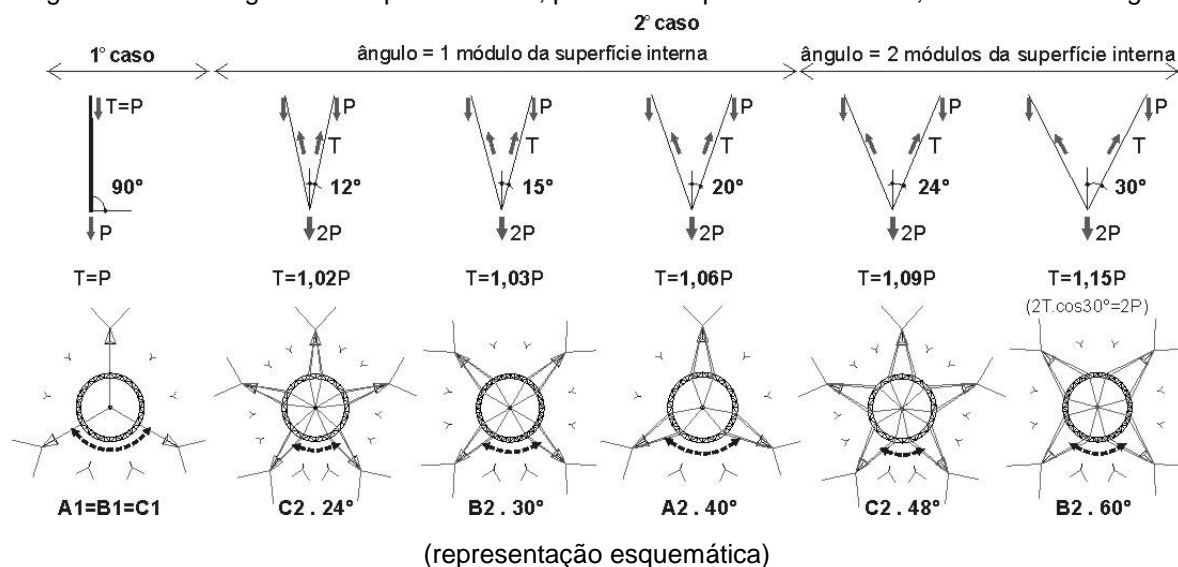
Comparação dos modelos A2-40°, B2-30° e B2-60°, C2-24° e C2-48°

Observou-se que a relação de pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte dos modelos do caso 2 (A2-40°, B2-30°, C2-24°) foi similar a dos modelos do caso 1 (A1, B1, C1). Entretanto, com a nova configuração dos cabos (caso 2), houve o aumento de 100% da magnitude da pré-tensão (Tabela 3.1-14).

Nos modelos A2-40°, B2-30°, C2-24°, com a nova configuração dos cabos e aumento da pré-tensão dos cabos do sistema suporte, verificou-se o aumento da rigidez global do sistema e maior integração entre o sistema suporte espacial e os grandes mastros, quando comparados aos modelos A1, B1 e C1. Logo, verificaram-se maiores restrições aos deslocamentos do sistema suporte espacial e das superfícies das membranas, principalmente a barlavento. Observaram-se também o aumento da magnitude e das áreas de concentração de tensões principalmente nas proximidades dos pontos de ancoragem da superfície externa a barlavento.

Verificou-se que o aumento do ângulo entre o par de cabos que suporta o sistema suporte espacial (modelos B2-60°, C2-48°) contribuiu para aumentar a rigidez do sistema suporte e reduzir do caminho de transmissão das cargas (Figura 3.1-63). Entretanto, essa alteração ocasionou maior solicitação do anel treliçado e dos grandes mastros, e o aumento significativo da massa/área total dos modelos. Esse comportamento ficou evidente ao se comparar os modelos B2-30° e B2-60°, C2-24° e C2-48° (Figura 3.1-63, Tabela 3.1-14, Tabela 3.1-15).

Figura 3.1-63 – Ângulos entre par de cabos; pré-tensão aplicada aos cabos; caminho das cargas



Nos modelos cujo ângulo entre cabos (do sistema suporte espacial) é definido por um módulo da superfície interna (A2-40°, B2-30°, C2-24°) observaram-se os menores deslocamentos do sistema suporte e das superfícies a barlavento no modelo A2-40°; a menor massa e pré-tensão, bem como superfícies com campo de tensão mais uniforme foram verificadas no modelo C2-24°. Contudo, o modelo B2-30° apresentou um bom desempenho, deslocamentos sistema suporte e das superfícies a barlavento com menor intensidade que o modelo C2-24°; massa e pré-tensão mais reduzidas que o modelo A2-40°.

Nos modelos cujo ângulo entre cabos (do sistema suporte espacial) é definido por dois módulos da superfície interna (B2-60°, C2-48°), observaram-se também a redução dos deslocamentos do sistema suporte e das superfícies a barlavento no modelo B2-60°, e a sotavento no modelo C2-48°. Entretanto, o modelo C2-48° apresentou as maiores reduções dos deslocamentos, bem como as superfícies com campo de tensão mais uniforme, além da menor massa e pré-tensão.

Observou-se também que os modelos B2-30° e C2-48° apresentaram desempenho comparável. Assim, para dar continuidade às análises, verificando a influência da geometria das superfícies das membranas no desempenho do sistema, foi escolhido o modelo B2-30°, o qual apresenta menor número de mastros, e cujo ângulo é definido por um módulo da superfície interna.

Figura 3.1-64 – Tensão Von Mises – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

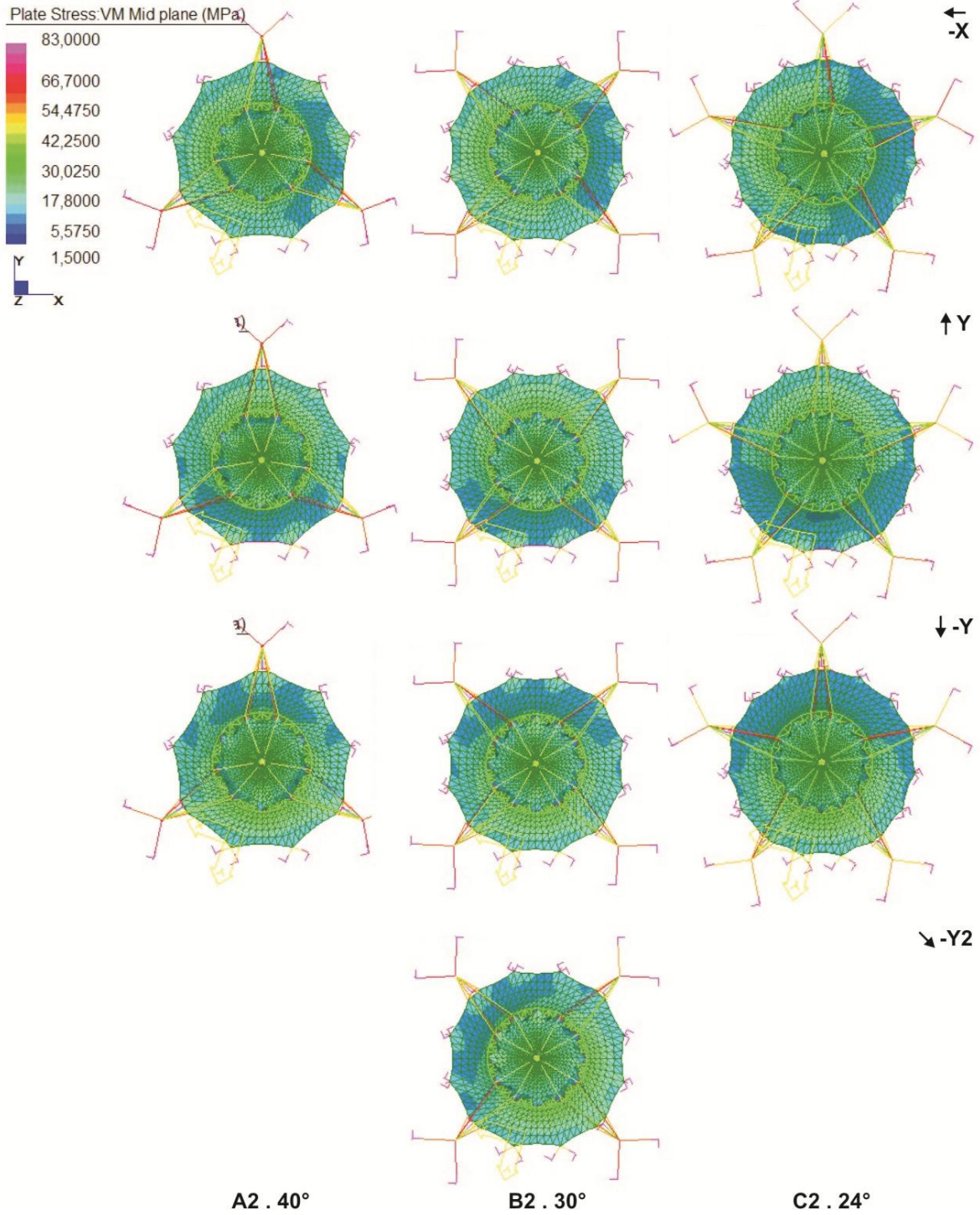


Figura 3.1-65 – Tensão Von Mises – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)

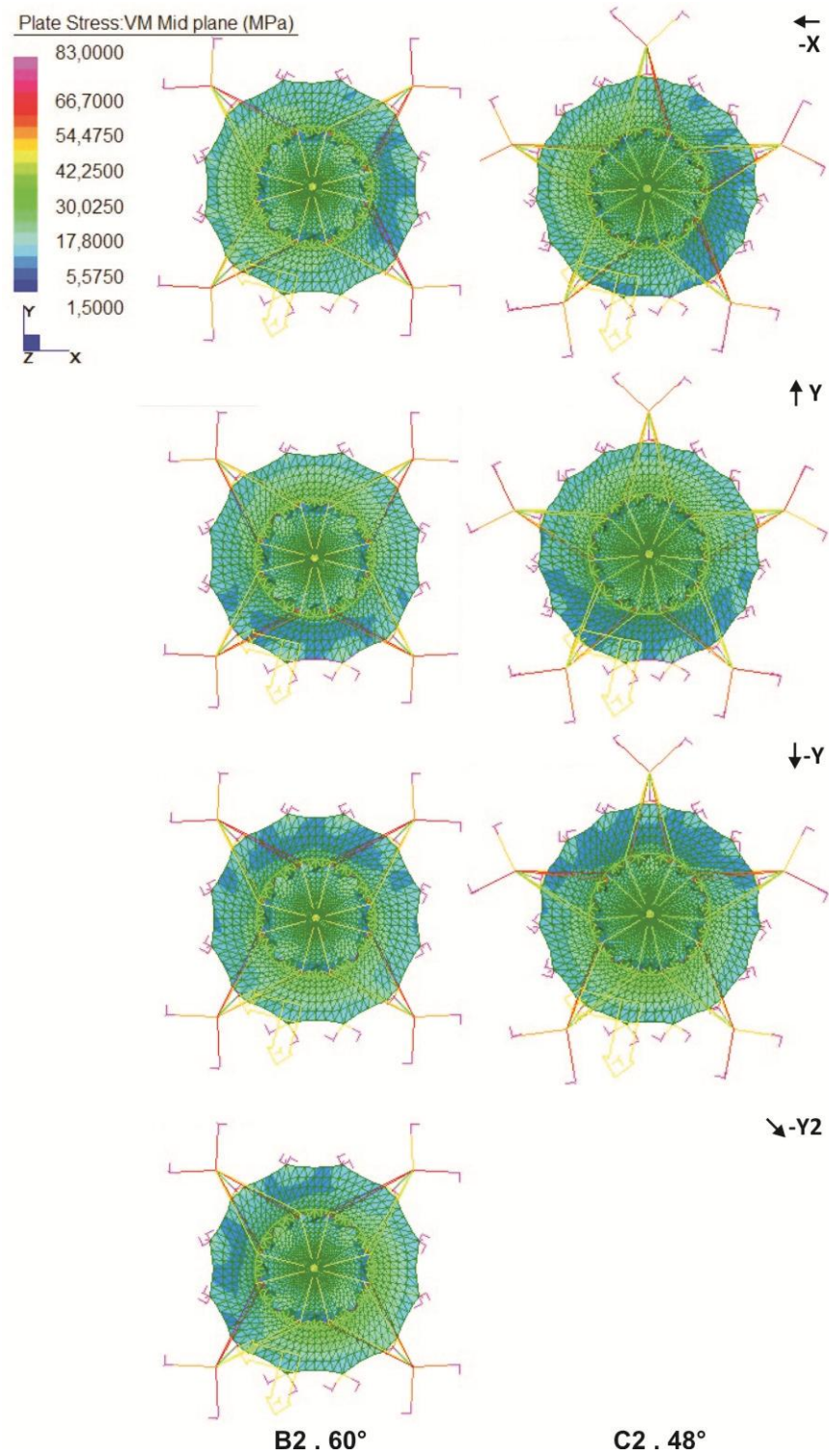


Figura 3.1-66 – Tensão máxima na membrana externa – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

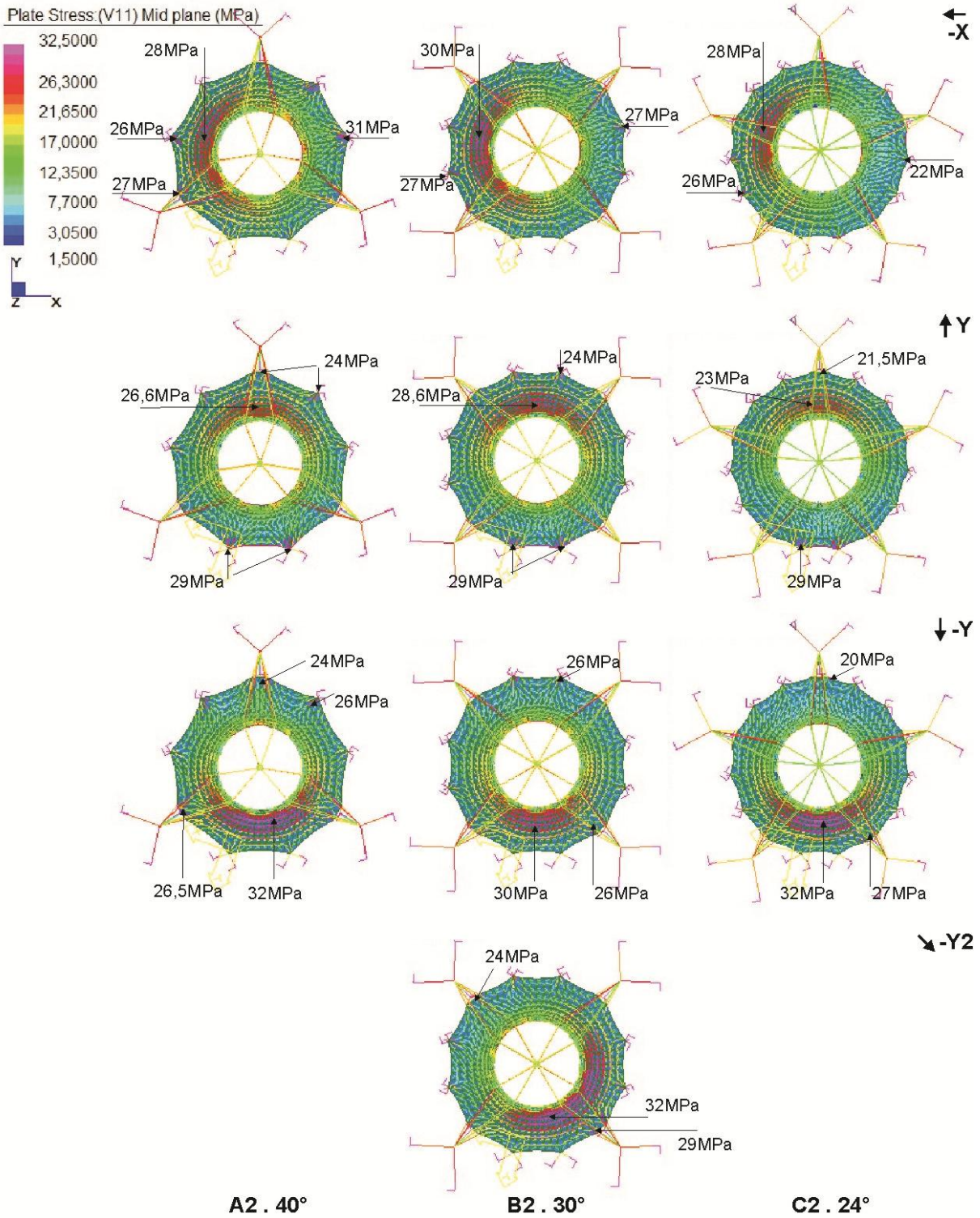


Figura 3.1-67 – Tensão máxima na membrana externa – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)

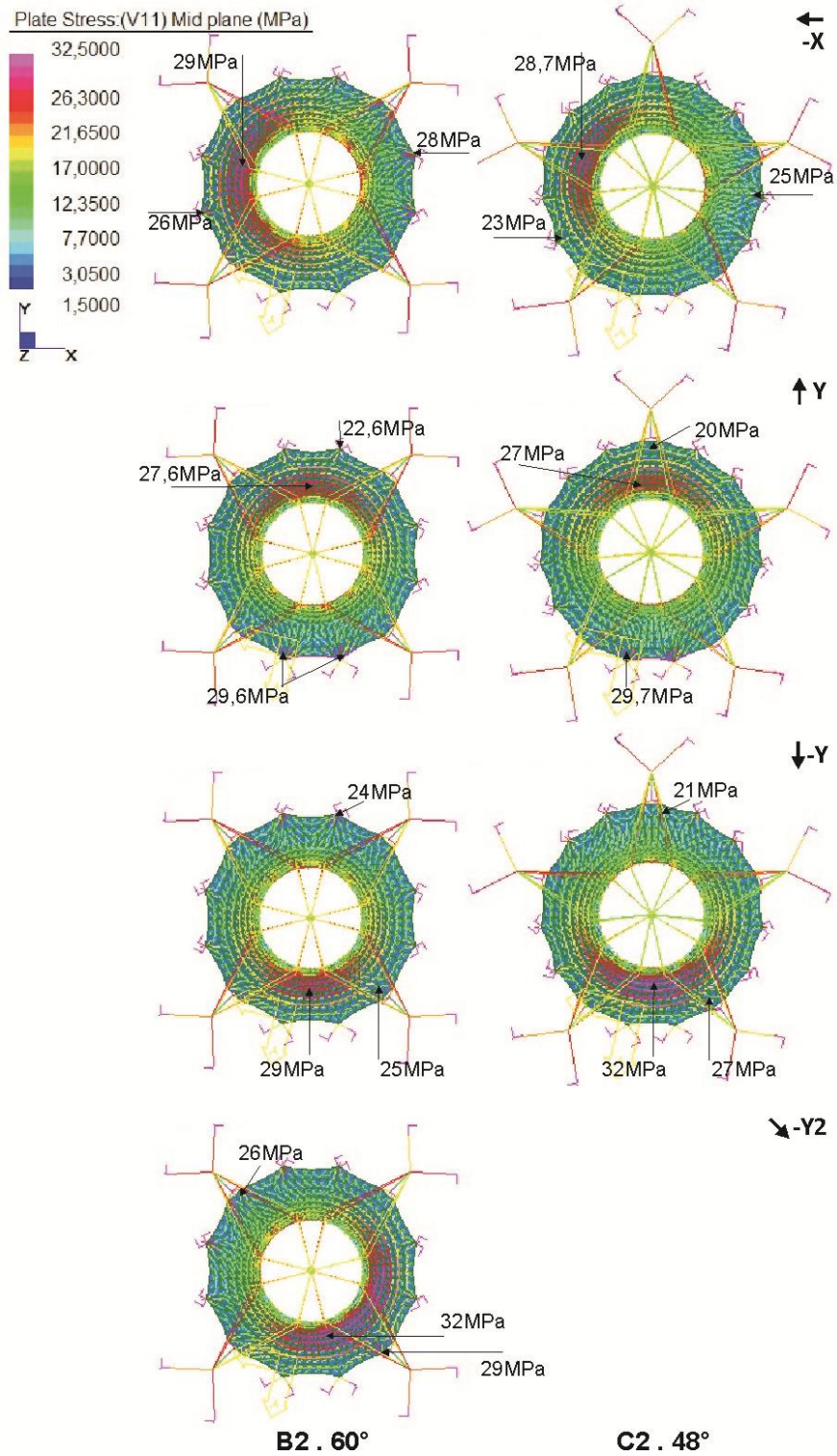


Figura 3.1-68 – Tensão mínima na membrana externa – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

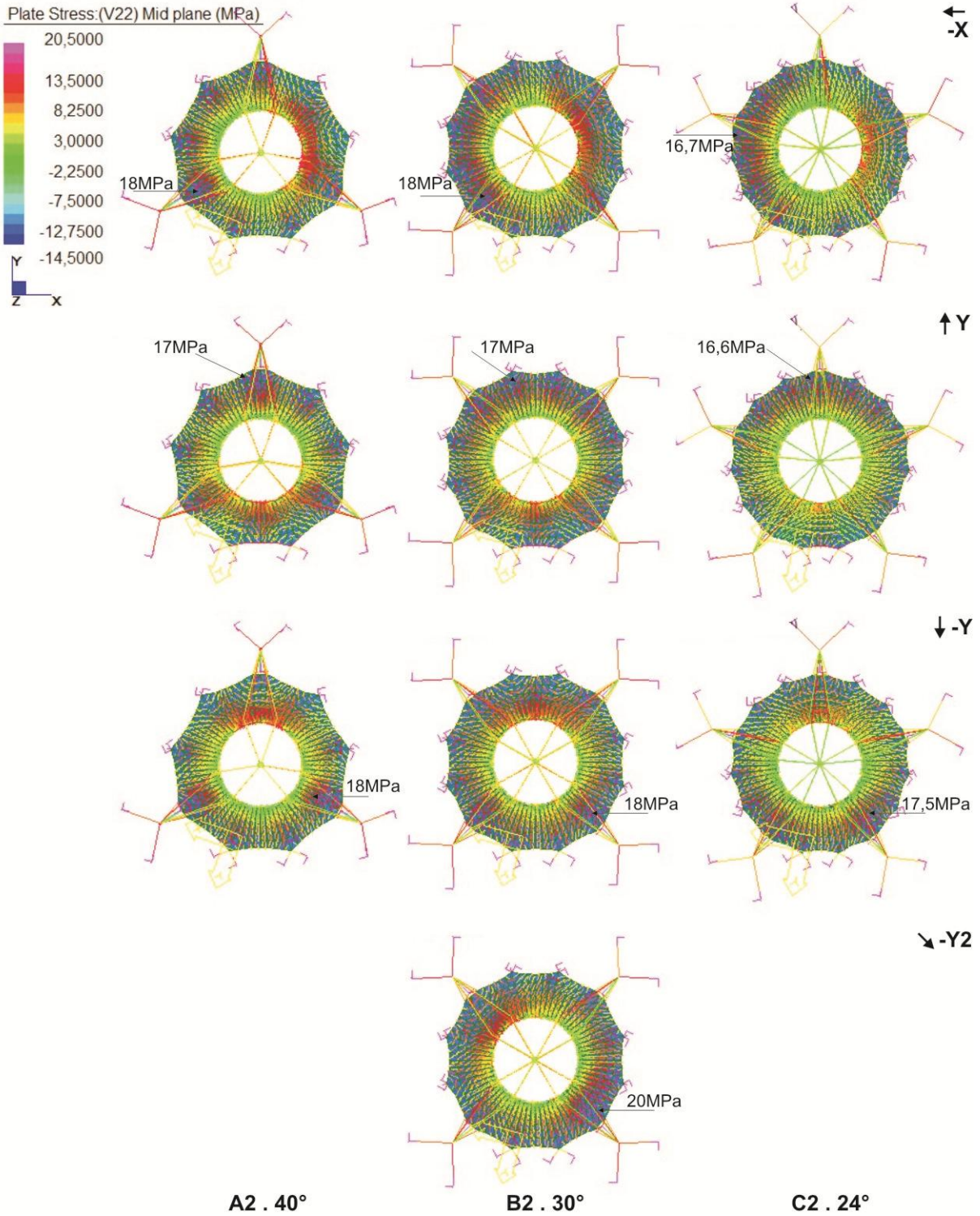


Figura 3.1-69 – Tensão mínima na membrana externa – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)

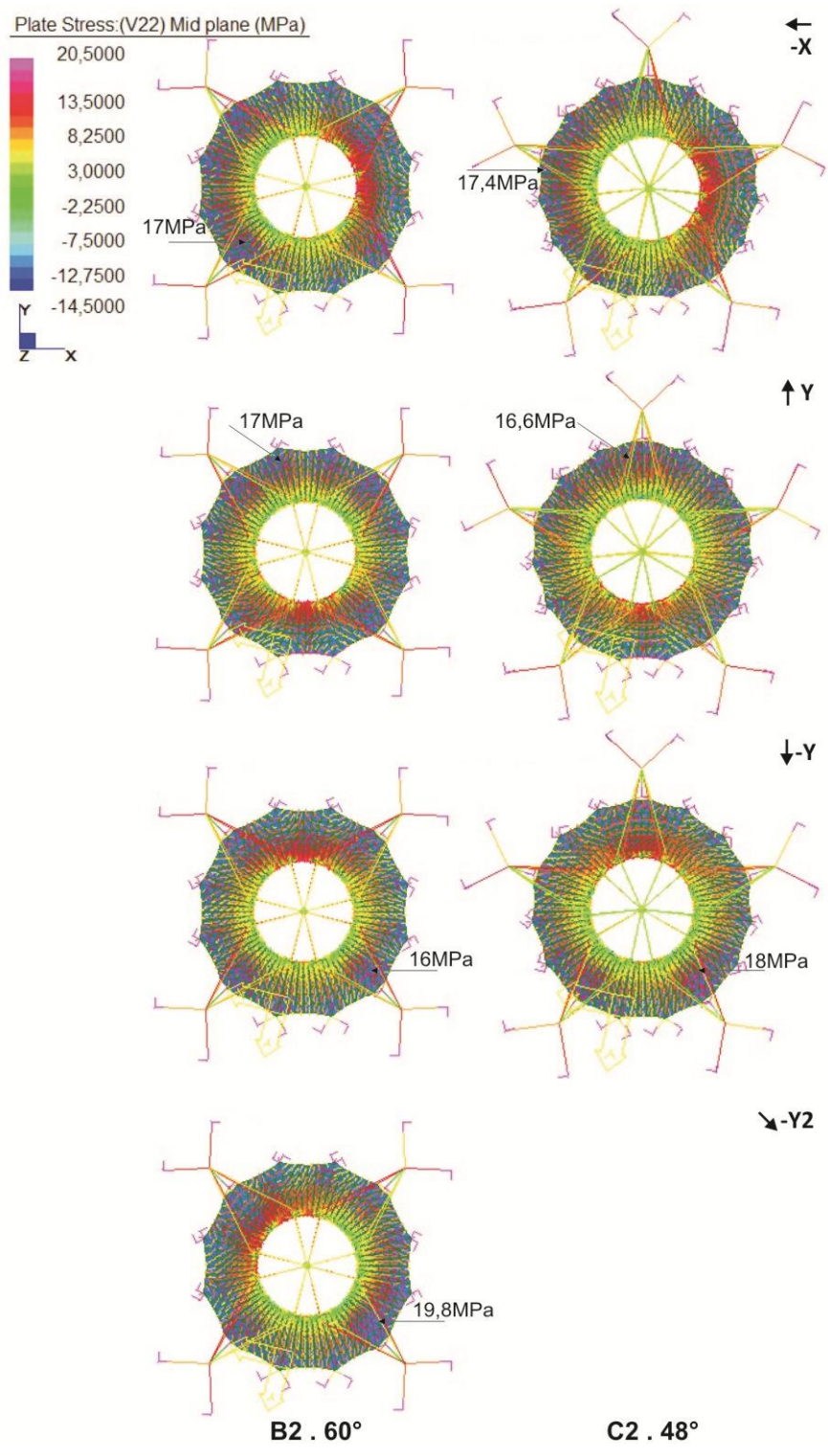


Figura 3.1-70 – Tensão máxima na membrana interna – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

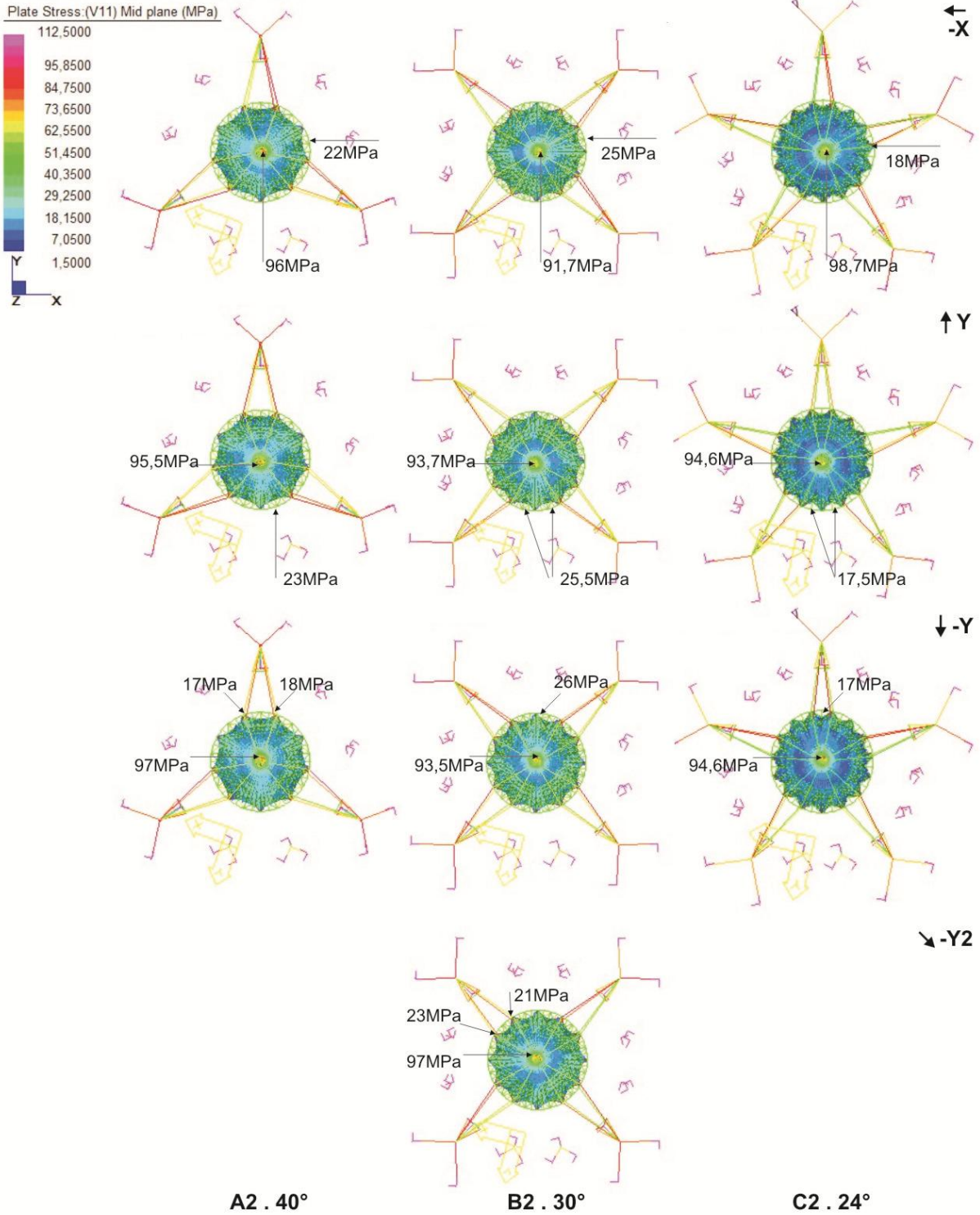


Figura 3.1-71 – Tensão máxima na membrana interna – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)

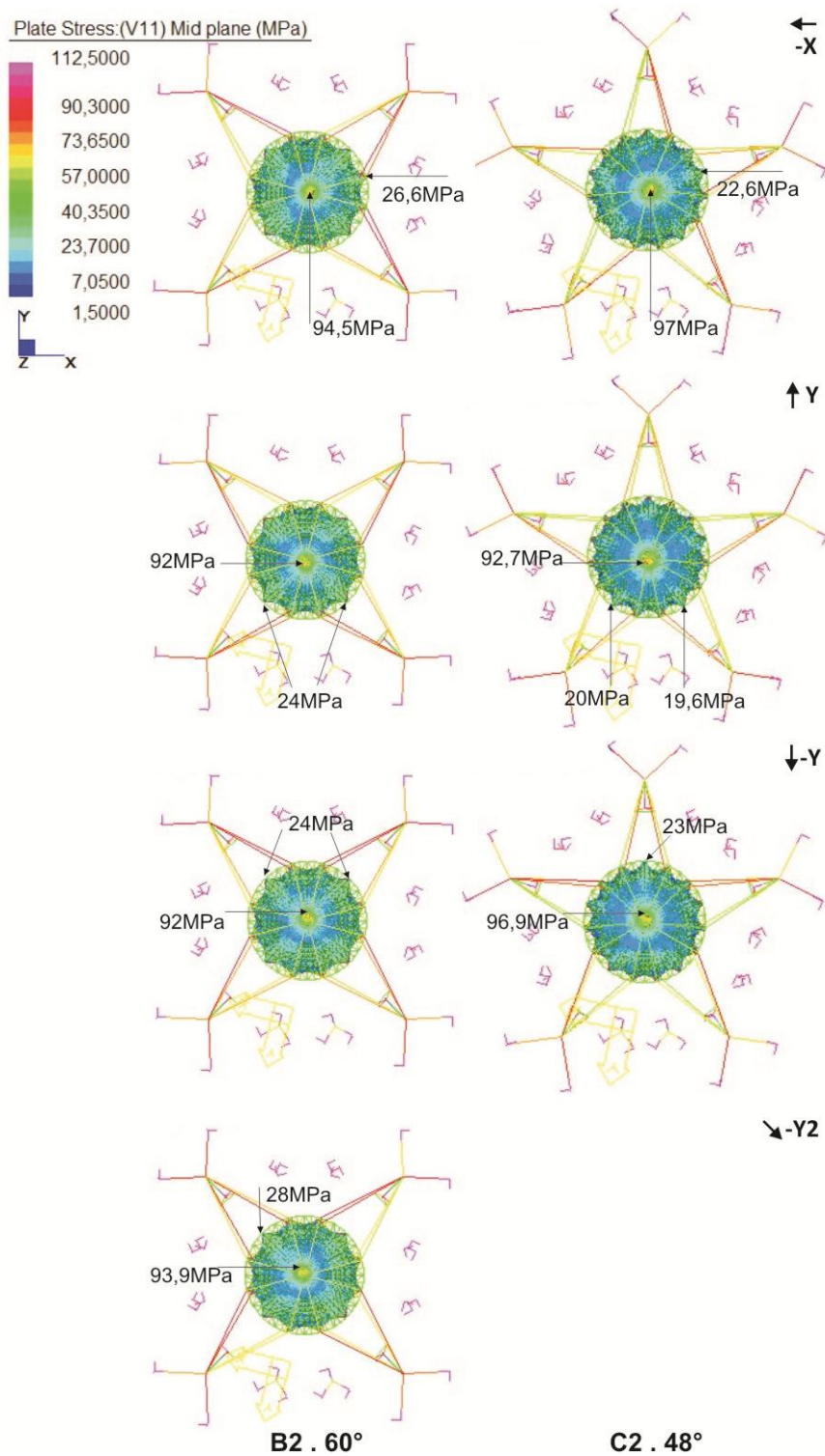


Figura 3.1-72 – Tensão mínima na membrana interna – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento -X, Y, -Y, -Y2)

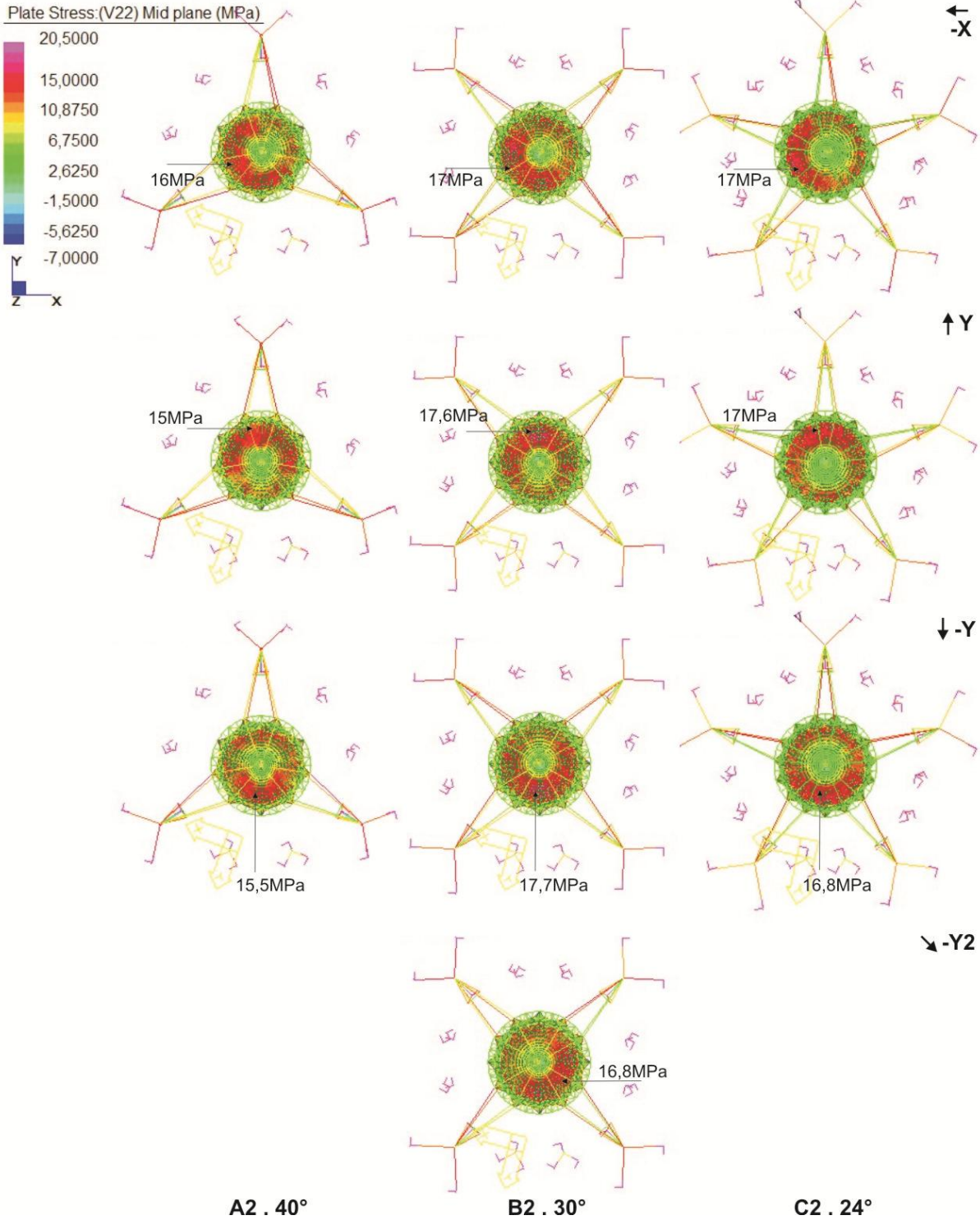


Figura 3.1-73 – Tensão mínima na membrana interna – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)

