

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

DANIELA GALIOTTO PADOIN

MODELAGEM NUMÉRICA DE TENSOESTRUTURAS: UM ESTUDO DE CASO

**Alegrete
2015**

DANIELA GALIOTTO PADOIN

MODELAGEM NUMÉRICA DE TENSOESTRUTURAS: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Telmo Egmar Camilo Deifeld

**Alegrete
2015**

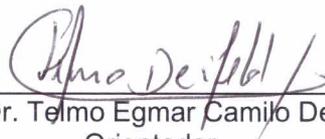
DANIELA GALIOTTO PADOIN

MODELAGEM NUMÉRICA DE TENSOESTRUTURAS: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 23 de janeiro 2015.

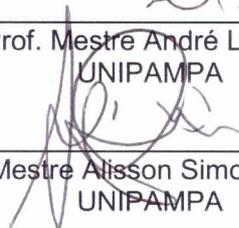
Banca examinadora:



Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Mestre André Lübeck
UNIPAMPA



Prof. Mestre Alisson Simonetti Milani
UNIPAMPA

AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me dado saúde e força para enfrentar cada dificuldade encontrada.

Aos meus pais, Aido e Ivone, por terem me dado a oportunidade desse estudo, pelo amor e incentivo que sempre me deram, e muitas vezes, nem sabendo o que estava acontecendo direito, me diziam que tudo daria certo. Meu irmão Eduardo, pela ajuda pelo incentivo de sempre.

Ao meu orientador Professor Telmo, por toda paciência, dedicação e empenho nesse trabalho, pelo apoio e pelos dias sacrificados para resolver cada problema. Aos demais professores pela contribuição na minha formação.

Agradeço à todos os meus colegas de faculdade, que sempre foram prestativos e me aguentaram nos dias de desespero, me fazendo rir e amenizar os momentos de dificuldade. Obrigada pela parceria sempre!

Aos meus amigos, de perto e de longe, que sempre entenderam minha ausência e que me ajudavam no possível.

Obrigada de coração à cada um de vocês, que contribuíram para que esse sonho se tornar-se realidade!

“Um sonho é apenas um sonho. Um sonho com
plano e prazo determinados é uma meta.”
(Harvey Mackay)

RESUMO

Este trabalho propõe o projeto da busca da forma e análise das tensões de uma cobertura em tensoestruturas para os passeios da UNIPAMPA Campus Alegrete, comparando a busca da forma encontrada numericamente através do uso do método de elementos finitos, com a encontrada experimentalmente por Rafaela Kluge. Para isso, inicialmente, definiu-se o trecho da cobertura a ser utilizado no estudo e, com o auxílio do software ANSYS®, buscou-se por encontrar uma forma equilibrada da membrana que mais se assemelhava a encontrada por Kluge. A partir da busca da forma definida, foi realizada a protensão nos elementos estruturais, para posteriormente, aplicar as pressões do vento, considerando duas direções transversal e longitudinal. Assim, foi possível verificar as tensões geradas na membrana e nos mastros e as forças geradas nos cabos de borda e nos estais. A partir das tensões e forças encontradas, foram definidas as forças atuantes nos elementos de fundação. Os resultados obtidos em termos de tensões principais considerando as duas direções de vento, apresentam valores compatíveis com os de uma estrutura de membrana. Além disso, os valores dos esforços estruturais são da mesma ordem de grandeza, não apresentando alterações significativas nos diferentes elementos estruturais.

Palavras - chaves: tensoestrutura; busca da forma; tensões principais.

ABSTRACT

This work proposes the shape design and stress analysis of the roofing in tensile structure for a footpath at the UNIPAMPA Alegrete campus, comparing the shape found numerically by using the finite element method, with the found experimentally by Rafaela Kluge. Initially, it was defined the roofing part to be used in the study and, with the ANSYS® software, the balanced shape of the membrane that most resembles the one found by Kluge. With the shape defined, the prestressing in the structural elements was done, to subsequently apply the wind pressures, considering two transverse and longitudinal directions. Thus, it was possible to check the stresses generated in the membrane and masts and the forces generated on the cable border and suspender cable. From the stresses and forces found, the forces acting on the foundation elements were defined. The results obtained in the principal stresses considering the two wind directions, show values compatible with a membrane structure. Furthermore, the values of the structural efforts are the same order of magnitude without significant changes in the different structures elements.

Keywords: tensile structure; shape design; principal stress.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tenda negra do Oriente	10
Figura 2 - Concha acústica Sidney Myer, Melbourne, Austrália	11
Figura 3 - Aeroporto de Denver, no Colorado EUA	12
Figura 4 - Pavilhão de São Cristóvão	13
Figura 5 - Igreja Batista Central.....	14
Figura 6 - Estádio Beira Rio- Rio Grande do Sul.....	14
Figura 7 - Estádio Mané Garrincha	15
Figura 8 - Arena da Amazônia em Manaus	15
Figura 9 - Arena Fonte Nova, em Salvador	16
Figura 10 - Classificação das tensoestruturas.....	17
Figura 11 - Fases de projeto de uma estrutura retesada	19
Figura 12 - Modelo de túnel de vento de estrutura de membrana em forma de parabolóide hiperbólico.	22
Figura 13 - Definição de zonas de coeficiente de pressão externa para estrutura de membrana em forma de parabolóide hiperbólico	23
Figura 14 - Isopletas NBR6123:1988	24
Figura 15 - Diferentes tipos de elementos finitos	27
Figura 16 - Graus de liberdade locais do elemento de membrana.....	35
Figura 17 - Graus de liberdade locais do elemento de cabo treliça.....	39
Figura 18 - Geometria Elemento Link8.....	43
Figura 19 - Geometria Elemento Pipe16	44
Figura 20 - Geometria Elemento Shell41	45
Figura 21 - Vista da maquete virtual.....	47
Figura 22 - Sub trecho escolhido para a busca da forma.....	47
Figura 23 - Estrutura inicial.....	48
Figura 24 - Divisão da membrana em áreas	49
Figura 25 - Divisão das áreas em zonas de pressão do vento.....	50
Figura 26 - Malha da membrana na direção transversal	50
Figura 27 - Malha da membrana na direção longitudinal	51
Figura 28 - Elementos dos mastros e estais	52
Figura 29 - Forma inicial e forma encontrada.....	54
Figura 30 - Comparação da forma por maquete física e modelo numérico.....	55

Figura 31 - Primeiras tensões principais de protensão inicial.....	56
Figura 32 - Segundas tensões principais de protensão inicial.....	57
Figura 33 - Forças nos cabos de borda - Protensão	58
Figura 34 - Forças nos estais - Protensão	58
Figura 35 - Tensões nos mastros - Protensão	59
Figura 36 - Primeiras tensões principais membrana – Vento de Sucção	60
Figura 37 - Segundas tensões principais membrana – Vento de Sucção	60
Figura 38 - Forças nos cabos de borda - Vento transversal de sucção	61
Figura 39 - Forças nos estais - Vento transversal de sucção.....	62
Figura 40 - Tensões nos mastros – Vento transversal de sucção.....	62
Figura 41 - Deformada causada pela sucção do vento transversal.....	63
Figura 42 - Primeiras tensões principais membrana – Vento de Sobrepressão.....	64
Figura 43 - Segundas tensões principais membrana – Vento de Sobrepressão.....	64
Figura 44 - Forças nos cabos de borda - Vento transversal de sobrepressão	65
Figura 45 - Forças nos estais - Vento transversal de sobrepressão	66
Figura 46 - Tensões nos mastros – Vento transversal de sobrepressão	66
Figura 47 - Deformada causada pela sobrepressão do vento transversal	67
Figura 48 - Primeiras tensões principais membrana – Vento de Sucção	68
Figura 49 - Segundas tensões principais membrana – Vento de Sucção	68
Figura 50 - Forças nos cabos de borda - Vento longitudinal de sucção.....	69
Figura 51 - Forças nos estais - Vento longitudinal de sucção	70
Figura 52 - Tensões nos mastros – vento longitudinal de sucção.....	70
Figura 53 - Deformada causada pela sucção do vento longitudinal	71
Figura 54 - Primeiras tensões principais membrana – Vento de Sobrepressão.....	72
Figura 55 - Segundas tensões principais membrana – Vento de Sobrepressão.....	72
Figura 56 - Forças nos cabos de borda - Vento longitudinal de sobrepressão	73
Figura 57 - Forças nos estais - Vento longitudinal de sobrepressão.....	74
Figura 58 - Tensões nos mastros– Vento longitudinal de sobrepressão.....	74
Figura 59 - Deformada de sobrepressão.....	75
Figura 60 - Identificação dos mastros	76
Figura 61 - Catálogo Sergio Ferrari.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de C_p para estrutura em forma de parabolóide hiperbólico.....	23
Tabela 2: Valores de pressão do vento C_p positivo.....	26
Tabela 3: Valores de pressão do vento C_p negativo.....	26
Tabela 4: Valores máximos para tensões e forças.....	77
Tabela 5: Forças mastros.....	78
Tabela 6: Forças estais.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	- Área transversal do elemento
B	- Matriz das relações deformação-deslocamento
B_0	- Parcela constante da matriz B
B_1	- Parcela linear da matriz B
C_p	- Coeficiente de pressão
D	- Matriz constitutiva
F	- Vetor de forças externas
F_x	- Vetor de forças na direção x
K_T	- Matriz de rigidez tangente
K_σ	- Matriz das tensões iniciais ou geométrica
L	- Comprimento do elemento
MEF	- Método dos elementos finitos
N_i	- Matriz das funções de interpolação do nó <i>i</i>
N_i	- Matriz das funções de interpolação do nó <i>i</i>
P	- Vetor de forças internas
PTFE	- Politetrafluoretileno (teflon)
PVDF	- Fluoreto de polivinilideno (polímero semicristalino)
PVC	- Policloreto de polivinila (vinil)
R	- Matriz de rotação
T	- Espessura do elemento de membrana
<i>u</i>	- Campo de deslocamentos
${}^n\mathbf{u}$	- Configuração de equilíbrio n
$\delta\mathbf{u}$	- Incremento de deslocamentos