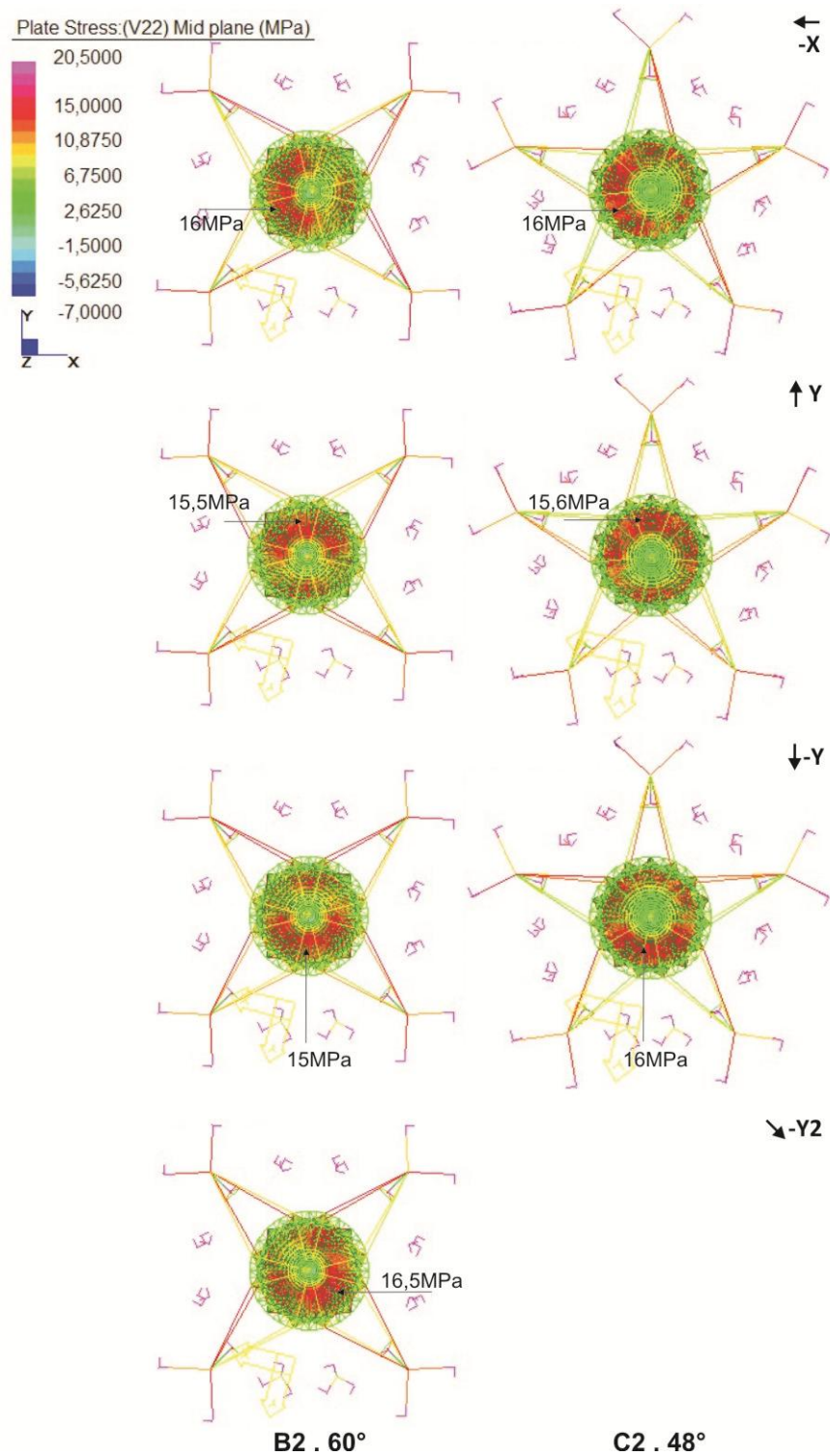


Figura 3.1-74 – Deslocamentos do sistema suporte – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

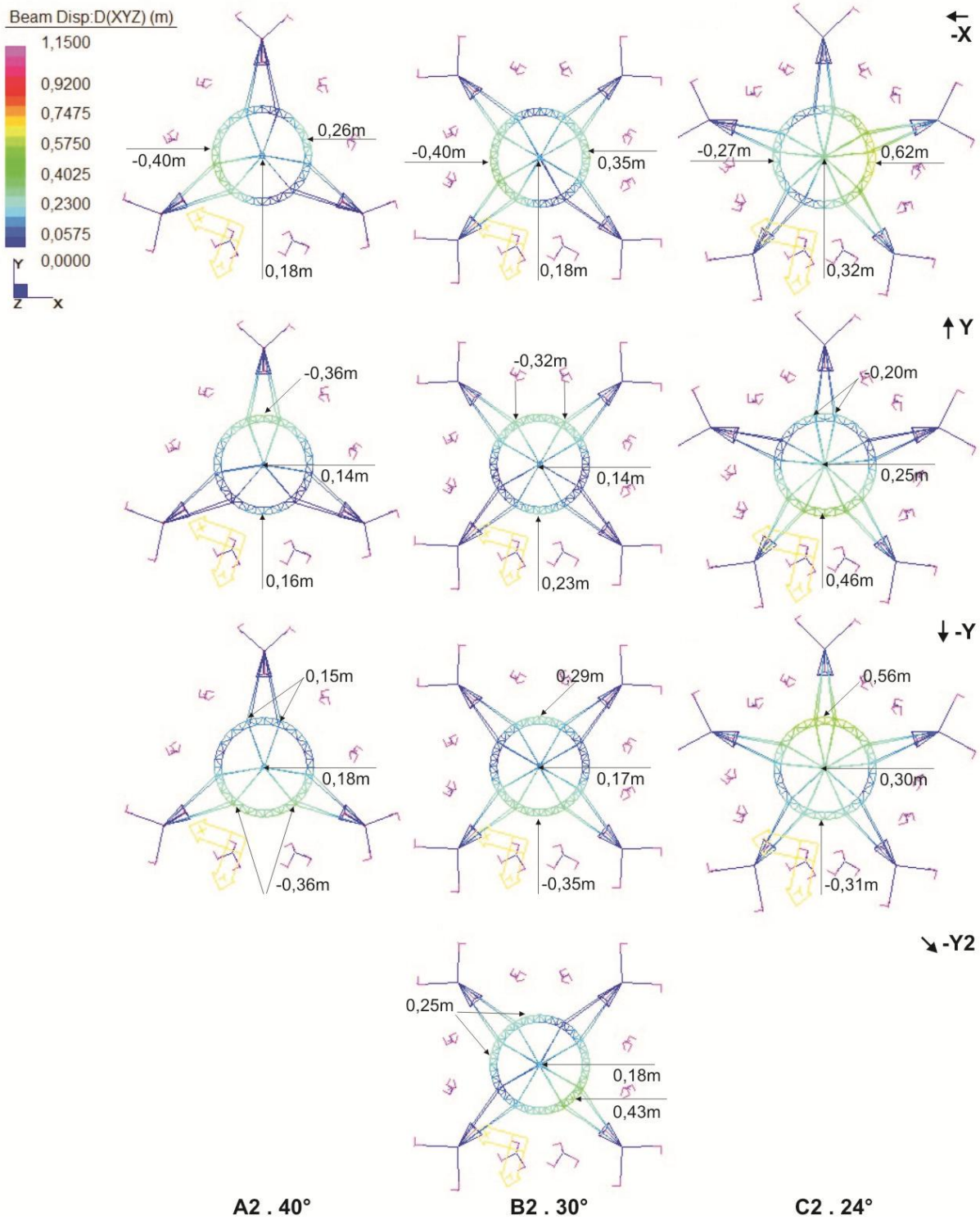


Figura 3.1-75 – Deslocamentos no sistema suporte – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)

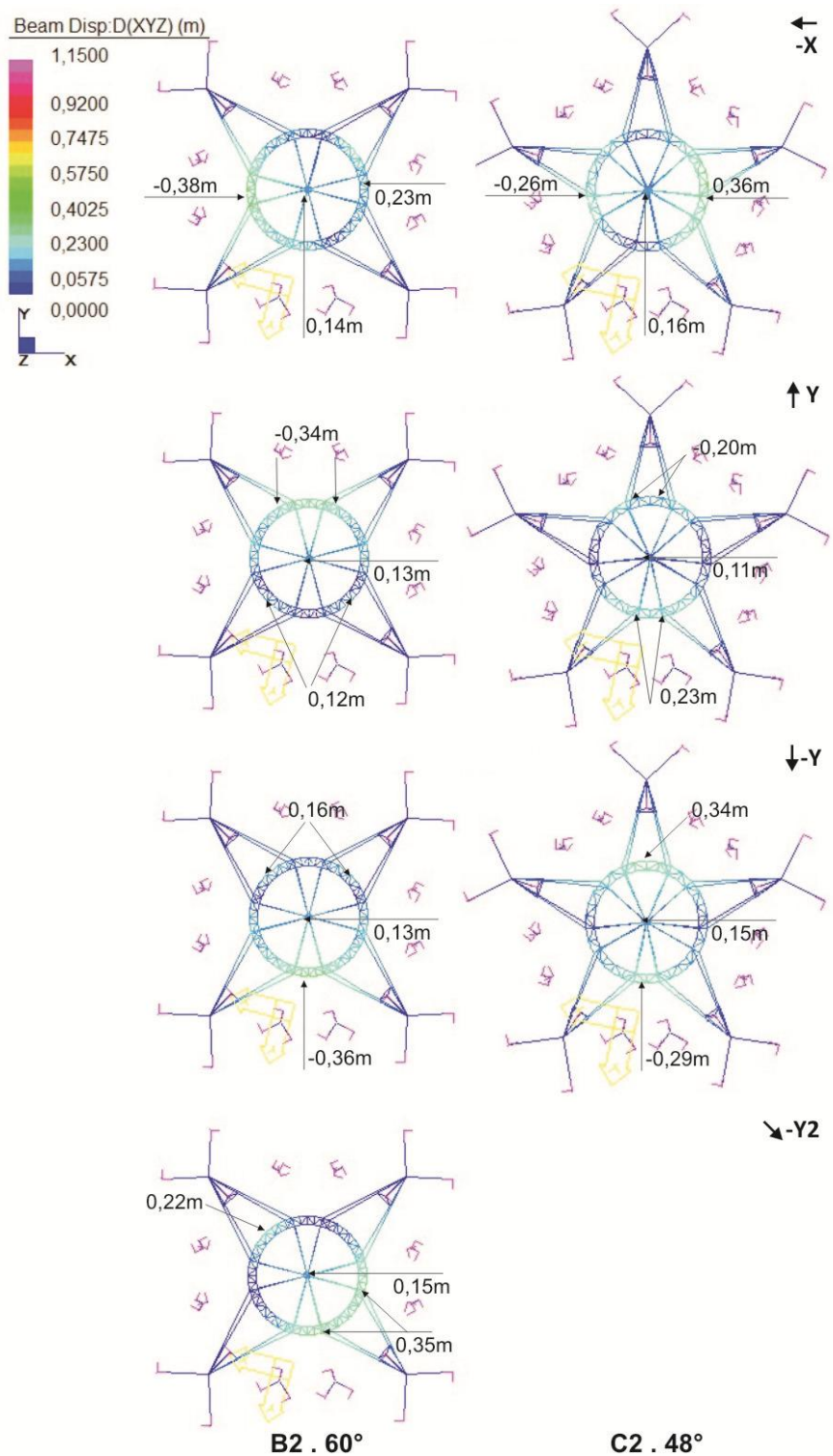


Figura 3.1-76 – Deslocamentos da membrana externa – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

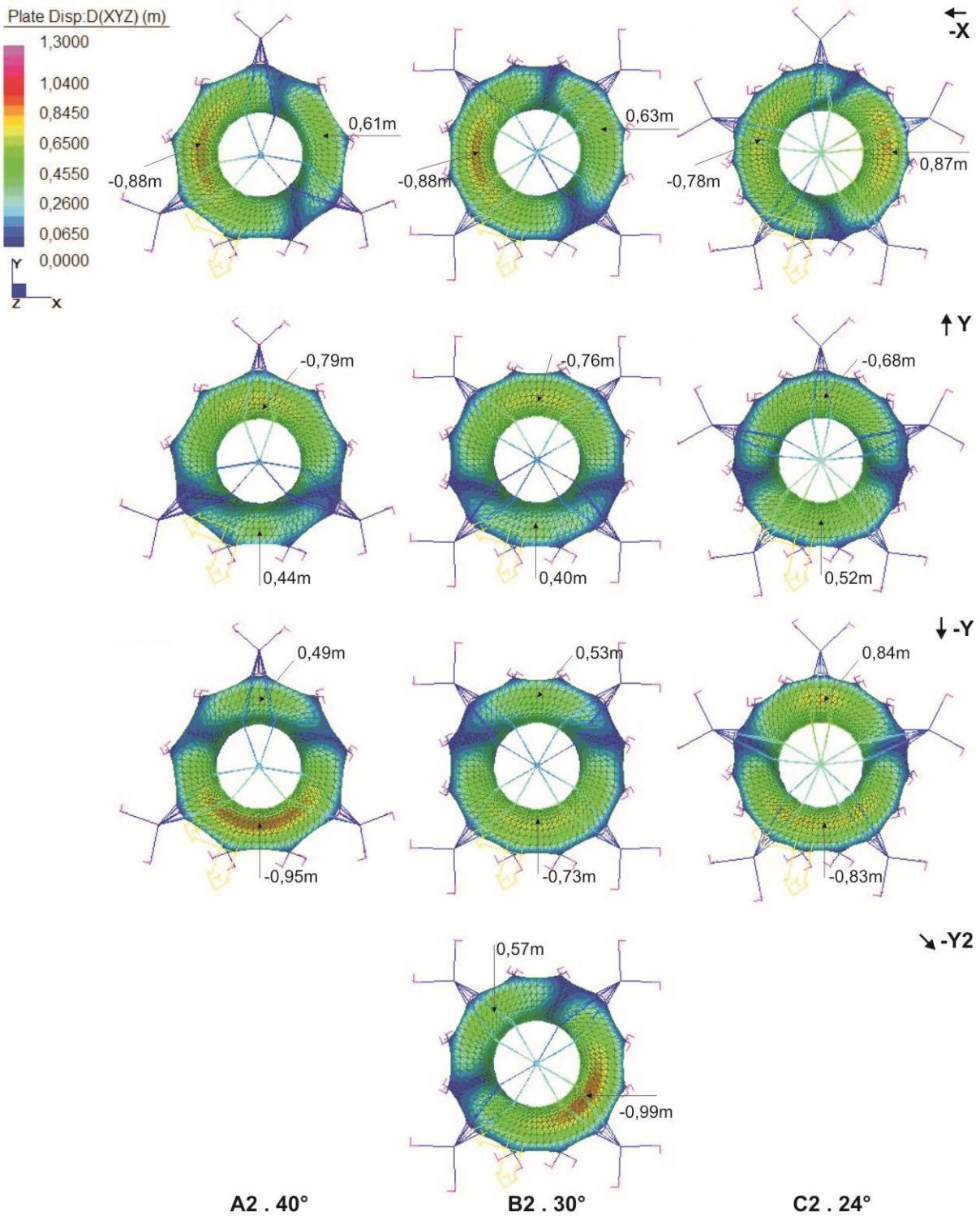


Figura 3.1-77 – Deslocamentos da membrana externa – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)

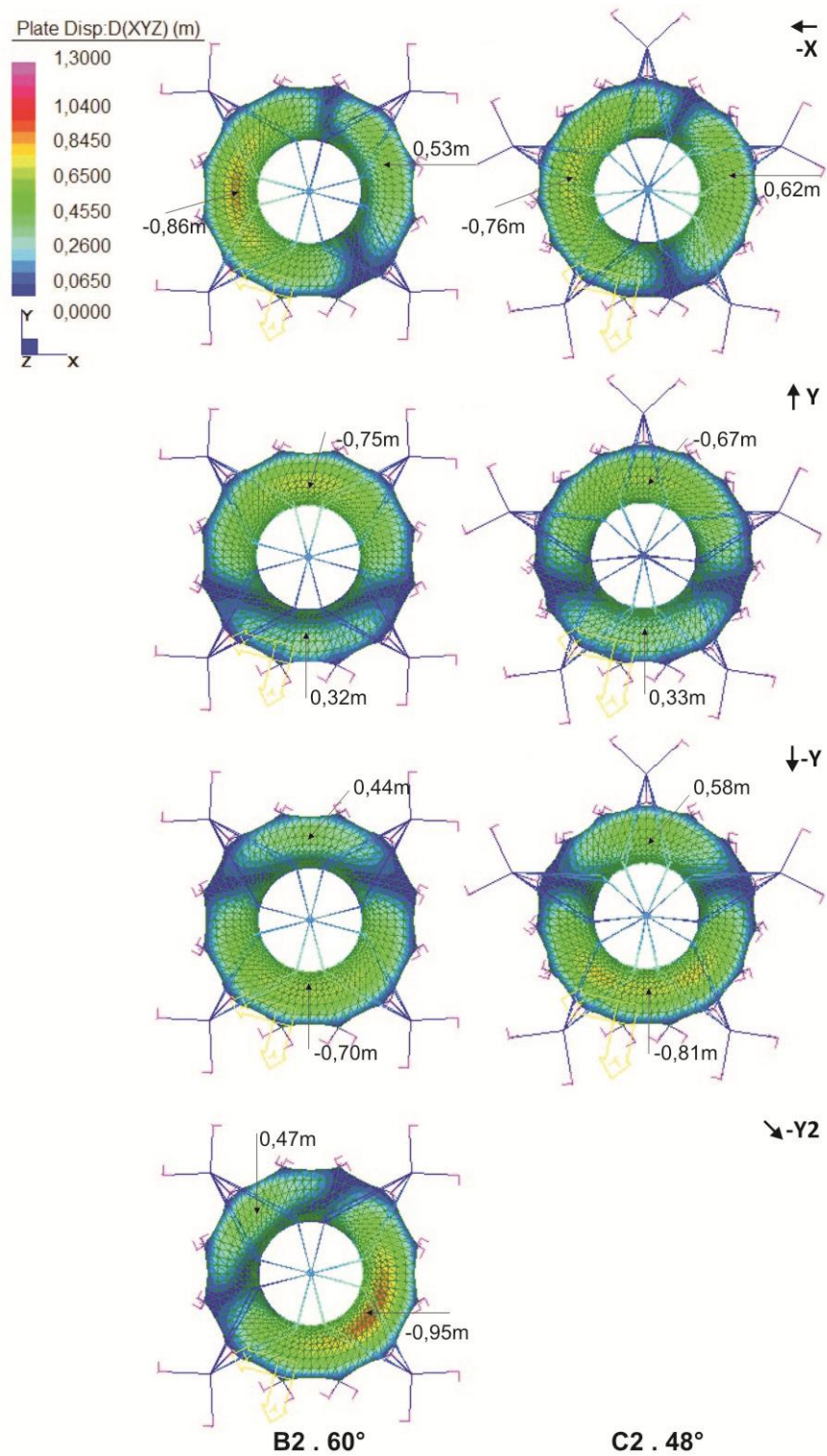


Figura 3.1-78 – Deslocamentos da membrana interna – A2-40°, B2-30°, C2-24° (vento: -X, Y, -Y, -Y2)

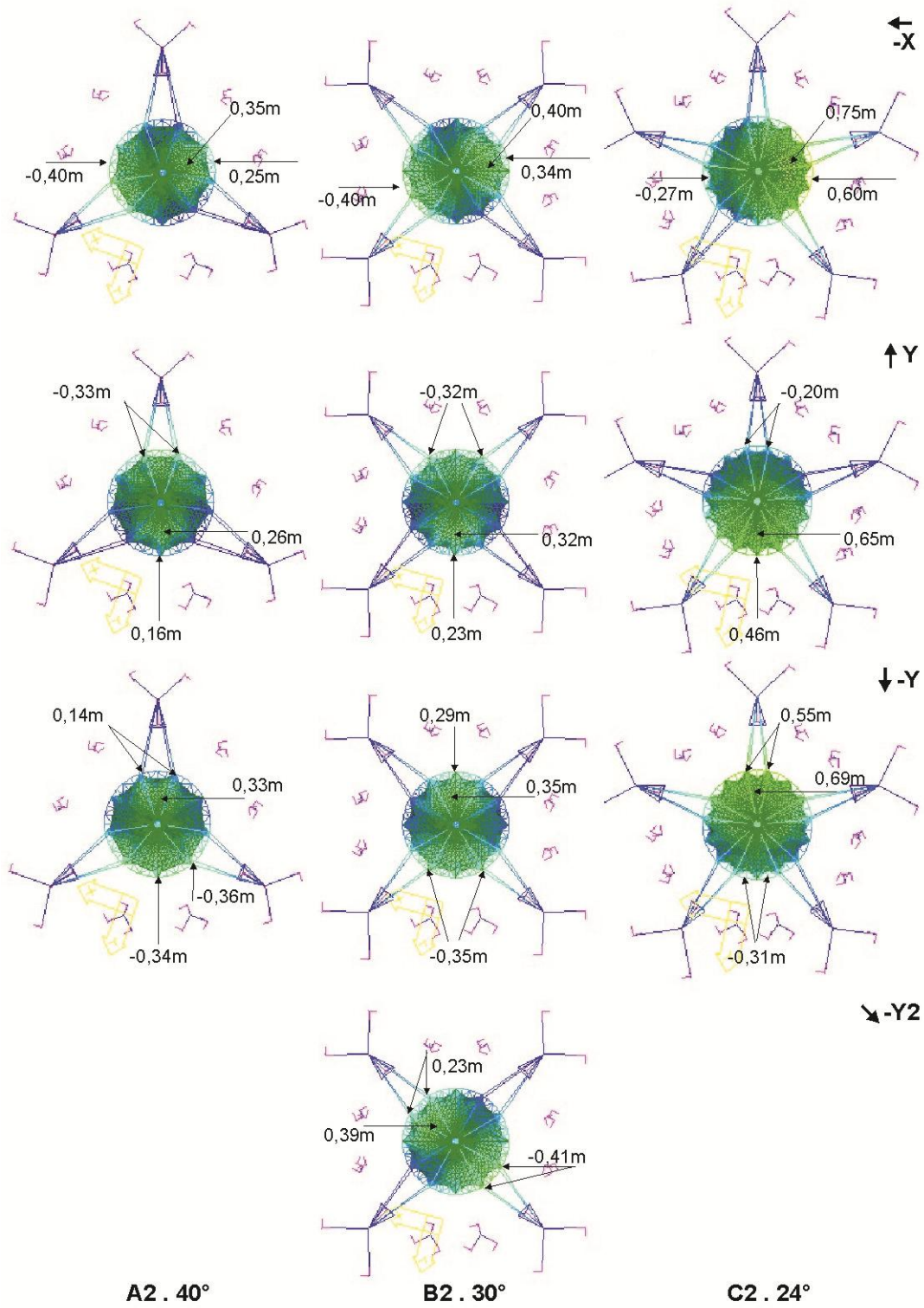
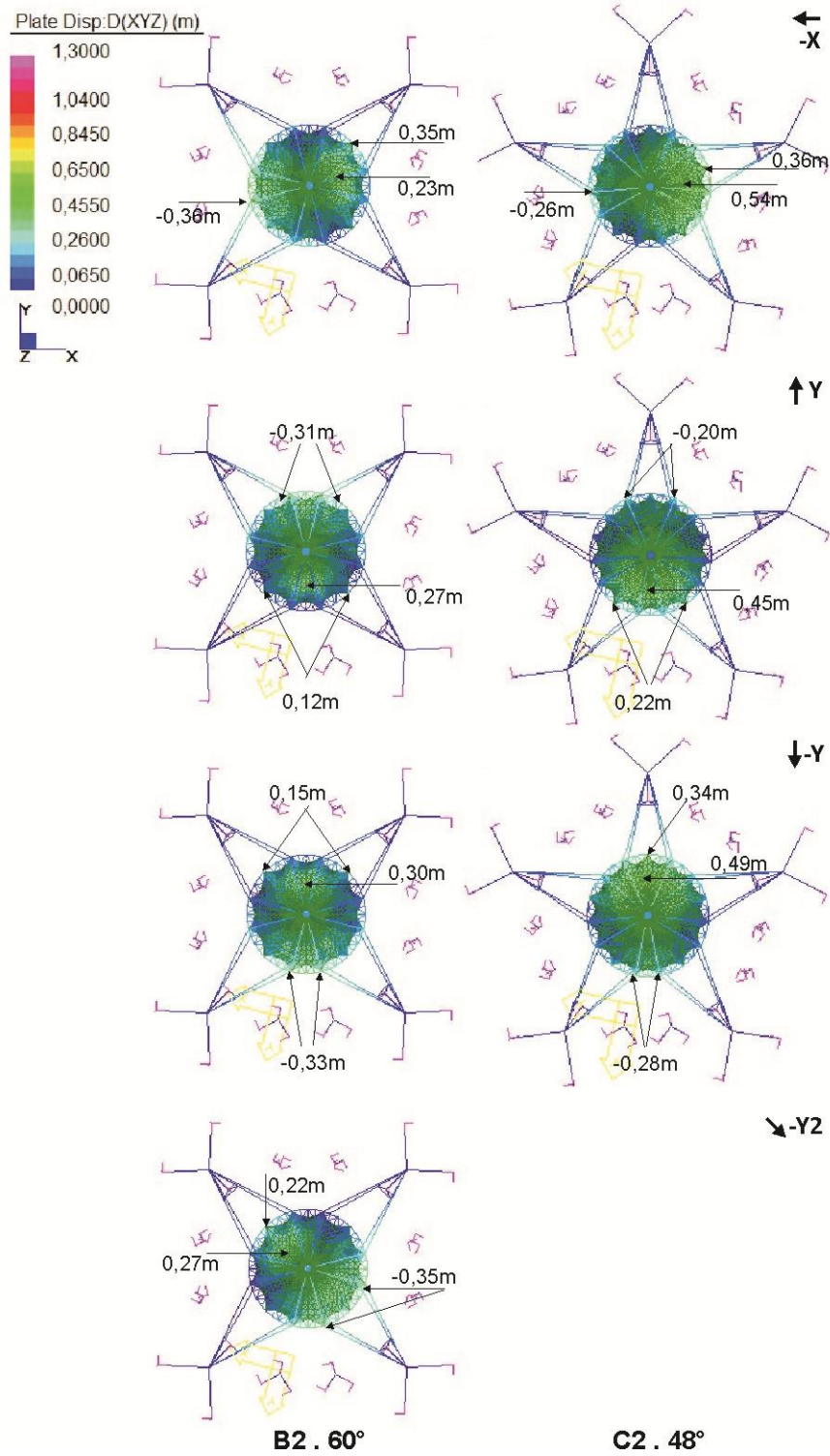


Figura 3.1-79 – Deslocamentos da membrana interna – B2-60°, C2-48° (vento -X, Y, -Y, -Y2)



3.1.6.3 Caso 3 – Número de mastros + configuração dos cabos + geometria da membrana – modelos B2int e B2int-ext

No caso 3 avaliou-se a influência de alterações na geometria das superfícies do modelo B2-30°. A relação da pré-tensão aplicada nas direções radial e circunferencial da superfície interna foi modificada, dando origem ao modelo B2_{int} (Figura 3.1-12). Alterou-se também a relação (f/l) entre a flecha (f) e o vão entre apoios (l) das curvaturas dos cabos de borda da base da superfície externa gerando o modelo B2_{int-ext} (Figura 3.1-13).


Pré-tensão do sistema

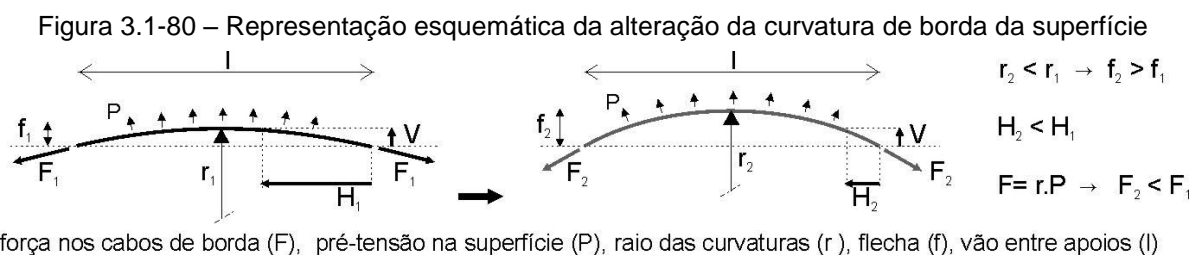
No procedimento de simulação do modelo B2_{int} foi considerada a mesma pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte do modelo B2-30° (Tabela 3.1-16, Tabela 3.1-9).

Entretanto, no modelo B2_{int-ext} (com o aumento das curvaturas dos cabos de borda da base da superfície externa; relação flecha/vão aprox. 12%) verificou-se a redução significativa (aprox. 40%) da pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte, segundo Tabela 3.1-16 e Tabela 3.1-9.

Esse comportamento, segundo Knippers et al. (2011), confirma que a força nos cabos de borda (F) depende apenas da relação (F=r.P) entre a pré-tensão (P) e do raio das curvaturas (r), e não do vão entre os apoios (l), apesar do vão influenciar indiretamente a geometria da curvatura e a viabilidade da construção. Demonstra também que a força no cabo de borda diminui muito quando a relação flecha/vão (f/l) é maior que 10% (mas diminui pouco quando esta relação é maior que 20%), (Figura 3.1-80).

Tabela 3.1-16 – Pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte nos modelos B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext}

caso de carga			análise da membrana							
			vento				vento + chuva			
			-X	Y	-Y	-Y2	-X	Y	-Y	-Y2
pré-tensão cabos do sist. suporte		B2.30°	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
		B2_{int}	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
		B2_{int-ext}	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0





Fonte: adaptado de KNIPPERS *et al.*, 2011, p.145.

Relação massa/ área de cada modelo

O modelo B2_{int} apresentou massa/ área total do sistema similar ao modelo B2-30°. Contudo, no modelo B2_{int-ext} observou-se a redução da massa/área total do sistema (aprox. 14%), conforme Tabela 3.1-17 e Tabela 3.1-10.

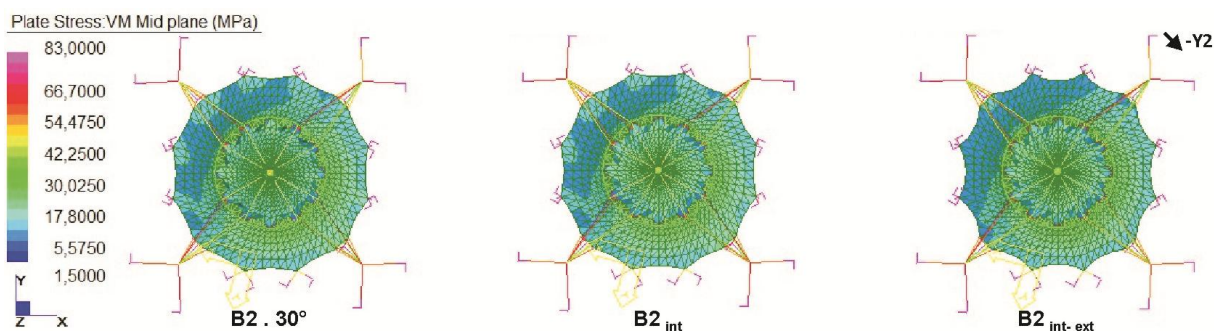
Tabela 3.1-17– Relação massa/área de cada dos modelos B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext}

modelos		sistema suporte		membrana			sistema suporte + membrana		
		massa (kg)	%	massa (kg)	área (m ²)	%	massa (kg)	massa/ área	
								(kg/m ²)	%
	A1	23.850,53	1,00	3.224,79	2.388,73	1,00	27.075,32	11,33	1,00
	B2 30°	33.111,38	1,39	3.394,94	2.514,77	1,05	36.506,32	14,52	1,28
	B2 int	33.047,46	1,39	3.378,64	2.502,70	1,05	36.426,10	14,55	1,28
	B2 int-ext	27.134,83	1,14	3.260,89	2.415,48	1,01	30.395,72	12,58	1,11

Distribuição das tensões nas superfícies das membranas externa e interna

Observou-se que as superfícies do modelo B2_{int} (Figura 3.1-81, Figura 3.1-89) apresentaram comportamento semelhante às do modelo B2-30°, mas com a redução das tensões na membrana interna. No modelo B2_{int-ext} verificou-se significativa redução das áreas de concentração da tensão, e conseqüentemente a distribuição mais homogênea das tensões nas superfícies interna e externa.

Figura 3.1-81 – Tensão Von Mises – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -Y2)



A superfície externa do modelo B2_{int} (Figura 3.1-82, Figura 3.1-90) apresentou comportamento e campo de tensões similar à do modelo B2-30°, ou seja, maior concentração de tensão no entorno do anel treliçado a sotavento e nas proximidades dos pontos de ancoragem a sotavento e a barlavento.

A superfície externa do modelo B2_{int-ext} (Figura 3.1-82, Figura 3.1-90) apresentou redução significativa (aprox. 70%) da magnitude das tensões nas proximidades dos pontos de ancoragem (mastos) a barlavento e sotavento. Este comportamento resulta do aumento da curvatura de borda da superfície,

possibilitando minimizar a pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte necessária ao equilíbrio do sistema.

Houve também pequena diminuição da magnitude das mínimas tensões na direção radial da superfície externa do modelo $B2_{int-ext}$, comparado aos modelos $B2-30^\circ$ e $B2_{int}$ (Figura 3.1-83, Figura 3.1-91).

Figura 3.1-82 – Tensão máxima na membrana externa – $B2-30^\circ$, $B2_{int}$ e $B2_{int-ext}$ (vento -Y2)

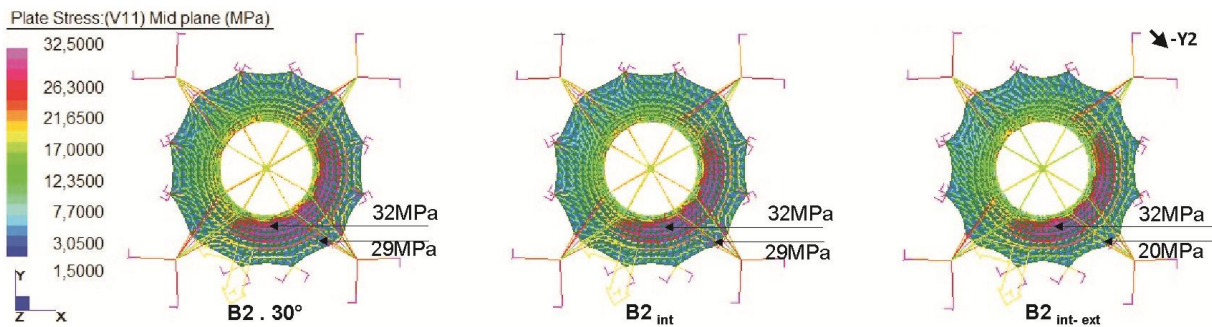
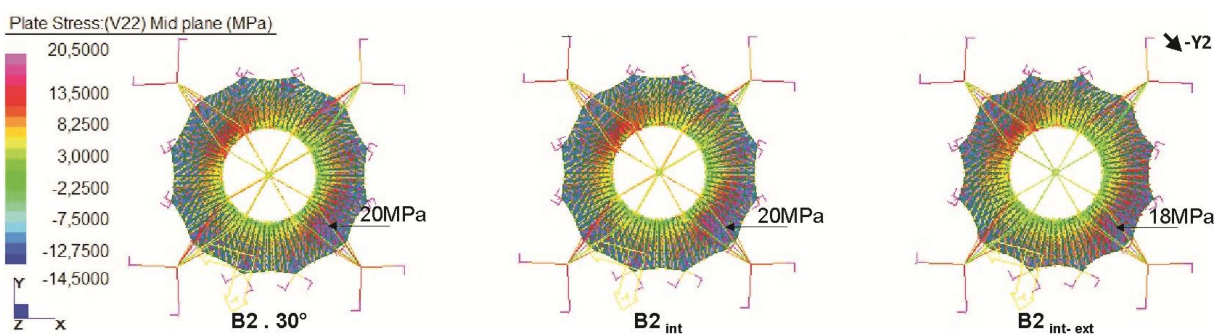


Figura 3.1-83 – Tensão mínima na membrana externa – $B2-30^\circ$, $B2_{int}$ e $B2_{int-ext}$ (vento -Y2)



Na superfície interna do modelo $B2_{int}$ (Figura 3.1-84, Figura 3.1-92) verificou-se a redução (aprox. 8%) na magnitude das tensões na região de ancoragem desta ao anel superior conforme máximas tensões (direção radial), comparada ao modelo $B2-30^\circ$. Houve também pequeno aumento da magnitude das mínimas tensões (direção circunferencial).

A superfície interna do modelo $B2_{int-ext}$ (Figura 3.1-84, Figura 3.1-92) apresentou pequena redução da magnitude das tensões na sua base e na região de ancoragem da superfície ao anel treliçado, comparada ao modelo $B2_{int}$,

Nesses modelos não foram verificadas áreas de compressão ou de acúmulo de água na base das superfícies externa e interna, conforme as trajetórias de tensão mínima (Figura 3.1-83, Figura 3.1-91, Figura 3.1-85, Figura 3.1-93).

Figura 3.1-84 – Tensão máxima na membrana interna – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -Y2)

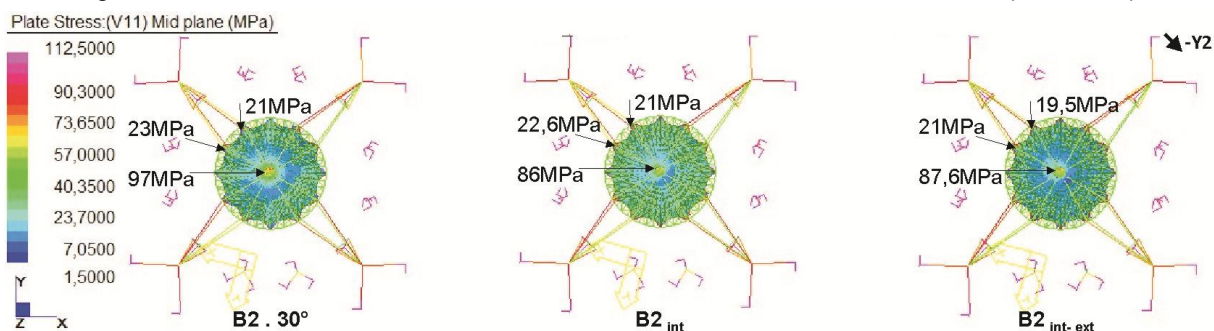
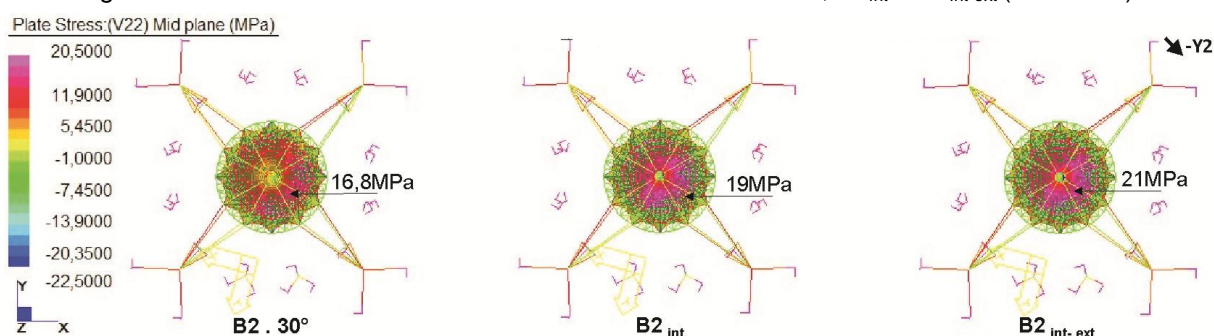


Figura 3.1-85 – Tensão mínima na membrana interna – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -Y2)

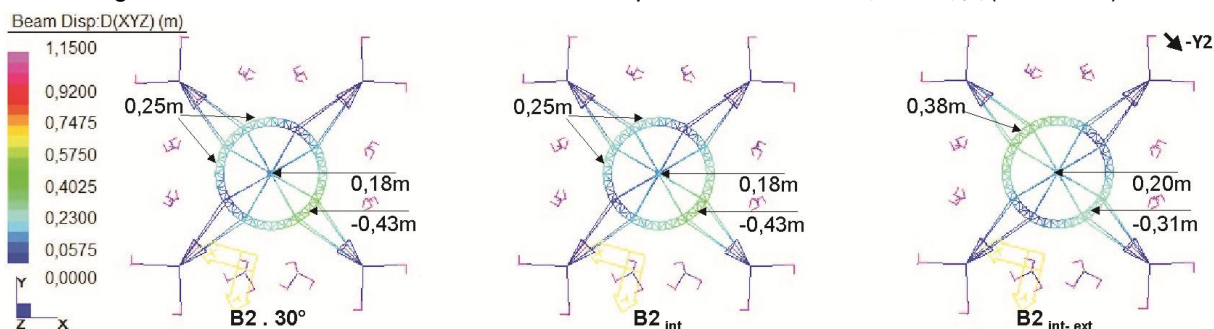


Deslocamentos do sistema suporte

O sistema suporte do modelo B2_{int} (Figura 3.1-86, Figura 3.1-94) apresentou comportamento similar ao do modelo B2-30°, ou seja, predominam deslocamentos do anel treliçado a sotavento (sucção), em todas as direções de vento.

No sistema suporte do modelo B2_{int-ext} (Figura 3.1-86, Figura 3.1-94, Tabela 3.1-11) verificou-se a redução (aprox. 30%) dos deslocamentos do anel treliçado a sotavento, e o aumento (aprox. 30%) dos deslocamentos do mesmo a barlavento, em todas as direções, resultante da redução da magnitude de pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte.

Figura 3.1-86 – Deslocamentos do sistema suporte – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -Y2)

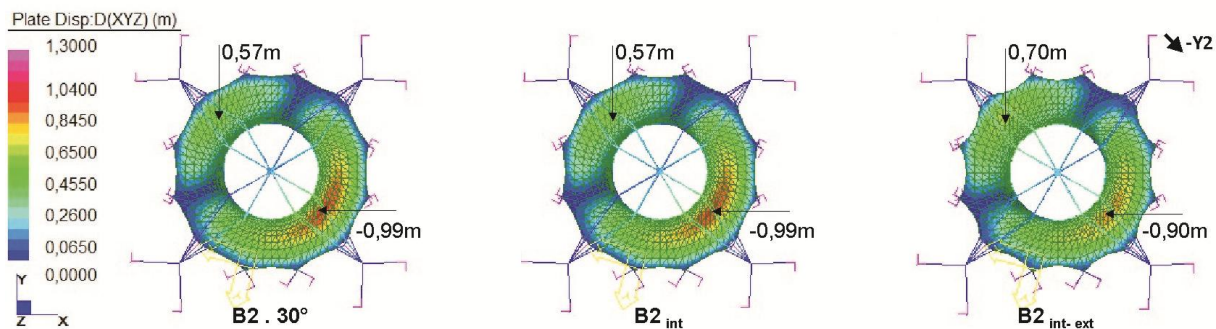


Com o carregamento da chuva associado ao vento, observou-se no modelo $B2_{int}$ o aumento (aprox. 30%) dos deslocamentos do anel treliçado a barlavento, bem como a redução (aprox. 20%) a sotavento, para todas as direções. Entretanto, no modelo $B2_{int-ext}$ os deslocamentos a barlavento e sotavento do anel treliçado foram similares (aprox. 25%). Este comportamento também foi observado nas superfícies das membranas interna e externa, evidenciando que essas apresentaram melhor capacidade de acomodação das cargas com a alteração das curvaturas (Tabela 3.1-11).