u_i	- Vetor de incógnitas do nó i
u^e	- Campo de deslocamentos no elemento e
U^e	- Vetor de deslocamentos nodais do elemento e
u, v, w	- Componentes do campo de deslocamentos
u_i, v_i, w_i	- Incógnitas nodais
V	- Velocidade do vento
ε	- Tensor de Green
$\delta\varepsilon$	- Incremento de deformação
ε_0	- Parcela linear das deformações
ε_1	- Parcela não-linear das deformações
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	- Componentes do tensor de Green
$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$	- Componentes do tensor de Green
Σ	- Vetor de tensões
$\delta\sigma$	- Vetor de incrementos de tensões
Ψ	- Vetor de resíduo
Ω	- Domínio da estrutura
Ω^e	- Domínio do elemento e
ζ, n, θ	- Matrizes auxiliares
τ	- Matriz de tensões iniciais
Δ	- Área do elemento de membrana
λ_{ix}	- Cosseno do ângulo entre os eixos i e j

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivo Geral	8
1.2 Objetivos Específicos	9
1.3 Justificativa	9
2 REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 Tensoestruturas no Brasil	12
2.2 Principal classificação de tensoestruturas em membrana	16
2.3 Projeto de uma tensoestrutura	17
2.4 Carregamentos em tensoestruturas	19
2.4.1 Pré tensionamento	20
2.4.2 Neve	20
2.4.3 Temperatura	21
2.4.4 Carregamentos sísmicos	21
2.4.5 Cargas de vento	21
2.5 Método dos elementos finitos	26
2.5.1 Elementos finitos utilizados para simular membranas e cabos	27
2.5.2 Obtenção forças internas e da matriz de rigidez tangente	31
2.5.3 Matrizes para elemento de membrana espaciais	34
2.5.4 Matrizes para elemento cabo-treliça	38
2.6 Escolha do software	41
2.6.1 LINK8	42
2.6.2 PIPE16	43
2.6.3 SHELL 41	44
3 METODOLOGIA	46
4 RESULTADOS	47
4.1 Escolha de um trecho	47
4.2 Busca da forma	48
4.2.1 Modelo numérico	48
4.2.2 Propriedades dos materiais	52
4.2.3 Processo de busca da forma	53
4.3 Protensão inicial	55

4.4 Definição de carregamentos provocados pelo vento	59
4.4.1 Direção Transversal	59
4.4.2 Direção Longitudinal.....	67
4.5 Alterações da estrutura	75
4.6 Escolha dos materiais utilizados	76
4.7 Obtenção das forças e tensões máximas	77
4.8 Obtenção das forças atuantes nos elementos de fundação	78
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

Quando se trata de construções, sempre se busca por tecnologia, funcionalidade e segurança. Segundo Pasqual (2011), além desses fatores, a otimização de materiais e a arquitetura diferenciada são elementos que fazem muita diferença e que, cada vez mais, estão se tornando essenciais no campo da construção civil.

Nesse contexto, inserem-se as tensoestruturas, que são estruturas definidas como sistemas flexíveis, as quais sofrem mudanças consideráveis de sua forma, quando o carregamento ao qual estão submetidas é modificado, agindo de forma inversa às estruturas rígidas, que quando se aplica algum carregamento, a mesma sofre uma pequena alteração de forma, ficando muito próxima da original. O funcionamento das tensoestruturas é garantido pelo estado de retesamento que ocorre nesse tipo de estrutura e pela definição da sua geometria (PAULETTI, 2003).

Segundo Pauletti (2003), esse tipo de estrutura possui a característica de geralmente ser leve (pois a carga suportada é muito maior do que o próprio peso). Com isso, o peso específico diminui, tornando possível o aumento do vão livre da estrutura, bem como, a redução dos esforços por ela suportados e cargas de fundações, porém, no entanto, outros fatores passam a exigir maiores cuidados em relação a sua análise, dentre outros, o pré-tensionamento e os carregamentos devidos ao vento (OLIVEIRA, 2003).

O uso de tensoestruturas já é antigo, foi iniciado pelos povos nômades, na construção de suas tendas. E, na atualidade, seu uso está sendo incorporado à cobertura de grandes estruturas, como pavilhões, ginásios, igrejas, dentre outros que serão descritos no decorrer do trabalho. Porém, ainda se encontram algumas dificuldades para que seu uso seja mais efetivo, principalmente no Brasil, como a falta de profissionais especializados e o preço alto das membranas.

1.1 Objetivo Geral

Dar continuidade ao trabalho “Tensoestruturas: uma proposta para os passeios da UNIPAMPA – Campus Alegrete”, desenvolvido por Rafaela Kluge, analisando carregamentos a serem considerados e os seus efeitos nas tensões

geradas em uma cobertura de membrana projetada. Esta análise será feita por modelagem em software baseado em elementos finitos.

1.2 Objetivos Específicos

- Encontrar, numericamente, uma forma equilibrada para a estrutura, comparando-a com a forma obtida de forma experimental;
- Definição de carregamentos provocados pelo vento;
- Pré-dimensionamento dos elementos estruturais;
- Cálculo de tensões na membrana e nos cabos de borda, nos estais e nos mastros;
- Cálculo das forças nos elementos de fundação.

1.3 Justificativa

A exposição dos alunos ao sol ou chuva por não se ter uma cobertura que sirva de abrigo nos passeios que ligam os prédios da UNIPAMPA, torna-se um problema que é ainda maior com a expansão da Universidade. Além disso, o uso de membranas como cobertura e estrutura ainda não é muito difundido e conhecido na região. Por esse fator, entendeu-se que a realização dessa cobertura em membrana além de servir de abrigo aos alunos e demais usuários do Campus, ainda apresentaria ao meio acadêmico, bem como a comunidade regional essa tecnologia que traz diversos benefícios. Desta forma, dar continuidade ao trabalho proposto anteriormente é de suma importância para a consolidação deste tipo de estruturas na região.

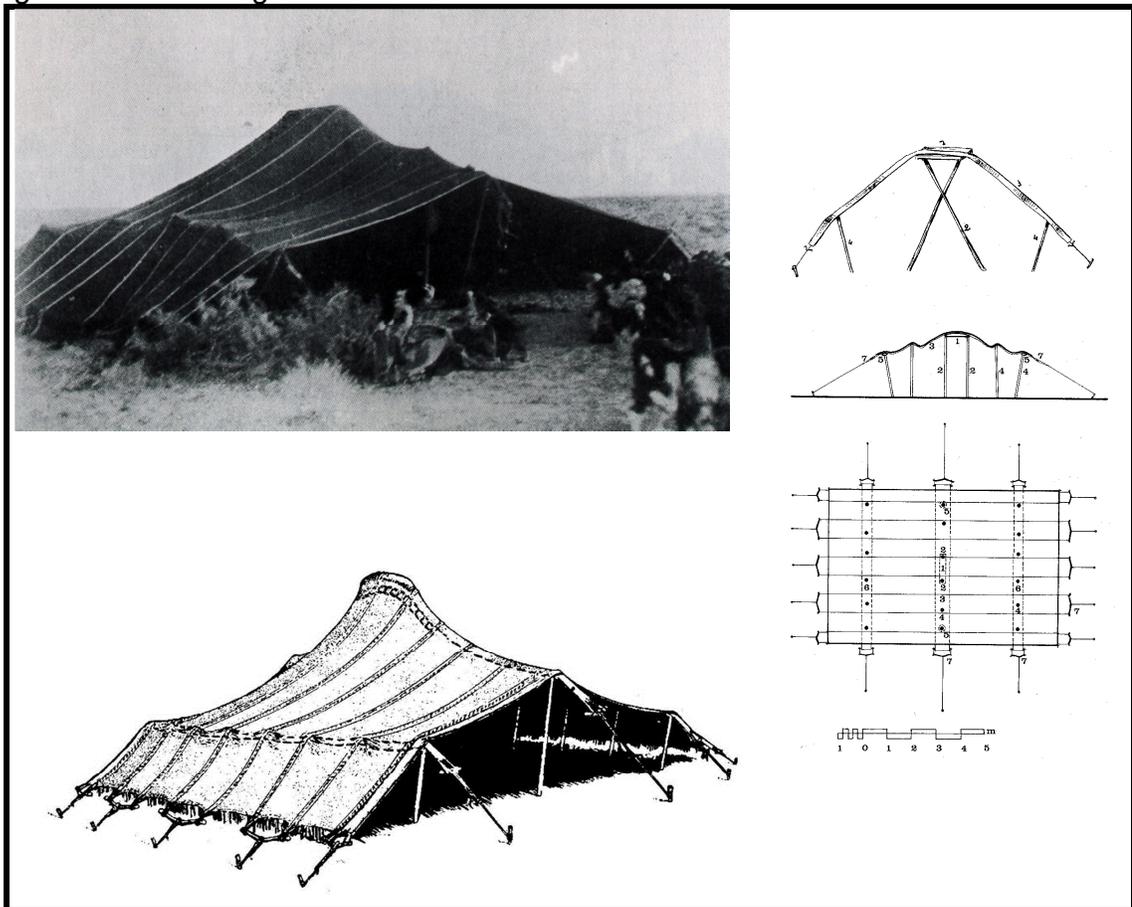
Pode-se afirmar que ainda há um número muito reduzido de engenheiros que possuem experiência com esse tipo de estrutura, tanto no que diz respeito ao projeto, quanto à fabricação e a montagem. E esse fator, incentiva o estudo e conhecimento da área.