Deslocamentos da superfície da membrana externa

Nas superfícies das membranas externas dos modelos $B2_{int}$, $B2_{int-ext}$ e $B2-30^\circ$, (Figura 3.1-87, Figura 3.1-95, Tabela 3.1-11) predominam deslocamentos a sotavento, para todas as direções de vento. Entretanto, na membrana externa do modelo $B2_{int-ext}$ houve pequena redução (aprox. 10%) dos deslocamentos a sotavento, e pequeno acréscimo (aprox. 10%) a barlavento, em todas as direções.

Figura 3.1-87 – Deslocamentos da membrana externa – $B2-30^\circ$, $B2_{int}$ e $B2_{int-ext}$ (vento -Y2)

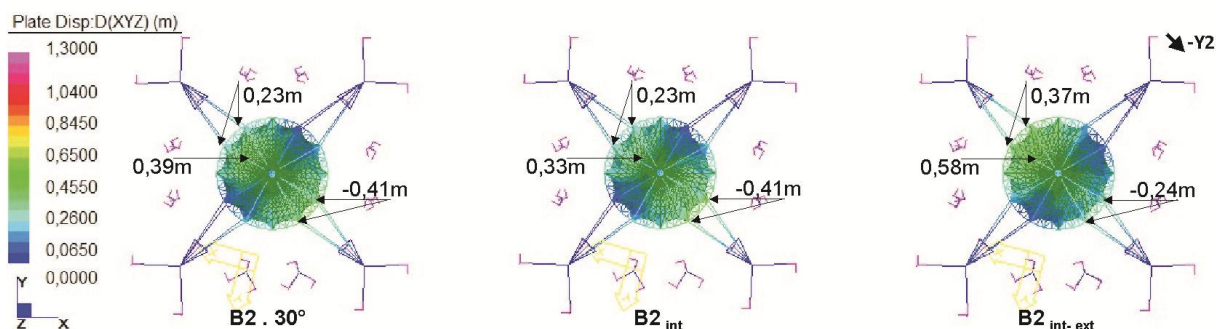


Deslocamentos da superfície da membrana interna

A superfície interna do modelo $B2_{int}$ apresentou comportamento similar a do modelo $B2-30^\circ$ (Figura 3.1-88, Figura 3.1-96).

Na superfície interna do modelo $B2_{int-ext}$ (Figura 3.1-88, Figura 3.1-96, Tabela 3.1-11) observou-se redução (aprox. 30%) dos deslocamentos a sotavento e o aumento (aprox. 35%) dos deslocamentos a barlavento.

Figura 3.1-88 – Deslocamentos da membrana interna – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -Y2)



Comparação dos modelos: B2_{int}, B2_{int-ex}, B2-30° e C2-48°

Observou-se no modelo B2_{int-ext} (com as alterações na curvatura de borda da superfície da membrana externa e da relação de pré-tensão da superfície da membrana interna) a redução significativa da magnitude de pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte, bem como a diminuição da massa/área total, em comparação com os modelos B2_{int} e B2-30°. Houve também redução dos deslocamentos das superfícies das membranas e do sistema suporte a sotavento (derivados de sucção), bem como da magnitude e das áreas de concentração de tensões nos pontos de ancoragem das superfícies. Portanto, o modelo B2_{int-ext} apresentou melhor desempenho que os modelos B2_{int} e B2-30°.

Verificou-se que as alterações na geometria das superfícies contribuíram para o aumento significativo da rigidez das superfícies das membranas, principalmente da superfície externa. Isto é, com o aumento das curvaturas (menor raio), as superfícies necessitaram menores forças para estabilizá-las e suportar carregamentos (Figura 3.1-80). Consequentemente, a nova geometria das superfícies colaborou para aumentar a estabilidade do conjunto estrutural e possibilitou reduzir a massa global.

Observou-se que os modelos B2_{int-ext} e C2-48° apresentaram similar relação massa/área total, bem como a mesma magnitude de pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte. Entretanto, o modelo B2_{int-ext} – com menor número de mastros – apresentou redução da magnitude e áreas de concentração de tensões na superfície da membrana externa e maior homogeneidade na distribuição das tensões nas superfícies das membranas (interna e externa), portanto melhor desempenho que o modelo C2-48°.

Figura 3.1-89 – Tensão Von Mises – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2)

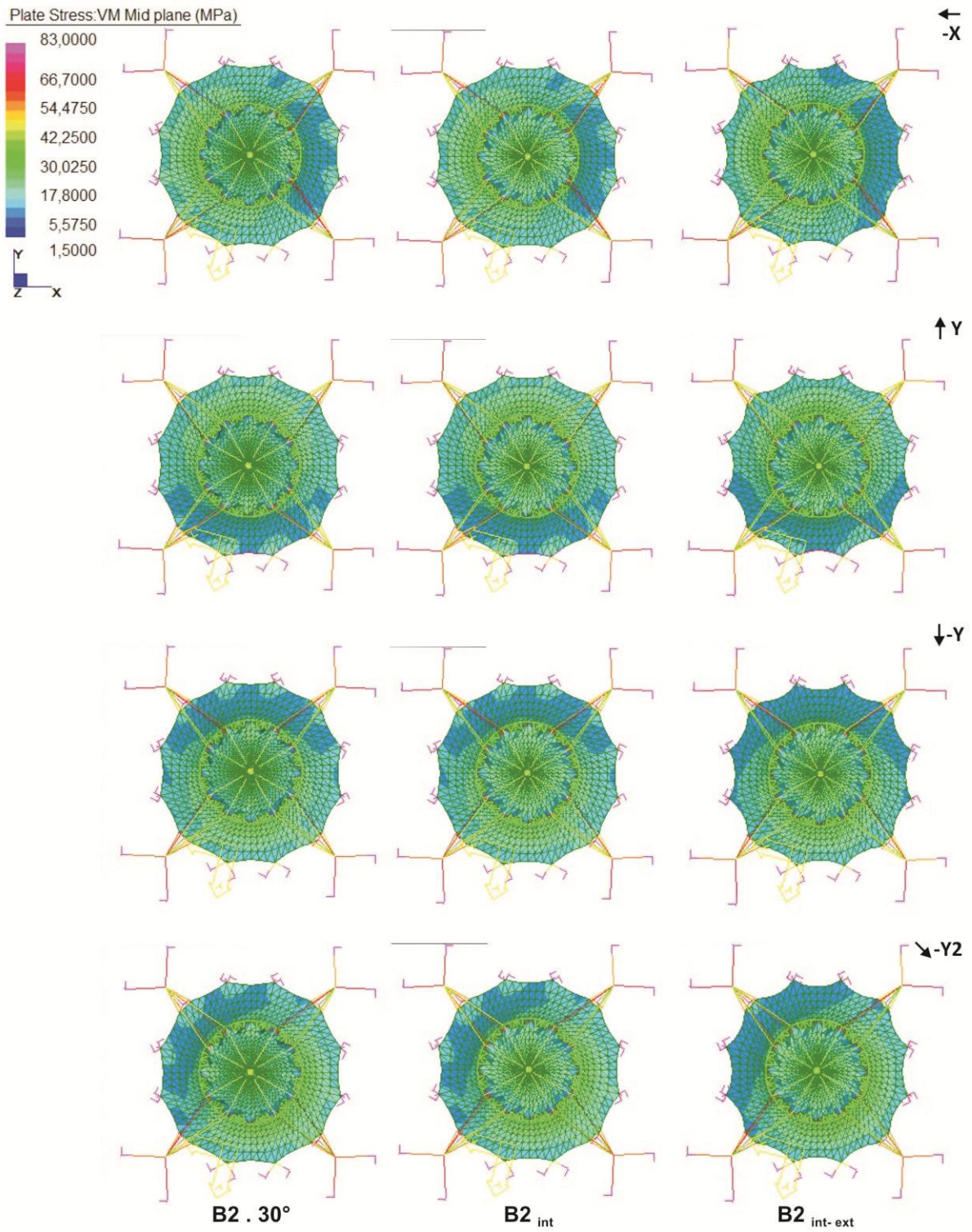


Figura 3.1-90 – Tensão máxima na membrana externa – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2)

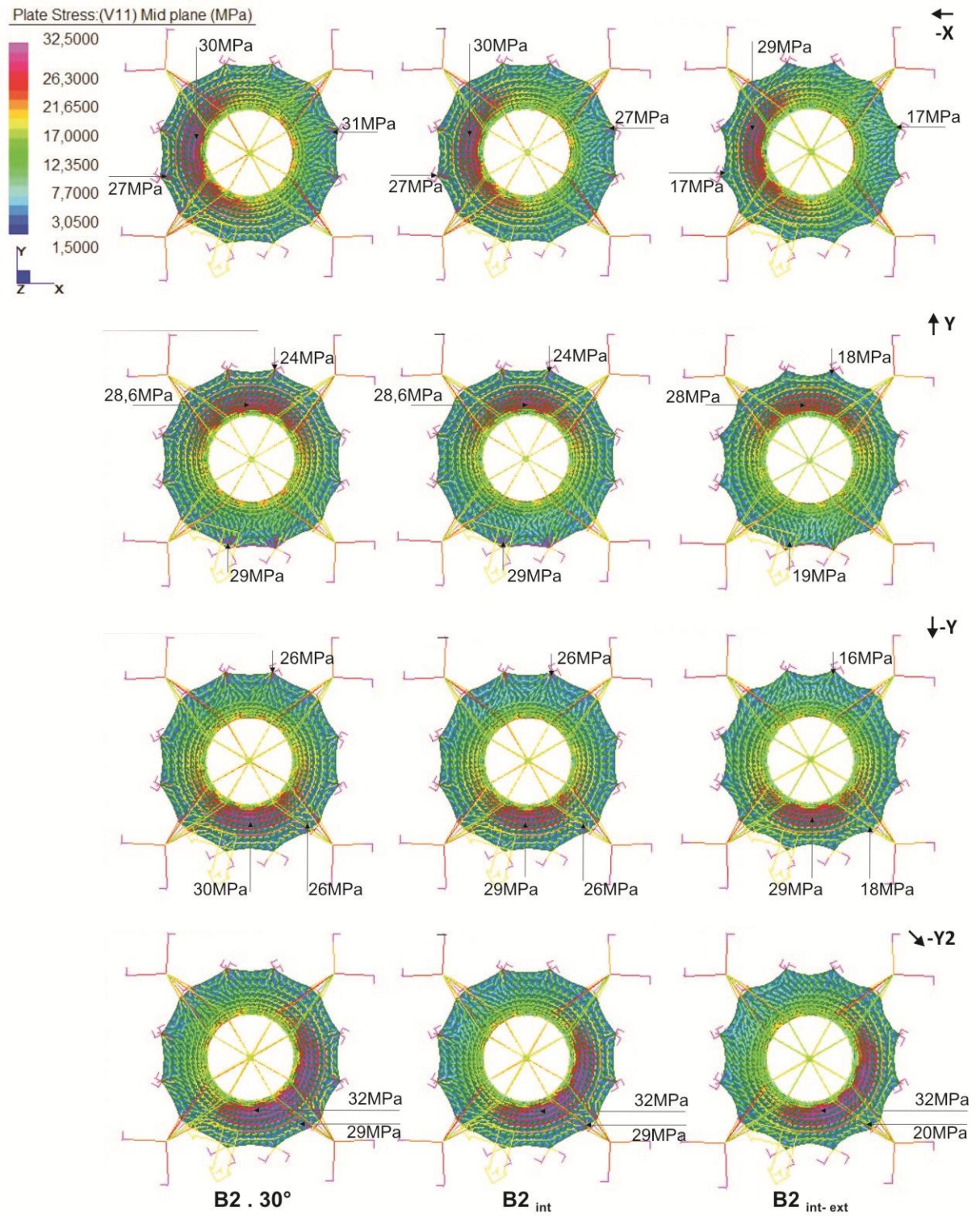


Figura 3.1-91 – Tensão mínima na membrana. externa – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2)

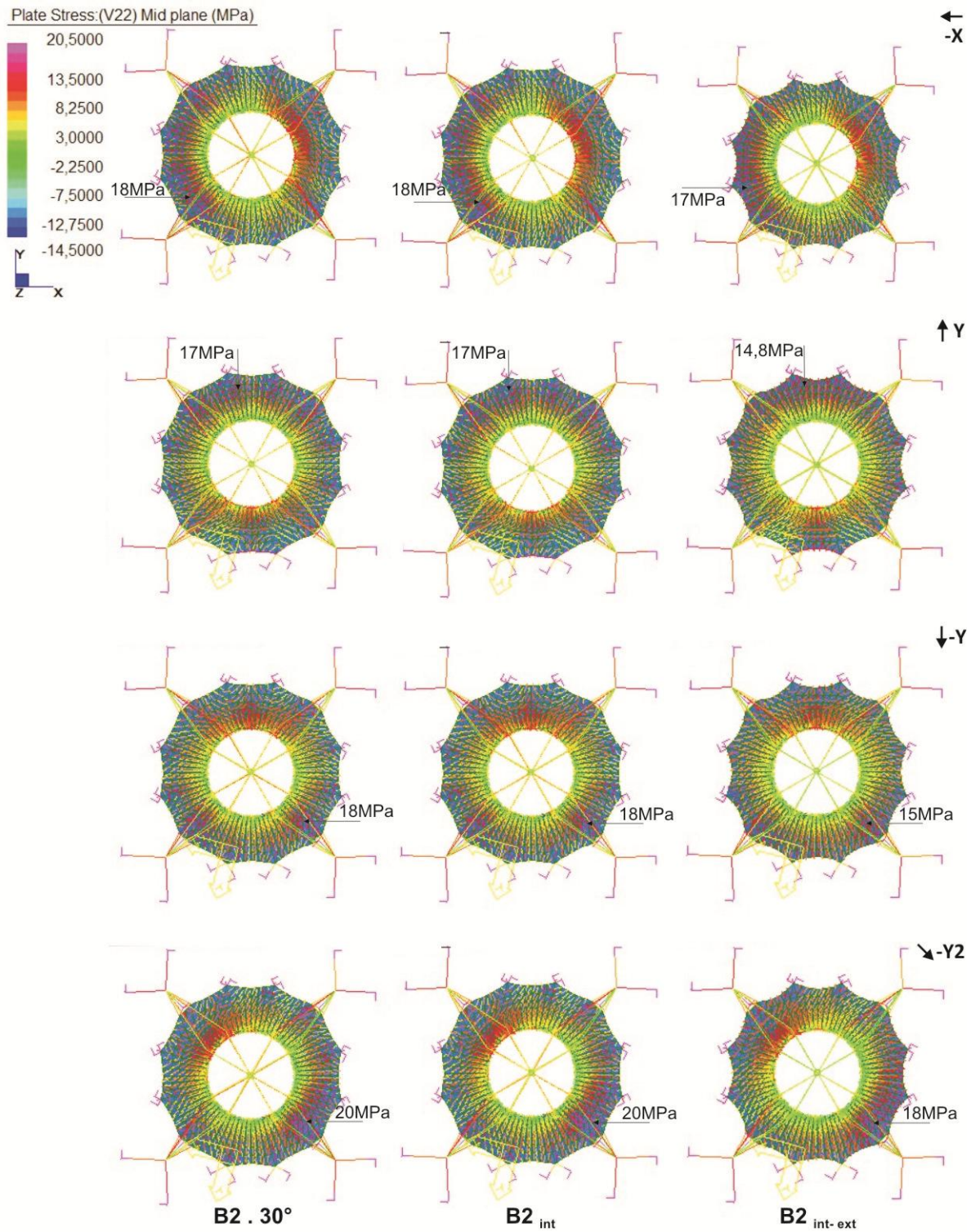


Figura 3.1-92 – Tensão máxima na membrana interna – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2)

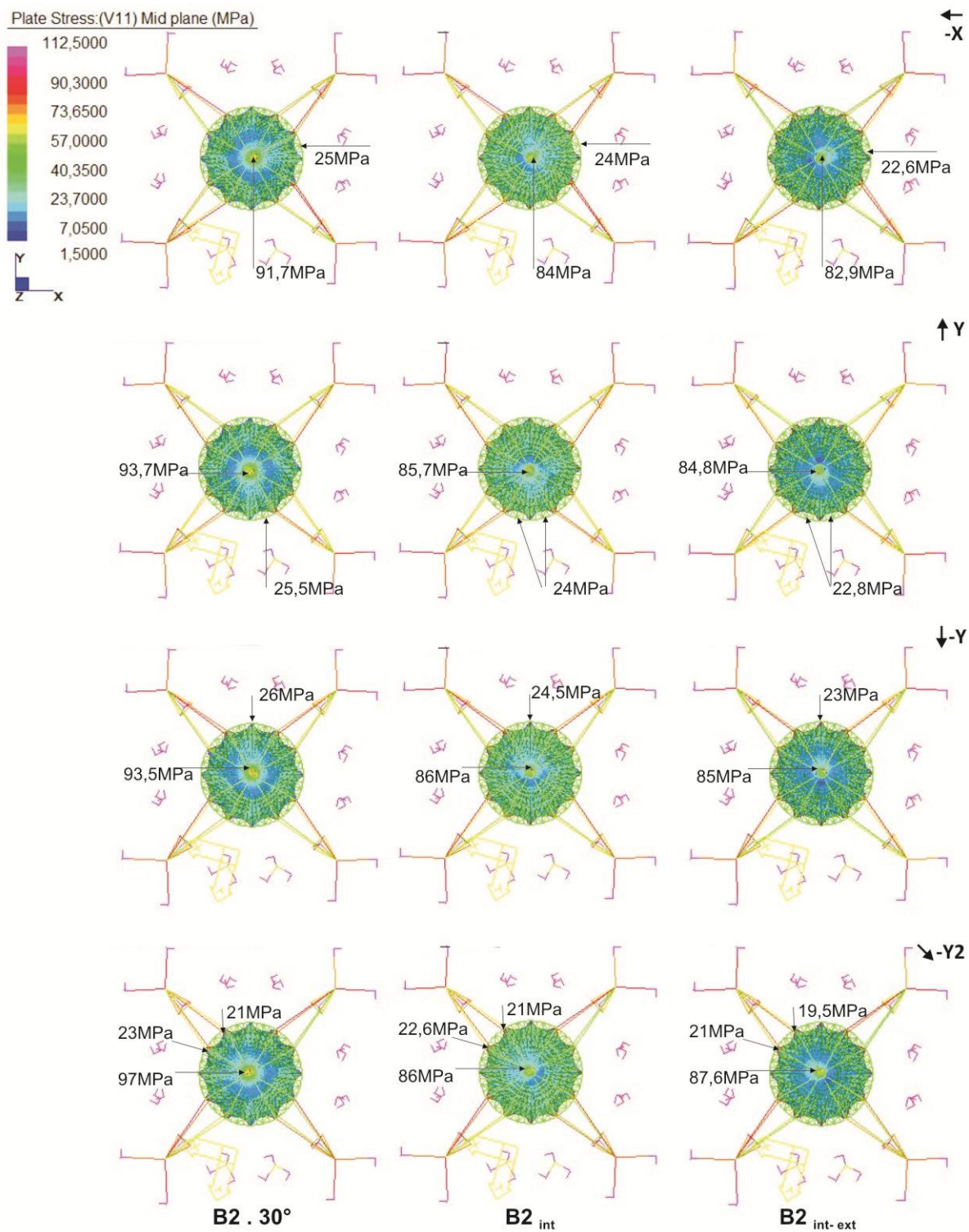


Figura 3.1-93 – Tensão mínima na membrana interna – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2)

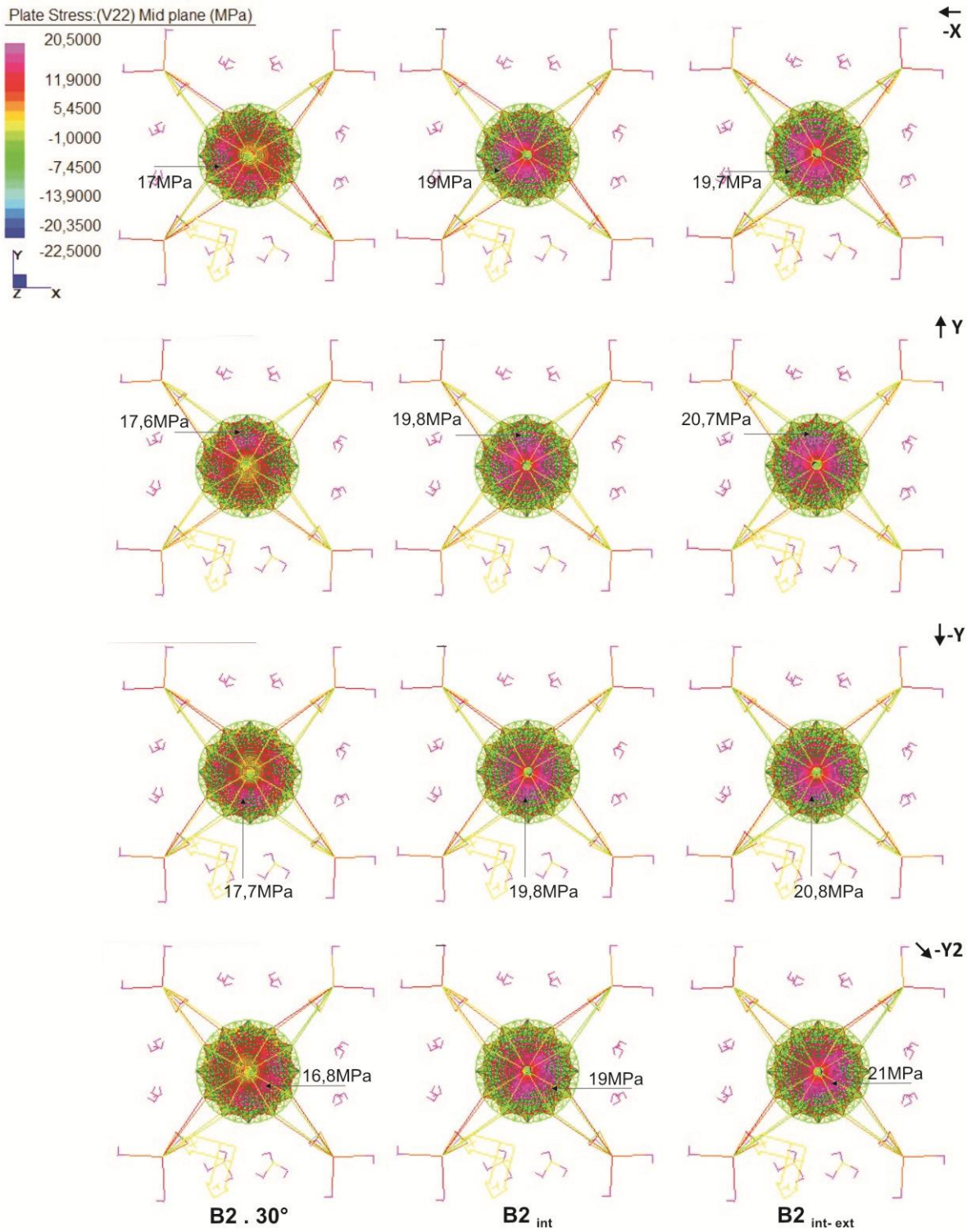


Figura 3.1-94 – Deslocamentos do sistema suporte – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2)

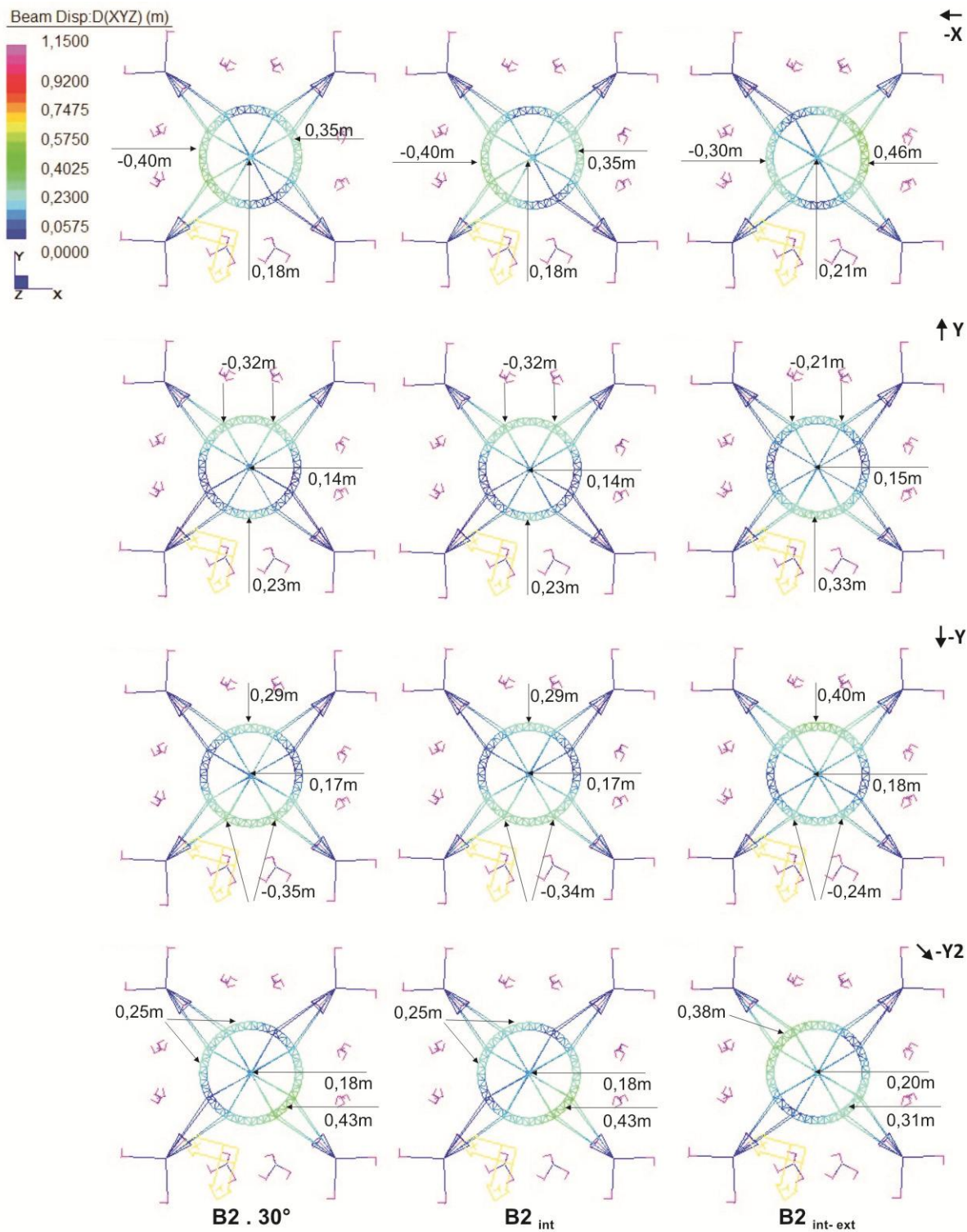


Figura 3.1-95 – Deslocamentos da membrana externa – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2)

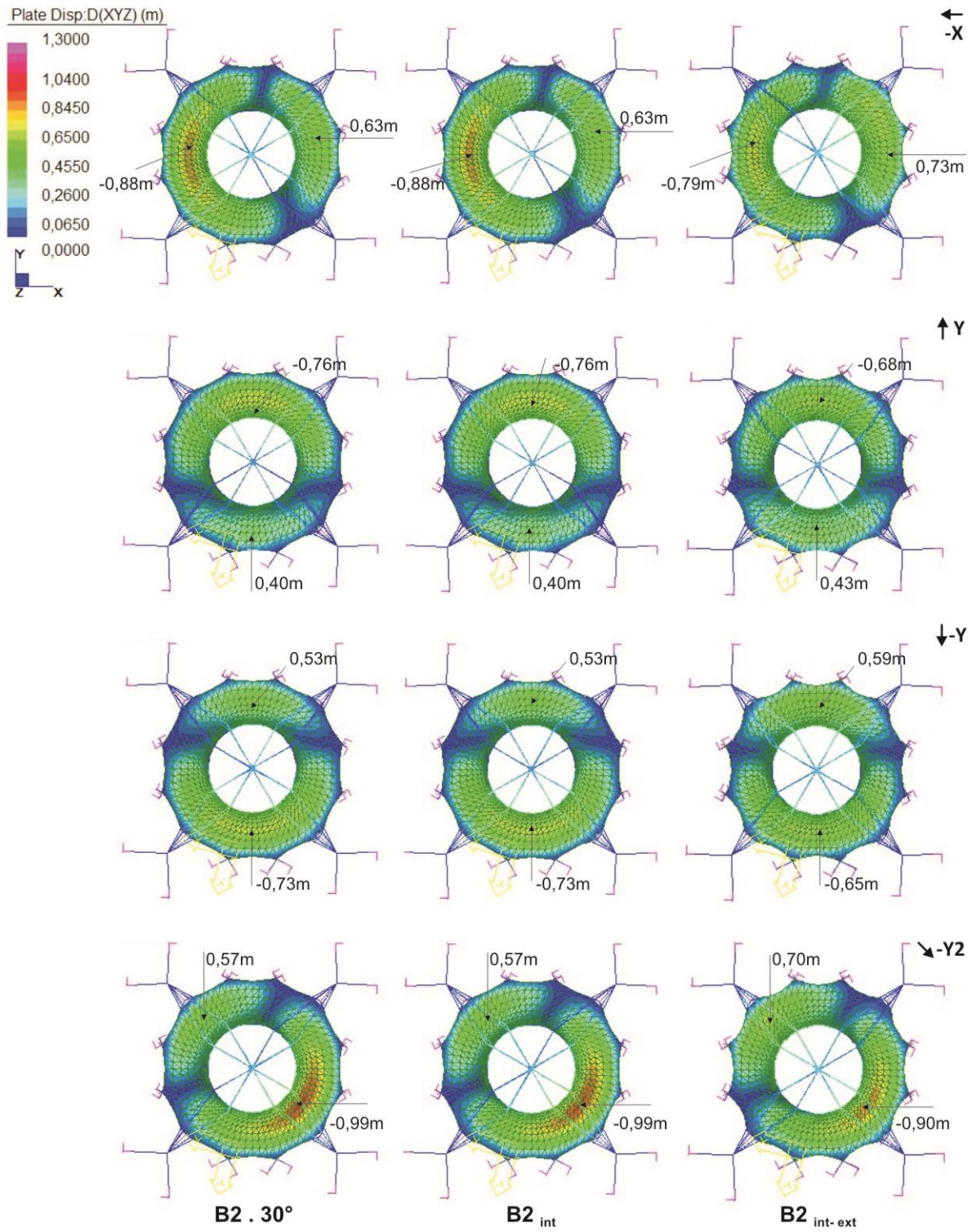
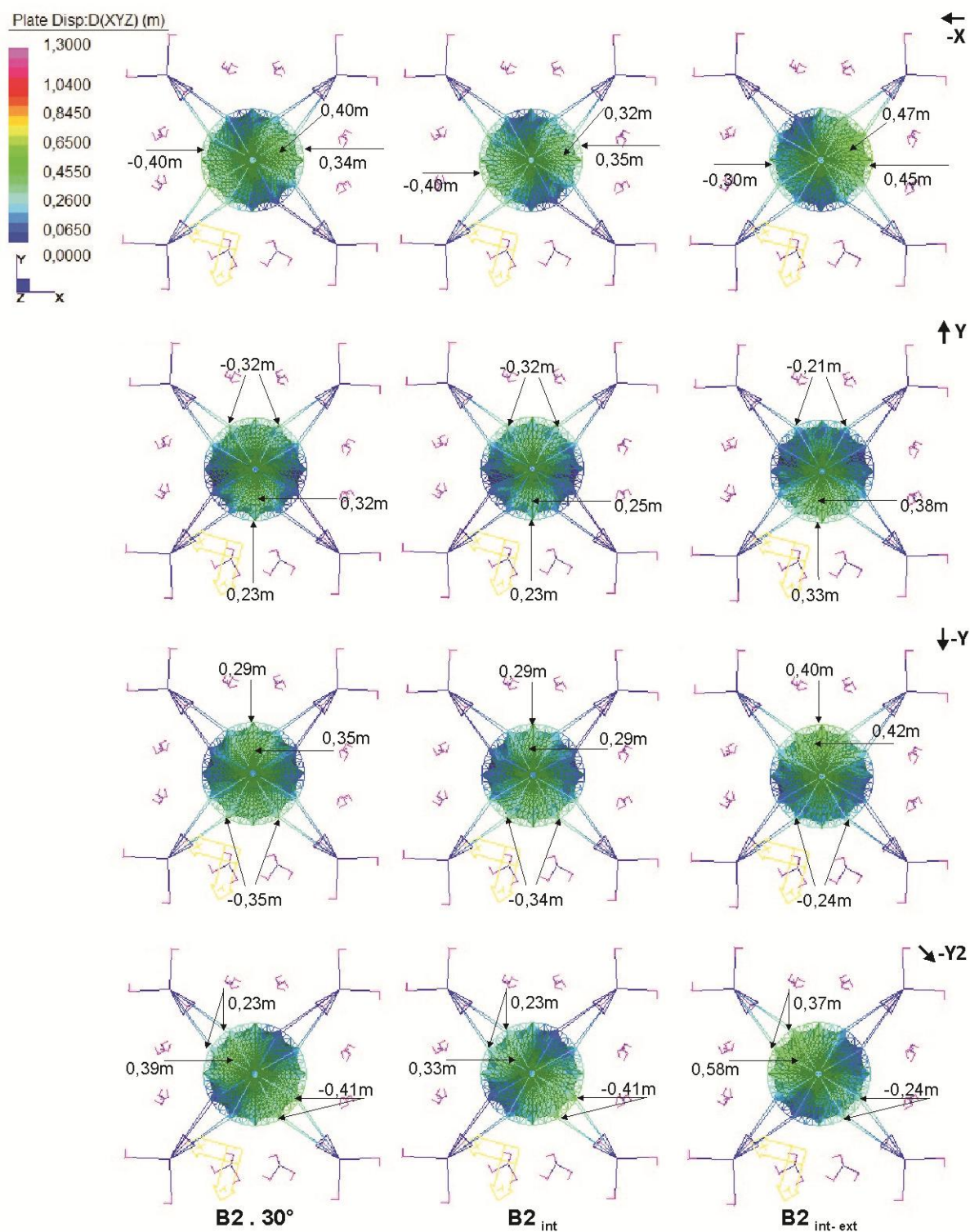


Figura 3.1-96 – Deslocamentos da membrana interna – B2-30°, B2_{int} e B2_{int-ext} (vento -X, Y, -Y, -Y2)



3.1.7 CONSIDERAÇÕES DA 1ª ETAPA DA ANÁLISE QUALITATIVA

As análises preliminares realizadas possibilitaram prever o comportamento global de cada modelo como uma tendência. Foi possível observar que as variáveis propostas (número de mastros, configuração de cabos e geometria da superfície da membrana), adicionadas a cada caso de análise, contribuíram para maior integração e o trabalho conjunto entre os componentes e o aumento da rigidez do sistema, bem como para a redução da massa global. Assim, verificou-se que o caminho para o ótimo desempenho do projeto em estudo, beneficiou-se do arranjo do conjunto estrutural e da geometria da superfície da membrana.

Em relação ao arranjo do conjunto estrutural, verificou-se que a rigidez alcançada pelo acréscimo do número de mastros (caso 1) não foi suficiente para restringir de forma significativa os deslocamentos do sistema suporte espacial e das membranas. Entretanto, o arranjo proposto no caso 2, número dos mastros associados à nova configuração dos cabos, possibilitou o trabalho mais integrado dos componentes, criando as condições mais favoráveis para o equilíbrio global do sistema. Foi possível também observar a importância do arranjo espacial dos cabos e a influência dos ângulos entre cabos.

Observou-se que as alterações na geometria das superfícies (caso 3) aumentaram de forma significativa a rigidez das superfícies das membranas, e, portanto a estabilidade global do sistema, possibilitando a redução da pré-tensão aplicada aos cabos do sistema suporte e da massa total. Verificou-se também a redução da magnitude e das áreas de concentração de tensões nos pontos de ancoragem da superfície externa, e maior homogeneidade na distribuição das tensões das superfícies.

Dentre os modelos avaliados, C2-48° e B2_{int-ext} apresentaram condições mais favoráveis para o equilíbrio global do sistema, além de possuírem massa do sistema e magnitude de pré-tensão aplicada aos cabos similares. O desempenho do modelo C2-48° resulta do grande número de mastros e da nova configuração e geometria dos cabos. Entretanto, o ótimo desempenho do modelo B2_{int-ext} deriva do equilíbrio (estabilidade global) alcançado com arranjo do conjunto estrutural e a geometria da superfície da membrana. Neste modelo, o aumento da rigidez das superfícies tornou possível o arranjo do sistema suporte com menor número de apoios, o trabalho mais integrado entre os componentes, menor massa do sistema e a distribuição mais uniforme das tensões nas superfícies.

3.2 2ª ETAPA DA ANÁLISE QUALITATIVA/ EXPERIMENTAL

Na primeira etapa da análise da qualitativa da eficiência de um projeto foi avaliada a influência das alterações do arranjo do conjunto estrutural e da geometria da superfície da membrana no comportamento e desempenho da estrutura global submetida à ação de cargas (Figura 3.2-1).

Nesse procedimento avaliou-se a forma de equilíbrio da membrana, ou seja, uma superfície tridimensional contínua cuja definição não considera o comportamento do material. Entretanto, a forma real das estruturas tensionadas (formada pela união de painéis planos) é influenciada pelo comportamento do material e pelas distorções geométricas do processo de planificação da superfície.

Assim, na segunda etapa da análise objetivou-se avaliar experimentalmente o comportamento do material selecionado, considerando a influência da geometria (curvaturas) da superfície da membrana e das cargas previstas, bem como a geometria (forma, dimensões) dos padrões de corte da membrana (Figura 3.2-1). Investigaram-se também a influência da orientação dos fios do material no painel plano e na união entre painéis, bem como o efeito da temperatura na resistência das uniões, conforme Figura 3.2-2.

Esta análise preliminar objetivou também identificar os parâmetros que devem ser considerados no procedimento de compensação dos painéis planos, e que também podem contribuir para minimizar as diferenças na geometria e na distribuição das tensões entre a forma real (modelo real) e a forma de equilíbrio (modelo teórico).

Essa investigação foi balizada pelos testes experimentais do material (biaxial) e da união entre painéis (biaxial e uniaxial), bem como pela análise preliminar do modelo B2_{int-ext} (item 3.1).

Os testes foram realizados no *Essen Laboratory for Lightweight structures, University Duisburg-Essen (UDE), Essen, Alemanha*, utilizando o material PES/PVC (FR1400 MEHATOP F - tipo IV), gentilmente cedido pela *Mehler Technologies*. As amostras utilizadas foram gentilmente preparadas (corte e solda) pela empresa *Carpro*.

Figura 3.2-1 – Análise qualitativa da eficiência do projeto: 1ª e 2ª etapas

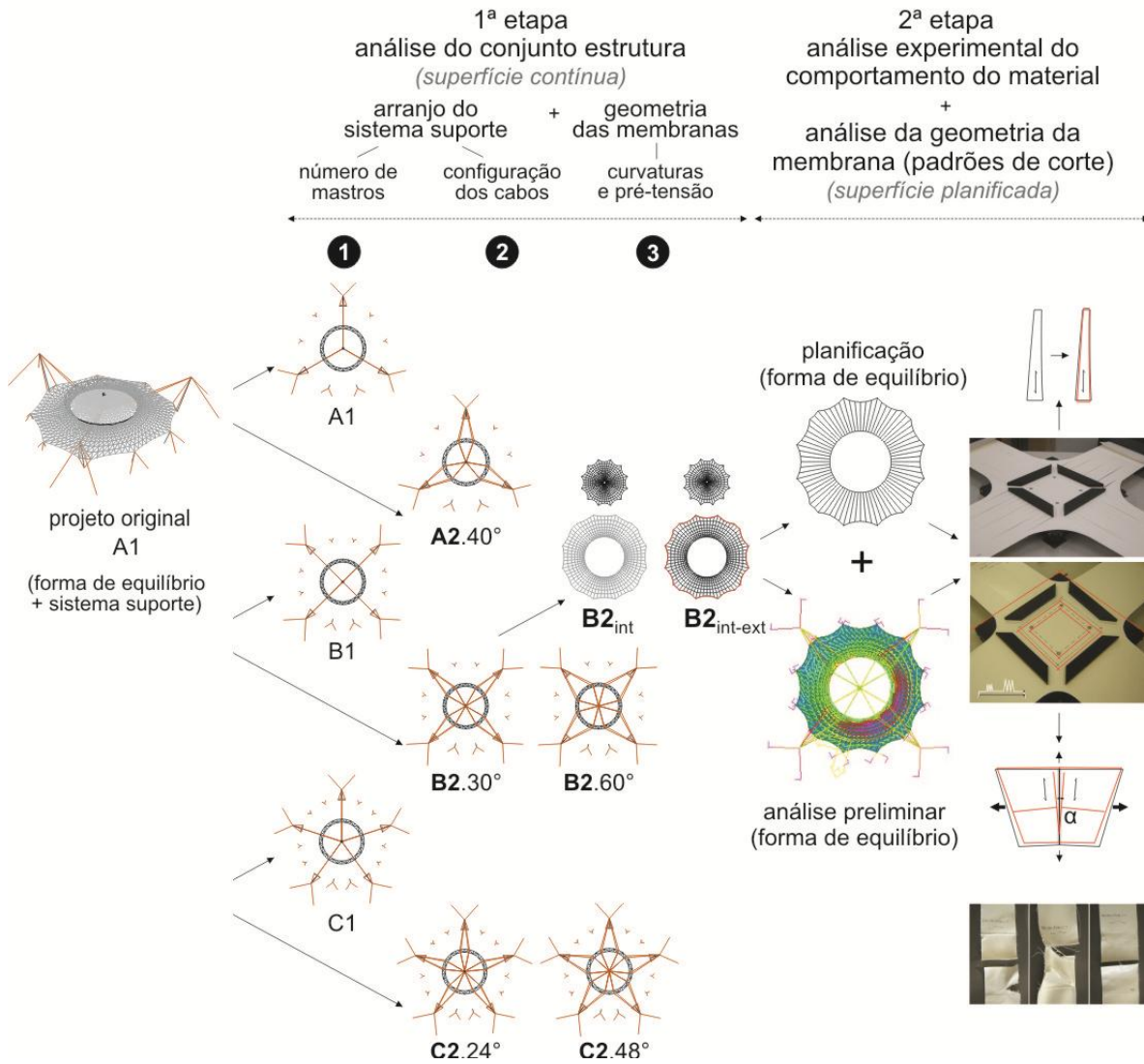


Figura 3.2-2 – Parâmetros e procedimentos avaliados na etapa experimental

Planificação superfície	Módulo		Orientação fios	Compensação		União
	Dimensão	Nº painéis		deform. material	% urdidura % trama	
	D1	N1	superfície 	ajuste painel 		ângulo do fio
			painel 			

3.2.1 TESTE BIAxIAL

O teste biaxial consiste na aplicação de forças simultaneamente em ambas as direções da amostra do material da membrana avaliado, de acordo com a relação de cargas proposta (magnitude, duração e série de cargas aplicadas na urdidura e trama).

Objetiva simular o comportamento do material na estrutura avaliada, e medir as tensões e as deformações, para referenciar o cálculo das constantes elásticas e os fatores de compensação.

É realizado à temperatura 23°C, com amostra em forma de cruz com braços estendidos na direção da urdidura e trama. Os braços da amostra apresentam cortes para garantir a transferência da tensão de forma homogênea ao material (Figura 3.2-3).

Figura 3.2-3 – Teste biaxial; material PES/PVC

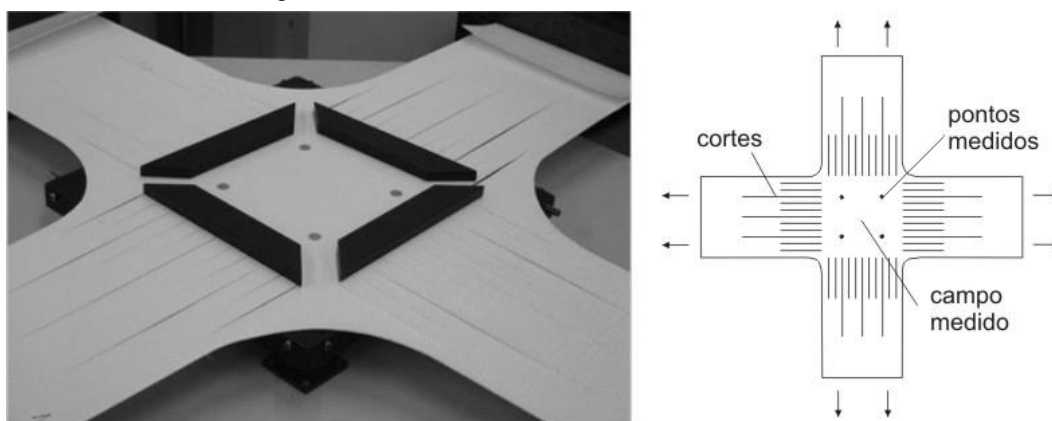
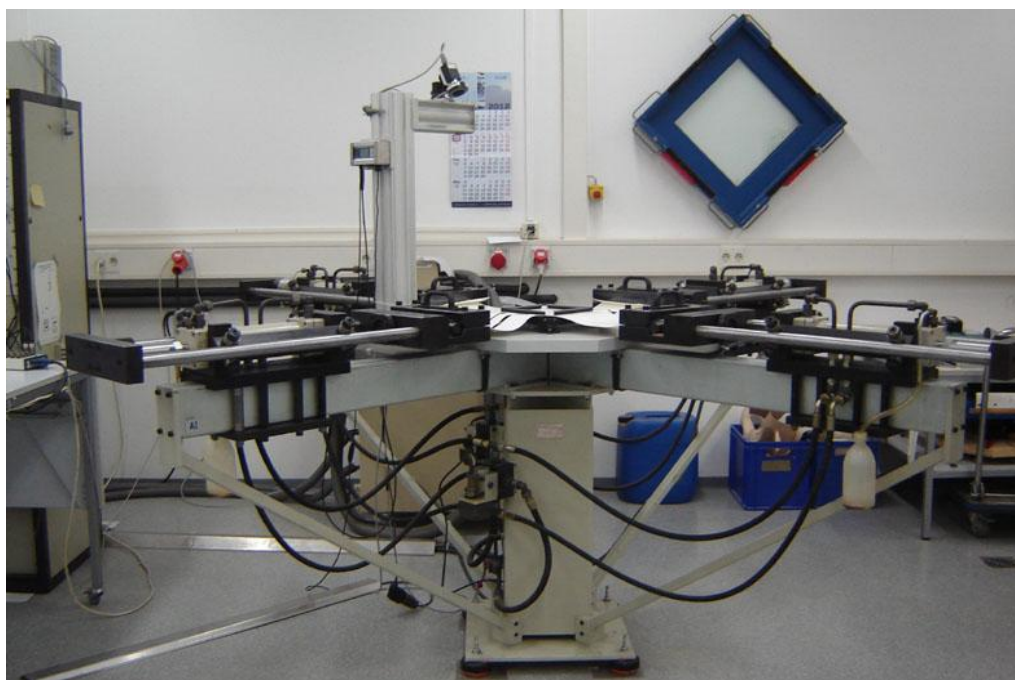


Figura 3.2-4 – Equipamento de teste - *Essen laboratory for lightweight structures, UDE*



Na Figura 3.2-4, pode-se observar o equipamento utilizado para a realização do teste biaxial no *Essen laboratory for lightweight structures -UDE*, o qual apresenta sistema de medição óptica.

Os procedimentos para a realização do teste biaxial, bem como, os métodos de avaliar e descrever aproximadamente o comportamento do material da membrana tem como referência a Norma Japonesa MSAJ/M-02-1995. Aplicam-se a materiais tipo A (fibra de vidro/ PTFE), tipo B (fibra de vidro/ PVC) e tipo C (fibra sintética/ PVC), com entrelaçamento dos fios *plain*, considerando comportamento elástico anisotrópico (MSAJ/M-01-1993 *apud* MSAJ/M-02-1995).

Segundo Uhlemann (2011), o conjunto de constantes elásticas avaliado pelo procedimento descrito pela norma japonesa deve ser considerado como uma aproximação otimizada e fictícia, pois descreve o comportamento do material que abrange todas as combinações de carga aplicadas na urdidura e trama. Entretanto, na prática buscam-se as constantes elásticas derivadas do campo de tensão e da relação de cargas que agem na estrutura avaliada, ou seja, que possam representar o comportamento da estrutura, já que as propriedades dos materiais variam de forma significativa em relação aos parâmetros de cada projeto.

3.2.1.1 Características da estrutura que norteia o teste biaxial

Esse teste teve como condicionante as características da estrutura investigada, ou seja, a geometria dos padrões de corte (Figura 3.2-5) e campo de tensões da superfície da membrana externa do modelo B2_{int-ext} (Figura 3.2-6, Figura 3.1-90, Figura 3.1-91).

Foram propostos padrões de corte radiais, alinhados as curvaturas principais da superfície. Assim, as direções dos materiais, urdidura e trama, seguem as direções radial e circunferencial, respectivamente. Segundo Wagner (2005), quando os fios do material estão alinhados às curvaturas principais, evita-se a torção dos painéis.

Figura 3.2-5 – Padrões de corte radiais das superfícies: externa e interna do modelo B2_{int-ext}

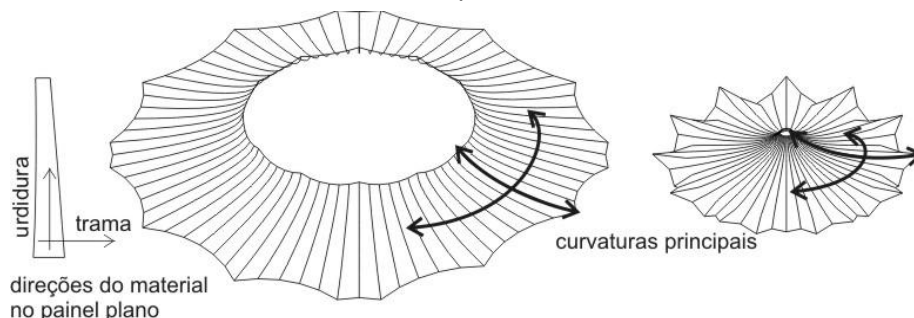
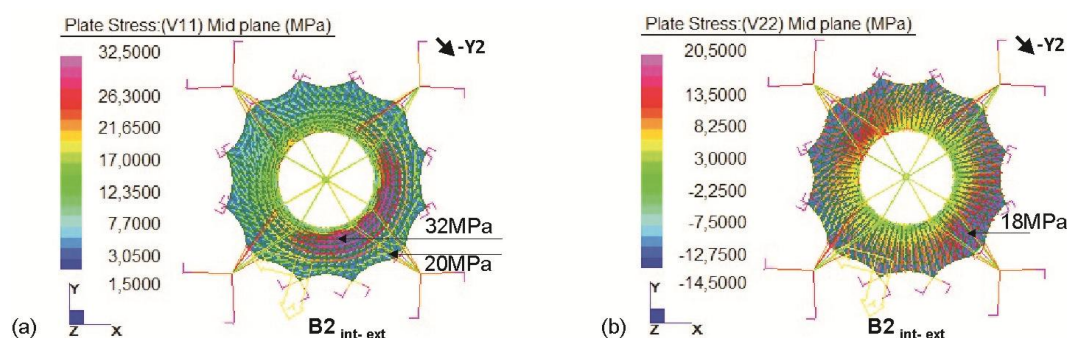


Figura 3.2-6 – Tensão máxima (a) e mínima (b) na membrana externa do modelo B2_{int-ext} (vento -Y2)



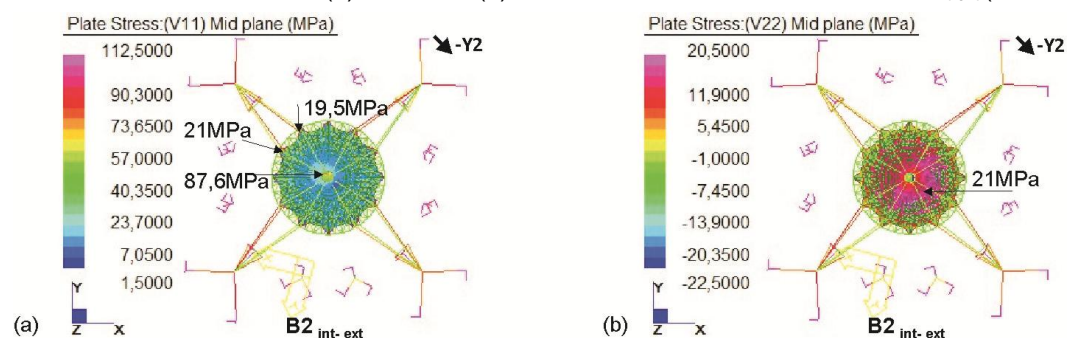
trajetórias de tensão máxima - direção circunferencial; trajetórias de tensão mínima - direção radial

Nesta superfície a tensão máxima prevista pelo modelo numérico (análise preliminar) sob a ação de crítica de carregamento (carga de vento) não excedeu a 25% da resistência de tração do material selecionado (Figura 3.2-6a, Figura 3.1-90). As trajetórias tensão máxima foram observadas na direção circunferencial (32MPa) que nesse caso é a direção da trama do material, e as trajetórias tensão mínima foram verificadas na direção radial (18MPa) que nesse caso é a urdidura (Figura 3.2-6b, Figura 3.1-91).

Em relação ao nível de pré-tensão (5% da resistência do material selecionado), a tensão máxima prevista na direção circunferencial da superfície (trama) não excedeu a 6,4MPa, e na direção radial da superfície (urdidura) a tensão observada foi 3,2MPa, conforme Tabela 3.2-1.

A superfície interna apresentou características distintas da superfície externa. As trajetórias tensão máxima foram observadas na direção radial que nesse caso é a direção da urdidura do material (Figura 3.2-7, Figura 3.1-92). Assim, a avaliação das constantes elásticas e da compensação dos painéis planos demanda um novo teste.

Figura 3.2-7 – Tensão máxima (a) e mínima (b) na membrana interna do modelo B2_{int-ext} (vento -Y2)



trajetórias de tensão máxima - direção radial; trajetórias de tensão mínima - direção circunferencial

3.2.1.2 Definição das cargas e da relação das cargas do teste biaxial

No teste realizado foram considerados os carregamentos de pré-tensão (5% da carga de ruptura) e os valores médios e máximos da carga crítica (vento), ou seja, a magnitude e a duração das cargas que atuam a longo e em curto prazo na estrutura, respectivamente.

Observou-se que um dos grandes desafios é definir qual é a magnitude da carga média, ou seja, o carregamento aproximado que predomina durante a vida útil da estrutura. Cinquenta por cento (50%) da carga máxima? Sessenta por cento (60%) da carga máxima?

Verificou-se que esse valor depende das características da estrutura, das cargas avaliadas, do material selecionado, e da experiência dos engenheiros e dos construtores. Nessa investigação, considerou-se a magnitude da carga média cinquenta por cento (50%) da carga máxima, ou seja, a influência da ação constante do peso próprio e pré-tensão, e menor intensidade da ação do vento.

O teste biaxial foi realizado da seguinte forma: inicialmente o tecido foi esticado até o nível de pré-tensão em ambas as direções, mantendo essa carga constante. Em seguida, as direções da urdidura e trama foram submetidas a ciclos de carga alternados (50% e 100% da carga crítica). Esses ciclos de carga foram intercalados por etapas de carga constante, simulando a pré-tensão da membrana.

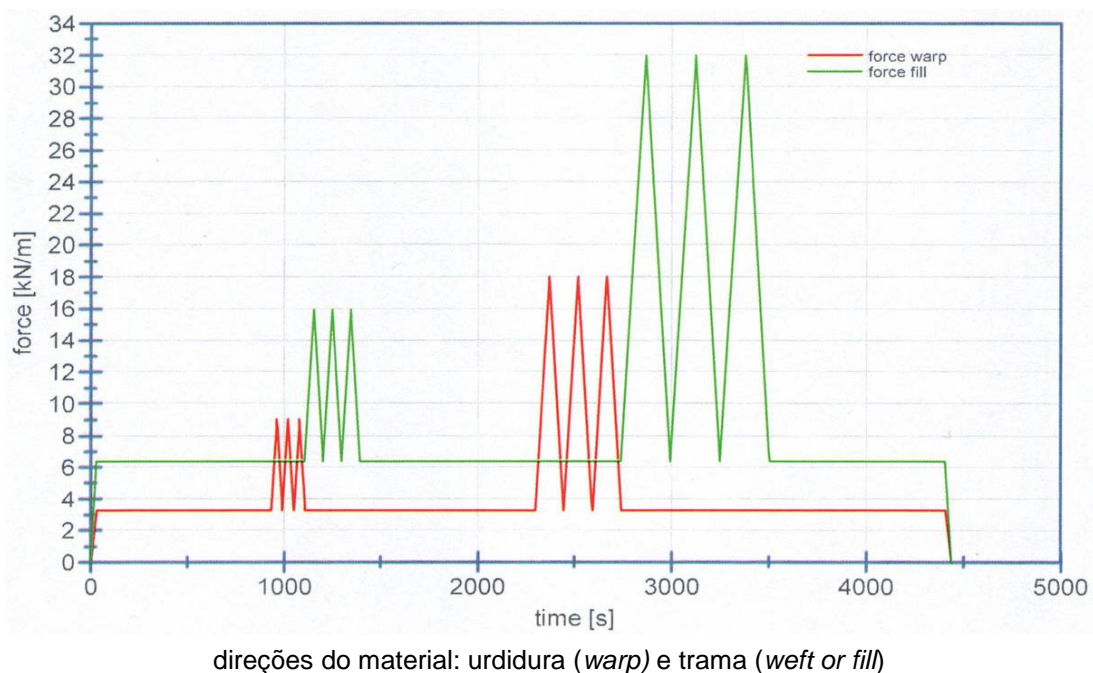
Nos ciclos iniciais foi aplicado o valor médio da carga. Inicialmente, a direção da urdidura foi submetida a três ciclos de carga e descarga, mantendo a tensão constante na direção da trama. Em seguida, a trama foi submetida a três ciclos de carga e descarga, mantendo a tensão constante na urdidura.

Os ciclos finais seguiram o mesmo procedimento, aplicando-se a carga máxima nas direções da trama e urdidura. A relação das cargas aplicadas nas direções do material a 0,2(kN/m)/s), podem ser observadas na Tabela 3.2-1, Diagrama 3.2-1, Apêndice G.

Tabela 3.2-1 – Teste biaxial - relação das cargas aplicadas nas direções do material

direções do material	1° passo	2° passo	3° passo	4° passo	5° passo	6° passo	7° passo
	carga constante pré-tensão [kN/m]	ciclos de carga valor médio da carga crítica [kN/m]		carga constante pré-tensão [kN/m]	ciclos de carga valor máximo da carga crítica [kN/m]		carga constante pré-tensão [kN/m]
urdidura	3,2	9	3,2	3,2	18	3,2	3,2
trama	6,4	6,4	16	6,4	6,4	32	6,4

Diagrama 3.2-1 – Teste biaxial – Valores de referência das cargas aplicadas nas direções do material



3.2.1.1 Interpretação dos resultados do teste biaxial

Nessa investigação preliminar do comportamento do material da membrana foram analisadas as tensões e as deformações que resultaram das cargas máxima e média (previstas) que atuam na estrutura avaliada. Essas análises referenciaram os cálculos das constantes elásticas do material e dos fatores de compensação.

A análise e a interpretação dos resultados foram sustentadas pelo acompanhamento e registro fotográfico do teste biaxial, bem como pelas informações e diagramas fornecidos pelo Laboratório.

O Diagrama 3.2-2, descreve o caminho não linear tensão-deformação (força-deformação) nas direções do material (urdidura e trama) em relação às cargas aplicadas no tempo. No Diagrama 3.2-3, observa-se a superposição das seguintes informações: deformações nas direções do material no tempo e a relação das cargas aplicadas. O Diagrama 3.2-4 descreve as deformações nas direções do material no tempo.

Verificou-se o grande alongamento positivo da trama e o alongamento negativo da urdidura, de acordo com a relação de cargas proposta e características da estrutura.

Diagrama 3.2-2 – Teste biaxial – Força- tempo nas direções do material: urdidura (*warp*) e trama (*fill*)

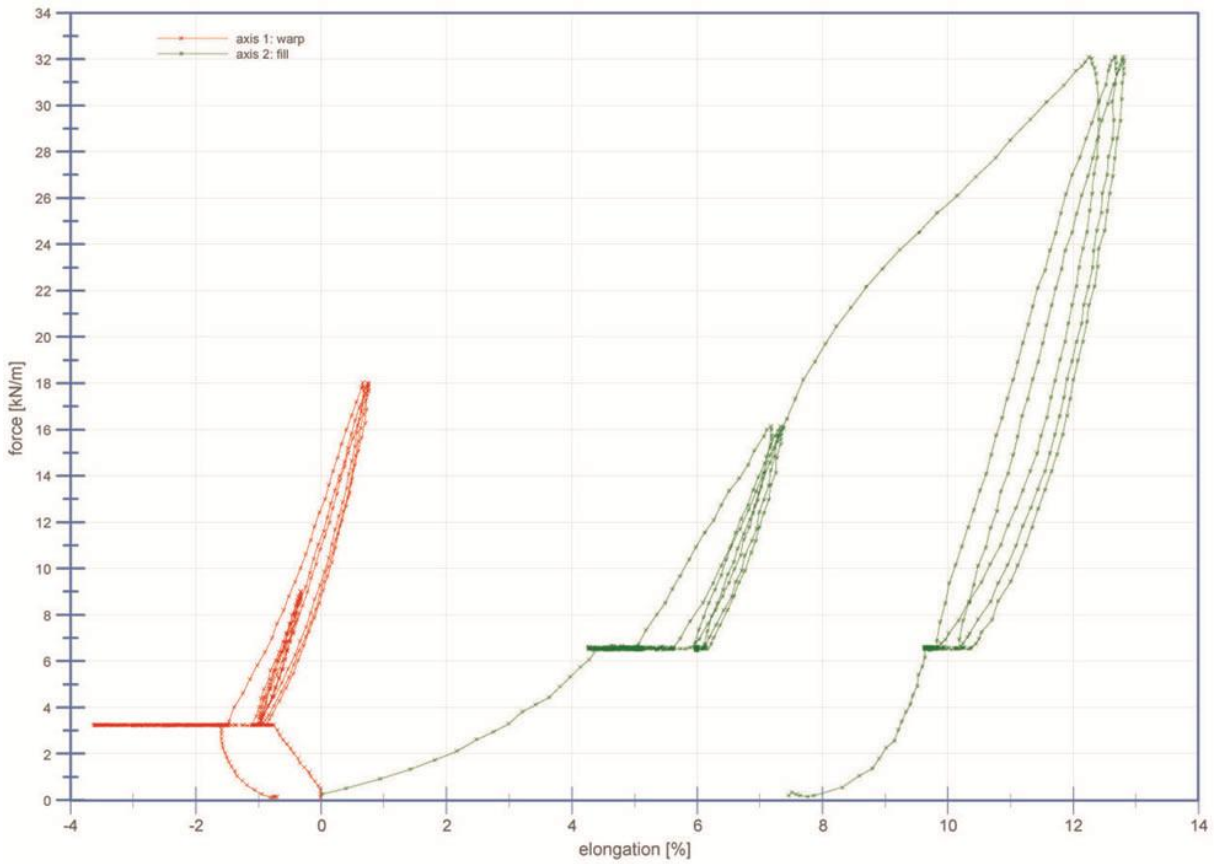
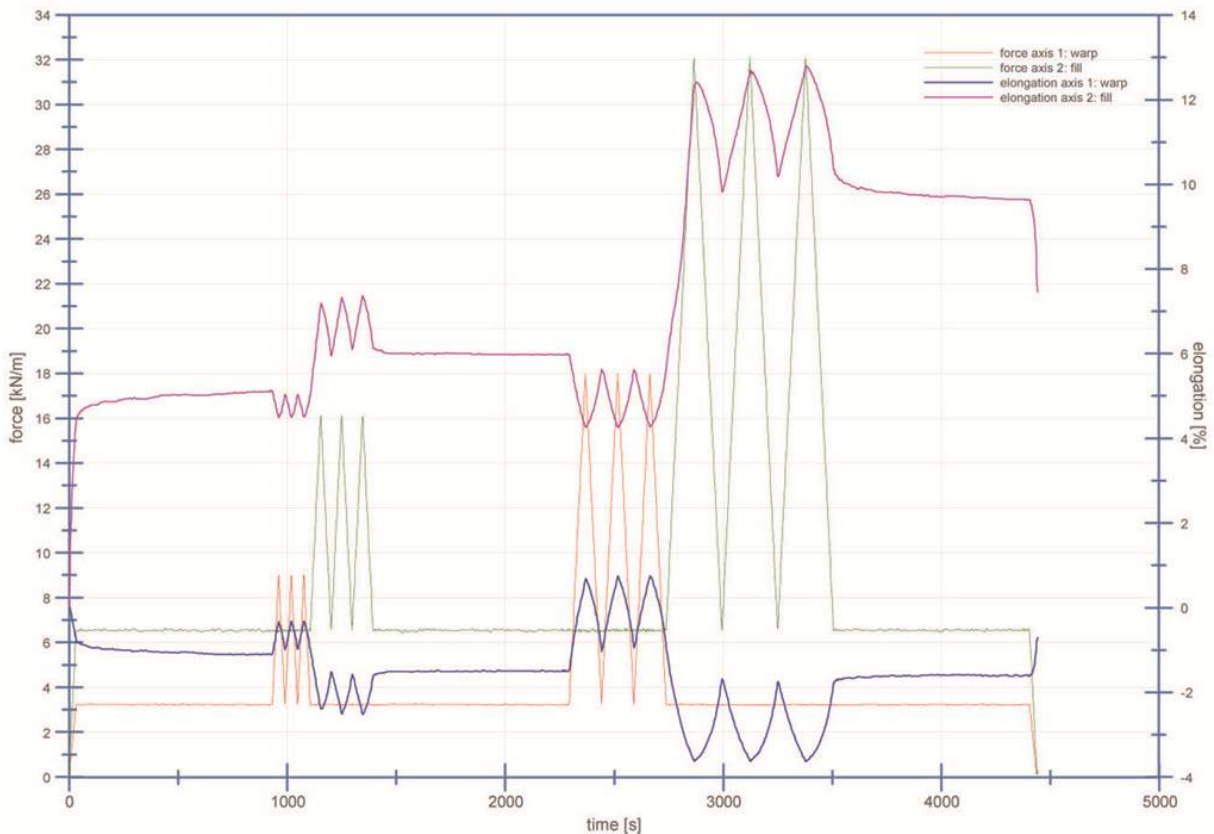


Diagrama 3.2-3 – Teste biaxial – Força-alongamento-tempo nas direções do material



direções do material: urdidura (*warp*) e trama (*fill*)

Cálculo das constantes elásticas do material

Nessa investigação preliminar, as constantes do material foram determinadas por uma simples aproximação linear. Procedeu-se uma análise simplificada que não é apropriada para casos onde é necessária a avaliação precisa do comportamento não linear do material.

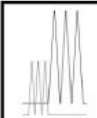
Para o cálculo das constantes elásticas da estrutura avaliada (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) foram consideradas as tensões e as deformações resultantes da carga máxima ou de curto prazo (vento) que atuam na estrutura avaliada.

O módulo de elasticidade ou a rigidez nas direções da urdidura (E_1) e trama (E_2) foram obtidos com o ajuste linear das curvas tensão-deformação longitudinal dos ciclos de carga máxima (Diagrama 3.2-2). Assim, as tensões (σ) e as deformações (ϵ) na urdidura e trama foram substituídas pela sua variação ($\Delta\sigma$ e $\Delta\epsilon$), conforme Blum (2002).

O coeficiente de Poisson (ν_{21}) que descreve a deformação transversal na direção da trama (2) causada pela carga na direção da urdidura (1), bem como o coeficiente de Poisson (ν_{12}) que descreve a deformação transversal na direção da urdidura (1) causado pela carga na direção da trama (2), foram também calculados considerando o ajuste linear da curva de deformação transversal em função da curva de deformação longitudinal, conforme Alvim e Pauletti (2004).

Assim, na Tabela 3.2-2 pode-se verificar o ajuste linear de todas as curvas tensão-deformação dos ciclos de carga máxima nas direções da urdidura e trama.

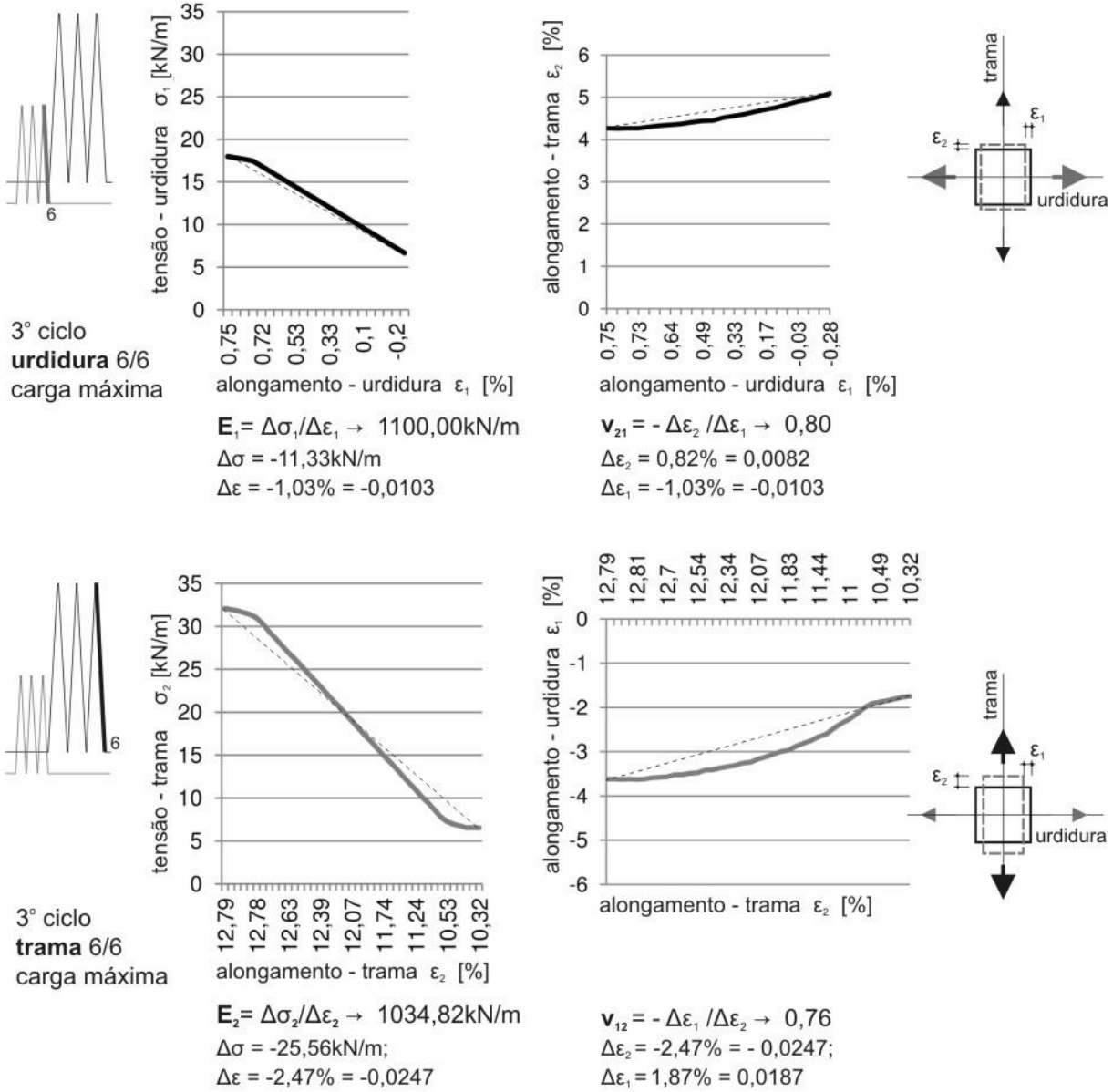
Tabela 3.2-2 – Avaliação das constantes elásticas nos ciclos de carga máxima prevista na estrutura

			constantes elásticas (carga máxima)					
			ciclo 1		ciclo 2		ciclo 3	
			1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6
urdidura	E_1	kN/m	683,33	872,78	832,77	872,19	866,47	1100,00
	ν_{21}	%	0,78	0,80	0,77	0,80	0,79	0,80
trama	E_2	kN/m	356,84	1055,37	903,18	1036,18	983,01	1034,82
	ν_{12}	%	0,46	0,79	0,67	0,75	0,72	0,76
		$E_1 \cdot t / E_2 \cdot t$	1,91	0,83	0,92	0,84	0,88	1,06
		ν_{21} / ν_{12}	1,70	1,01	1,15	1,07	1,10	1,05

Observou-se que os ciclos de carga endireitam os fios na direção em que a carga é aplicada, aumentando sua rigidez a cada ciclo. Assim, esse procedimento possibilitou a medição das constantes elásticas na última aplicação da carga (curva

tensão-formação 6/6, 3º ciclo, Figura 3.2-8), sem a interferência das folgas entre os fios, conforme comentário da Norma Japonesa MSAJ/M-02-1995.

Figura 3.2-8 – Cálculo das constantes elásticas



$$E_{1,t} / E_{2,t} = \nu_{21} / \nu_{12} \rightarrow 1100 / 1034,82 = 0,80 / 0,76 \rightarrow 1,062 \sim 1,052$$

(avaliação da última curva de tensão-deformação: 6/6; 3º ciclo de carga; direções da urdidura e trama)

Na última curva tensão-formação (6/6) do terceiro ciclo (Figura 3.2-8, Tabela 3.2-2) verificou-se também a relação recíproca entre a rigidez nas direções da urdidura e trama e os dois coeficientes de Poisson ($E_{1,t} / E_{2,t} = \nu_{21} / \nu_{12}$), conforme MSAJ/M-02-1995.

Observou-se, pequena diferença entre a rigidez da urdidura e da trama ($E_1=1100\text{kN/m}$ e $E_2=1034\text{kN/m}$), ou seja, uma tendência do material ao comportamento isotrópico, para as características da estrutura investigada e relação de cargas avaliadas. Além disso, estes módulos de elasticidade apresentaram menor magnitude que o módulo assumido nas análises preliminares ($E = 1300\text{kN/m}$). Portanto, os resultados deste teste devem ser considerados nas análises refinadas finais.

Teoricamente, o coeficiente de Poisson para materiais elásticos e isotrópicos não excede o valor de 0,5. Entretanto, nessa análise, o coeficiente de Poisson calculado excedeu esse valor.

Segundo a MSAJ/M-02-1995, nos tecidos entrelaçados, como é o material da membrana avaliado, o alongamento e o encolhimento do material estão associados à mudança de ondulação dos fios (*crimp interchange*), conforme Figura 3.2-9. Conseqüentemente, o coeficiente de Poisson pode eventualmente exceder o valor de 1,0. Assim, apenas um coeficiente de Poisson fictício se aplica.

Compensação dos painéis planos

Conforme descrito no item 2.6.3, a forma real das estruturas de membrana tensionadas é influenciada pelo comportamento do material e pelas as distorções do procedimento de planificação (procedimento geométrico).

Nessa análise foi avaliada apenas a influência das deformações do material (direções da urdidura e trama) na geometria dos padrões de corte bidimensionais do tecido (painéis planos), para posteriormente ajustar (compensar) as dimensões desses painéis, segundo comportamento observado.

Foram avaliadas as deformações que resultam dos ciclos com valor médio de carga, isto é, que derivam das cargas que predominam durante a vida útil da estrutura.

Inicialmente, observaram-se as deformações nas direções do material (Diagrama 3.2-4).

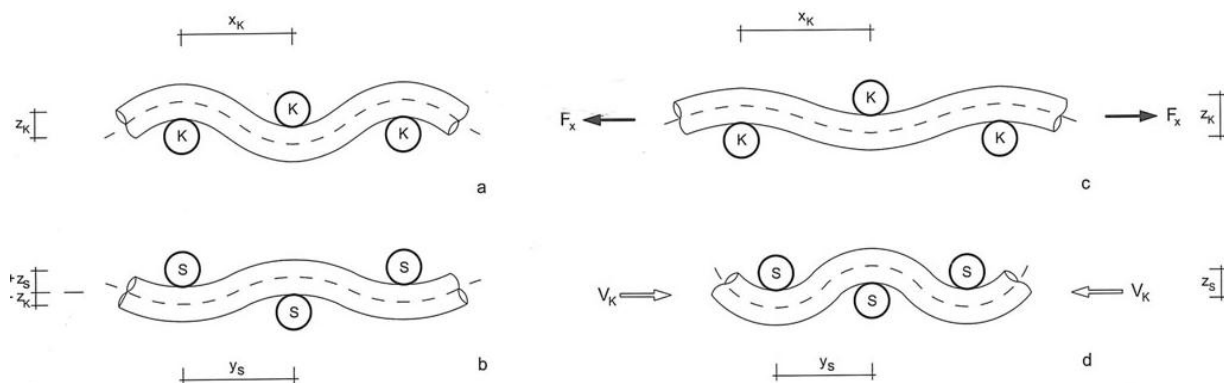
No trecho inicial de carregamento – carga zero até o início da aplicação do primeiro passo de carga –, observou-se a deformação significativa nas direções do material. Verificou-se o alongamento positivo da direção da trama (+4,4%) e o encolhimento da urdidura (-0,76%). Esse comportamento foi interpretado como uma

deformação geométrica, causada pela mudança da ondulação dos fios (*crimp interchange*, conforme Figura 3.2-9), já que esta deformação ocorreu antes da aplicação de carga constante e ciclos de cargas.

Segundo a MSAJ/M-02-1995, isso acontece porque nos tecidos (entrelaçados e cobertos) usados nas membranas estruturais, os fios e a cobertura não são unificados. Quando os fios são solicitados, esses ondulam na trama do tecido. A magnitude dessa ondulação depende da tensão aplicada às direções da urdidura e da trama, durante o processo de tecelagem, e geralmente não têm o mesmo valor.

Então, quando a direção da trama é solicitada, a urdidura encolhe (contrai transversalmente), e vice-versa, por causa da folga causada pela ondulação dos fios entrelaçados (*weaving wave effect*), conforme Figura 3.2-9. Esse efeito não é uma deformação elástica, mas uma deformação geométrica conhecida como a transferência de ondulação dos fios (*crimp interchange*), que tem grande influência nas propriedades mecânicas do material (HUNGTINGTON, 2003; MSAJ/M-02-1995).

Figura 3.2-9 – Transferência de ondulação dos fios



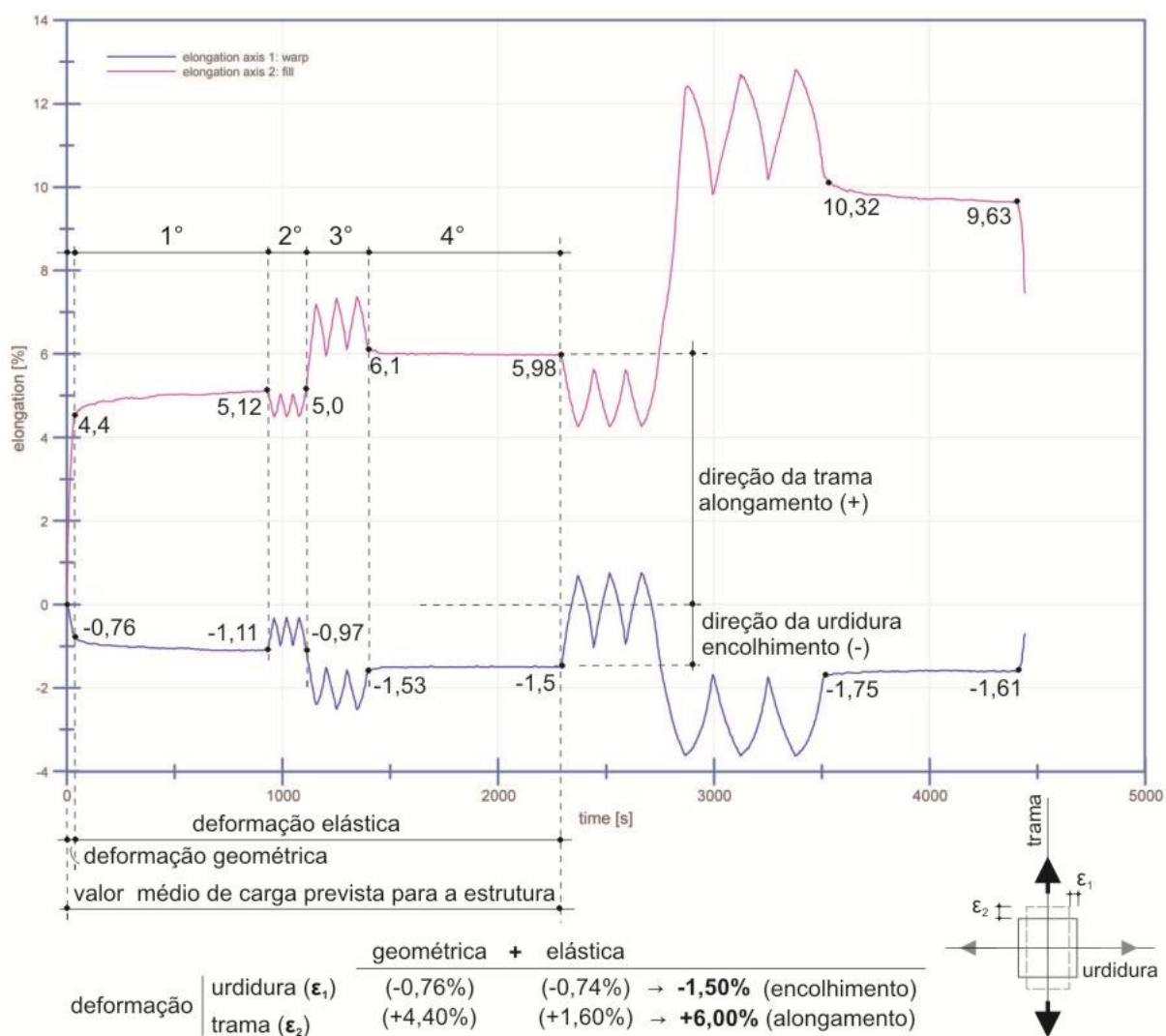
(a; b) fios não deformados; (c; d) fios deformados: trama (S) foi solicitada e a urdidura (K) encolheu

Fonte: SEIDEL,2009, p.42.