Outro fator, é que o dimensionamento de tensoestruturas quando é realizado de forma numérica possui muito mais segurança. Desta forma, com a análise elaborada neste TCC, será apresentado método de dimensionamento destas estruturas, contribuindo, assim, para a difusão do conhecimento das mesmas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A forma mais antiga de estruturas retesadas que se tem conhecimento são as tendas utilizadas como moradias nos primórdios da civilização e eram construídas com as técnicas disponíveis naquele tempo. Conforme Salvadori (2006), a estrutura tinha capacidade de desempenhar a sua função principal, que era de cobertura e abrigo. Porém o vento era um forte inimigo, e por este fator, as tendas precisavam de cabos fixados no solo, que deixassem o tecido o mais esticado possível, no seu estado de tensão. Uma das tendas que se destaca por mais se aproximar da forma e do funcionamento estrutural das atuais membranas é a tenda negra do Oriente Médio, apresentada na Figura 1, cuja rigidez é garantida pela protensão do tecido utilizado em sua cobertura (PAULETTI, 2003).

Figura 1 - Tenda negra do Oriente

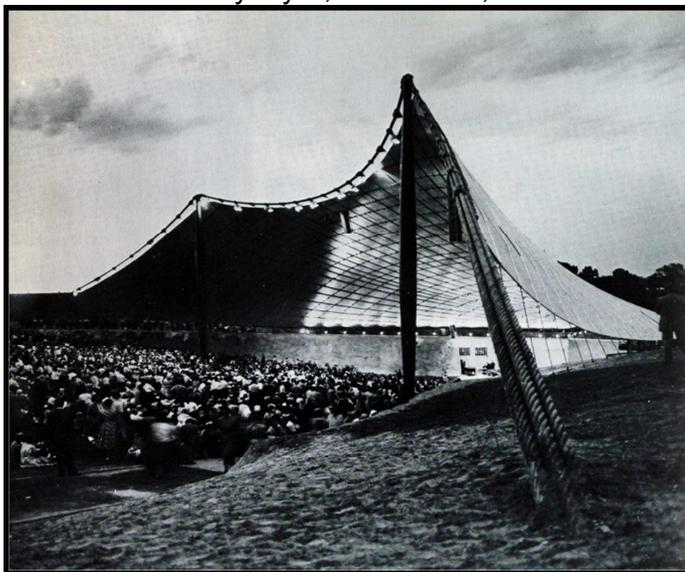


Fonte: Pauletti (2003, p.9)

No início de sua utilização, como os materiais ainda não apresentavam a durabilidade necessária para que seu uso fosse permanente, as estruturas realizadas eram apenas temporárias. Porém, com os avanços tecnológicos e com a substituição da pele por tecidos, a durabilidade aumentou consideravelmente, sendo que atualmente é possível encontrar membranas com mais de 30 anos de uso e em bom estado, como é o caso do Terminal de Passageiros de *Jeddah*, concluído em 1981 (OLIVEIRA, 2003) e que ainda possui sua estrutura para uso.

Um das primeiras obras desta, que podemos chamar de fase moderna das tensoestruturas, é a concha acústica de Melbourne (Figura 2), construída na Austrália, finalizada em 1958. Projetada por Frei Otto, a estrutura foi um marco em estruturas de rede de cabos. Sua forma é anticlástica, apresentando borda livre. Na sequência, outras tensoestruturas foram surgindo e se tornando importantes, como o Estádio de Hockey da Universidade Yale– Estados Unidos da América, em 1958 e os estádios de Kenzo Tange em 1964 – construídos para as Olimpíadas de Tóquio de 1964 (SALVADORI, 2006).

Figura 2 - Concha acústica Sidney Myer, Melbourne, Austrália



Fonte: Pauletti (2003, p.16)

Outra obra marcante e mais atual no mundo das tensoestruturas, e neste caso uma membrana, é o aeroporto de Denver, no Colorado, EUA. Projetada por Horst Berger, possui uma cobertura de membrana de 140.000 m². Com a finalidade de se obter um bom isolamento térmico e acústico, foi construída uma cobertura de

duas camadas de fibra de vidros recobertas por Teflon, as quais distam 60 cm uma da outra. A mesma é mostrada na Figura 3 (PAULETTI, 2003).

Figura 3 - Aeroporto de Denver, no Colorado EUA



Fonte: Figuerola (2013, não paginado)

São muitos os fatores que influenciaram e incentivaram o uso de tensoestruturas no mundo todo. Nesse sentido, citam-se os avanços tecnológicos que, com base na modelagem numérica computacional, possibilitam a análise de estruturas que exigem cálculos mais complexos; a forma arquitetônica diferenciada; a facilidade de montagem; bem como, a melhoria dos tecidos no quesito qualidade, os quais se tornaram mais resistentes e com capacidade para serem empregados em estruturas tanto de pequeno, médio ou grande porte. A diversificação do uso das membranas é tal que hoje é utilizada em estruturas de aeroportos, estádios, grandes espaços públicos, dentre outros (OLIVEIRA, 2003).

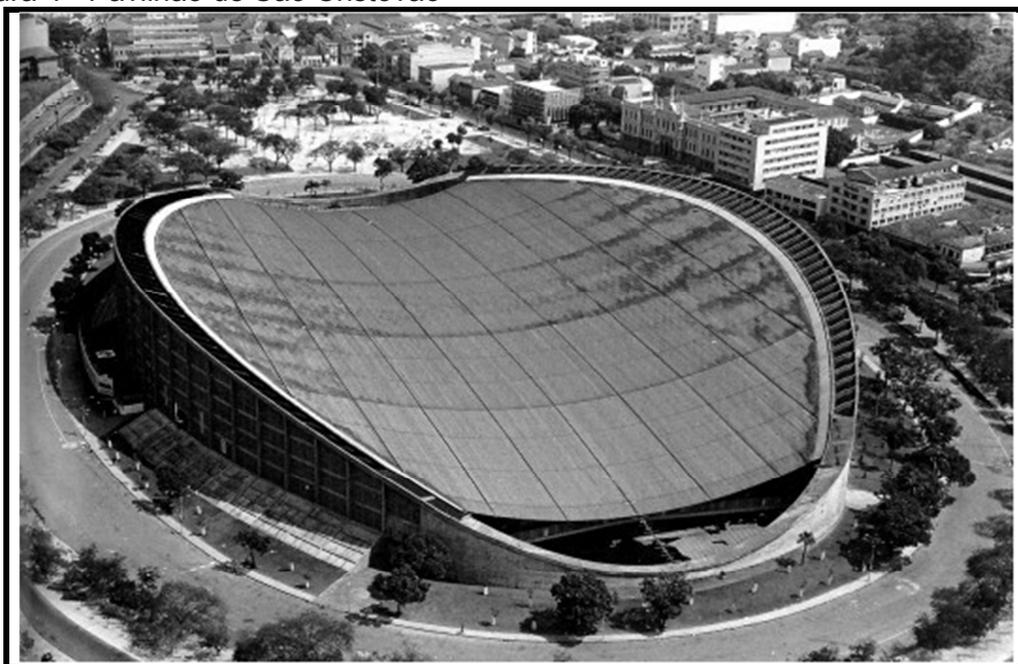
2.1 Tensoestruturas no Brasil

A utilização de tensoestruturas de cabos no Brasil teve como obras marcantes a execução da cobertura do Pavilhão de Exposições do Rio Grande do Sul, em São Paulo, no ano de 1954, projetada por A. Borges e R.C. Alliana e a cobertura do pavilhão de São Cristóvão, em 1960, no Rio de Janeiro, projetada pelo arquiteto Sergio W. Bernardes e pelo engenheiro Paulo R. Fragoso.

Segundo Oliveira (2003), na época essas estruturas de cobertura estavam entre as maiores tensoestruturas formadas por malhas de cabos no mundo. A cobertura de São Cristóvão é constituída por uma malha de cabos, a qual define a

forma da cobertura como um hiperboloide parabólico e se ancora numa estrutura de concreto armado, conforme pode-se ver na Figura 4.