Entretanto, após cada passo de carga aplicado ao material – pré-tensão constante (1° e 4° passos de carga) e ciclos de carga média (2° e 3° passos de carga) –, foram observadas deformações elásticas residuais nas direções do material (Diagrama 3.2-4).

Assim, a deformação total do material foi considerada como a somatória das deformações elásticas e geométricas observadas.

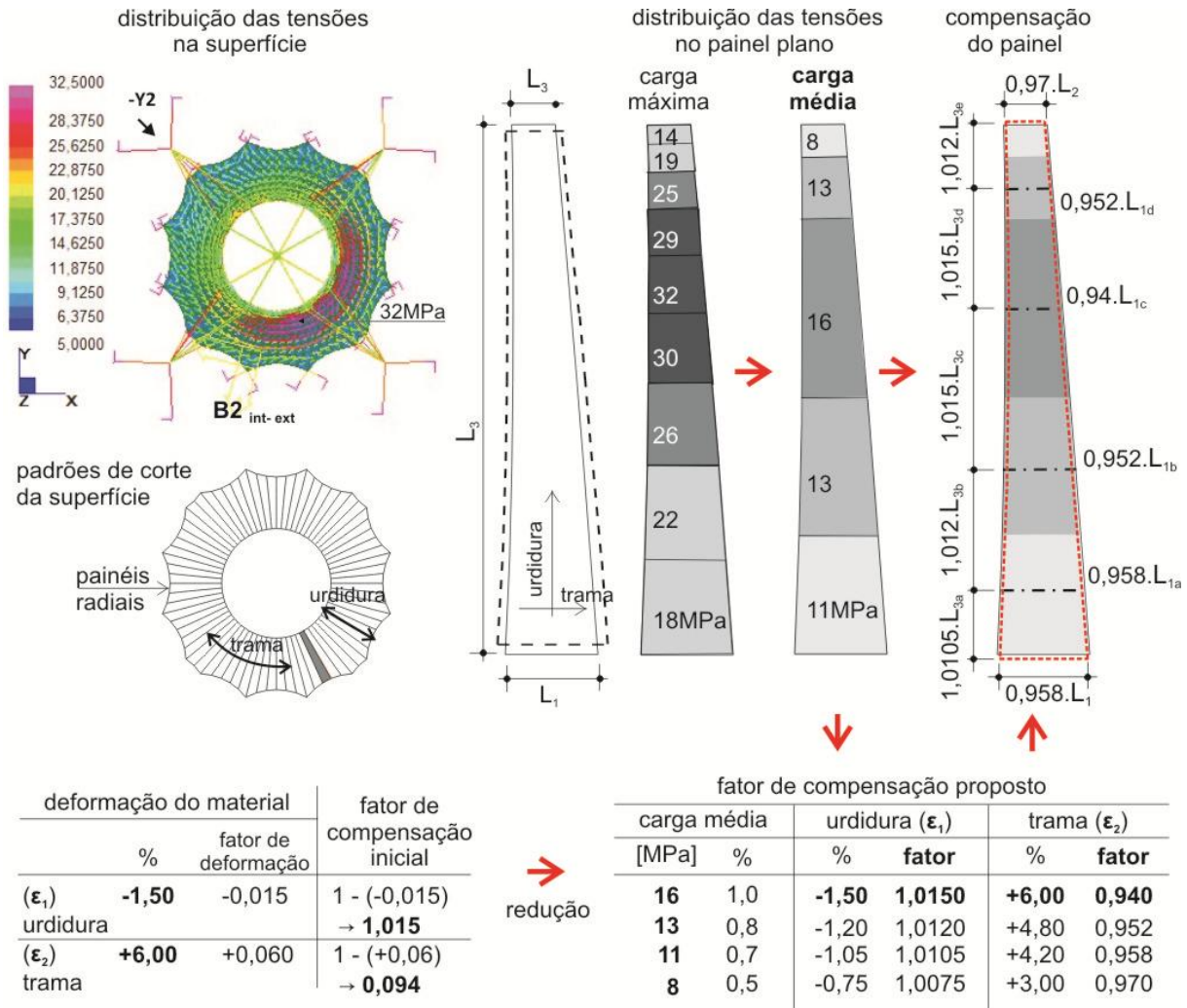
Diagrama 3.2-4 – Teste biaxial – Alongamento-tempo



Em seguida, avaliaram-se as deformações nas direções do material em relação à geometria dos padrões de corte e a distribuição das tensões na superfície da membrana. Esse procedimento foi realizado em cinco passos (Figura 3.2-10):

1° Passo: observou-se a distribuição das tensões na superfície externa em todas as direções (Figura 3.2-6, Figura 3.1-90, Figura 3.1-91). As áreas de maior tensão foram observadas a sotavento e coincidem com as áreas de maior deslocamento, causados pela sucção do vento, (Figura 3.1-95). Pode-se observar, como exemplo, a variação das tensões na superfície externa e no painel plano sob a ação do vento na direção -Y2, conforme Figura 3.2-10.

Figura 3.2-10 – Compensação dos painéis planos



2º Passo: em seguida, foi proposta a divisão dos painéis planos em cinco áreas de tensão, de acordo com a distribuição da tensão (carga média) na superfície.

3º Passo: foram calculados os fatores de compensação (redução e ou acréscimo) das dimensões dos painéis planos, considerando apenas a deformação do material (alongamento e encolhimento); considerou-se como referência, um exemplo de cálculo do fator de compensação para edificações pneumáticas esféricas (OTTO *et al.*, 1983, p.77).

4º Passo: foi proposta a redução desses fatores de compensação, de acordo com a distribuição da tensão observada na superfície e nos painéis planos; essa redução teve como objetivo evitar o corte ou acréscimo excessivo do material, e, portanto de regiões de pico de tensão e ou dificuldades na montagem.

5º Passo: para realizar o ajuste das dimensões dos painéis planos, os fatores de compensação reduzidos foram multiplicados pelas dimensões iniciais dos painéis

planos (padrões de corte bidimensionais), de acordo com as deformações verificadas nas direções do material (urdidura e trama) e distribuição de tensões proposta.

Esse procedimento busca contribuir para minimizar as diferenças entre a forma de equilíbrio e a forma real, para evitar as rugas causadas pela deformação do material, e para que a superfície possa alcançar a geometria prevista no estado de pré-tensão.

3.2.2 TESTE BIAxIAL DA UNIÃO

Nessa etapa avaliou-se a influência da orientação do material, e conseqüentemente do ângulo entre os painéis planos adjacentes na união, já que a união é uma descontinuidade geométrica no fluxo das forças na superfície curva (SEIDEL 2009).

Primeiramente, observaram-se os padrões de corte dos seguintes modelos em estudo: A2-40°, B2-30°, B2_{int-ext}, C2-24°, C2-48° (sendo B2-30°= B2_{int-ext} e C2-24°= C2-48°). Para estes modelos, foram propostos padrões de corte radiais, alinhados as curvaturas principais da superfície (Figura 3.2-11).

Os ângulos aproximados dos padrões de corte nas superfícies externas destes modelos são 4,8° e 5°, e nas superfícies internas são 6°, 6,6° e 7,5°. Logo, os fios do material (urdidura e trama) não se encontram paralelos às uniões, mas apresentam pequena rotação em relação às uniões.

Para guiar essa investigação, foi selecionada a superfície externa do modelo B2_{int-ext}, avaliando-se o efeito do ângulo de 5° entre os painéis adjacentes.

Para a comparação e a avaliação do resultado desse ângulo na união dos painéis, foram realizados testes biaxiais com ângulos de 0°, 4° e 8°. Assim, no primeiro teste a direção da urdidura encontra-se paralela ao eixo da união (0°), e, portanto as direções do material estão alinhadas as direções das forças. Nos demais testes a urdidura está a 2° e de 4° em relação ao eixo da união (Figura 3.2-12).

Nestes testes, a união das amostras foi realizada por solda a quente com sobrepasso de 8cm (Figura 3.2-13) .

Figura 3.2-11 – Ângulos dos padrões de corte - superfícies externa/ interna (A2-40°, B2_{int-ext} e C2-48°)

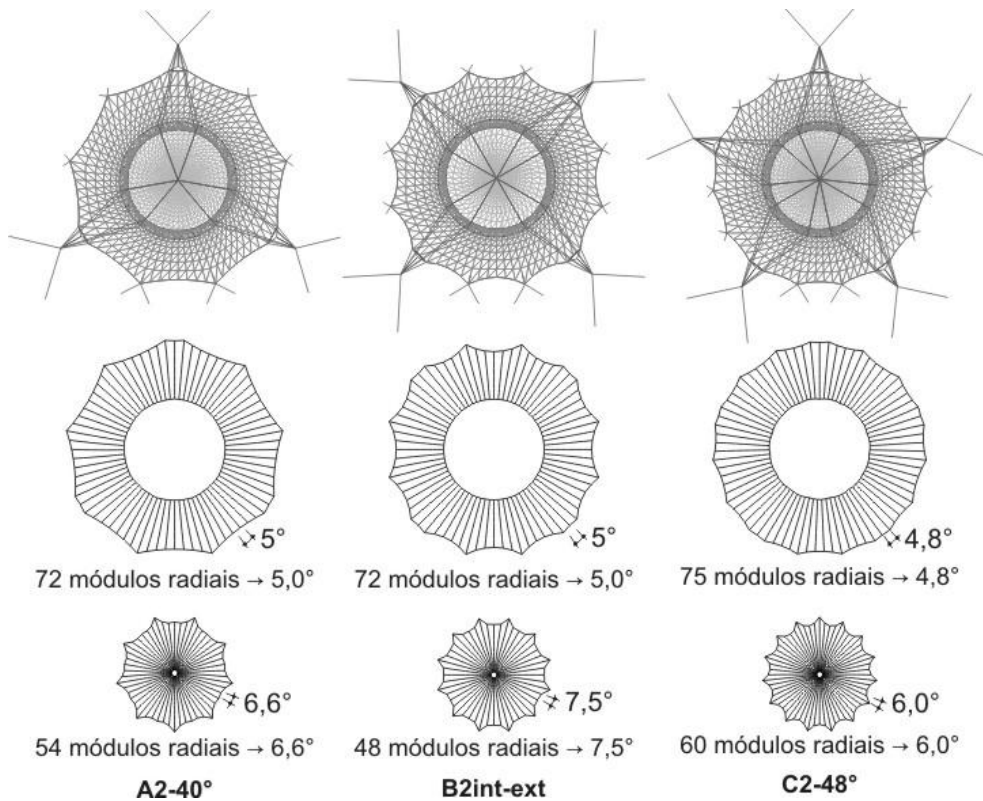
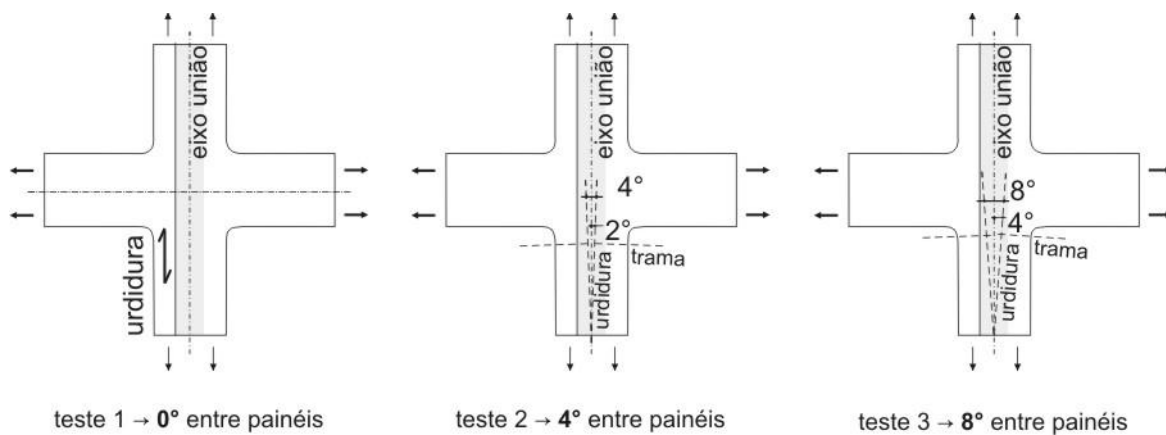


Figura 3.2-12 – Teste biaxial da união (superfície externa do modelo B2_{int-ext}) – ângulos avaliados



3.2.2.1 Definição das cargas e passos de carga dos testes biaxiais da união

Nos três testes biaxiais da união dos painéis (ângulos a 0°, 4° e 8° entre painéis) foram considerados os carregamentos de pré-tensão e os valores médios e máximos da carga crítica.

Nesses testes, o tecido foi inicialmente esticado até o nível de pré-tensão em ambas as direções. A urdidura manteve essa tensão constante durante todo o teste. Entretanto, a trama foi carregada em vários ciclos de carga (com valores médio e

máximo da carga crítica), sendo estes ciclos intercalados por etapas de carga constante (simulando a pré-tensão da membrana). A relação das cargas aplicadas a 0,2(kN/m)/s nas direções do material podem ser observadas na Tabela 3.2-3, no Diagrama 3.2-5 e Apêndice G. Pode-se observar a aplicação de cargas distintas nas direções do material.

As amostras dos testes foram marcadas com pontos de medição e linhas, para facilitar a observação do comportamento do material (Figura 3.2-13).

Tabela 3.2-3 – Teste biaxial da união - relação das cargas aplicadas direção do material

direções do material	1° passo	2° passo	3° passo	4° passo	5° passo
	carga constante pré-tensão [kN/m]	ciclos de carga valor médio da carga crítica [kN/m]	carga constante pré-tensão [kN/m]	ciclos de carga valor máximo da carga crítica [kN/m]	carga constante pré-tensão [kN/m]
urdidura	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
trama	6,4	16	6,4	32	6,4

Diagrama 3.2-5 – Valores de referência das cargas aplicadas nos testes biaxiais da união

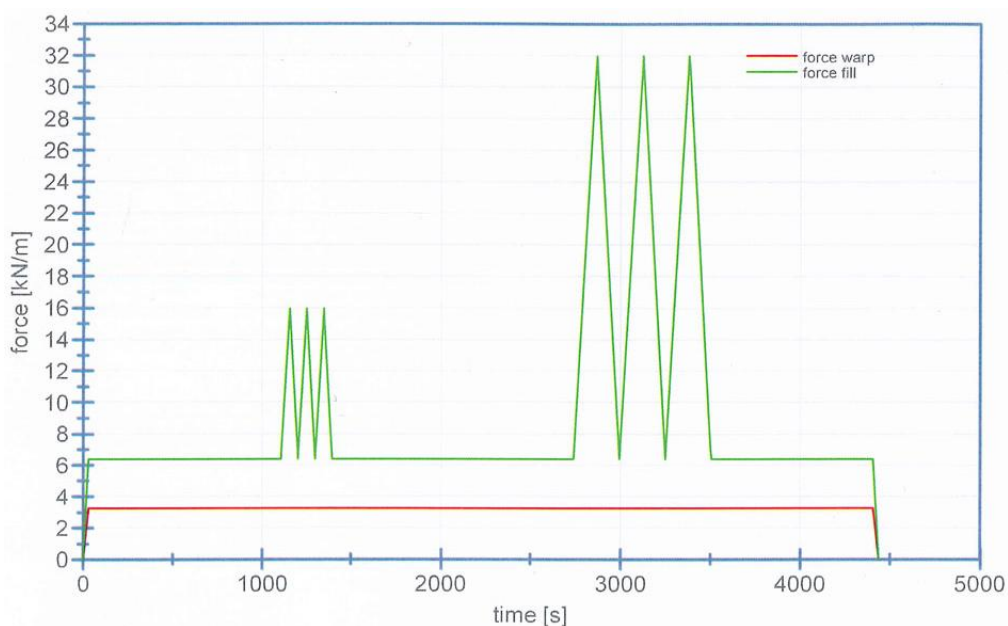
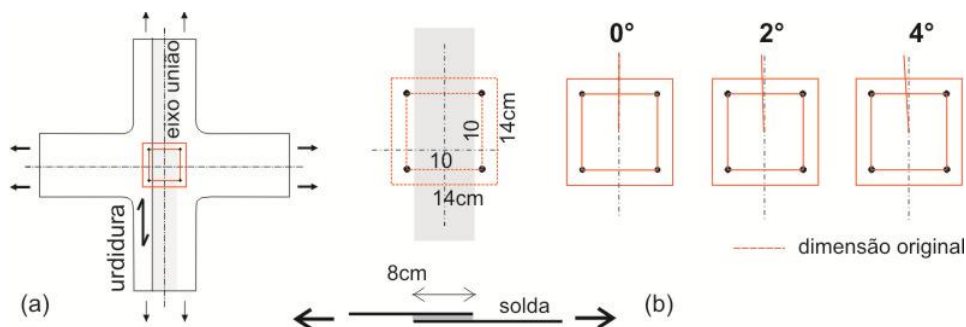


Figura 3.2-13 – (a) Pontos e linhas de referência marcadas na amostra; (b) sobreposições dos painéis



3.2.2.2 Interpretação dos resultados dos testes biaxiais da união dos painéis

A análise e a interpretação dos resultados foram guiadas pelas informações e diagramas fornecidos pelo Laboratório, bem como pelo acompanhamento e registro fotográfico dos testes biaxiais da união com ângulos a 0°, 4° e 8° entre painéis.

Observaram-se em todos os testes biaxiais da união o encolhimento da urdidura e o significativo alongamento positivo da trama. A direção da urdidura apresentou deformação elástica significativa (aprox. 70%), enquanto que na direção da trama a deformação elástica foi aproximadamente 57%, (Diagrama 3.2-6, Diagrama 3.2-7, Diagrama 3.2-8 e Tabela 3.2-4).

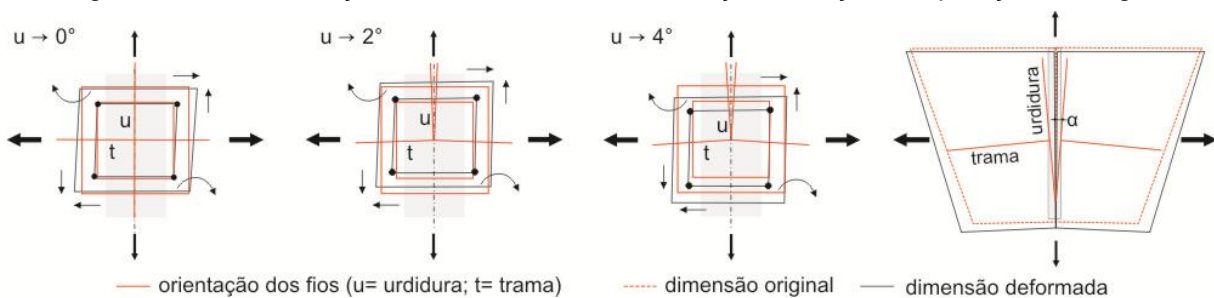
Tabela 3.2-4 – Teste biaxial da união entre painéis - deformação do material

ângulos entre painéis/ direção do material		deformação (%)		
		geométrica	elástica	total
0°	urdidura (ϵ_1)	-0,48	-0,97	-1,45
	trama (ϵ_2)	+ 2,65	+ 3,27	+ 5,92
4°	urdidura (ϵ_1)	-0,55	-1,00	-1,55
	trama (ϵ_2)	+ 2,61	+ 3,33	+ 5,94
8°	urdidura (ϵ_1)	-0,40	-1,12	-1,52
	trama (ϵ_2)	+ 2,57	+ 3,35	+ 5,92

A magnitude da deformação do material (nas direções da trama e da urdidura) pode ser considerada similar para todos os ângulos entre painéis adjacentes na união avaliada, de acordo com o Diagrama 3.2-9 e a Tabela 3.2-4.

Entretanto, comparando-se as linhas original e deformada na superfície da amostra (Figura 3.2-15, Figura 3.2-16), verificou-se a distorção do material. Esta distorção, nos testes com os ângulos 0° e 4° (entre painéis), apresentou a mesmo sentido e direção, porém com intensidades diferentes. No teste com ângulo a 8° graus entre painéis, a maior distorção na direção do eixo da união ocorreu em sentido distinto à observada nos ângulos 0° e 4° e com grande intensidade (Figura 3.2-14).

Figura 3.2-14 – Orientação dos fios do material em relação à direção de aplicação da carga



A distorção (ou deformação de cisalhamento) do material ficou mais intensa com o aumento do ângulo (α) entre os painéis e do carregamento aplicado. Esse comportamento deriva do movimento de deslizamento e rotação entre fios da urdidura e trama. Trata-se de comportamento causado por forças distintas atuando nas direções do material (Tabela 3.2-3, Diagrama 3.2-5) e pela orientação dos fios do material em relação à direção da aplicação das forças (urdidura a 0° , 2° e 4° em relação ao eixo da união), conforme Figura 3.2-15 e Figura 3.2-16.

Segundo Seidel (2009), quando a resistência a essa distorção ou deformação de cisalhamento (causada pelo movimento dos fios) é pequena, verificam-se pequenas tensões no material. Quando os fios obstruem o movimento uns dos outros, a resistência a movimentos adicionais cresce rapidamente. Como a distorção entre os fios da urdidura e trama só pode causar pequenas tensões no material, já que os tecidos entrelaçados têm baixa rigidez ao cisalhamento. Então, é importante limitar o ângulo e, conseqüentemente, a largura dos painéis planos, evitando o bloqueio da rotação entre os fios.

Essa análise possibilitou observar as deformações e as distorções (cisalhamento) do material. Ambas aumentaram com a intensidade das cargas aplicadas. Entretanto, a distorção foi influenciada por forças distintas aplicadas na urdidura e trama, e principalmente pelo aumento do ângulo (α) entre os painéis adjacentes, ou seja, pela orientação dos fios em relação a união e a direção das forças aplicadas.

Assim, essa investigação preliminar vem confirmar a importância de se avaliar de forma integrada a geometria dos painéis (forma, dimensões), o ângulo entre painéis adjacentes, as direções do material em relação às curvaturas principais, bem como a direção e intensidade das forças aplicadas, objetivando reduzir as distorções entre painéis planos adjacentes e na superfície curva, além de evitar a rigidez repentina e falha.

Diagrama 3.2-6 – Teste biaxial da união - ângulo entre painéis: 0°

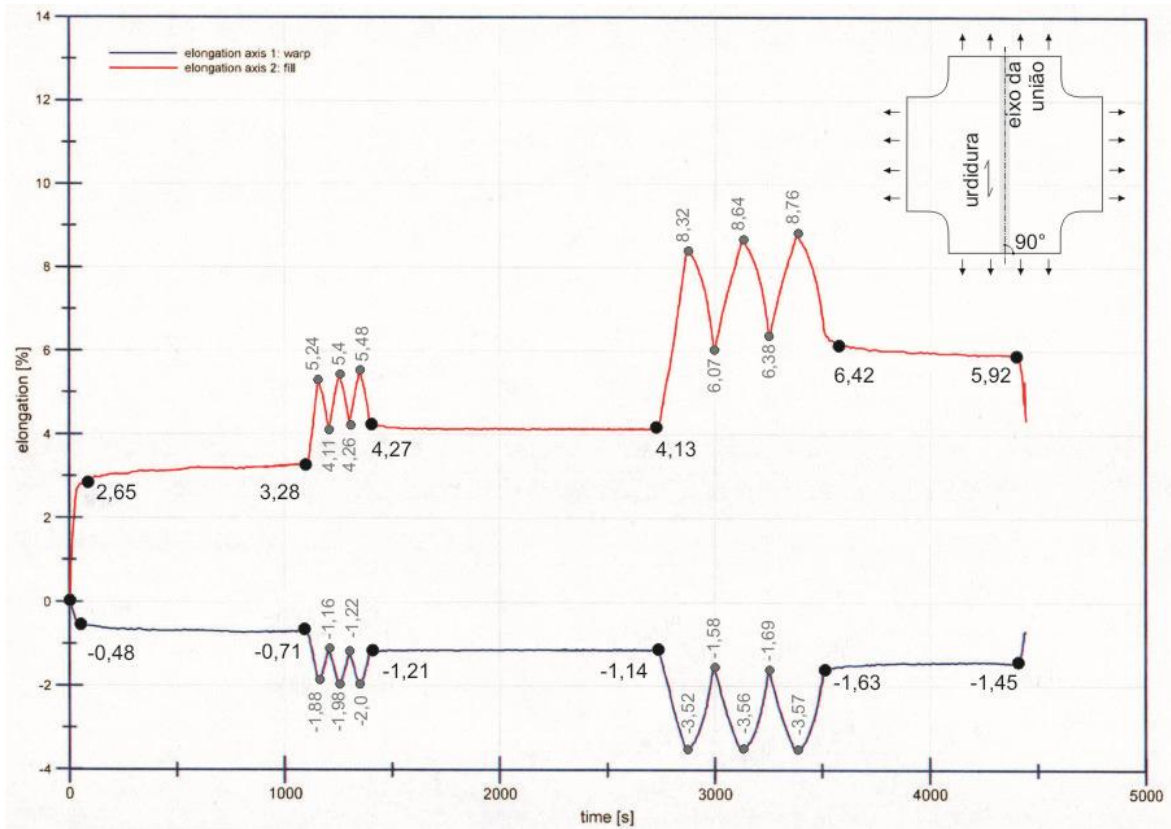


Diagrama 3.2-7 – Teste biaxial da união - ângulo entre painéis: 4°

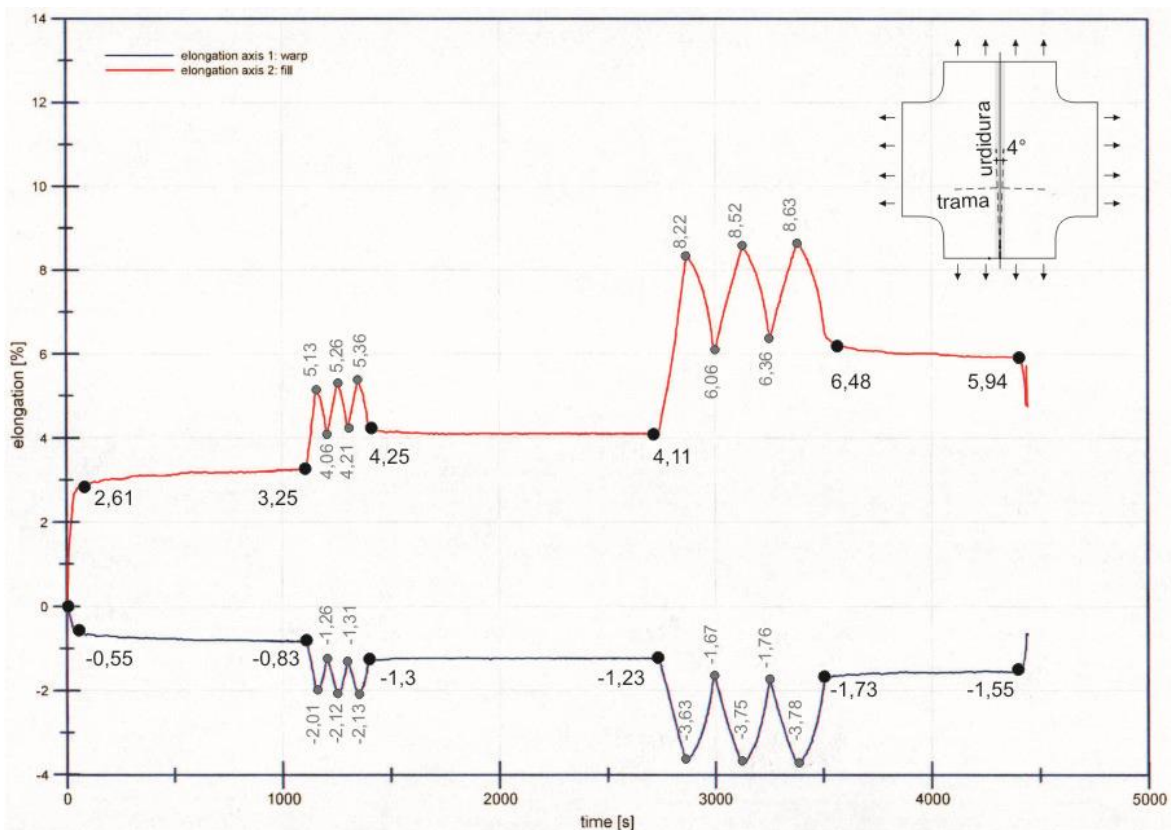


Diagrama 3.2-8 – Teste biaxial da união - ângulo entre painéis: 8°

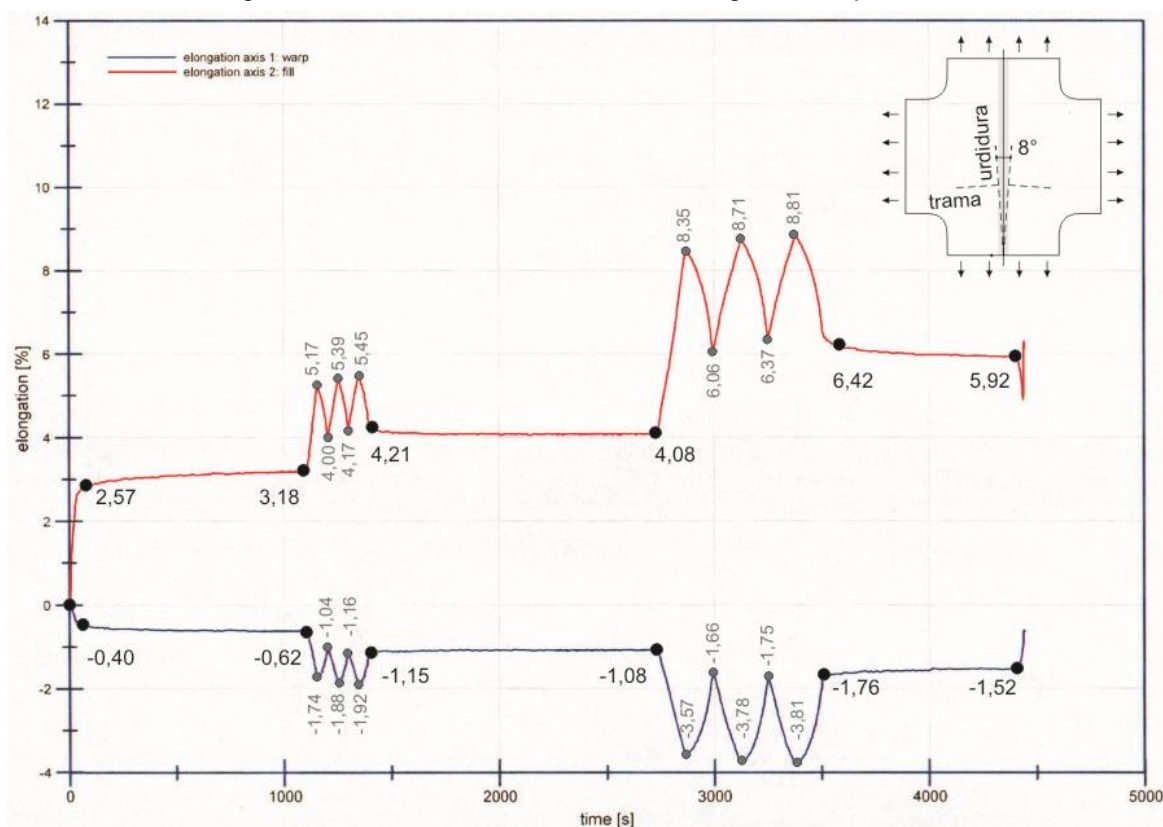


Diagrama 3.2-9 – Teste biaxial da união - comparação dos ângulos entre painéis: 0°, 4° e 8°

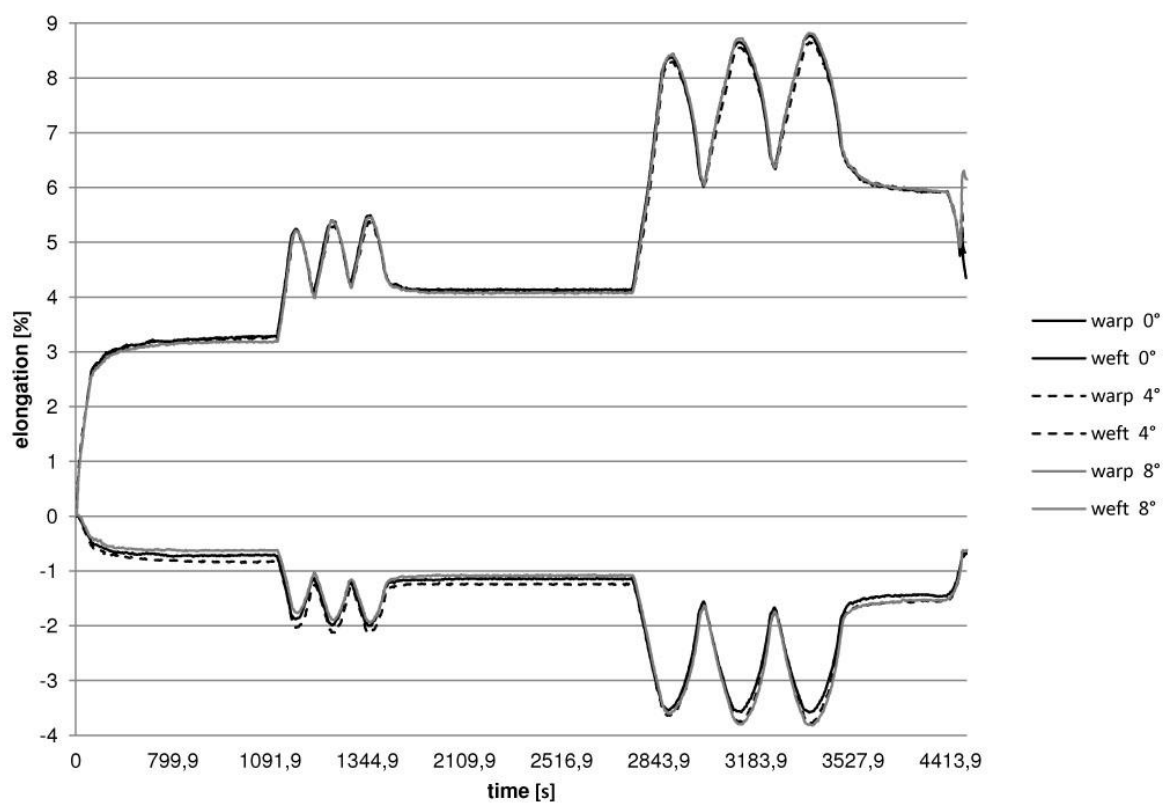


Figura 3.2-15 – Teste biaxial da união – comparação dos testes - ângulo entre painéis: 0° e 4°
 teste biaxial da união → 0° entre painéis teste biaxial da união → 4° entre painéis

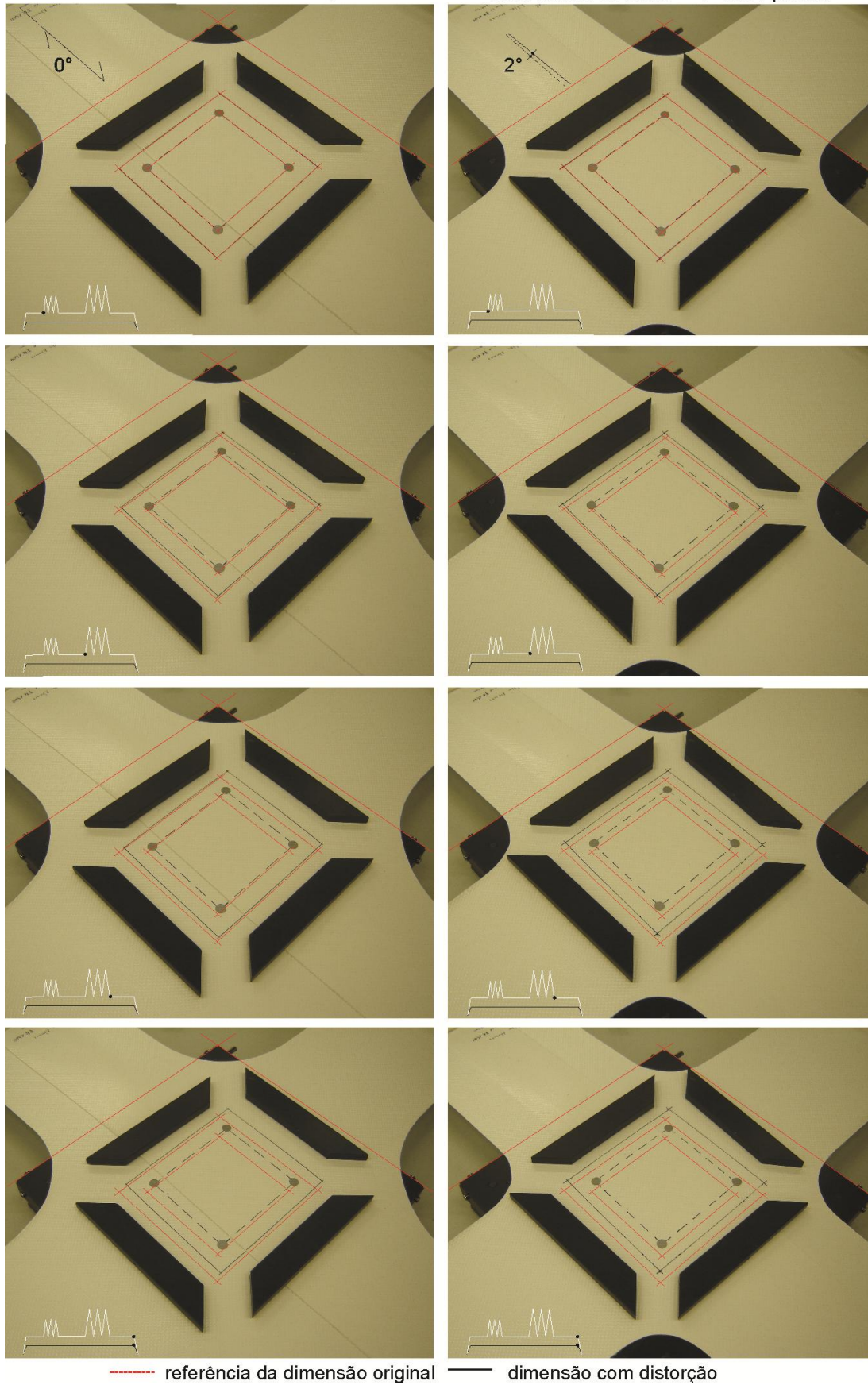
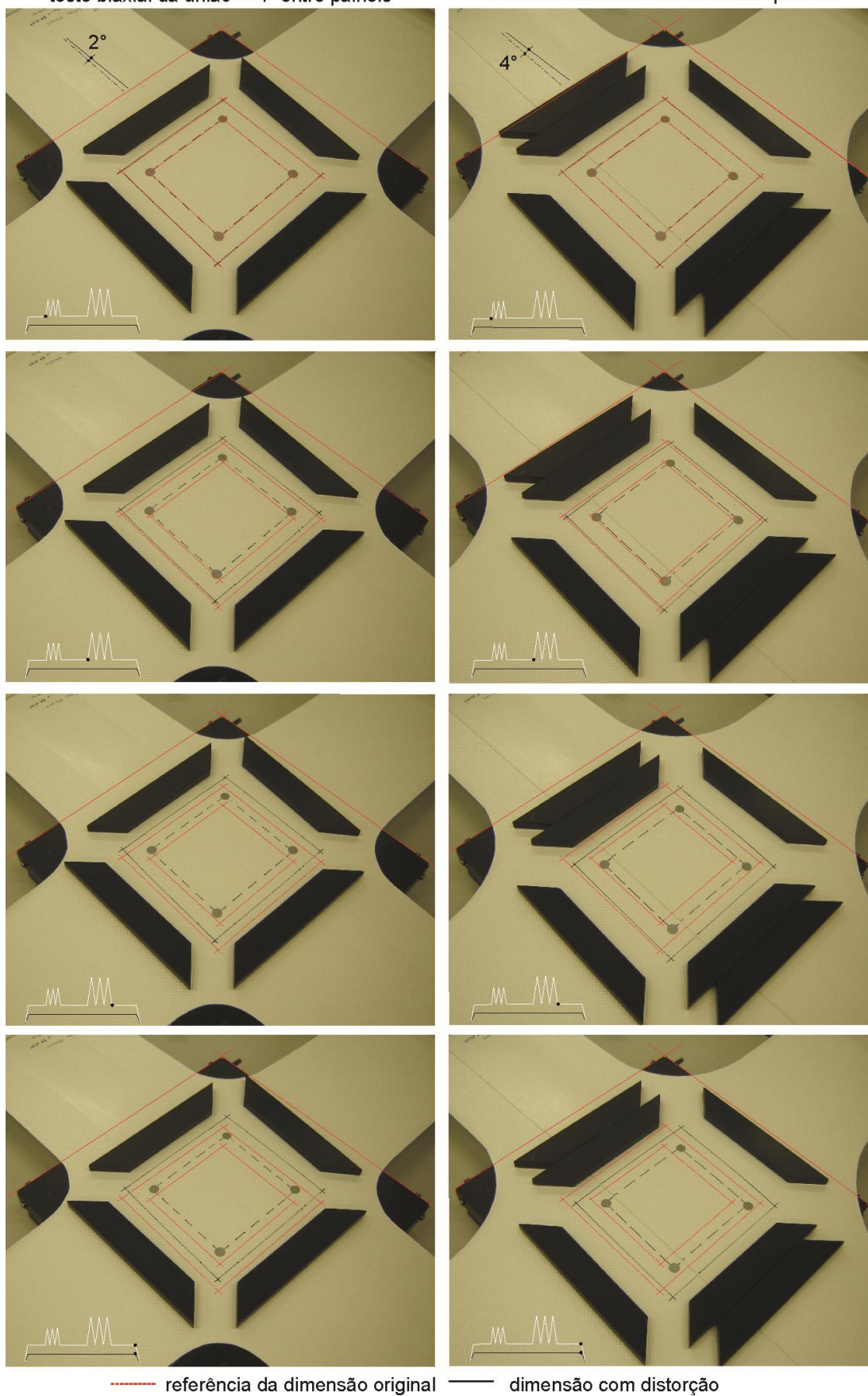


Figura 3.2-16 – Teste biaxial da união – comparação dos testes - ângulo entre painéis: 4° e 8°
 teste biaxial da união → 4° entre painéis teste biaxial da união → 8° entre painéis



3.2.3 TESTES UNIAXIAIS DA UNIÃO

Após avaliar a influência do ângulo entre os painéis planos adjacentes na união, verificou-se o desempenho das uniões soldadas sob a influência da temperatura.