Figura 4 - Pavilhão de São Cristóvão



Fonte: Bastos (2011, não paginado)

Mais recentemente em 2002 foi executada a cobertura da Igreja Batista Central, em Fortaleza, esta apresentada na Figura 5. Essa é uma das maiores tensoestruturas do país, sendo que no seu dimensionamento fez-se uso de métodos computacionais. Foi a primeira vez que, no Brasil, utilizaram-se tais métodos para o cálculo estrutural na realização de uma estrutura em membrana.

A Igreja Batista Central foi projetada por Nasser Issa Arquitetos Associados e executada por Formato Coberturas Especiais Ltda, sendo o cálculo estrutural realizado pelo Prof. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti. A membrana utilizada foi importada da Alemanha e possui acabamento em PVDF e superfície PVC (PORTAL METÁLICA, 2014a).

Figura 5 - Igreja Batista Central



Fonte: Portal Metálica (2014, não paginado)

No Brasil, as estruturas em membranas aparecem em destaque nas obras relacionadas com Copa do Mundo de 2014. São obras de caráter permanente ou mesmo temporário. Seguem alguns exemplos de obras permanentes, utilizadas na cobertura de estádios, como mostradas nas Figuras 6, 7, 8 e 9.

Figura 6 - Estádio Beira Rio- Rio Grande do Sul



Fonte: Estádio Esportes (2011, não paginado); Central Brasileiro (2014, não paginado)

Na Figura 6 observa-se o Estádio Beira-Rio, em Porto Alegre – RS, com cobertura constituída de Politetrafluoretileno, um material sintético que, nos seus módulos principais, é opaco, porém, entre as folhas é translúcido, o que permite a iluminação interna no estádio (INTERNACIONAL, 2014).

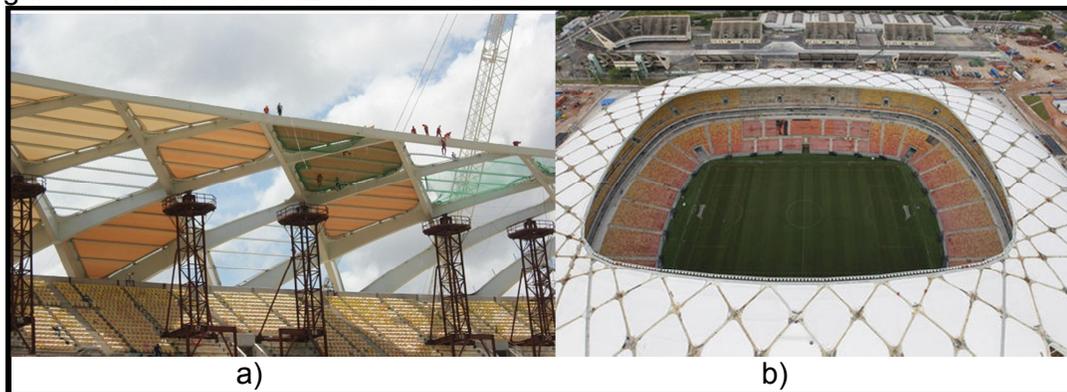
Figura 7 - Estádio Mané Garrincha



Fonte: Esporte (2012, não paginado); News Rondônia (2013, não paginado)

O Estádio Nacional Mané Garrincha, em Brasília - DF, ilustrado na Figura 7, conta com cobertura de membrana sendo dividida em duas partes: uma superior e outra inferior, como uma espécie de forro. A cobertura cobre os 71 mil assentos do estádio (PORTAL, 2014).

Figura 8 - Arena da Amazônia em Manaus

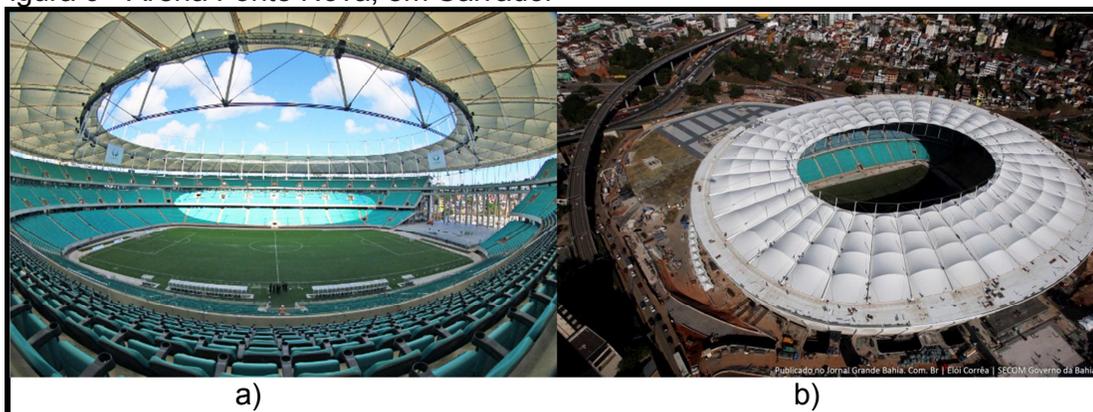


Fonte: Globo Esportes (2013, não paginado); Acrítica (2014, não paginado)

Na Figura 8 é apresentada a Arena da Amazônia, construída em Manaus – AM com cobertura de membrana constituída de fibra de vidro revestida de teflon (PTFE). O material possui uma cor mais escura durante a instalação, mas como é

uma medida de segurança adotada, irá clarear com a incidência dos raios solares (COPA, 2014).

Figura 9 - Arena Fonte Nova, em Salvador



Fonte: Bem Paraná (2013, não paginado); Jornal Grande Bahia (2013, não paginado)

Tem-se, na Figura 9, ilustrada a Arena Fonte Nova, em Salvador - BA, projetada para abrigar 50 mil torcedores. Toda a sua cobertura é estruturada com cabos tracionados e mastros volantes (estrutura *tensegrity*), sendo coberta com membrana impermeável (INFRAESTRUTURA URBANA, 2014b).

Cabe destacar, conforme Oliveira (2003), que há muitos fatores que ainda dificultam a utilização desse tipo de estrutura no Brasil, como por exemplo, o custo elevado dos tecidos importados, pois estes são de melhor qualidade e garantem maior durabilidade e melhor resistência ao fogo. Outro fator que retarda o avanço do uso dessas estruturas no país é o número reduzido de engenheiros que possuem experiência com esse tipo de obra, tanto no que diz respeito ao projeto, quanto à fabricação e a montagem.

Além disso, para que os projetos de membranas sejam realizados e atuem a contento, é preciso ter conhecimento de softwares específicos, e esses ainda não são desenvolvidos no país, o que dificulta também para que os projetistas brasileiros tenham a capacidade de idealizar uma tensoestrutura têxtil e analisar o desempenho final, após a montagem e o retesamento (OLIVEIRA, 2003).

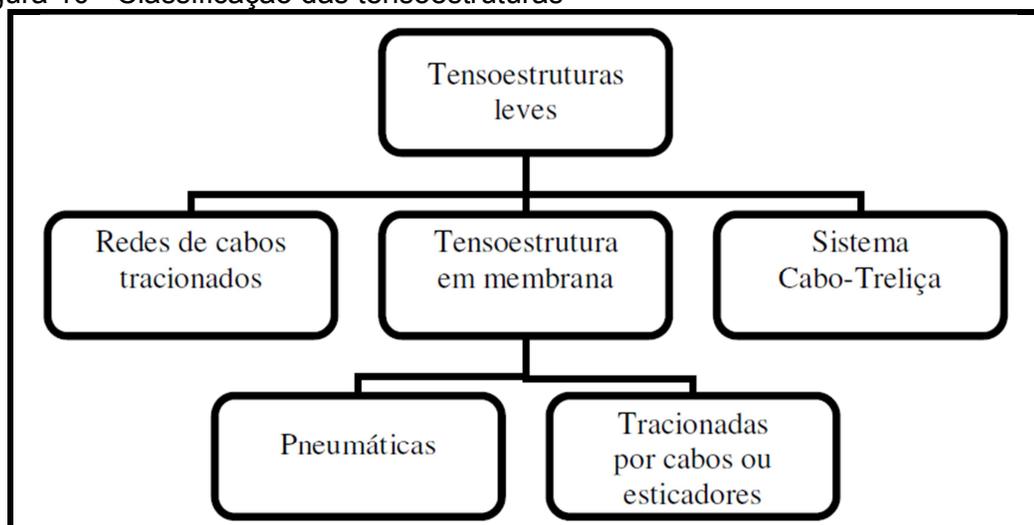
2.2 Principal classificação de tensoestruturas em membrana

Conforme Vilela (2011, p. 9) “a membrana estrutural é o principal elemento que distingue as tensoestruturas em membrana das demais”.

E para que essas estruturas atuem como o desejado, elas necessitam ser projetadas corretamente, considerando que a estrutura precisa se manter sob estado de tensão de tração, mesmo que não esteja atuando nenhum carregamento externo no momento. Esse estado, conhecido como retesamento é um ponto muito importante no caso das membranas, é o que definirá a forma da estrutura, sua durabilidade e a forma como irão se comportar os deslocamentos quando se admitir uma carga (rigidez) (Haber e Abel, 1982 *apud* Vilela, 2011).

Os cabos tensores e pressão do ar são os principais elementos do pré-tensionamento das membranas. As tensoestruturas são classificadas dependendo de qual desses dois elementos está causando o retesamento. Na Figura 10 são apresentadas as principais classificações (VILELA, 2011).

Figura 10 - Classificação das tensoestruturas



Fonte: Vilela (2011, p.10)

2.3 Projeto de uma tensoestrutura

As tensoestruturas, como já citado, são estruturas leves, que necessitam de retesamento para que tenham o comportamento desejado. É possível nesse tipo de estrutura arbitrar o campo de tensões e, é a partir desse fator, que se buscam a forma ideal e a rigidez ideal (PAULETTI, 2003).

A variabilidade de soluções é uma das características de estruturas retesadas, que incorporadas ao comportamento geométrico diferenciado, e a não linearidade do material, dificultam o seu dimensionamento. Assim, torna-se quase

obrigatório o uso de métodos numéricos para realização das análises (PAULETTI, 2003).

A análise de uma tensoestrutura é dividida em etapas, que são: a busca da forma, a determinação dos padrões de corte e a análise da resposta dos carregamentos.

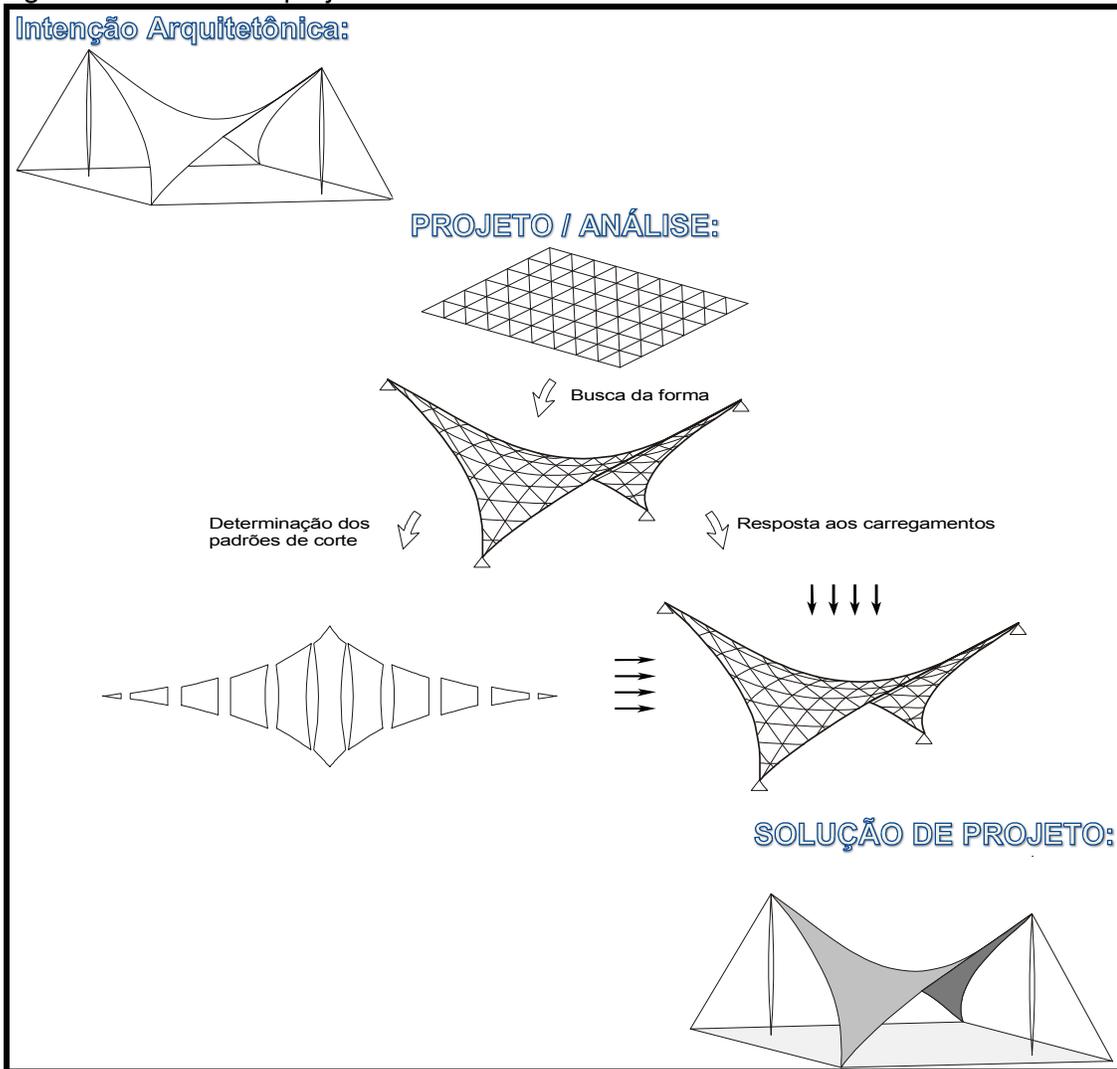
- **Busca da forma:** Consiste na determinação inicial da forma da estrutura retesada, quando se trabalha com o estado de solicitações e a geometria da mesma, a fim de se obter um estado de equilíbrio. Além disso, essa forma escolhida, precisa também suportar os carregamentos solicitados, garantindo a estabilidade, bem como adequar os requisitos arquitetônicos (PAULETTI, 2003).

- **Determinação dos padrões de corte:** Após a definição da forma, segue-se para a determinação dos padrões de corte, que consiste em identificar as linhas de corte na superfície escolhida. Desta forma a superfície inicial é desdobrada e definem-se várias peças planas, para então, poder ser fabricada (PASQUAL, 2011).

- **Análise dos carregamentos:** Etapa na qual, são analisados o retesamento e os demais carregamentos que a estrutura de membrana estará sujeita em seus estados de serviço e limite último. Pois, por ser uma estrutura com pouca rigidez, pode sofrer grandes deformações e variações geométricas, decorrentes até mesmo de pequenos carregamentos. Ou seja, esse tipo de estrutura acaba por demonstrar através de deflexões o carregamento sofrido (PAULETTI, 2003).

De forma mais simplificada essas fases são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 - Fases de projeto de uma estrutura retesada



Fonte: Pauletti, (2003, p.168)

2.4 Carregamentos em tensoestruturas

Para se iniciar a análise das tensoestruturas é preciso ter conhecimentos dos carregamentos que a mesma está submetida. O primeiro carregamento a ser considerado é o retesamento. O peso próprio é uma das cargas existentes, porém, como são estruturas leves, esse valor geralmente é desprezado. Portanto as cargas básicas de projeto analisadas são os carregamentos externos. Quando se aplica uma força externa, gera-se uma deflexão na estrutura de membrana, alterando a forma e o raio de curvatura. E a tensão em uma direção principal irá resistir à carga aplicada, enquanto a tensão na direção perpendicular irá ajudar a estrutura a se manter estável (VILELA, 2011).

As tensões geradas precisam ser analisadas corretamente, para que não surjam enrugamentos na membrana. Caso ocorra algum problema, a solução é aumentar ou diminuir a protensão aplicada nos cabos de borda, ou ainda, alterar o tipo de membrana utilizada, visando modificar as características (VILELA, 2011).

2.4.1 Pré tensionamento

É um campo interno de tensões imposto à estrutura, aplicado ao final da montagem. Sua aplicação afeta todos os elementos da estrutura, justamente pelo fato de que essa força de tração precisa garantir que a forma e a rigidez desejadas e pré-definidas em projeto sejam atingidas (VILELA, 2011).

O pré-tensionamento garantirá que nenhum carregamento que venha a surgir cause enrugamento na membrana. Os valores máximos admissíveis para pré-tensionamento, ficam limitados pela resistência da membrana empregada na cobertura. Para os tipos em PVC, admitem-se valores máximos de até 5% e mínimos entre 1,3 a 1,5% da sua tensão de ruptura. Na classe PTFE o intervalo é de 2,5% a 6% (VILELA, 2011).

2.4.2 Neve

Segundo Vilela (2011, p. 29) “a carga de neve deve ser obtida de normas. Para estruturas de grandes vãos é recomendado que a carga mínima de neve seja obtida de dados disponíveis nos escritórios locais de meteorologia.”

Porém, em áreas que não há ocorrência de neve no inverno, poderá ser utilizada uma carga nominal uniformemente, distribuída de 0,3 kN/m². Sendo que esse valor ainda pode se alterar a depender do vão da estrutura. Se o vão for superior a 50 m se exige uma busca mais aprofundada, considerando pontos específicos (VILELA, 2011).

2.4.3 Temperatura

Quando se trabalha com tensoestruturas o carregamento proveniente da temperatura não é tão significativo quanto em estruturas rígidas, pois a mesma não apresenta variação relevante em níveis de pré-tracionamento (VILELA, 2011).