Segundo Seidel (2009), a resistência dos tecidos cobertos reduz sob a ação das cargas de longa duração, já que as deformações do material aumentam com o tempo (*creep*). Estas deformações são também influenciadas pelo comportamento dos materiais em relação à alteração da temperatura. Os materiais termoplásticos (polímeros sintéticos usados na fabricação dos tecidos e coberturas) ficam quebradiços a baixas temperaturas e apresentam relativa expansão do volume sob as altas temperaturas, causando a redução constante do módulo de elasticidade. Então, para compreender as propriedades mecânicas desses materiais sob a influência da temperatura é importante entender o significado das temperaturas de transição vítrea (T_g) e de fusão (T_m).

Estas temperaturas indicam limites para as aplicações dos polímeros (condição de serviço), bem como para os procedimentos de fabricação e processamento dos mesmos (CALLISTER, 2008). A temperatura transição vítrea (T_g) representa a temperatura em que o polímero, se transforma de um estado rígido para um estado viscoelástico (as regiões amorfas das cadeias moleculares apresentam mobilidade, reduzindo a rigidez do material); a temperatura de fusão (T_m) indica a temperatura em que o polímero fica completamente fluido (as regiões ordenadas dos polímeros se desagregam e fundem), (KNIPPERS *et al.*, 2011; MANO, 2007).

Minte (1981) pesquisando o comportamento mecânico dos tecidos usados nas membranas observou que a adesão da cobertura ao tecido tem grande influência no comportamento da união, e que na temperatura de 70°C há redução significativa da resistência do material nas uniões. Huntington (2003) também destaca que as temperaturas em serviço de tecidos com cores escuras sob a ação direta do sol (altas temperaturas) elevam-se a 65°C.

Então, para avaliar a resistência da união são realizados testes uniaxiais observando o comportamento das mesmas, geralmente a 23°C, 70°C e -20°C.

Segundo Minte (1981), a escolha de testes uniaxiais para a avaliação da resistência das uniões pode ser explicada pelo fato que no teste uniaxial a resistências das uniões é menor que as avaliadas pelo teste biaxial de uniões semelhantes, permitindo o dimensionamento das uniões com segurança. No teste

uniaxial há o alongamento completo de fios de urdidura e trama. Entretanto, no teste biaxial isso não ocorre. As cargas são aplicadas simultaneamente nas duas direções do tecido, os fios trabalham juntos e restringem as deformações um dos outros (ALVIM; PAULETTI, 2004).

3.2.3.1 Características dos testes uniaxiais da união

Como foi observada a similaridade das deformações do material em relação aos ângulos avaliados, os testes uniaxiais foram realizados para união entre painéis a 0° graus (urdidura paralela à união). Foram avaliadas as temperaturas de 23°C, 70°C e -10°C (pois não houve necessidade de avaliar a influência da temperatura de -20°C para o local em que se insere a estrutura investigada).

A resistência da união foi avaliada a partir da análise do comportamento de cinco amostras, com cargas aplicadas transversalmente à união, na direção da trama, (procedimento de teste DIN EN ISO1421 mod./ Guideline DIBt). Utilizaram-se amostras com 10cm de largura, sendo a largura de sobreposição da união com 8cm (Figura 3.2-17, Figura 3.2-18).

Figura 3.2-17 – Detalhe da amostra

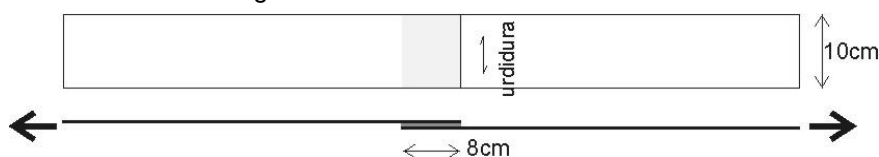
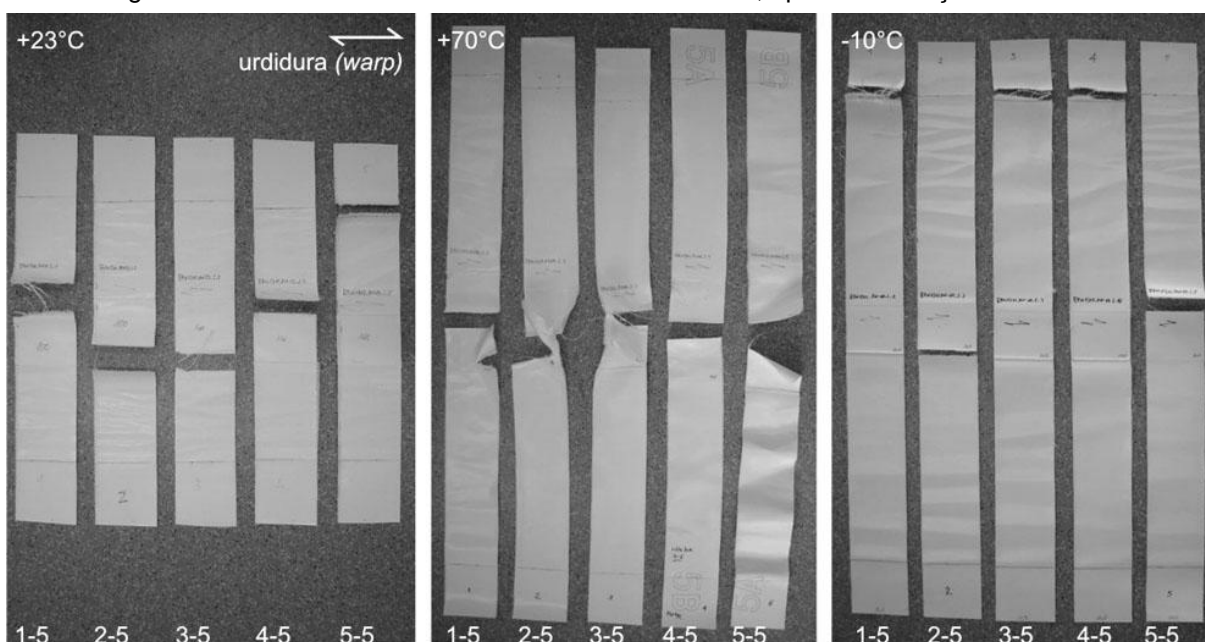


Figura 3.2-18 – Amostras dos testes uniaxiais da união, após a realização dos testes



3.2.3.2 Interpretação dos testes uniaxiais da união

Nos testes uniaxiais da união com a temperatura de 23°C (Figura 3.2-19, Diagrama 3.2-10), verificou-se que a resistência de ruptura da união apresentou valor percentil de 135,3 kN/m (5% *fractile*²³).

Esse valor é 4% superior à resistência a tração do material tipo IV, na direção da trama (130kN/m), o qual referenciou as análises preliminares da superfície externa dos modelos (Tabela 3.1-7). Conforme análise preliminar, a tensão máxima na superfície externa do modelo B2_{int-ext} foi observada na direção da trama, sendo 32MPa (32kN/m, considerando espessura: 1mm), ou seja, 25% da resistência do material (Figura 3.2-6a, Figura 3.1-90).

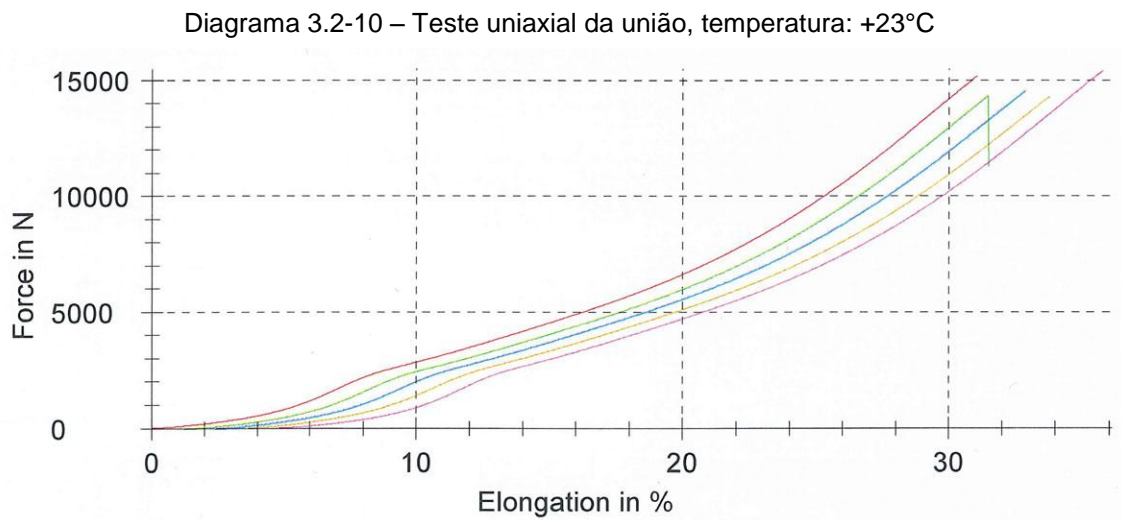


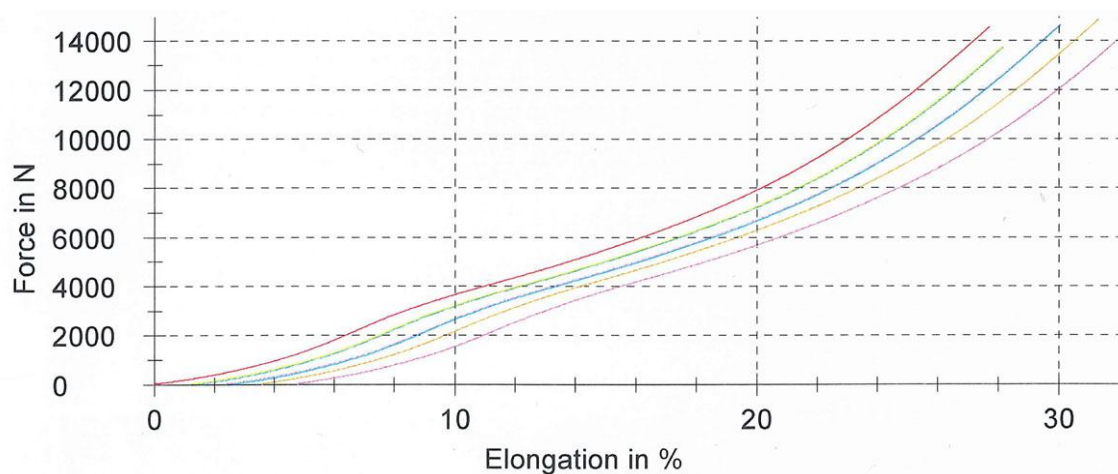
Figura 3.2-19– Teste uniaxial da união dos painéis, temperatura: + 23°C



²³ O valor 5% *fractile* é usado como fator de redução para a falta de homogeneidade no tecido (FOSTER, 2004).

Nos testes uniaxiais da união com a temperatura de -10°C (Figura 3.2-20b, Diagrama 3.2-11), a resistência de ruptura apresentou valor percentil de $130,0\text{ kN/m}$ (*5% fractile*). Com a redução da temperatura, observou-se a diminuição da resistência média da união, aproximadamente 22% em relação ao teste a 23°C . Entretanto, esse valor é similar à resistência do material tipo IV na direção da trama.

Diagrama 3.2-11 – Teste uniaxial da união, temperatura: -10°C



Para os testes uniaxiais com a temperatura de $+70^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.2-20a, Diagrama 3.2-12), a resistência da união apresentou valor percentil de $64,2\text{ kN/m}$ (*5% fractile*). Com a elevação da temperatura, verificou-se a redução significativa do desempenho da união do material da membrana (aprox. 50% da resistência do material). Entretanto, essa redução é reversível com o decréscimo da temperatura.

Diagrama 3.2-12 – Teste uniaxial da união, temperatura: $+70^{\circ}\text{C}$

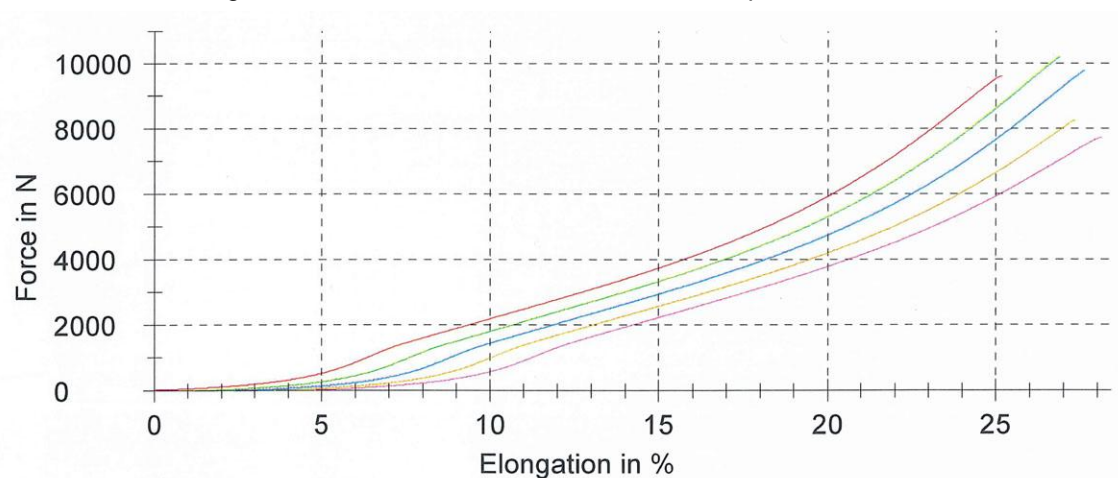
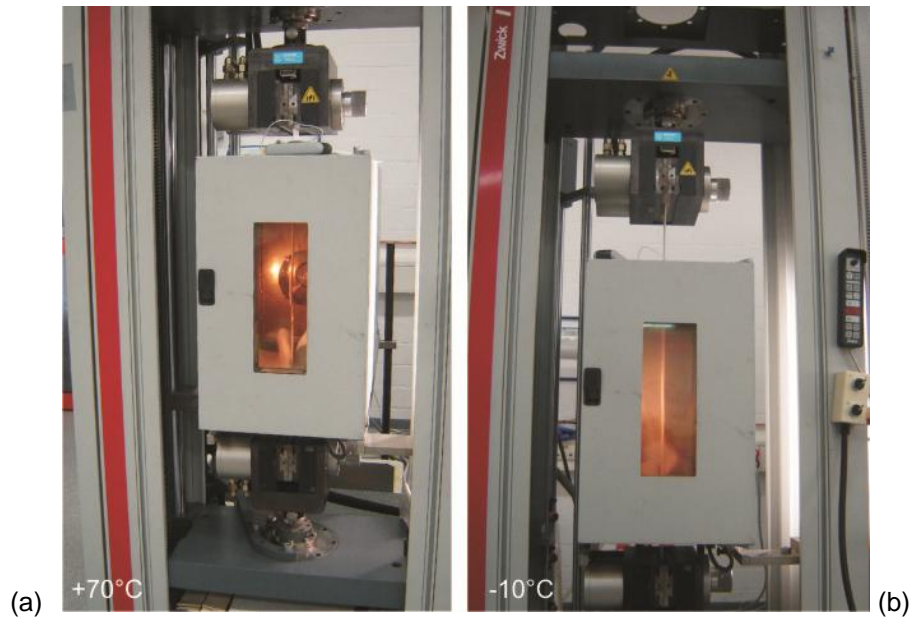
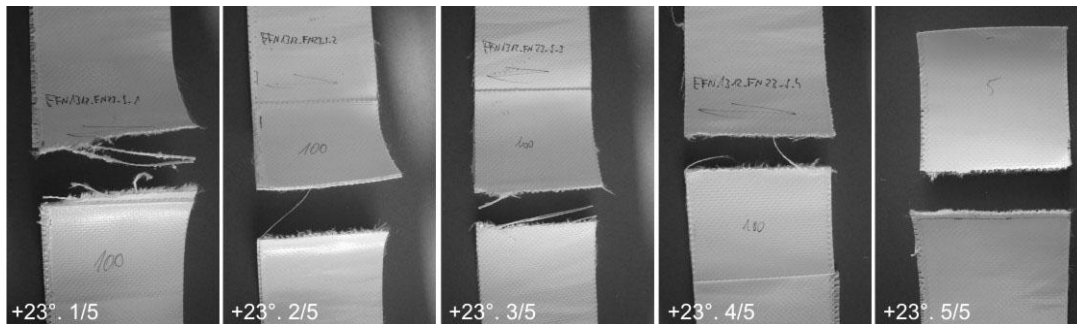


Figura 3.2-20 – Teste uniaxial da união dos painéis; temperatura: (a) +70°C; (b) -10°C



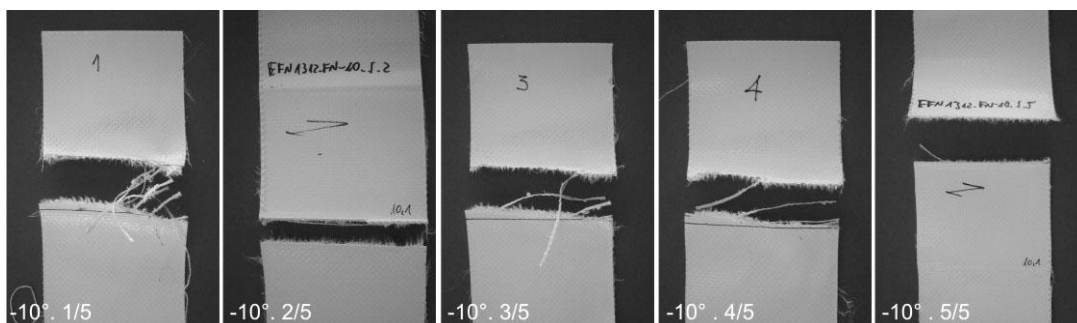
Nos testes a 23°C predominaram falhas na extremidade da solda, na transição da união ao tecido, com a ruptura no tecido paralela à união, o que demonstra ótima resistência da união (Figura 3.2-18, Figura 3.2-21).

Figura 3.2-21– Detalhe do tipo de falha das amostras do teste uniaxial da união a +23°C



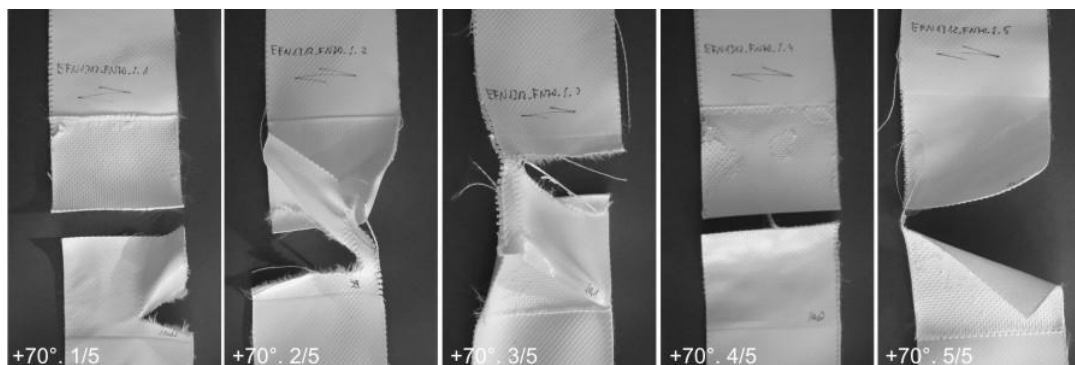
Nos testes a -10°C, observou-se que o material ficou quebradiço, reduzindo a resistência média da união (aprox. 22% em relação ao teste a 23°C). Prevaleceram falhas na extremidade do material, conforme Figura 3.2-22.

Figura 3.2-22 – Detalhe do tipo de falha das amostras do teste uniaxial da união a -10°C



Nos testes a 70°C observou-se o amolecimento da cobertura em PVC, a redução da adesão, e conseqüentemente, a separação (ou deslocamento) entre a cobertura e o tecido, conforme Figura 3.2-23.

Figura 3.2-23 – Detalhe do tipo de falha das amostras do teste uniaxial a +70°C



O resultado dos testes a 70°C levou a uma reavaliação das tensões na superfície da membrana. Nessa nova análise preliminar, considerou-se a combinação cargas com fatores de segurança (*Summer storm*) proposta pela norma alemã DIN 4134: $1n_g + 1,1n_p + 0,7n_w$; sendo: n_g =gravidade; n_p = pré-tensão; n_w =vento (KOENEN, 2012). Essa aproximação considera a redução da ação do vento com o aumento da temperatura.

Na nova análise preliminar, a tensão máxima observada na superfície externa foi na direção da trama 28,88MPa (28,88kN/m, considerando a espessura do material igual a 1mm).

Em seguida, calculou-se a resistência admissível do material (N_θ) com o fator de redução de altas temperaturas para PES/PVC, tendo como base a dissertação de Minte (1981), (KOENEN, 2012): $N_\theta = f_{u,k} / 3,02 = 64,2 / 3,02 = 21,96 \text{ kN/m}$.

Verificou-se que a resistência admissível do material sob temperaturas elevadas (21,96 kN/m) foi menor que a tensão máxima observada na superfície, na direção da trama (28,88 kN/m).

Esse resultado veio confirmar a importância de se avaliar a resistência das uniões (largura da solda e o processo de fabricação) e o comportamento do material (sob a ação da temperatura), principalmente em regiões de clima tropical, como o Brasil. Entretanto, para análises refinadas finais, sugere-se investigar se os fatores de segurança adotados nessa avaliação preliminar estão adequados às características climáticas da região onde se insere a estrutura.

3.2.4 CONSIDERAÇÕES DA 2ª ETAPA DA ANÁLISE QUALITATIVA

Essas análises evidenciaram que o material da membrana é uma estrutura flexível, que equilibra as forças mediante o movimento (giro; deslizamento) e ou deformação dos fios. Esse comportamento é influenciado pelos entrelaçamentos e a rigidez dos fios (urdidura; trama), orientação dos fios em relação à união dos painéis e direção das forças, bem como a magnitude das cargas, tempo e temperatura.

Consequentemente, a geometria da superfície da membrana é influenciada pelo comportamento flexível do material e pelas uniões dos painéis (elementos lineares que suportam e transmitem cargas) que interferem no comportamento da superfície curva da membrana (SEIDEL, 2009).

Assim, para minimizar as diferenças entre o modelo teórico e a forma real e garantir que a membrana possa adotar a forma prevista no tempo, é necessário analisar o comportamento do material em relação ao contexto da estrutura, desde a fase de preparação dos testes.

A análise das tensões e deformações do material (teste biaxial) que resultaram da carga máxima possibilitou calcular as constantes elásticas do material.

A análise das deformações do material (teste biaxial) que resultaram das cargas que predominam na vida útil da estrutura (considerando a distribuição das tensões na geometria da membrana) possibilitou calcular e propor ajustes aos fatores de compensação usados para corrigir as dimensões dos painéis planos, buscando evitar picos de tensão e ajustes de pré-tensão durante a vida útil da estrutura.

A análise do ângulo entre os painéis planos adjacentes na união (teste biaxial da união) possibilitou observar as deformações e as distorções do material causadas pelo movimento dos fios do tecido quando solicitado, já que os tecidos entrelaçados o revestimento não são unificados. Verificou-se também que as distorções dos painéis são influenciadas pela orientação dos fios em relação à união, direção e magnitude das forças aplicadas; e que os menores ângulos entre painéis contribuem para reduzir as distorções na superfície curva da membrana.

A análise da resistência das uniões soldadas sobre a influência da temperatura (teste uniaxial da união) possibilitou observar o comportamento do revestimento do tecido e a sua influência na resistência das uniões. Essa análise confirmou a importância de se avaliar a largura e o processo de fabricação da união principalmente em regiões de clima tropical.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho investigou-se qualitativamente o desempenho das membranas estruturais nos contextos: estrutural e de procedimento de projeto.

O conhecimento básico que fundamentou essa investigação abrangeu a revisão bibliográfica, a análise de estruturas leves construídas e dos procedimentos de projeto e construção de coberturas em membrana (estudos de campo), permitindo integrar o conhecimento teórico e a análise crítica do objeto em estudo.

A análise de estruturas leves construídas objetivou identificar as estratégias que os arquitetos e engenheiros utilizam para que essas estruturas tenham um ótimo desempenho. A escolha das edificações objetivou avaliar qualitativamente o desempenho das membranas estruturais no contexto das estruturas leves.

Essa investigação envolveu a observação e a análise do conceito estrutural das edificações selecionadas, ou seja, como conjunto estrutural se organiza, quais componentes foram utilizados e como a geometria e o arranjo dos componentes podem contribuir para alcançar a rigidez, a estabilidade global e a leveza do sistema.

Observou-se que as coberturas em membrana estrutural destacam-se dentre as estruturas investigadas. As membranas são cobertura (envoltória da edificação) e estrutura, e trabalham de forma integrada com o sistema suporte; nas demais estruturas investigadas (casca de madeira, *grid shell*, estrutura em aço), a membrana, o vidro e as telhas são apenas revestimento.

Observou-se que o ótimo desempenho das membranas estruturais está associado à estabilidade espacial e a baixa massa do conjunto estrutural, bem como à grande resistência dos materiais utilizados (ex.: fibras sintéticas e aço). Conforme estratégias identificadas, esse desempenho resulta:

- da organização espacial do conjunto estrutural (membrana e sistema suporte) e trabalho conjunto e contínuo dos componentes sob pré-tensão;
- da geometria tridimensional da membrana em estado de retesamento;
- uso de tecidos constituídos de fibras sintéticas que suportam grandes tensões com baixa densidade;
- do arranjo espacial e geometria dos componentes do sistema suporte que provém da combinação de sistemas e ou organização tridimensional de componentes lineares principalmente sob a ação de esforços axiais (ex. mastros com estais), bem como da

forma da secção transversal dos componentes adequada aos esforços atuantes, possibilitando reduzir a massa do sistema para o mesmo volume (densidade).

O acompanhamento de estruturas de membrana em construção evidenciou que o comportamento dessas estruturas é influenciado também pela organização, forma e dimensões dos painéis planos (geometria da superfície planificada), assim como pelo comportamento do material.

Demonstrou que as incertezas em relação ao comportamento do material reduzem a precisão da etapa de projeto e o desempenho da construção. Além disso, as estratégias utilizadas pelos engenheiros e construtores na etapa de construção para lidar com as deformações do material e as imprecisões construtivas que porventura podem ocorrer (ex. conexões de grande ajuste), nem sempre conseguem abranger todas as incertezas. Logo, erros ou modificações geometria das membranas alteram o fluxo das forças, causando distorções e ou deformações visíveis que não são camufladas.

Assim, esse estudo confirmou a importância da avaliação do comportamento do material da membrana, de se conhecer os procedimentos construtivos (manufatura, montagem) desse sistema, do detalhamento (com maior precisão) e acompanhamento da manufatura dos componentes, e principalmente do trabalho em equipe formada por arquitetos, engenheiros e construtores, somando conhecimento e experiências.

Essas investigações nortearam a análise qualitativa da eficiência do projeto de cobertura em membrana, realizada em duas etapas.

Na primeira etapa desta análise qualitativa avaliou-se a influência do arranjo do conjunto estrutural e da geometria da superfície da membrana no desempenho do sistema. Foi investigado um conjunto de variáveis que geraram alterações no projeto (modelo original). Essas alterações deram origem a modelos com geometrias distintas, cujo comportamento e desempenho sob a ação de carga foram investigados. A análise e comparação desses modelos possibilitou identificar quais variáveis contribuíram para o ótimo desempenho desse sistema e qual apresentou melhor resultado.

Na avaliação de desempenho do sistema suporte, verificou-se que rigidez e a estabilidade global do conjunto estrutural não estão associadas apenas ao acréscimo de mastros. A configuração dos cabos associada ao acréscimo de mastros possibilitou o trabalho mais integrado dos componentes do sistema suporte

e contribuiu de forma significativa para limitar os deslocamentos do sistema suporte e das membranas, aumentando a estabilidade tridimensional do conjunto estrutural.

Posteriormente, avaliou-se a influência das alterações da geometria das superfícies das membranas no comportamento do sistema. Com a nova geometria houve aumento da rigidez das superfícies, ou seja, menores forças foram necessárias para estabilizá-las. Verificou-se a redução da magnitude e das áreas de concentração de tensões das superfícies e, a distribuição mais homogênea das tensões nas superfícies. Houve também a redução da pré-tensão e a massa global do sistema.

As análises realizadas comprovaram que o desempenho desse sistema flexível se beneficiou do arranjo espacial do sistema suporte, do aumento da rigidez da superfície tridimensional da membrana, e da organização espacial e trabalho conjunto de todos os componentes sob pré-tensão, conforme verificado no modelo $B2_{int-ext}$.

Na segunda etapa dessa análise qualitativa avaliou-se a geometria da membrana planejada sob a influência do comportamento do material.

Essa análise evidenciou que o material da membrana também apresenta estrutura flexível, ou seja, equilibra as forças mediante o movimento e ou deformação dos fios. Esse comportamento é influenciado pelos entrelaçamentos, orientação e a rigidez dos fios do material, bem como pela magnitude e duração das cargas, tempo e temperatura. Portanto, confirma a importância da avaliação do comportamento do material considerando a geometria e distribuição das tensões na superfície da membrana, e as condições climáticas do local onde a estrutura se insere.

Tal avaliação possibilitou investigar inicialmente o comportamento do material (rigidez, deformações) no contexto da estrutura em estudo. Posteriormente, verificaram-se as diferenças entre a geometria do modelo teórico (forma de equilíbrio contínua cuja definição desconsidera o material) e da forma real (composta de painéis planos). Foram propostos ajustes das dimensões dos painéis planos em relação às deformações do material. Verificou-se também a importância de reduzir o ângulo entre painéis adjacentes, buscando minimizar as distorções na superfície curva da membrana. Esses ajustes buscam refinar a geometria dos painéis planos e contribuir para que a forma final da superfície membrana possa revelar não só o melhor caminho das forças, mas também o melhor uso do material.

Portanto, foi possível observar que nas estruturas de membrana é necessário controlar os movimentos do material e dos componentes sob a ação de cargas.

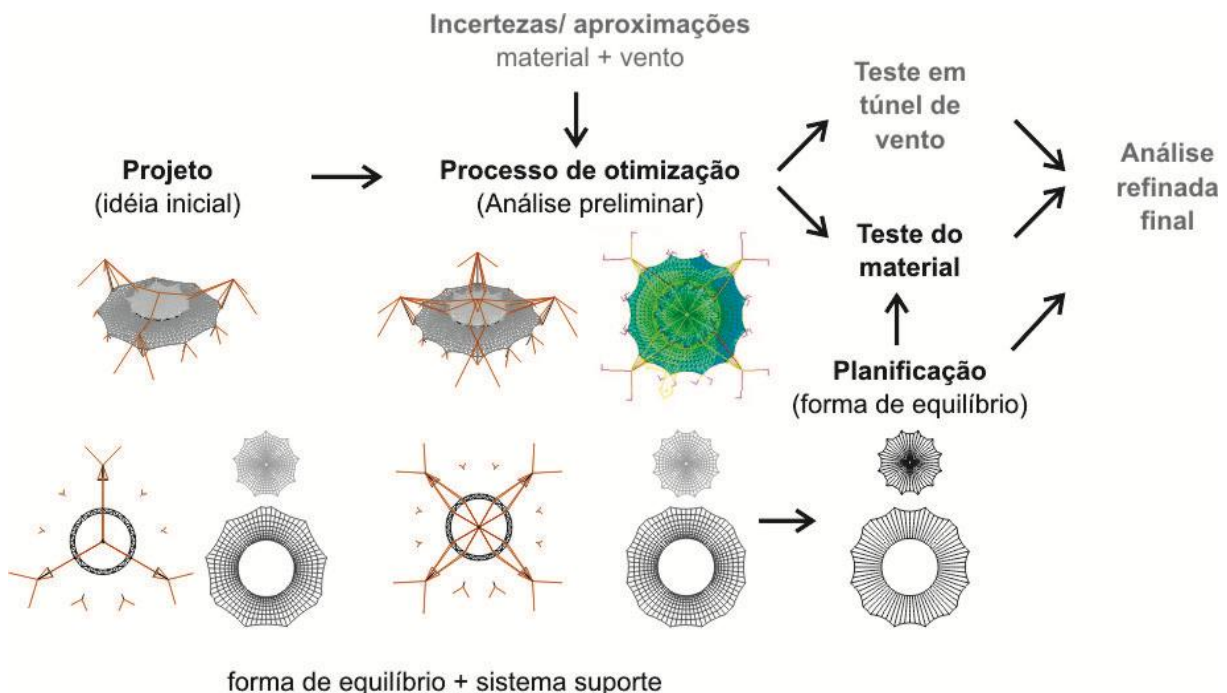
Esses podem ser observados na deformação e na distorção do material, nos deslocamentos dos componentes do sistema suporte e da membrana, até que o equilíbrio seja alcançado.

As análises demonstraram que a forma de lidar com esses movimentos, alcançar o desempenho desse sistema deriva da avaliação do arranjo do conjunto estrutural e geometria dos componentes do sistema (membrana e sistema suporte), bem como da avaliação da geometria da membrana planificada, conforme hipótese proposta.

Isto quer dizer que o desempenho das coberturas em membranas estruturais resulta de um processo de otimização que envolve a análise da estabilidade espacial do conjunto estrutural (investigando arranjo dos componentes), da rigidez da membrana (avaliando geometria da superfície), bem como a avaliação da geometria dos padrões de corte da superfície (avaliando a influência do comportamento do material).

As investigações, análises realizadas e o procedimento de trabalho adotado na análise qualitativa preliminar ampliaram a compreensão desse sistema. Apontam também estratégias para aumentar o desempenho do sistema e minimizar as falhas dessa etapa preliminar de trabalho (Figura 4-1). Cabe aos arquitetos, engenheiros e construtores avaliarem em conjunto, esses procedimentos e possibilidades para cada projeto, em particular.

Figura 4-1 – Procedimento de trabalho adotado e novas etapas de trabalho



Sugestões para procedimentos de projeto

Observa-se que as membranas estruturais inserem-se na área de fronteira entre a arquitetura e a engenharia. Portanto, o processo de projeto é realizado a partir da aproximação de ambas as áreas e diálogo entre as equipes.

A primeira etapa do processo de projeto objetiva a elaboração do conceito e das diretrizes do objeto a ser edificado. Em outras palavras, busca-se definir os usos e atividades a serem potencializadas, identificar as qualidades e as características do lugar onde se insere a edificação, bem como a relação da edificação proposta com o entorno (vistas, insolação, vento, topografia, edificações vizinhas). Avalia-se também a legislação local de uso e ocupação do solo. Estas diretrizes irão nortear a elaboração de espaços e soluções – arquitetônicas e estruturais – que potencializem as atividades e as relações humanas, bem como a integração da edificação na paisagem em que se insere (NUNES, 2008).

Na segunda etapa desenvolve-se a configuração tridimensional do objeto a ser edificado, ou seja, o arranjo conjunto estrutural (sistema suporte e membrana). Abrange o desenvolvimento de modelos físicos e ou computacional, e integram-se as ações da arquitetura e da engenharia.

A elaboração dos modelos físicos pode ser considerada como um primeiro passo do estudo da forma da membrana e do conjunto estrutural. Possibilita explorar e analisar qualitativamente o arranjo e a geometria dos componentes (membrana e sistema suporte) sob pré-tensão. Permite a compreensão intuitiva do comportamento do sistema e o desenvolvimento, de forma espontânea, da configuração estrutural. Além disso, possibilita investigar a edificação na paisagem, bem como o processo de fabricação e montagem da estrutura em estudo, o que não é possível apenas do ponto de vista cartesiano (plantas, cortes). Os modelos flexíveis podem ser realizados em tecidos elásticos (meia de nylon, malha), filme de sabão ou papel, e suporte com pregos, palitos de madeira, fios de aço e linhas.

Paralelamente, desenvolve-se a modelagem computacional da configuração inicial proposta, permitindo uma investigação mais refinada da forma de equilíbrio da membrana e do arranjo do conjunto estrutural. Utiliza-se, por exemplo, o Método Densidade de Força para a definição da forma tridimensional da membrana sob pré-tensão e uma plataforma gráfica para representação de todo o conjunto estrutural.

Posteriormente, avalia-se o comportamento e a estabilidade global da configuração inicial proposta (membrana e sistema suporte) sob a influência das

cargas previstas. Essa análise preliminar é balizada pelos fatores de segurança e ou normas adotadas. Inicia-se então, o processo de otimização da configuração proposta, investigando-se seu desempenho estrutural (ex. rigidez do sistema, capacidade da membrana de acomodação das cargas, peso do sistema) e construtivo. Este processo envolve ajustes na geometria e arranjo dos componentes e pode ser definido como um passo a passo para encontrar a melhor configuração do sistema.

Esta análise preliminar é também a base dos testes experimentais do material e da ação do vento. A análise do comportamento do material fornece informações (ex. rigidez do material e deformações) que possibilitam refinar a geometria dos padrões de corte das membranas, contribuindo para aproximar os modelos real e teórico. Os testes de túnel de vento do modelo em estudo possibilitam quantificar as cargas, colaborando para evitar o dimensionamento excessivo das estruturas e aumentar a segurança das mesmas.

A análise preliminar e os testes norteiam as análises refinadas subsequentes aumentando a qualidade da simulação da estrutura e contribuindo para o dimensionamento adequado, o detalhamento com maior precisão dos componentes e, portanto para o desempenho da construção e da estrutura da membrana na sua vida útil.

Sugestões para trabalhos futuros

Esse trabalho se abre a novas avaliações guiadas pelo maior refinamento da malha da superfície da membrana e dos padrões de corte, bem como de teste em túnel de vento do modelo em estudo, objetivando avaliar e quantificar as incertezas dos carregamentos e aumentar a qualidade da simulação de desempenho da estrutura.

Sugere-se também:

- a avaliação os fatores de segurança a serem adotados nas análises de desempenho de tensoestruturas;
- a verificação do comportamento do material e da resistência das uniões dos painéis planos, principalmente em regiões de clima tropical como o Brasil;
- o desenvolvimento de softwares que possibilitam a integração dos procedimentos de projeto (estudo da forma, padrões de corte, análise estrutural).

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDIS, William. *Design Revolutions in the History of Tension Structures*. *Structural Engineering Review*. Oxford, v.6, n.1, p.1-10. Feb. 1994.

ALVIM, Rosana de Albuquerque Arléo. *Avaliação experimental de propriedades mecânicas dos tecidos estruturais*. 2003. 134f. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo, 2003.

ALVIM, Rosana de Albuquerque Arléo; PAULETTI, Ruy Marcelo de Oliveira. Avaliação experimental de propriedades mecânicas dos tecidos estruturais. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, Mendonza, mai., 2004.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, Inc. AISC. *Specification for structural steel buildings*. jun., 22, 2010.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, Inc. AISC. *Load and resistance factor design specification for steel hollow structural sections*. nov., 10, 2000.

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

AZEVEDO, Álvaro F. M. *Método dos elementos finitos*. Porto: Faculdade de Engenharia do Porto, 2003.

BAIER, Bernd. Technical characteristics and requirements of textiles used for building and construction. In: TEXTILES, POLYMERS AND COMPOSITES FOR BUILDINGS. The Textile Institute – Woodhead publishing. Cambridge. Edited by Goeran Pohl. 2010. p.49-68.