2.4.4 Carregamentos sísmicos

Pelo fato das membranas possuírem baixo peso próprio e somado ao fato de serem estruturas flexíveis, os carregamentos sísmicos não são considerados problema. Apenas deve-se ter cuidado quando se tem elementos de grande massa presentes na estrutura, pois nesse caso as tensoestruturas estarão sujeitas as acelerações provocadas por sismos (VILELA, 2011).

2.4.5 Cargas de vento

Um dos principais problemas em estruturas retesadas é a ação do carregamento devido ao vento, a qual normalmente será de sucção, decorrente do formato desse tipo de estrutura. Seu estudo é complexo, e exige cuidado. Segundo Pasqual (2011, p.30) “As pressões de vento em uma superfície arbitrária são em geral dadas por expressões do tipo $P = 1/2 C_p \rho V^2$, onde ρ é a densidade, V é a velocidade do vento e C_p é um coeficiente de pressão”, sendo que todos esses valores variam, dependendo da direção de atuação do vento, bem como a geometria da superfície que recebe o carregamento.

Esses valores de coeficiente de pressão podem ser gerados tanto por modelos numéricos, como por ensaios, por exemplo, em túnel de vento (VILELA, 2011).

Também, segundo a NBR 6123:1988, os coeficientes de pressão interna e externa, são divididos em dois, se possui valor positivo, se tem sobrepressões, ou seja, significa que existe uma pressão efetiva com o sentido de uma sobrepressão externa. Já, se os valores são negativos, se tem sucção, o que significa que existe uma pressão efetiva com o sentido de sucção externa.

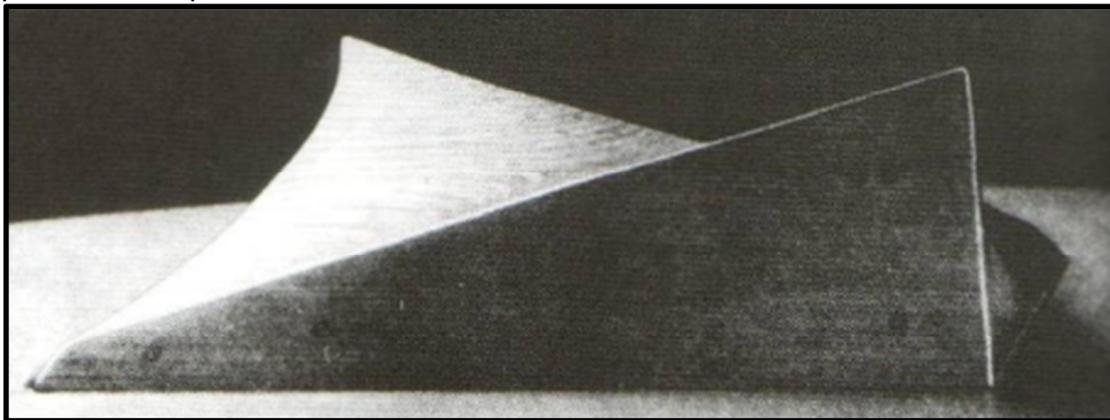
Esses valores dos coeficientes são difíceis de encontrar quando a sua aplicação é em tensoestruturas, as bibliografias são poucas e vagas, ou ainda,

apenas apresentam valores para estruturas convencionais, com formas mais específicas (VILELA, 2011).

O que é considerado como formas simples em tensoestruturas são paraboloides hiperbólicos e cones. E os coeficientes para esses tipos de formatos, foram apresentados por Forster e Mollaert (2004) e Buschholdt (1998) que trabalharam com estudos para coberturas em forma de paraboloides hiperbólicos; e Forster e Mollaert (2004) que estudou as formas cônicas. (Forster e Mollaert, 2004 *apud* Vilela, 2011).

Assim, para se trabalhar com estruturas que possuem pontos altos e baixos, como é o caso do presente trabalho, utilizou-se os valores de coeficientes encontrados por Forster e Mollaert (2004), os quais foram obtidos com ensaios de túnel de vento gerando o modelo da estrutura apresentada na Figura 12. (Forster e Mollaert, 2004 *apud* Vilela, 2011).

Figura 12 - Modelo de túnel de vento de estrutura de membrana em forma de paraboloides hiperbólicos.

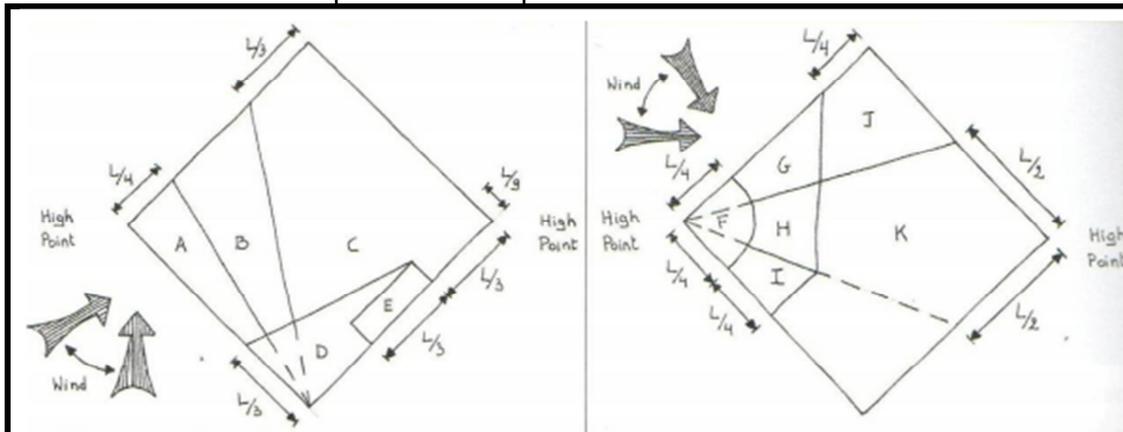


Fonte: (Forster e Mollaert, 2004 *apud* Vilela, 2011)

Os coeficientes encontrados por este ensaio dependem da direção do vento que está atuando na estrutura, bem como a geometria da mesma e da interação entre ambos. A depender disso, a estrutura é dividida em áreas para nelas serem aplicados os coeficientes.

Essas zonas seguem a divisão apresentada na Figura 13 e os valores referentes a cada zona, são apresentados na Tabela 1.

Figura 13 - Definição de zonas de coeficiente de pressão externa para estrutura de membrana em forma de parabolóide hiperbólico



Fonte: (Forster e Mollaert, 2004 *apud* Vilela, 2011)

Tabela 1: Valores de C_p para estrutura em forma de parabolóide hiperbólico

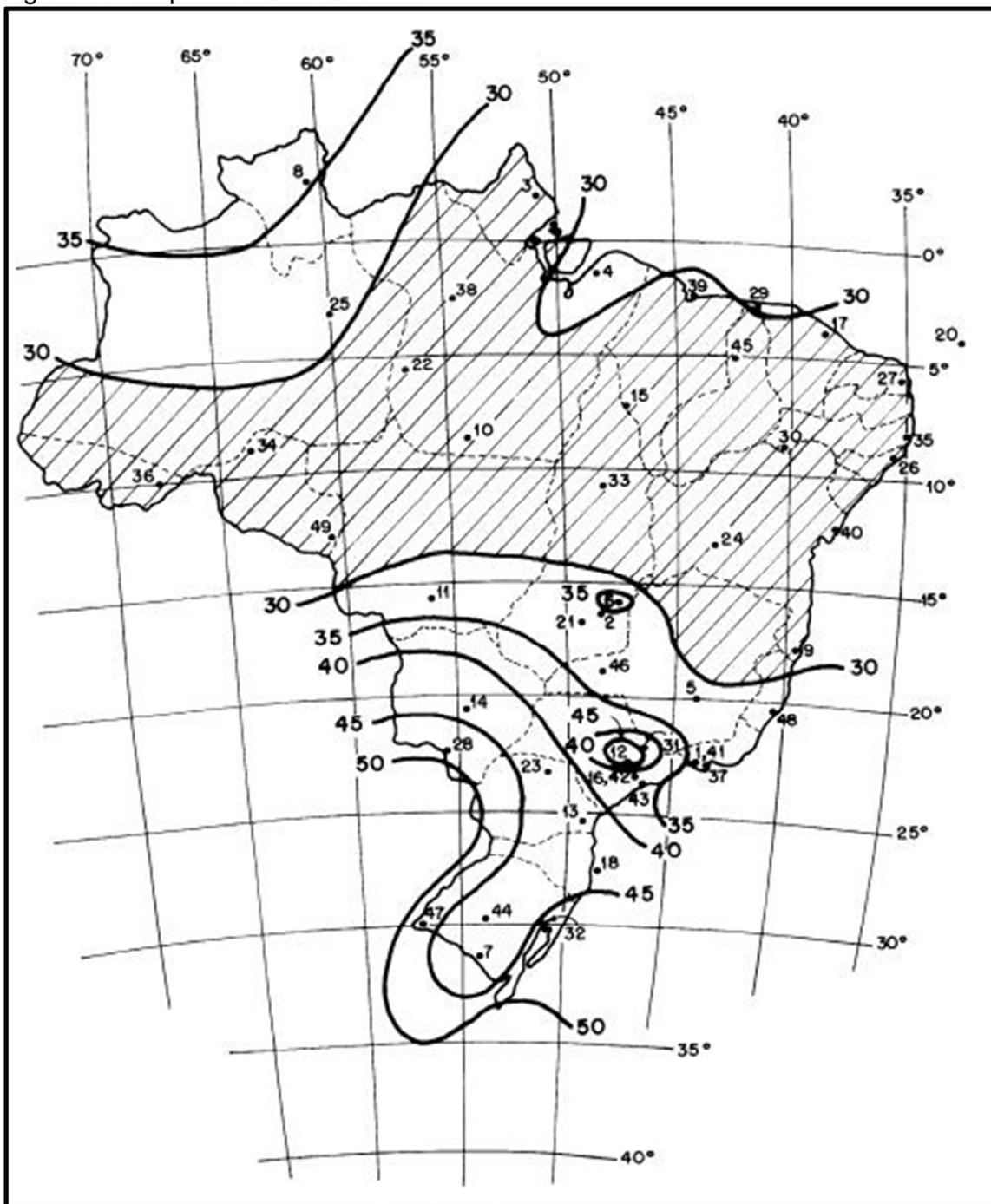
Valores de C_{pe}	Zonas										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Positivo	0,0	0,0	0,3	0,3	0,3	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2
Negativo	-1,45	-0,90	-0,65	-0,70	-1,20	-1,80	-1,20	-0,90	-1,20	-0,65	-0,65