BAIER, Bernd: Leichtbau mit Membranen – Neue Entwicklungen, Materialien, Konstruktionen. In: ESSENER UNIKATE 23, BERICHTE AUS FORSCHUNG UND LEHRE, INGENIEURWISSENSCHAFT. Essen: Universität Duisburg-Essen, 2004. p.86-97 *apud* BAIER, Bernd. Technical characteristics and requirements of textiles used for building and construction. In: TEXTILES, POLYMERS AND COMPOSITES FOR BUILDINGS. The Textile Institute – Woodhead publishing. Cambridge. Edited by Goeran Pohl. 2010. p.49-68.

BALDWIN, J. *Bucky Works: Buckminster Fuller's ideas for today's*. New York: John Wiley, 1996, 243p.

BARNES, Michael. Form and stress: engineering of tension structures. *Structural Engineering Review*. Oxford, v.6, n.3-4, p.175-202. aug.-nov. 1994.

BÖGNER-BALZ, H.; BLUM, R. Materials. In: MASTER PROGRAM FOR MEMBRANE STRUCTURES. Dessau: [s.n], 2008. CD-ROM do material de trabalho - divulgação restrita.

BLUM, R. Material properties of coated fabrics for textile architecture. In: THE DESIGN OF MEMBRANE AND LIGHTWEIGHT STRUCTURES - PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM AT THE VRIJE UNIVERSITY BRUSSEL. Sep. 2000. Brussel. p.63-88.

BLUM, Rainer. Evaluation method for the elastic moduli. *Tensinews*, Brussels, Newsletter n.3, p.3, sep. 2002.

BUBNER, Ewald. *Membrankonstruktionen - Verbindungstechniken /Membrane construction - connection details*. Essen: Druckerei Wehlmann GmbH, 2005. p323.

CALLISTER, William D. *Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma abordagem integrada*. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. Revisão técnica de Paulo Emílio Valadão de Miranda. 2ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 720p.

CHILTON, John; BLUM, Rainer; DEVULDER, Thibau; RUTHERFORD, Peter. Thermal Environment. In: *European design guide for tensile surface structures*. Brussel: Tensinet, 2004. p.98-122.

CIMAF Cabos S/A. Cabos de Responsabilidade. *Catálogo de produtos*. Osasco, 2002.

D'ARCY THOMSON, W. On growth and form. Cambridge University Press. 1917 *apud* LEWIS, Wanda J. *Tension structures: form and behavior*. London: Thomas Telford Publishing. 2003. 201p.

DIAS JUNIOR, Urubatan de Souza. Determinação de padrões de corte *em estruturas de membrana por linhas geodésicas*. 2006. 110f. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo, 2006.

DEUTSCHE NORM. *DIN 4134: Tragluftbauten, Berechnung, Ausführung und Betrieb*.1983.

DREW, Philip. *Frei Otto: Form and structure*. London: Crosby Lockwood Staples, 1976 *apud* PAULETTI, Ruy Marcelo de Oliveira. *História, análise e Projeto das Estruturas Retesadas*. Tese de Livre docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

Experiences, ideas and new ways with architecture fabrics. *Sefar architecture*. Sefar Ag: Heiden. n. 1, p.10-11, nov. 2011.

FOSTER, Brian. Cable and membrane roofs – a historical survey. *Structural Engineering Review*. Oxford, v.6, n.3-4, p.145-174. aug-nov. 1994.

FOSTER, Brian; MOLLAERT, Marijke. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Brussel: Tensinet, 2004. 354p.

GÓMES JÁUREGUI, Valentin. *Tensigridad: estruturas tensegráficas em ciência y arte*. Santander: Serviço de Publicaciones de La Universidad de Cantabria, 2007. 199p.

GONÇALVES, Roberto Martins; SALES, José Jairo de; MALITE, Maximiliano; MUNAIAR NETO, Jorge. *Ação do vento nas edificações: teoria e exemplos*. São Carlos: SET/EESC/USP, 2004. 124p.

GOSLING, P.D.; ZHANG, L. A non-safety factor approach to the design of membrane structures. In: TENSINET SYMPOSIUM 2010 – Tensile Architecture: connecting past and future. sep. 2010, Sofia.p.13-22.

GRÜNDIG, L.; MONCRIEFF, E.; STRÖBEL, P. A history of the principal developments and applications of the force density method in Germany 1970-1999. In: IASS-IACM 2000. FOURTH INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON COMPUTATION OF SHELL & SPATIAL STRUCTURES. June 5-7, 2000. Chania-Crete, Greece. Disponível em: <www.google.com.br/search?hl=pt-BR&q=density2.pdf&btnG=Pesquisar&meta=>>. Acesso em 26/09/2007.

HUNTINGTON. Craig G. *The Tensioned Fabric Roof*. Reston: Asce Press, 2003. 203p.

INFORMATIONSDIENST HOLZ. *Holzbaupreis Nordrhein-Westfalen 1996*. Arbeitsgemeinschaft Holz e V. Dusseldorf, 1996. p.13.

JOTA, Fabiano de Oliveira; PORTO, Cláudia Estrela. Evolução das Estruturas de Membrana, 2003. Disponível em: < www.unb.br/fau/pos_graduacao/paranoa/edicao2004/evolucao_estruturas_membrana.pdf >. Acesso em 18/06/2008.

KNIPPERS, Jan; CREMERS, Jan; GABLER; Markus; LIENHARD, Julian. *Construction Manual for Polymers + Membranes*. Basel: Birkhäuser. 2011. 296p.

KOCH, Klaus-Michael. *Membrane Structures: innovative building with film and fabric*. Munich: Prestel Verlag, 2004.

KOENEN, Reinhold. *Skript Leichtbau*. Institut für Metall-und Leichtbau. Universität Duisburg Essen. Editor: Dipl.-Ing. Jan Peter Hartmann. Revisada e ampliada em 2009: Dr.- Ing Reinhold Koenen. 11/13/2009: Design of lightweight shell structures – Master course, elective module, out.2011 - fev.2012.38p. Apostila e notas de aulas.

KROSCWITZ, Jacqueline I. *Concise Encyclopedia and Polymer Science and Engineering*. New York: Wiley.1990. 1341p.

LEWIS, Wanda J. Lightweight tension membranes: an overview. In: PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS. Civil Engineering. v.126, n.4, p.171-181. Aug. 1998.

LEWIS, Wanda J. *Tension structures: form and behavior*. London: Thomas Telford Publishing. 2003. 201p.

LINKWITZ, Klaus. About formfinding of double-curved structures. *Engineering Structures*. v. 21, issue 8, p. 709-718, aug. 1999. Disponível em: <www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V2Y-3VWFYVR-6&_user=686449&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000037578&_version=1&_urlVersion=0&_userid=686449&md5=f2fd4e74e01fb4a7bd803394f076a946#b2>. Acesso 31/01/08.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luis Cláudio. *Polímeros como materiais de engenharia*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1991. 198p.

MATTHECK, C. Why they grow, how they grow: the mechanics of trees´. *Arboricultural Journal*, 14, 1-17. 1990 apud LEWIS, Wanda J. *Tension structures: form and behavior*. London: Thomas Telford Publishing. 2003. 201p.

MEEß-OLSOHN, Lars: *Textegrity - Textiles and tensegrity* Textegrity. Dissertation. Universität Essen, 2004.150p.

MEHLER Technologies. Valmex structures. *Catálogo de produtos*. V314/ 03/ 2008.

MILWICH, M. Types and production of textiles used for building and construction. In: *TEXTILES, POLYMERS AND COMPOSITES FOR BUILDINGS*.. The Textile Institute – Woodhead publishing. Cambridge. Edited by Goeran Pohl. 2010. p.13-48.

MINTE, Jörg. *Das Mechanische Verhalten Von Verbindungen Beschichteter Chemiefasergewebe*. 1981. 117p. Thesis (PhD) Facultad für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Aachen, 1981.

MOLLAERT, Marijke; HEBBELINK, Sven; HAASE, Jürgen. The design of membrane and lightweight structures -from concept to execution. *Proceedings of the symposium at the Vrije Universiteit Brussel*, sep. 2000. Brussels: VUB Brussels University Press, 2002. 315p.

MEMBRANE STRUCTURES ASSOCIATION OF JAPAN. *MSAJ/M-02-1995: testing method for elastic constants of membrane materials*.1995.

NUNES, Eliana Ferreira. *Tensoestruturas: elementos e cabos associados a membranas*. 2008. 169f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2008.

OLIVEIRA, Maria Betânia. *Estudo das Estruturas de membrana: uma abordagem integrada do sistema construtivo, do processo de projetar e dos métodos de análise*. 2001. 165f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2001.

OLIVEIRA, Vinícius Maia Barreto de. *Análise e projeto de tenso-estruturas têxteis para coberturas*. 2003. 139f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro, 2003.

OTTO, Frei; TROSTEL, Rudolf. *Tensile Structures: Volume 1: Pneumatic structures*. Cambridge: The M.I.T. Press, 1967.

OTTO, Frei; TROSTEL, Rudolf. *Tensile Structures: Volume 2: Basic Concepts and Survey of Tensile Structures*. Cambridge: The M.I.T. Press, 1969.

OTTO, Frei et al. *Convertible roofs - IL 5*. Stuttgart: Information of the Institute for Lightweight Structures, 1972.

OTTO, Frei et al. *Air hall handbook - IL15*. Stuttgart: Information of the Institute for Lightweight Structures, 1983.

OTTO, Frei et al. *Experiments - IL25*. Stuttgart: Information of the Institute for Lightweight Structures, 1990.

OTTO, Frei et al. *Lightweight principle* - IL24. Stuttgart: Information of the Institute for Lightweight Structures, 1997.

PAULETTI, Ruy Marcelo de Oliveira. *História, análise e Projeto das Estruturas Retesadas*. Tese de Livre docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

PAULETTI, Ruy Marcelo de Oliveira. *Sistemas Estruturais Leves – PEF 5750 – EPUSP-PEF 2007 – Disciplina do Mestrado, jun - set 2007*. Notas de aulas.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. *A concepção estrutural e a arquitetura*. São Paulo: Zigurate editora, 2003. 272p.

ROLAND, Conrad. *Frei Otto: Estruturas - estudios y trabajos sobre la construccion ligera*. Barcelona: Gustavo Gili, 1973. 171p.

SAITOH, Masao. Recent development of tension structures: aesthetics and technology of the strings. In: PROCEEDINGS OF IASS COLLOQUIUM – CURRENT AND EMERGING TECHNOLOGIES OF SHELL AND SPATIAL STRUCTURES. apr. 1997, Madrid.

SCHLAICH, Jörg; BERGERMANN, Rudolf. *Leicht weit - Light structures*. Munich: Prestel Verlag e Frankfurt am Main: Deutsches Achitektur Museum (DAM), 2003. 328p.

SEIDEL, Michael. *Tensile Surface structures*. Berlin: Ernst& Sohn. 2009. 229p.

SCHIEMANN, L.; MORITZ, K. Polymer foils used in construction. In: TEXTILES, POLYMERS AND COMPOSITES FOR BUILDINGS. The Textile Institute – Woodhead publishing. Cambridge . Edited by Goeran Pohl. 2010. p.189-226.

STEGMAIER, T; SCHNEIDER, P.; VOHRER, A.; PLANK, H.; BLUM, R.; BÖGNER-BALZ, H. Developing and testing textiles and coatings for tensioned membrane structures. In: TEXTILES, POLYMERS AND COMPOSITES FOR BUILDINGS. The Textile Institute – Woodhead publishing. Cambridge . Edited by Goeran Pohl. 2010. p.129-188.

SHUKHOV_TOWER. Disponível...http://en.wikipedia.org/wiki/Shukhov_Tower. Acesso em: 13 set. 2010.

RODRÍGUEZ, Nelson. *Diseño de estructura transformable por deformación de una malla plana em su aplicación a un refúgio de rápido montaje*. 2005. 297f. Tese (Doutorado) Universidad Politécnica da Catalunya – Escola Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona – Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Valle. Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1. Barcelona, 2005.

UHLEMANN, Jörg; STRANGHÖNER, Natalie; SCHMIDT, Herbert; SAXE, Klaus. Effects on elastic constants of technical membranes applying the evaluation methods of MSAJ/M-02-1995. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TEXTILE COMPOSITES AND INFLATABLE STRUCTURES – STRUCTURAL MEMBRANES 2011. Barcelona, 2011.

VILELA, C.A.B.S. *Ação estática do vento em tensoestruturas*. 2011. 149p. Tese de doutorado em Construção civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

V&M do Brasil. Tubos Estruturais de seção circular (MSH): dimensões, propriedades geométricas e materiais. *Informações técnicas Vallourec & Mannesmann Tubes*. Edição set. 2000 – VMB – BR0001P – 1ª Edição.

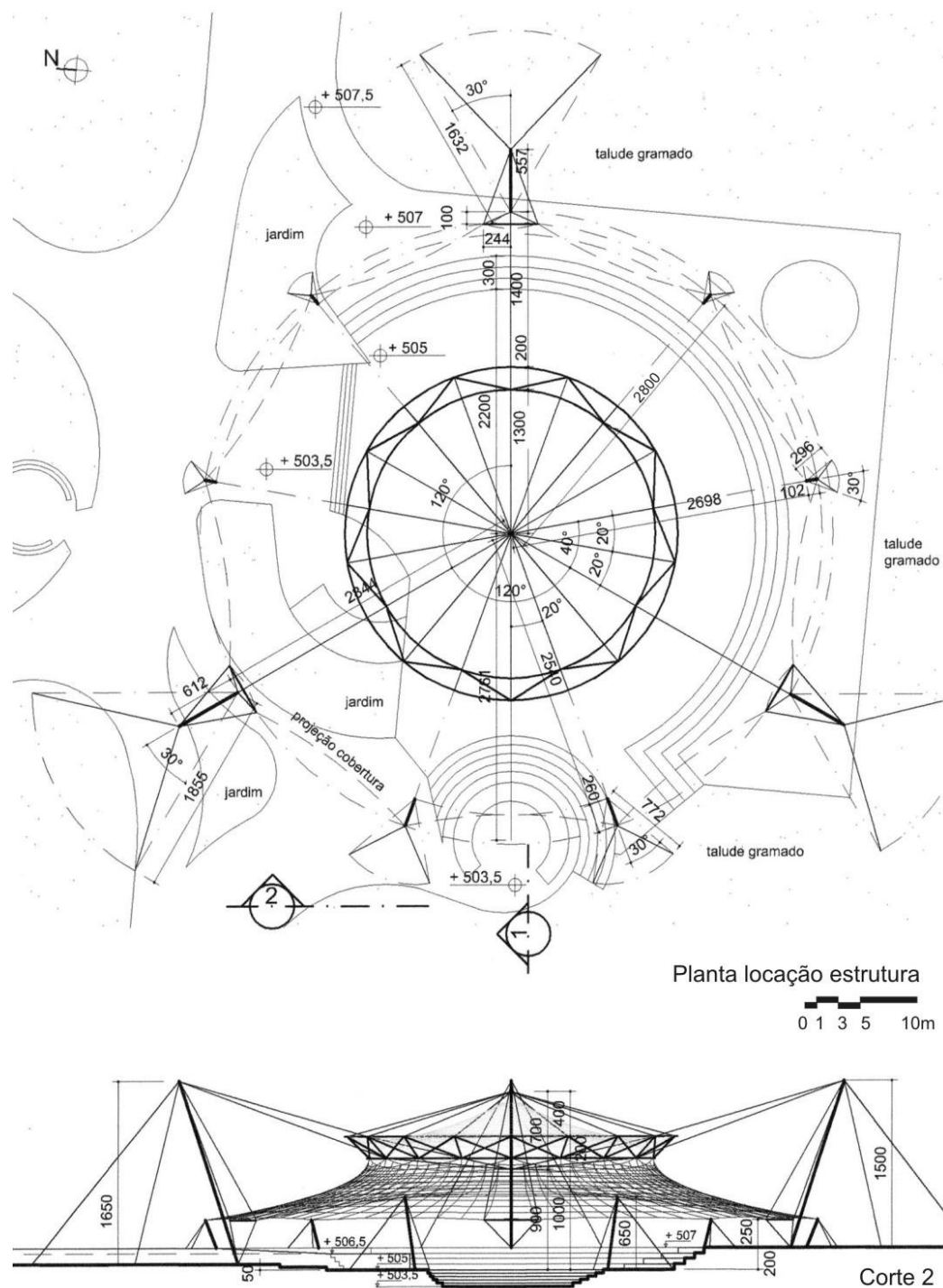
WAGNER, Rosemarie. On the design process of tensile structures. In: OÑATE, E.; KRÖPLIN, B. (eds). *Textile Composites and Inflatable Structures*. Netherlands: Springer, 2005. p.1-16.

WAGNER, Rosemarie. Kinematics in tensioned structures. In: OÑATE, E.; KRÖPLIN, B. (eds). *Textile Composites and Inflatable Structures II*. Netherlands: Springer, 2008. p.85-97.

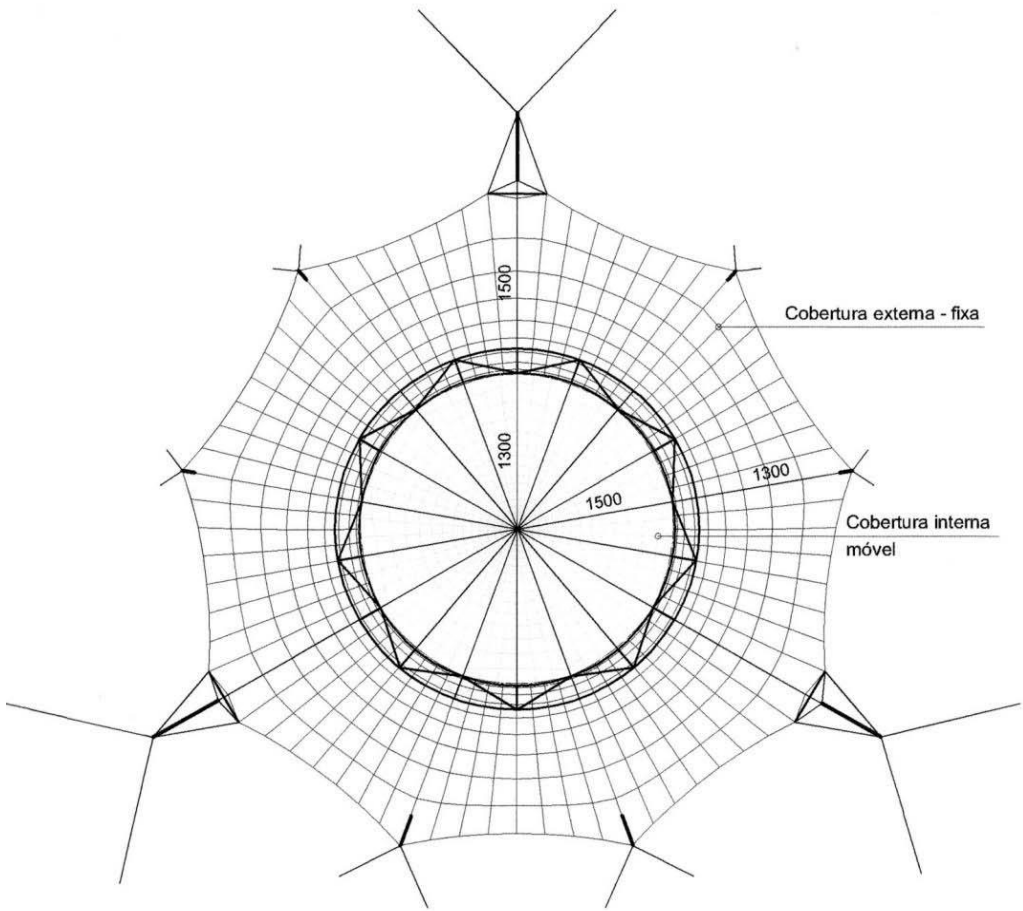
YU, Xiaobing. Bamboo: structure and culture. 2012. 178f. Thesis dissertation. Fachbereich Kunst und Design der Universität Duisburg-Essen. 2012.

ZANETTINI, Siegbert; GARCIA, José Wagner. Centro de pesquisas Petrobrás-CENPES. *Arcoweb*, 2006. (Tecnologia). Disponível em: http://www.arcoweb.com.br/tecnologia/siegbert-zanettini-e-jose-wagner-garcia-09-04-2008.html#Scene_1>. Acesso 5/julho 2009.

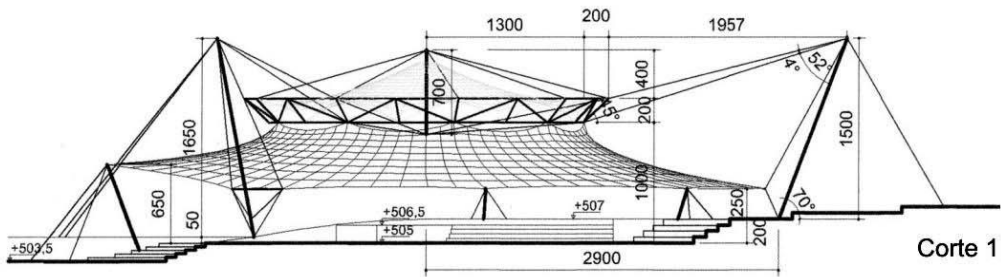
APÊNDICE A – Informações sobre o projeto original



Fonte: Nunes, 2008, p.149.



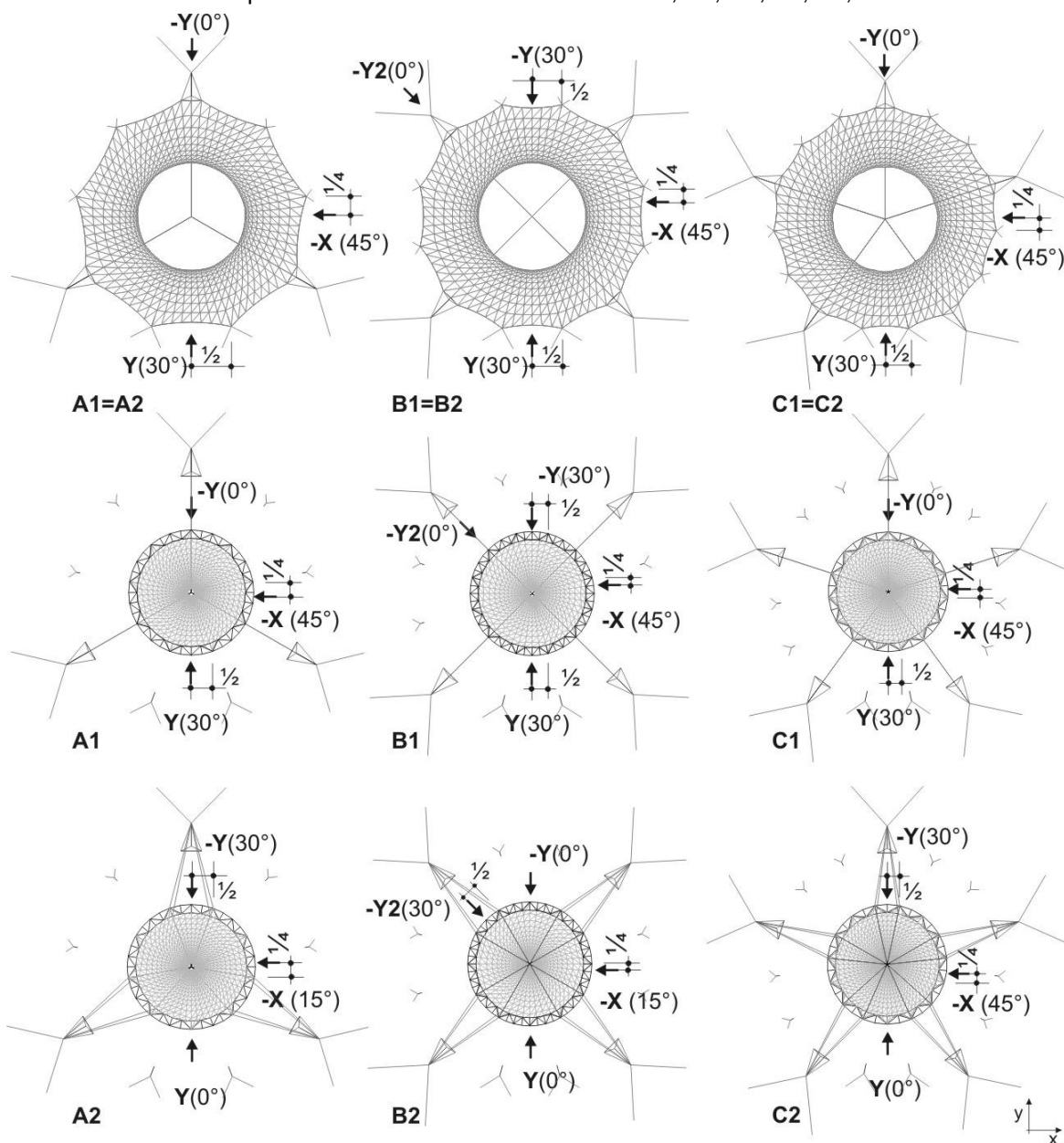
Planta cobertura
 0 1 3 5 10m



Fonte: Nunes, 2008, p.150.

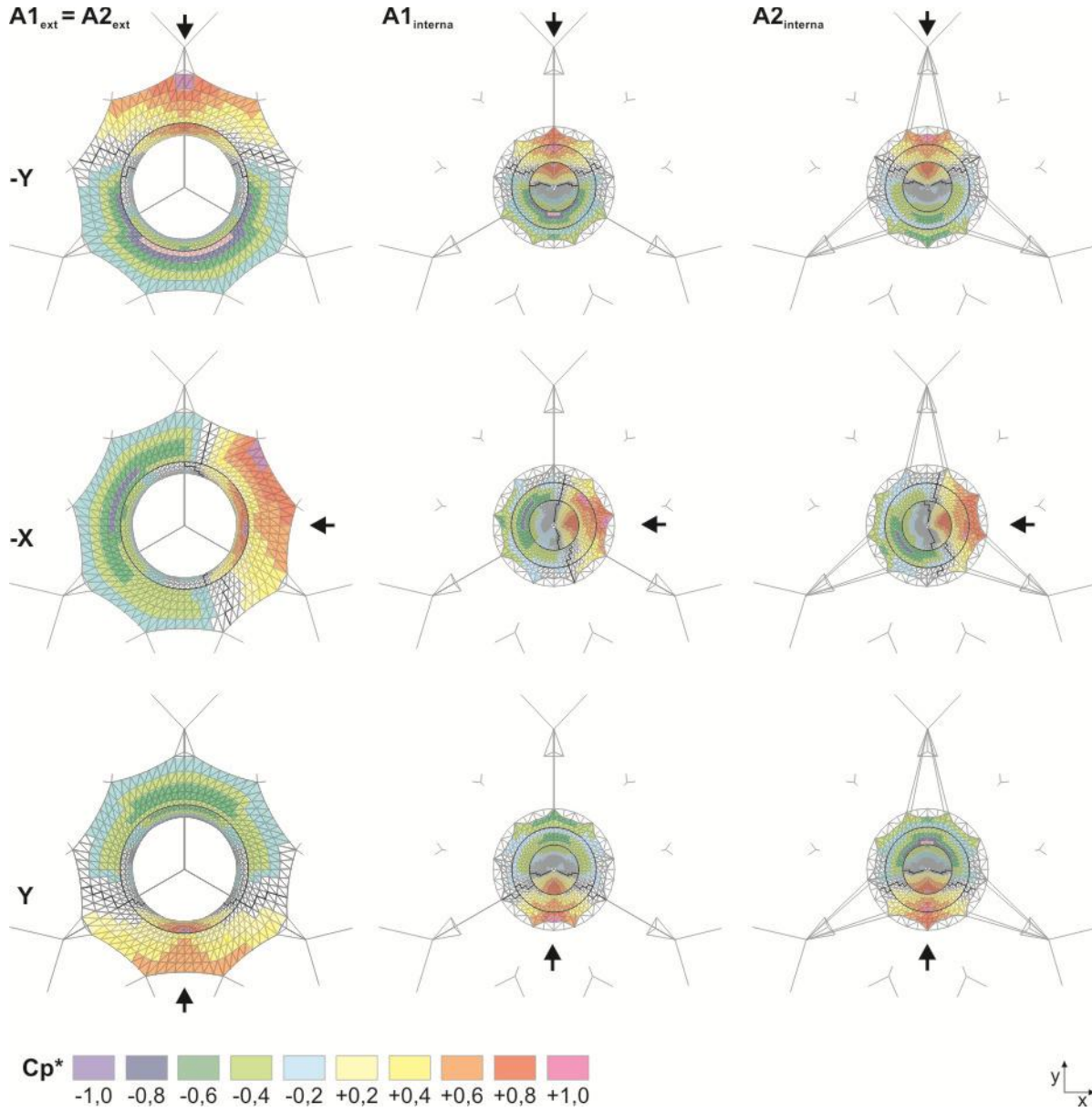
APÊNDICE B – Direções de incidência do vento

Direções (global e local) de incidência do vento
superfícies externa e interna modelos: A1, B1, C1, A1, B2, C2

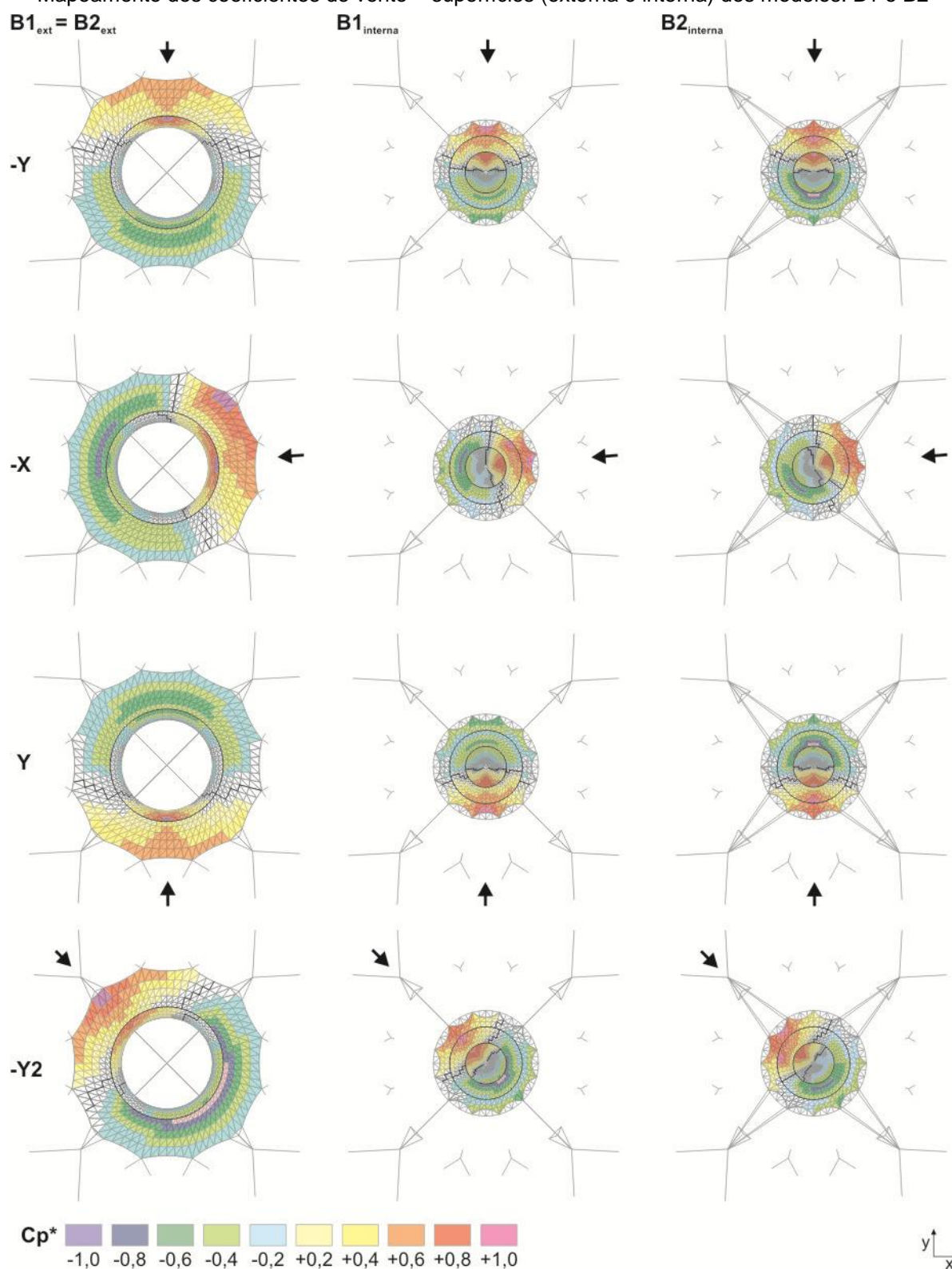


APÊNDICE C – Mapeamento dos coeficientes de vento

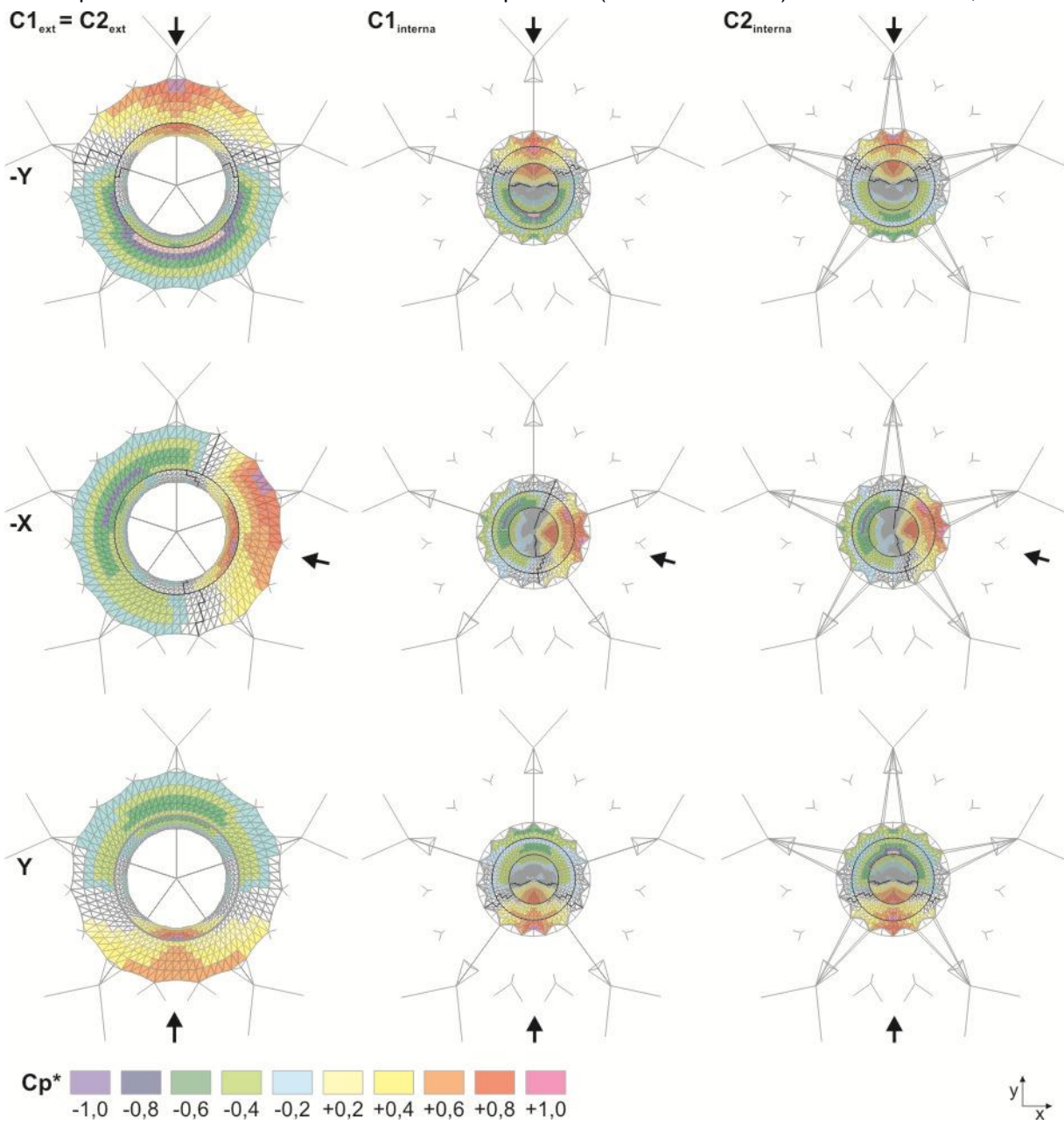
Mapeamento dos coeficientes de vento – superfícies (externa e interna) dos modelos: A1 e A2



Mapeamento dos coeficientes de vento – superfícies (externa e interna) dos modelos: B1 e B2

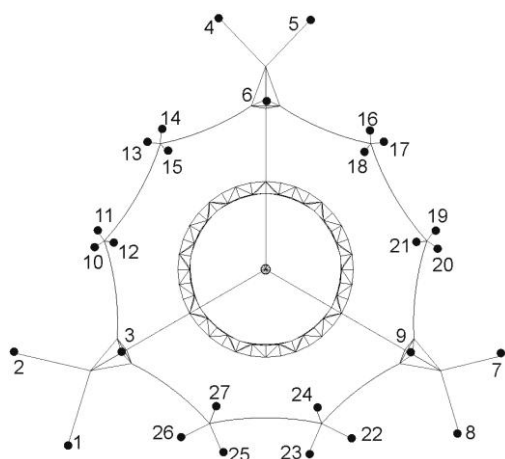


Mapeamento dos coeficientes de vento – superfícies (externa e interna) dos modelos: C1, C2