Fonte: (Forster e Mollaert, 2004 *apud* Vilela, 2011)

Já para a densidade do vento (ρ) foi utilizado um valor de $1,23 \text{ kg/m}^3$, conforme é citado por PASQUAL (2011). E a velocidade do vento é dada pela NBR 6123:1988, que define que a velocidade de vento, é composto pôr: $V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3$

Onde, V_0 , conforme cita a NBR 6123:1988 é: “A velocidade básica do vento, V_0 , é a velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano”, sendo essas, apresentados a partir das isopletras, conforme Figura 14.

Figura 14 - Isopletas NBR6123:1988



Fonte: NBR6123:1988 (p.6)

A velocidade para a região da cidade de Alegrete - RS, onde está sendo projetada essa estrutura, conforme apresenta a Figura 14, é de 47m/s.

Já S_1 é dividido em dois, em terreno plano ou fracamente acidentado e em taludes e morros. Sendo que é um fator topográfico, o qual considera o relevo do

terreno. No caso, para terrenos planos ou fracamente acidentados que é o caso desse projeto, se considera $S_1 = 1,0$.

No que tange a rugosidade do terreno e as dimensões da edificação, é utilizado o S_2 , no qual primeiramente, se analisa a rugosidade, que segundo a NBR 6123:1988 é dividida em 5 categorias.

Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão.

Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados.

Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sedes e muros, edificações baixas e esparsas.

Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizados.

Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.

Após, para esse mesmo parâmetro, se analisa a altura da edificação, a qual é dividida em 3 Classes.

Classe A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.

Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.

Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Para obter, o parâmetro S_2 , tem-se: $S_2 = bF_r \left(\frac{z}{10}\right)^p$

Onde, os valores de b , F_r e p , são retirados da Tabela 1 da NBR 6123:1988.

O ultimo parâmetro a ser considerado segundo a NBR 6123:1988 é o S_3 , que depende do grau de segurança e da vida útil da estrutura, os valores correspondentes, é fornecido pela Tabela 3 da referida Norma.

Utilizando esses parâmetros citados, foi calculada a velocidade do vento a ser utilizada, bem como os coeficientes para cada zona definida anteriormente, assim, foram aplicados para as pressões positivas os valores apresentados na Tabela

2, e para os negativos os valores apresentados na Tabela 3. Todos os valores estão dados em kN/m².

Tabela 2: Valores de pressão do vento - C_p positivo

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
0,00	0,00	0,82	0,82	0,82	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,54

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3: Valores de pressão do vento - C_p negativo

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
-3,94	-2,45	-1,77	-1,90	-3,26	-4,89	-3,26	-2,45	-3,26	-1,77	-1,77

Fonte: Elaboração própria

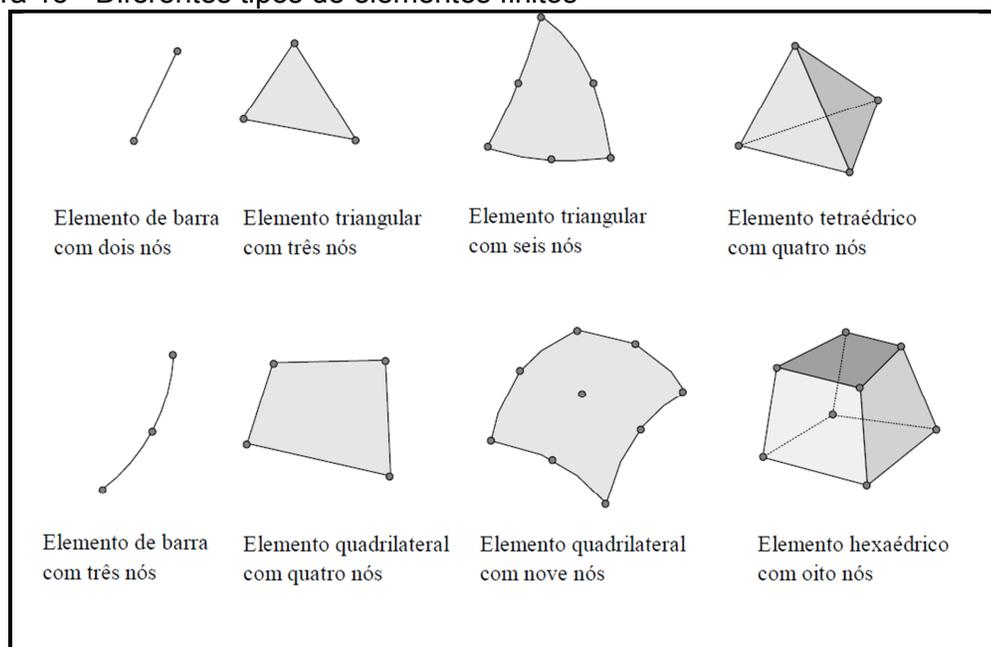
2.5 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) foi inicialmente estudado a fim de solucionar problemas da área de resistência dos materiais, com enfoque na determinação de deslocamentos de grandes estruturas, bem como para análise de tensões de maior complexidade, as quais não eram sanáveis com ferramentas mais usuais da teoria da elasticidade. Com o passar do tempo, seu uso foi direcionado para diferentes áreas, sendo uma delas, a Engenharia Civil (SOBRINHO, 2006).

A partir dele, se trabalha com modelos computacionais, que buscam a análise de fenômenos físicos em condições de meios contínuos, sendo que os mesmos são referidos a partir de equações diferenciais parciais, com algumas condições de contorno pré-estabelecidas. Busca-se a determinação dos estados de tensão e de deformação que um sólido está sujeito decorrente das ações exteriores (AZEVEDO, 2003).

Segundo Souza (2003), a ideia principal do MEF é a de dividir o domínio (que consta em um meio contínuo Ω) em domínios menores (Ω^e), que possuem um formato simples (podendo ser de diferentes geometrias), formato triangular, quadrangular, cúbico, dentre outros, a depender da dimensão e do tipo de questão a ser analisada, conforme é mostrado na Figura 15. Ou seja, busca-se por uma solução de problemas de uma forma rápida e eficaz.

Figura 15 - Diferentes tipos de elementos finitos



Fonte: Souza (2003 p.2)

O MEF fragmenta um problema maior em vários menores. Essas sub-regiões criadas são denominadas “elementos finitos”, nome dado, pelo fato de que as dimensões são finitas. E essa divisão que se realiza é um processo conhecido como discretização.

Também essas subdivisões do domínio possuem variáveis que são aproximadas a partir da interpolação dos valores delimitados pelos contornos. Assim, se obtêm um modelo matemático composto por várias equações, definidas de acordo com o tipo de elemento analisado.

Entende-se que o método é aproximado, por isso, quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, mais precisos tendem ser os resultados da análise (SOUZA, 2003).

2.5.1 Elementos finitos utilizados para simular membranas e cabos

Apresenta-se, a seguir, as formulações do MEF para análise de membrana e cabos. Convém lembrar que, por mais que estes elementos estruturais sejam relativamente simples, as estruturas apresentam comportamentos essencialmente não-lineares geometricamente, pois parte considerável da rigidez da estrutura advém do estado de solicitação previamente imposto. Apresenta-se, a seguir, a

formulação Lagrangeana Total, particularizada, na sequência, para os elementos de membrana e cabo-treliça, como descrito inicialmente por Oliveira (2003).

Inicialmente, define-se uma aproximação para o campo de deslocamentos.