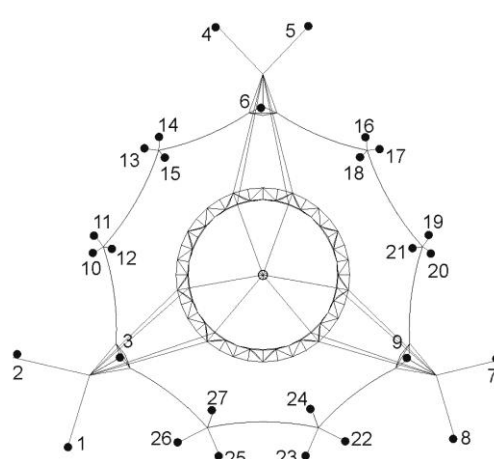


APÊNDICE D – Pontos de ancoragem dos modelos avaliados

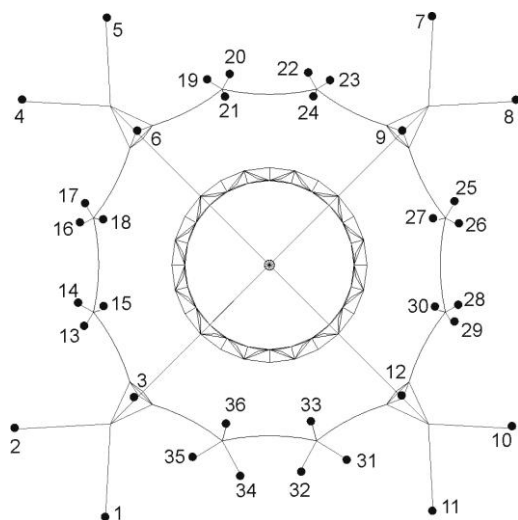
Modelo A1



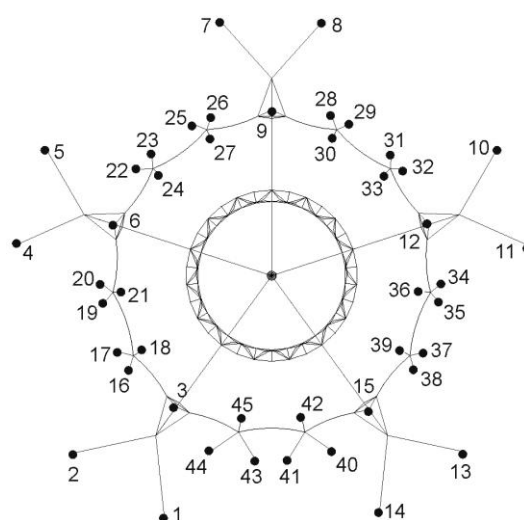
Modelo A2



Modelo B1/B2



Modelo C1/C2

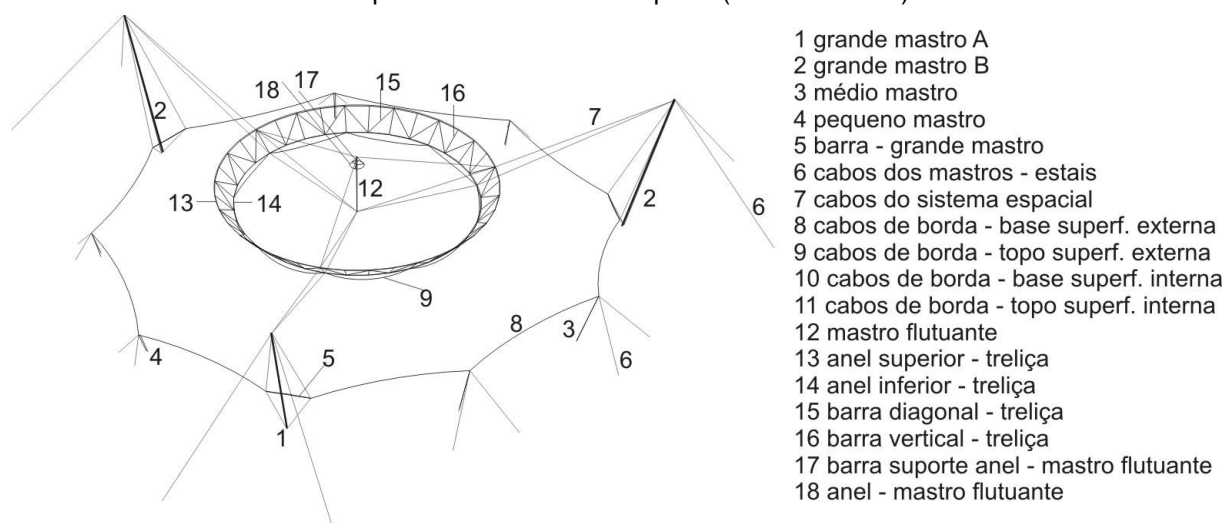


APÊNDICE E – Dimensões do sistema suporte

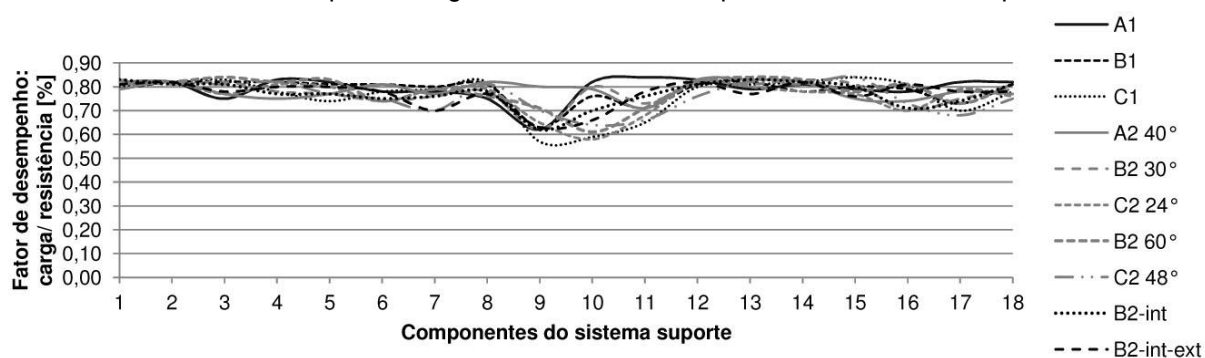
componentes sistema suporte		A1	B1	C1	A2 40°	B2 30°	C2 24°	B2 60°	C2 48°	B2 _{int}	B2 _{int-ext}	
1	grande mastro A	Diâmetro [m]	0,4600	0,4300	0,4270	0,5050	0,4280	0,4000	0,4540	0,4230	0,4280	0,4150
		Espessura [m]	0,0111	0,0103	0,0071	0,0127	0,0111	0,0079	0,0111	0,0084	0,0111	0,0103
		Desempenho [%]	0,82	0,79	0,80	0,79	0,83	0,82	0,81	0,81	0,83	0,81
2	grande mastro B	Diâmetro [m]	0,4600	0,4300	0,4270	0,5050	0,4280	0,4000	0,4540	0,4230	0,4280	0,4150
		Espessura [m]	0,0086	0,0082	0,0066	0,0111	0,0103	0,0079	0,0103	0,0082	0,0103	0,0095
		Desempenho [%]	0,82	0,82	0,82	0,82	0,81	0,82	0,82	0,82	0,81	0,82
3	mastro médio	Diâmetro [m]	0,1683	0,1683	0,1683	0,1683	0,1683	0,1683	0,1683	0,1683	0,1683	0,1683
		Espessura [m]	0,0127	0,0087	0,0071	0,0143	0,0095	0,0079	0,0095	0,0079	0,0095	0,0087
		Desempenho [%]	0,75	0,82	0,83	0,77	0,82	0,77	0,84	0,81	0,81	0,78
4	pequeno mastro	Diâmetro [m]	0,1683	0,1143	0,1143	0,1683	0,1143	0,1143	0,1143	0,1143	0,1143	0,1143
		Espessura [m]	0,0052	0,0060	0,0048	0,0064	0,0071	0,0048	0,0071	0,0052	0,0071	0,0060
		Desempenho [%]	0,83	0,82	0,78	0,75	0,78	0,81	0,82	0,82	0,77	0,80
5	barra do grande mastro	Diâmetro [m]	0,1413	0,1413	0,1413	0,1413	0,1413	0,1413	0,1413	0,1413	0,1413	0,1413
		Espessura [m]	0,0071	0,0071	0,0066	0,0066	0,0066	0,0056	0,0056	0,0056	0,0066	0,0066
		Desempenho [%]	0,82	0,81	0,74	0,77	0,77	0,80	0,83	0,77	0,77	0,80
6	cabos dos mastros	Diâmetro [m]	0,0380	0,0350	0,0320	0,0480	0,0380	0,0320	0,0450	0,0350	0,0380	0,0350
		Desempenho [%]	0,78	0,81	0,78	0,81	0,74	0,74	0,74	0,75	0,75	0,78
7	cabos sist. espacial	Diâmetro [m]	0,0380	0,0350	0,0350	0,0380	0,0320	0,0260	0,0320	0,0290	0,0320	0,0320
		Desempenho [%]	0,78	0,80	0,79	0,77	0,76	0,79	0,79	0,70	0,76	0,70
8	cabo de borda 1a	Diâmetro [m]	0,0320	0,0290	0,0260	0,0320	0,0290	0,0260	0,0290	0,0260	0,0290	0,0260
		Desempenho [%]	0,75	0,81	0,82	0,82	0,78	0,79	0,76	0,81	0,78	0,77
9	cabo de borda 1b	Diâmetro [m]	0,0220	0,0220	0,0190	0,0220	0,0220	0,0190	0,0220	0,0190	0,0220	0,0220
		Desempenho [%]	0,62	0,63	0,57	0,80	0,62	0,65	0,71	0,70	0,62	0,63
10	cabo de borda 2a	Diâmetro [m]	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0220	0,0190	0,0190	0,0190
		Desempenho [%]	0,82	0,76	0,59	0,79	0,80	0,58	0,61	0,64	0,70	0,66
11	cabo de borda 2b	Diâmetro [m]	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095
		Desempenho [%]	0,84	0,71	0,65	0,71	0,73	0,68	0,71	0,66	0,76	0,78
12	mastro flutuante	Diâmetro [m]	0,1683	0,1683	0,1683	0,1683	0,1683	0,1413	0,1683	0,1413	0,1683	0,1143
		Espessura [m]	0,0143	0,0079	0,0064	0,0087	0,0079	0,0079	0,0079	0,0066	0,0064	0,0052
		Desempenho [%]	0,83	0,81	0,80	0,83	0,82	0,82	0,82	0,76	0,81	0,82
13	anel superior - treliça	Diâmetro [m]	0,2191	0,2191	0,1683	0,3556	0,3238	0,1683	0,3238	0,1683	0,3238	0,2730
		Espessura [m]	0,0103	0,0082	0,0079	0,0222	0,0103	0,0079	0,0143	0,0110	0,0103	0,0087
		Desempenho [%]	0,79	0,82	0,81	0,83	0,81	0,80	0,84	0,82	0,83	0,77
14	anel inferior - treliça	Diâmetro [m]	0,2191	0,1683	0,2191	0,3238	0,3238	0,2191	0,3238	0,2730	0,3238	0,3238
		Espessura [m]	0,0082	0,0079	0,0127	0,0222	0,0127	0,0095	0,0238	0,0143	0,0127	0,0087
		Desempenho [%]	0,81	0,78	0,82	0,82	0,83	0,78	0,83	0,81	0,82	0,82
15	diagonal treliça	Diâmetro [m]	0,1016	0,0889	0,0730	0,0889	0,0889	0,0889	0,0889	0,0730	0,0889	0,0889
		Espessura [m]	0,0057	0,0111	0,0064	0,0044	0,0055	0,0044	0,0064	0,0055	0,0055	0,0055
		Desempenho [%]	0,79	0,80	0,84	0,75	0,81	0,77	0,78	0,84	0,80	0,76
16	vertical treliça	Diâmetro [m]	0,1143	0,1016	0,1413	0,1143	0,0603	0,0730	0,0334	0,1413	0,0603	0,0603
		Espessura [m]	0,0079	0,0044	0,0095	0,0040	0,0040	0,0048	0,0034	0,0056	0,0040	0,0044
		Desempenho [%]	0,78	0,79	0,81	0,74	0,70	0,70	0,81	0,73	0,71	0,81
17	apoio mastro flutuante	Diâmetro [m]	0,0730	0,0603	0,0422	0,0603	0,0603	0,0381	0,0603	0,0422	0,0483	0,0483
		Espessura [m]	0,0048	0,0036	0,0049	0,0044	0,0036	0,0050	0,0036	0,0049	0,0037	0,0037
		Desempenho [%]	0,82	0,73	0,70	0,78	0,75	0,79	0,73	0,68	0,74	0,78
18	anel mastro flutuante	Diâmetro [m]	0,1016	0,1143	0,1016	0,1413	0,1143	0,1016	0,1143	0,1016	0,1143	0,1143
		Espessura [m]	0,0048	0,0064	0,0057	0,0066	0,0064	0,0057	0,0060	0,0057	0,0044	0,0048
		Desempenho [%]	0,82	0,81	0,78	0,77	0,79	0,76	0,81	0,75	0,81	0,78

APÊNDICE F – Avaliação preliminar dos componentes do sistema suporte

Componentes do sistema suporte (ex. Modelo A1)



Fator de desempenho carga/resistência dos componentes do sistema suporte



Os cálculos realizados tiveram como finalidade pré-dimensionar e especificar dos componentes que compõem o sistema suporte (mastros, anel treliçado e cabos) de cada modelo para sua comparação, ou seja, não são estritamente rigorosos. Resultam do procedimento de análise preliminar, considerando a combinação de ações, que teve como referência a norma americana AISC (2010). Nessa avaliação, o fator de desempenho (carga/resistência) estimado para os componentes do sistema foi aproximadamente 80%.

Teve-se como referência, as dimensões e características dos tubos estruturais de seção circular - MSH (V&M, 2000), exceto para os grandes mastros, bem como as dimensões e características dos cabos IPS - *Improved Plow Steel*, (CIMAF, 2002).

Análises realizadas

A avaliação dos elementos (cabos) sob a força axial de tração foi realizada em três passos.

- a. Inicialmente, foi avaliada a resistência a tração dos elementos considerando a área bruta da seção ($P_n = F_y A_g$) e verificada a resistência desses à ruptura, considerando a área líquida da seção ($P_n = F_u A_e$) segundo Cimaf (2002). Considerou-se como a resistência de cálculo, o menor valor obtido, que nesse caso foi a resistência à ruptura dos elementos ($P_n = F_u A_e$). Essa foi ponderada ($\Phi_c P_n$), considerando o fator de redução de tração ($\Phi_t = 0,9$).
- b. Foi realizada a medição da resistência à tração (P_u) necessária aos elementos conforme modelo numérico (análise preliminar).
- c. O último passo compreendeu a avaliação de desempenho do elemento, ou seja, a relação carga/resistência ($P_u / \Phi_c P_n$).

Para o cálculo dos elementos (mastros) sob a força axial de compressão (uniforme) foi realizada a análise da estabilidade (flambagem), da seguinte forma:

- a. Avaliou-se a tensão elástica de flambagem [$F_e = \pi^2 E / (KL/r)^2$], e em seguida a tensão crítica de flambagem dos elementos, considerando:
 - $kL/r \leq 4.71 \sqrt{E/F_y}$ >> Tensão crítica: $F_{cr} = [0.658 F_y / F_e] F_y$
 - $kL/r > 4.71 \sqrt{E/F_y}$ >> Tensão crítica: $F_{cr} = 0.877 F_e$
- b. Essa análise balizou a avaliação da resistência nominal dos elementos à compressão ($P_n = F_{cr} A_g$). Esta foi ponderada ($\Phi_c P_n$) considerando o fator de redução da resistência a compressão ($\Phi_c = 0,9$).
- c. Foi realizada a medição da resistência à compressão necessária aos elementos (P_u) conforme modelo numérico (análise preliminar).
- d. No último passo foi avaliado o desempenho do elemento, ou seja, a relação carga/resistência ($P_u / \Phi_c P_n$).

Para o cálculo dos elementos sob as forças combinadas – flexo-compressão (componentes do anel treliçado e mastro flutuante) foram realizadas as análises à estabilidade e de resistência à flexão (para elementos de seção circular), avaliando-se a interação entre elas.

Avaliou-se inicialmente, a resistência nominal dos elementos à compressão ($P_n = F_{cr} A_g$), conforme descrito previamente, sendo essa ponderada ($\Phi_c P_n$), considerando fator de redução da resistência de compressão ($\Phi_c = 0,9$).

Em seguida, foi realizada a avaliação da resistência nominal a flexão (M_n). Essa abrangeu a análise dos estados limites de plastificação (Y) e flambagem (LB) para elementos com seções circulares, tendo esbeltez (parede): $\lambda = D/t \leq 0,45E/F_y$.

→ Avaliação dos estados limites para a plastificação (Y):

$M_n = M_p = F_y Z$, sendo:

Módulo plástico da seção $> Z = 4/3(r_2^3 - r_1^3)$; $\lambda_p = 0.0448E/F_y$ (seção compacta)

→ Avaliação dos estados limites para flambagem local (LB), considerando:

- (LB) para seções não compactas: $M_n = (0.021E/(D/t) + F_y) S$

- (LB) para seções esbeltas: $M_n = F_{cr} S = (0.33E/D/t) S$

Sendo:

Módulo elástico da seção $\gg S = W_1 = W_2 = I/y$;

$I = \pi(R-t/2)^3 t$ e $y/2 = \text{radius} = h/2$

$\lambda_p = 0,0714E/F_y$, se $\lambda \leq \lambda_p$ (seção compacta);

$\lambda_r = 0.309E/F_y$, se $\lambda \leq \lambda_r$ (seção não compacta)

(λ_p e λ_r : tabela 2.21, p.4, AISC/2001)

Considerou-se como a resistência nominal a flexão (M_n), o menor o menor valor obtido de acordo com os estados limites de plastificação (Y) e flambagem local (LB) para seções não compactas e paredes esbeltas). A resistência nominal dos elementos a flexão (M_n), foi ponderada ($\Phi_b M_n$), considerando o fator de redução da resistência ($\Phi_b = 0,9$).

Em seguida, foi realizada a medição das forças (P_r) e tensões (M_1) e (M_2) necessárias aos elementos conforme modelo numérico (análise preliminar).

A avaliação final abrangeu a análise da combinação de forças (flexão e força axial), e a interação entre os esforços aplicados e resistentes. Considerando:

Se $P_u/\Phi P_n \geq 0.2$... ($M_{n_x} = M_{n_y}$) $\gg P_r/\Phi P_n + 8/9(M_1/\Phi_b M_{n_x} + M_2/\Phi_b M_{n_y}) \leq 1$

Se $P_u/\Phi P_n < 0.2$... ($M_{n_x} = M_{n_y}$) $\gg P_r/2\Phi P_n + (M_1/\Phi_b M_{n_x} + M_2/\Phi_b M_{n_y}) \leq 1$

Tem se como exemplo as análises realizadas do modelo A1.

A1 model / Elements under compression forces			1 -Tall mast A	2 - Tall mast B	3 - Medium mast	4 - Small mast	5 - Bar of tall mast	
Characteristics	Modulus of elasticity of steel (E)	MPa	200000	200000	200000	200000	200000	
		kN/m ²	200000000	200000000	200000000	200000000	200000000	
	Diameter (d)	m	0,46	0,46	0,1683	0,1683	0,1413	
	Thickness (t)	m	0,0111	0,0086	0,0127	0,0052	0,0071	
	Moment of inertia (I)	m ⁴	0,000394	0,000311	0,000019	0,000009	0,00000674	
	Cross sectional area (A)	m ²	0,0160	0,0124	0,0067	0,0027	0,00315	
	y/2	m	0,2300	0,2300	0,0842	0,0842	0,07065	
	Elastic section modulus (S)	m ³	0,0017	0,0014	0,0002	0,0001	0,0001	
	Density (ρ)	kg/m ³	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	
	Length of the member (l)	m	17,60	16,00	7,00	2,70	4,88	
	Radius of gyration (r)	m	0,157	0,158	0,053	0,057	0,046	
	Specified minimum yield stress - Fy	MPa	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	
	reference (V&M, 2000), except tall mast data	kN/m ²	250000,00	250000,00	250000,00	250000,00	250000,00	
	Effective length factor (k)		1	1	1	1	1	
Wall slenderness (λ)		112,26	101,20	132,33	47,56	105,54		
Design strength: φRu (compressive) Rn ≤ φRu - LRDF (AISC, 2010)	Flexural buckling of members without slender elements							
	$4.71 \sqrt{E/F_y}$	MPa	133,22	133,22	133,22	133,22	133,22	
	Elastic buckling stress $F_e = \pi^2 E / (KL/r)^2$	MPa	156,64	192,72	112,72	872,55	177,22	
	Fy/Fe	MPa	1,60	1,30	2,22	0,29	1,41	
	when... $kL/r \leq 4.71 \sqrt{E/F_y}$... >> Critical stress (flexural buckling stress) : $F_{cr} = [0.658 F_y / F_e] F_y$							
	Critical stress $F_{cr} = (0.658 F_y / F_e) F_y$	MPa	128,18	145,26	98,80	221,75	138,52	
		kN/m ²	128182,10	145257,69	98803,93	221747,47	138521,53	
	Nominal compressive strength >> Pn= FcrAg							
	Resistance factor Φc (compressive)		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
	Nominal compressive strength (Pn)	kN	2056,17	1805,28	663,46	609,67	436,58	
	Design compressive strength (ΦcPn)	kN	1850,55	1624,75	597,11	548,70	392,93	
	Required compression strength* (Pu)	kN	-1525,55	-1328,23	-446,60	-456,14	-323,46	
	Pu/ΦcPn (performance factor)		0,82	0,82	0,75	0,83	0,82	

(*) PU - measure values, according preliminary analysis

A1 model / Elements under tensile forces			6 - Mast cables	7 - Spatial system cables	8-Membrane edge cable 1a	9-Membrane edge cable 1b	10-Membrane edge cable 2a	11-Membrane edge cable 2b
Characteristics	Modulus of elasticity of wire rope ** (E)	kgf/mm ²	9500	9500	9500	9500	9500	9500
		kN/m ²	95000000	95000000	95000000	95000000	95000000	95000000
		MPa	95000	95000	95000	95000	95000	95000
	Diameter (d)	m	0,038	0,038	0,032	0,022	0,019	0,0095
		inches	1.1/2"	1.1/2"	1.1/4"	7/8"	3/4"	3/8"
	Mass (m)	kg/m	6,19	6,19	4,30	2,11	1,55	0,38
	Cross sectional area (Ag)	m ²	0,00113	0,00113	0,00080	0,00038	0,00028	0,00007
	Density (ρ)	kg/m ³	5458,00	5458,00	5346,61	5550,69	5466,82	5389,22
	Nominal tensile stress of the wire rope** (Fy)	kgf/mm ²	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00
		kN/m ²	1800000,00	1800000,00	1800000,00	1800000,00	1800000,00	1800000,00
		MPa	1800,00	1800,00	1800,00	1800,00	1800,00	1800,00
	Specified minimum breaking load ** (Pn)	tf	89,70	89,70	63,00	31,40	23,20	5,94
		kN	897,00	897,00	630,00	314,00	232,00	59,40
	Design strength φRu (tensile) Rn ≤ φRu - LRDF (AISC /2010)	Nominal tensile strength (for tensile yielding).... >> Pn= FyAg						
Resistance factor (tensile yielding) Φt			0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Nominal tensile yielding strength (Pn)		kN	2041,41	2041,41	1447,65	684,24	510,35	127,59
Design tensile yielding strength (ΦPn)		kN	1837,27	1837,27	1302,88	615,81	459,32	114,83
Nominal tensile strength (for tensile rupture).... >> Pn= FuAe = Specified minimum breaking load *								
Resistance factor (tensile rupture) Φt			0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Design tensile rupture strength (ΦPn)		kN	672,75	672,75	472,50	235,50	174,00	44,55
Required tensile strength*** (Pu)		kN	521,56	525,00	352,25	146,44	141,99	37,62
Pu/ΦPn	%	0,78	0,78	0,75	0,62	0,82	0,84	

(*) Class wire rope - fiber core (CIMAF, 2002); (6 legs with 27 to 49 wires each) - 6x37

(**) wire rope: IPS (Improved Plow Steel) - (CIMAF, 2002) (***) PU - measure values, according preliminary analysis

A1 model - Elements under combined forces (flexure + axial force)		12- Flying mast	12- Flying mast	13- Top ring - truss	14- Bottom ring - truss	15-Diagonal bar - truss	16- Vertical bar - truss	17- Truss - flying mast	18- Ring - flying mast	
Characteristics	Modulus of elasticity (E)	MPa	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	
		kN/m ²	200000000	200000000	200000000	200000000	200000000	200000000	200000000	
	Diameter	m	0,1683	0,1683	0,2191	0,2191	0,1016	0,1143	0,073	0,1016
	Thickness	m	0,0143	0,0143	0,0103	0,0082	0,0057	0,0079	0,0048	0,0048
	Internal section radius (R1)	m	0,06985	0,06985	0,09925	0,10135	0,0451	0,04925	0,0317	0,046
	External section radius (R2)	m	0,08415	0,08415	0,10955	0,10955	0,0508	0,05715	0,0365	0,0508
	Moment of inertia (I)	m ⁴	0,00002051	0,00002051	0,000037	0,000030	0,000002	0,000004	0,00000060	0,00000171
	Cross sectional area (A)	m ²	0,00756	0,00756	0,0071	0,0056	0,0018	0,0028	0,00110	0,00153
	y/2	m	0,08415	0,08415	0,1096	0,1096	0,0508	0,0572	0,03650	0,05080
	Elastic section modulus (S)	m ³	0,0002	0,0002	0,0003	0,0003	0,0000	0,0001	0,00002	0,00003
	Plastic section modulus (Z)	m ³	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000
	Density (ρ)	kg/m ³	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
	Length of the member (L)	m	1,00	6,00	2,61	2,26	3,73	2,8284	1,25	0,26
	Radius of gyration (r)	m	0,052	0,052	0,072	0,073	0,033	0,036	0,023	0,033
	Specified minimum yield stress (Fy) *	MPa	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
		kN/m ²	250000,00	250000,00	250000,00	250000,00	250000,00	250000,00	250000,00	250000,00
	Effective length factor (k)		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Wall slenderness (λ)		9,60	57,60	18,14	15,43	56,64	38,96	26,82	3,90	
Flexural buckling of members without slender elements										
4.71√(E/Fy)	MPa	133,22	133,22	133,22	133,22	133,22	133,22	133,22	133,22	
Elastic buckling stress (Fe)	MPa	21417,94	594,94	5997,98	8292,21	615,28	1300,16	2744,80	129842,44	
Fy/Fe	MPa	0,01	0,42	0,04	0,03	0,41	0,19	0,09	0,00	
when.... kL/r ≤ 4.71√(E/Fy) >> Critical stress (flexural buckling stresses) : Fcr=[0.658 ^{Fy/Fe}]Fy										
Critical stress (Fcr)	MPa	248,78	209,68	245,68	246,87	210,90	230,67	240,65	249,80	
	kN/m ²	248781,60	209680,00	245676,46	246865,12	210902,41	230668,21	240648,83	249798,61	
Nominal compressive strength >> Pn= FcrAg										
Resistance factor Φc (compressive)		0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
(Pn)	kN	1881,00	1585,36	1741,78	1393,37	383,71	654,35	264,91	382,71	
(ΦcPn)	kN	1692,90	1426,82	1567,60	1254,03	345,34	588,92	238,42	344,44	
Nominal flexure strength >> Mn >> applied to round HSS having D/t ratios: D/t ≤ 0,45E/Fy										
0,448E/Fy		358,40	358,40	358,40	358,40	358,40	358,40	358,40	358,40	
Wall slenderness λ= D/t		11,77	11,77	21,27	26,72	17,82	14,47	15,21	21,17	
Limit states of yielding or plastic moment (Y) - wall slenderness for compression members (table 2.21 - p4 - AISC/2001)										
λp= 0,0448E/Fy (compact section)		35,84	35,84	35,84	35,84	35,84	35,84	35,84	35,84	
Limit states of local buckling (LB) - wall slenderness for compression members (table 2.21 - p4 - AISC/2001)										
λp= 0,0714E/Fy, se λ ≤ λp		57,12	57,12	57,12	57,12	57,12	57,12	57,12	57,12	
λr= 0,309E/Fy, se λ ≤ λr		247,20	247,20	247,20	247,20	247,20	247,20	247,20	247,20	
Nominal flexure strength >> Mn - the lower value obtained according to the limit states of yielding (Y) and local buckling (LB)										
1- (Y) Mn=Mp=FyZ	kNm	85,03	85,03	112,35	91,23	13,12	22,40	5,59	11,25	
2- (LB) non compact sections Mn**	kNm	147,91	147,91	150,39	112,28	18,87	35,33	8,62	15,09	
3- (LB) slender wall sections Mn***	kNm	1366,78	1366,78	1042,83	681,09	143,90	298,28	71,09	104,94	
Resistance factor Φb=0,9		0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
(ΦbMn)	kNm	76,53	76,53	101,12	82,10	11,81	20,16	5,03	10,13	
Required forces and stress (measuar values, according preliminary analysis)										
Required axial strenght (Pr)	kN	-186,26	-197,17	-241,70	-263,58	-187,75	-36,68	-38,550	16,98	
Required flexural strenght (M1)	kNm	-39,21	-40,56	38,62	40,30	-2,15	-15,37	-1,350	14,03	
Required flexural strenght (M2)	kNm	-18,10	-19,31	49,49	34,81	-1,06	0,18	-2,360	-6,00	
Required forces and stress (measuar values, according preliminary analysis)										
Pr/ΦPn.... Φc=0,90 e Φt=0,90		-0,11	-0,14	-0,15	-0,21	-0,54	-0,06	-0,16	0,05	
Pr/2ΦPn.... Φ=0,90 e Φt=0,90		-0,06	-0,07	-0,08	-0,11	-0,27	-0,03	-0,08	0,02	
M1/ ΦbMnx.... Φb=0,9		-0,512	-0,530	0,382	0,491	-0,182	-0,762	-0,268	1,385	
M2/ ΦbMny.... Φb=0,9		-0,237	-0,252	0,489	0,424	-0,090	0,009	-0,469	-0,592	
For Pu/ΦPn ≥ 0.2 (Mnx=Mny)										
Pr/ΦPn + 8/9(M1/ΦbMnx+M2/ΦbMny) ≤ 1		-0,78	-0,83			-0,79		-0,82		
For Pu/ΦPn < 0.2 (Mnx=Mny)										
Pr/2ΦPn + (M1/ΦbMnx+M2/ΦbMny) ≤ 1				0,79	0,81			-0,78	0,82	

(*) Fy - reference (V&M, 2000) except tall mast ; (**) non compact sections Mn=(0.021E/(D/t)+Fy)S; (***) slender wall sections Mn= FcrS=

Fe=π²E/(KL/r)²; Fcr= (0,658 Fy/Fe)Fy;

APÊNDICE G – Informações dos testes experimentais

Teste biaxial 1
cargas (valores de referência)

	tempo [s]	carga aplicada [kN/m]	
		urdidura	trama
	0:00:00	0,1	0,1
00:00:32	0:00:32	3,2	6,4
pré-tensão constante 0:15:00 (900s)	0:15:32	3,2	6,4
3 ciclos: urdidura 0:02:54 (29s x 6= 174s)	0:16:01	9,0	6,4
	0:16:30	3,2	6,4
	0:16:59	9,0	6,4
	0:17:28	3,2	6,4
	0:17:57	9,0	6,4
	0:18:26	3,2	6,4
3 ciclos: trama 0:04:48 (48s x 6= 288s)	0:19:14	3,2	16,0
	0:20:02	3,2	6,4
	0:20:50	3,2	16,0
	0:21:38	3,2	6,4
	0:22:26	3,2	16,0
	0:23:14	3,2	6,4
pré-tensão constante 0:15:00 (900s)	0:38:14	3,2	6,4
3 ciclos: urdidura 0:07:24 (74s x 6= 444s)	0:39:28	18,0	6,4
	0:40:42	3,2	6,4
	0:41:56	18,0	6,4
	0:43:10	3,2	6,4
	0:44:24	18,0	6,4
	0:45:38	3,2	6,4
3 ciclos: trama 0:12:48 (128s x 6= 768s)	0:47:46	3,2	32,0
	0:49:54	3,2	6,4
	0:52:02	3,2	32,0
	0:54:10	3,2	6,4
	0:56:18	3,2	32,0
	0:58:26	3,2	6,4
pré-tensão constante 0:15:00 (900s)	1:13:26	3,2	6,4
	1:13:58	0,0	0,0

Taxa de aplicação da carga: 0,2 (kN/m) /s;
Temperatura do teste: 23 °C

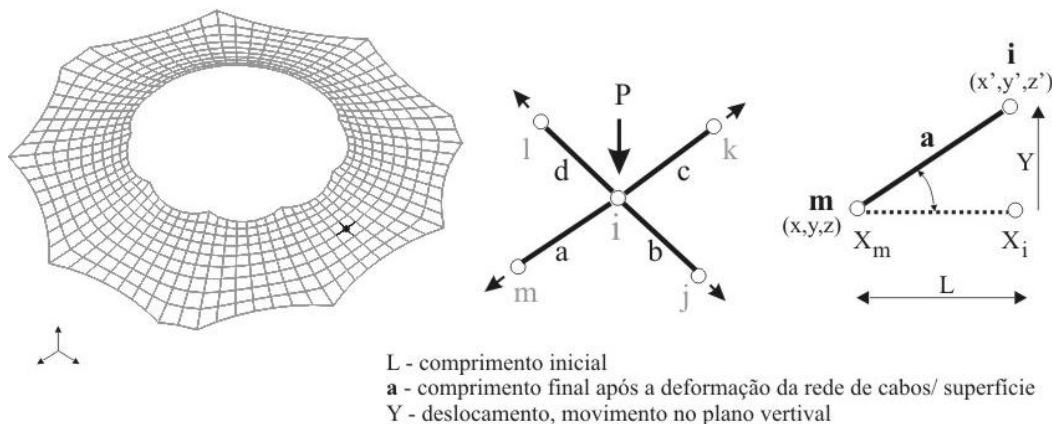
Teste biaxial (união dos painéis)
cargas (valores de referência)

	tempo [s]	carga aplicada [kN/m]	
		urdidura	trama
	00:00:00	0,1	0,1
00:00:32	00:00:32	3,2	6,4
pré-tensão constante 0:15:00 (900s)	00:15:32	3,2	6,4
3 ciclos: trama 0:04:48 (48s x 6= 288s)	00:16:20	3,2	16
	00:17:08	3,2	6,4
	00:17:56	3,2	16
	00:18:44	3,2	6,4
	00:19:32	3,2	16
	00:20:20	3,2	6,4
pré-tensão constante 0:15:00 (900s)	00:35:20	3,2	6,4
3 ciclos: trama 0:12:48 (128s x 6= 768s)	00:37:28	3,2	32
	00:39:36	3,2	6,4
	00:41:44	3,2	32
	00:43:52	3,2	6,4
	00:46:00	3,2	32
	00:48:08	3,2	6,4
pré-tensão constante 0:15:00 (900s)	01:03:08	3,2	6,4
00:00:32	01:03:40	0	0

Taxa de aplicação da carga: 0,2 (kN/m) /s;
Temperatura do teste: 23 °C

ANEXO A – Equações do Método Densidade de Força

Comportamento do elemento de barra como parte da rede de cabos.



Fonte: adaptado de GRÜNDIG et al., 2000, p.4.

Sistema de 'Equações não-lineares', segundo, Gründig (2000):

$$S_a \cos(a, x) + S_b \cos(b, x) + S_c \cos(c, x) + S_d \cos(d, x) = p_x$$

$$S_a \cos(a, y) + S_b \cos(b, y) + S_c \cos(c, y) + S_d \cos(d, y) = p_y$$

$$S_a \cos(a, z) + S_b \cos(b, z) + S_c \cos(c, z) + S_d \cos(d, z) = p_z$$

S_a, S_b, S_c, S_d = forças internas nas barras; p_x, p_y, p_z = forças externas

a, b, c, d = comprimentos não-lineares em função das coordenadas;

$(x_m + x_i)$, = comprimentos de projeção dos cabos (eixo x);

$$\cos(a, x) = \frac{(x_m + x_i)}{a}$$

$$\frac{S_a}{a} (x_m + x_i) + \frac{S_b}{b} (x_j + x_i) + \frac{S_c}{c} (x_k + x_i) + \frac{S_d}{d} (x_l + x_i) = p_x$$

$$\frac{S_a}{a} (y_m + y_i) + \frac{S_b}{b} (y_j + y_i) + \frac{S_c}{c} (y_k + y_i) + \frac{S_d}{d} (y_l + y_i) = p_y$$

$$\frac{S_a}{a} (z_m + z_i) + \frac{S_b}{b} (z_j + z_i) + \frac{S_c}{c} (z_k + z_i) + \frac{S_d}{d} (z_l + z_i) = p_z$$

Definição de um parâmetro constante: Densidade de Força (q):

$$\frac{S_a}{a} = q_a, \text{ ou seja, } q = \frac{\text{força}}{\text{comprimentotensionado}}$$

Substituindo os valores, tem-se um sistema de 'Equações lineares':

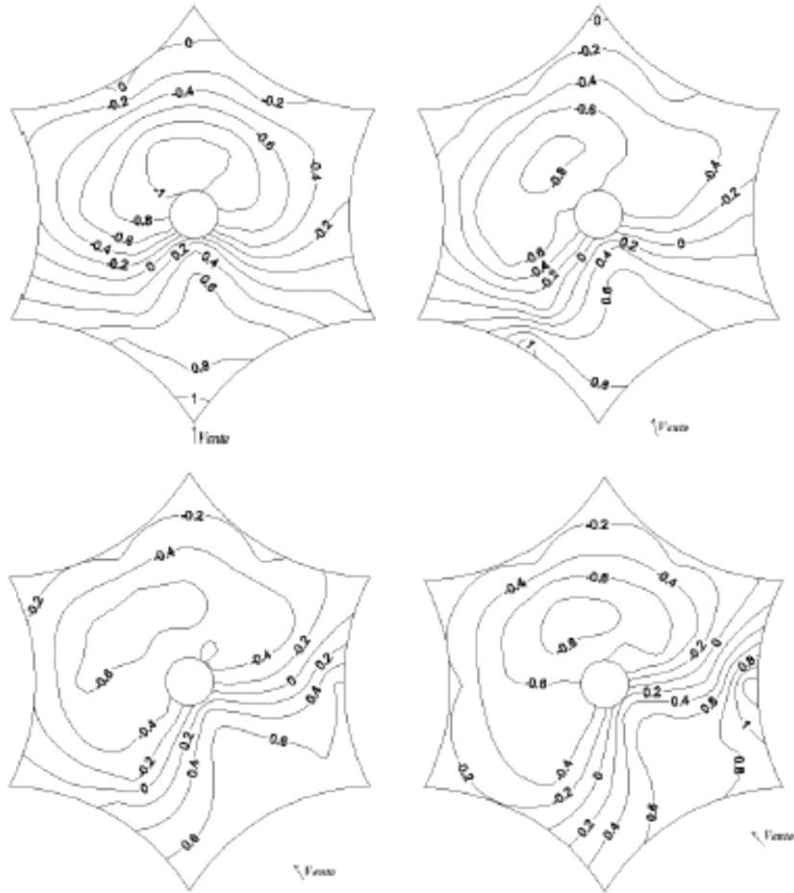
$$q_a (x_m + x_i) + q_b (x_j + x_i) + q_c (x_k + x_i) + q_d (x_l + x_i) = p_x$$

$$q_a (y_m + y_i) + q_b (y_j + y_i) + q_c (y_k + y_i) + q_d (y_l + y_i) = p_y$$

$$q_a (z_m + z_i) + q_b (z_j + z_i) + q_c (z_k + z_i) + q_d (z_l + z_i) = p_z$$

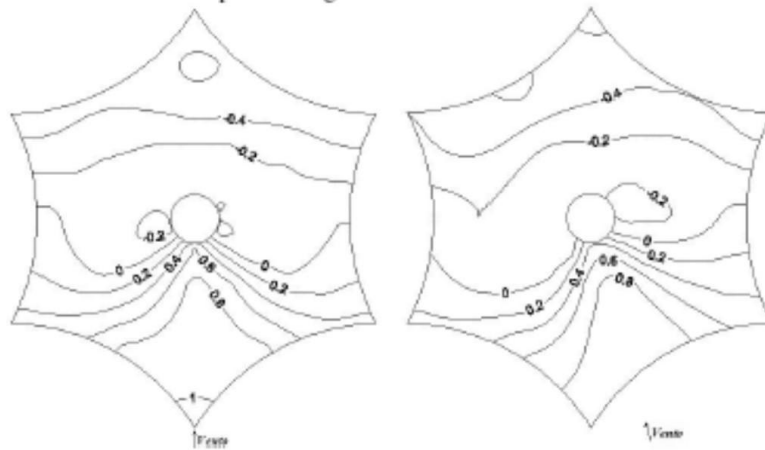
ANEXO B – Linhas isobáricas de C_p , modelos ensaiados

Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (C_p^*) do modelo R215: para os ângulos de incidência do vento de 0° , 15° , 30° e 45° .



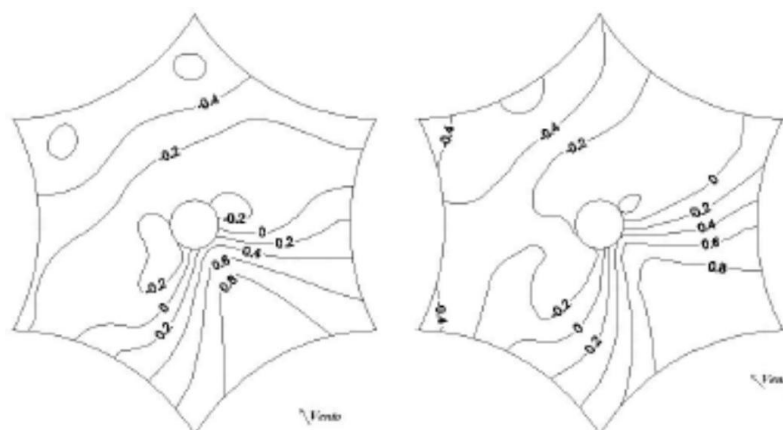
Fonte: VILELA, 2011, p.91.

Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (C_p^*) do modelo R390: para os ângulos de incidência do vento de 0° , 15° .



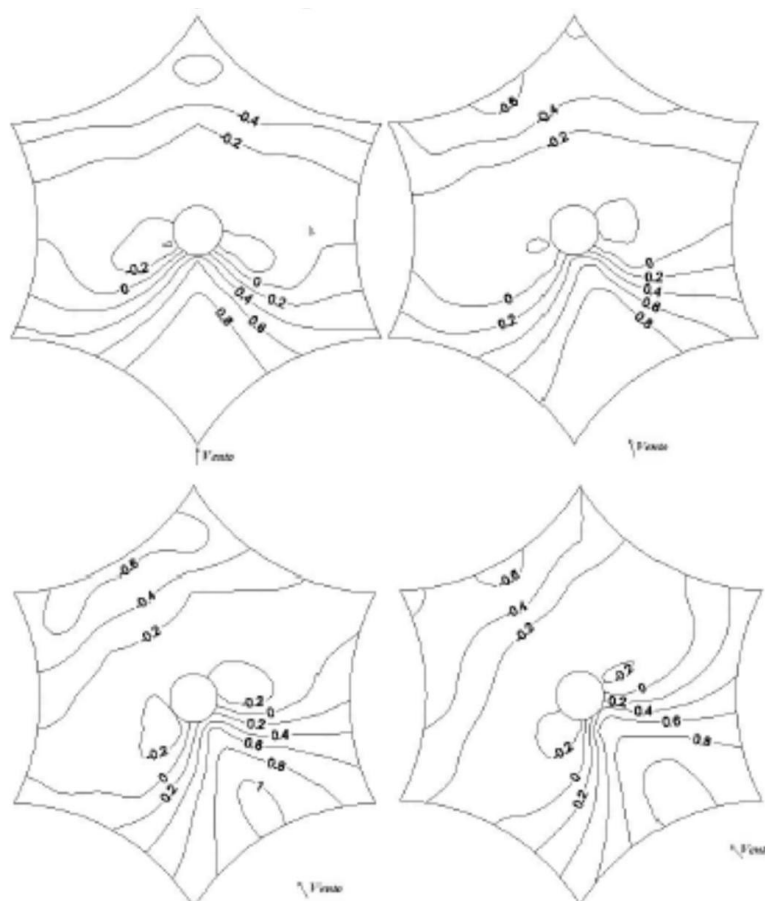
Fonte: VILELA, 2011, p.94.

Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (C_p^*) do modelo R390: para os ângulos de incidência do vento de 30° e 45°.



Fonte: VILELA, 2011, p.94.

Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (C_p^*) do modelo R215: para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°.



Fonte: VILELA, 2011, p.95 e 96.