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \mathbf{N}_i \cdot \mathbf{u}_i \quad \dots(1)$$

Na equação (1), tem-se que \mathbf{N}_i é uma matriz composta pelas funções de interpolação N_i , do nó i , e \mathbf{u}_i são incógnitas do mesmo nó (deslocamentos).

$$\mathbf{N}_i = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u}_i = \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{pmatrix} \quad \dots(2)$$

As deformações representadas pelo tensor de Green são iguais a:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yx} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \boldsymbol{\varepsilon}_0 + \boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad \dots(3)$$

Em que $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ e $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ são parcelas lineares e não lineares respectivamente, das deformações nodais, definidas por:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_0 = \begin{Bmatrix} u_{,x} \\ v_{,y} \\ w_{,z} \\ v_{,z} + w_{,y} \\ w_{,x} + u_{,z} \\ u_{,y} + v_{,x} \end{Bmatrix} \quad \dots(4)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} (u_{,x}^2 + v_{,x}^2 + w_{,x}^2) \\ \frac{1}{2} (u_{,y}^2 + v_{,y}^2 + w_{,y}^2) \\ \frac{1}{2} (u_{,z}^2 + v_{,z}^2 + w_{,z}^2) \\ u_{,z} \cdot u_{,y} + v_{,z} \cdot v_{,y} + w_{,z} \cdot w_{,y} \\ u_{,x} \cdot u_{,z} + v_{,x} \cdot v_{,z} + w_{,x} \cdot w_{,z} \\ u_{,x} \cdot u_{,y} + v_{,x} \cdot v_{,y} + w_{,x} \cdot w_{,y} \end{array} \right\} \quad \dots(5)$$

As deformações podem ser expressas matricialmente:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \left[\mathbf{B}_0 + \frac{1}{2} \mathbf{B}_1(\mathbf{u}) \right] \cdot \mathbf{u} \quad \dots(6)$$

Também, é possível variar a expressão (6), e com isso, serão encontrados alguns incrementos de deformação:

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon} = [\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1(\mathbf{u})] = \mathbf{B}(\mathbf{u}) \cdot \delta \mathbf{u} \quad \dots(7)$$

Considerando a Lei de Hooke, expressa por:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \quad \dots(8)$$

As tensões de Piola-Kirchhoff são iguais a:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \quad \dots(9)$$

Sendo que nessa equação, o \mathbf{D} representa a matriz constitutiva do material.

Como são desprezados os efeitos de não linearidade física, da primeira variação de (9), resulta:

$$\delta \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \cdot \delta \boldsymbol{\varepsilon} \quad \dots(10)$$

As equações de equilíbrio da estrutura são representadas por:

$$\Psi(\mathbf{u}) = \mathbf{P}(\mathbf{u}) - \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad \dots(11)$$

Onde \mathbf{F} é o vetor de forças externas, $\mathbf{P}(\mathbf{u})$ são as forças internas, definida pela integral no domínio Ω

$$\mathbf{P}(\mathbf{u}) = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \cdot \boldsymbol{\sigma} d\Omega \quad \dots(12)$$

E $\Psi(\mathbf{u})$ é um resíduo que deve ser nulo quando a estrutura se encontra em equilíbrio.

Expandindo o resíduo $\Psi(\mathbf{u})$ em Série de Taylor na vizinhança de uma configuração ${}^n\mathbf{u}$ obtém-se:

$$\Psi({}^{n+1}\mathbf{u}) = \Psi({}^n\mathbf{u} + ({}^n\Delta\mathbf{u})) = \Psi({}^n\mathbf{u}) + \frac{\partial\Psi({}^n\mathbf{u})}{\partial\mathbf{u}} \cdot {}^n\Delta\mathbf{u} + \dots = \mathbf{0} \quad \dots(13)$$

Desprezando-se os termos de ordem maior que um, ou seja, apenas levando em consideração a primeira derivada dos termos, a expressão acima se reduz a:

$$\Psi({}^n\mathbf{u}) + \mathbf{K}_T \cdot {}^n\Delta\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad \dots(14)$$

Sendo que, a matriz \mathbf{K}_T , é uma matriz de rigidez tangente:

$$\mathbf{K}_T = \frac{\partial\Psi({}^n\mathbf{u})}{\partial\mathbf{u}} \quad \dots(15)$$

Porém, a matriz \mathbf{K}_T pode ser obtida através de uma variação do deslocamento que é dividida em duas parcelas: a primeira é parcela geométrica, que diz respeito à rigidez geométrica, a qual depende das tensões que estão sendo aplicadas; ou seja, se aumentar as tensões, aumenta a rigidez; a segunda parcela é correspondente à rigidez elástica, que tem relação com as propriedades do material. Essa variação é:

$$\delta\Psi(\mathbf{u}) = \int_{\Omega} \delta\mathbf{B}^T \cdot \boldsymbol{\sigma} d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \cdot \delta\boldsymbol{\sigma} d\Omega = \mathbf{K}_T \delta\mathbf{u} \quad \dots(16)$$

Sendo:

$$\mathbf{B}_{(\mathbf{u})} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1(\mathbf{u}) \quad \dots(17)$$

A expressão final ficará:

$$\delta\Psi = \mathbf{K}_T \delta\mathbf{u} \quad \dots(18)$$

2.5.2 Obtenção forças internas e da matriz de rigidez tangente

Devido à característica das funções de interpolação utilizadas no MEF, as integrais definidas em todo o domínio Ω são, na prática, efetuadas como elemento (domínio Ω^e). Isso significa que as matrizes são calculadas elemento por elemento e posteriormente são montadas globalmente ou não, dependendo da estrutura de dados utilizadas para armazenamento das matrizes. Portanto, para obter as matrizes \mathbf{B} e \mathbf{K}_T como elemento, é necessário definir o campo de deslocamentos para um elemento genérico \mathbf{e} :

$$\mathbf{u}^e = \mathbf{N}^e \cdot \mathbf{U}^e \quad \dots(19)$$

Sendo \mathbf{N}^e as funções de interpolação do elemento e \mathbf{U}^e o vetor dos deslocamentos dos n nós do elemento.

$$\mathbf{N}^e = [\mathbf{N}_1 \dots \mathbf{N}_i \dots \mathbf{N}_n] \quad \dots(20)$$

$$\mathbf{U}^e = (u_1, v_1, w_1, \dots, u_n, v_n, w_n)^T \quad \dots(21)$$

No que se seguem, todas as matrizes, vetores e integrais referem-se a um elemento genérico. Por simplicidade e clareza do texto, omite-se o índice, com exceção do símbolo Ω^e que se refere ao domínio do elemento.

A matriz \mathbf{B} , definida em (17), é separada em duas parcelas \mathbf{B}_0 e \mathbf{B}_1 . A matriz \mathbf{B}_0 não depende dos deslocamentos e é composta pelas derivadas das funções de interpolação.

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{B}_{01} \dots \mathbf{B}_{0i} \dots \mathbf{B}_{0n} \quad \dots(22)$$

$$\mathbf{B}_{0i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \quad \dots(23)$$

A matriz \mathbf{B}_0 fornece a relação entre os deslocamentos e a parcela linear ε_0 das deformações.

$$\varepsilon_0 = \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{U} \quad \dots(24)$$

Similarmente, a parcela não linear das deformações pode ser escrita na forma:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{U} \quad \dots(25)$$

Pode-se então, dizer que:

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \xi_x & 0 & 0 & 0 & \xi_z & \xi_y \\ 0 & \xi_y & 0 & \xi_z & 0 & \xi_x \\ 0 & 0 & \xi_z & \xi_y & \xi_x & 0 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} N \\ \frac{\partial}{\partial Y} N \\ \frac{\partial}{\partial Z} N \end{Bmatrix} \quad \dots(26)$$

Em resumo, tem:

$$\mathbf{B}_1 = \zeta \cdot \boldsymbol{\Theta} \quad \dots(27)$$

A partir disso, são obtidas as forças internas do elemento, que são:

$$\mathbf{P}(\mathbf{U}) = \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \cdot \boldsymbol{\sigma} d\Omega^e \quad \dots(28)$$

A matriz geométrica \mathbf{K}_σ é obtida a partir da segunda parcela da equação (16) a qual é escrita para um elemento genérico.

$$\mathbf{K}_\sigma \delta \mathbf{u} = \int_{\Omega^e} \delta \mathbf{B}^T \cdot \boldsymbol{\sigma} d\Omega^e \quad \dots(29)$$

Como \mathbf{B}_0 não depende de \mathbf{u} , a primeira variação de \mathbf{B} é dada por:

$$\delta \mathbf{B} = \delta \mathbf{B}_1 \quad \dots(30)$$

Sendo assim, se incorporar a equação (27) na equação (29), pode-se simplificar a equação em:

$$\mathbf{K}_\sigma \delta \mathbf{u} = \int_{\Omega^e} \boldsymbol{\Theta}^T \cdot \delta \zeta^T \cdot \boldsymbol{\sigma} d\Omega^e \quad \dots(31)$$

Definindo a matriz de tensões iniciais, $\boldsymbol{\tau}$:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \sigma_x \cdot \mathbf{I}_3 & \tau_{xy} \cdot \mathbf{I}_3 & \tau_{xz} \cdot \mathbf{I}_3 \\ \tau_{yx} \cdot \mathbf{I}_3 & \sigma_y \cdot \mathbf{I}_3 & \tau_{yz} \cdot \mathbf{I}_3 \\ \tau_{zx} \cdot \mathbf{I}_3 & \tau_{zy} \cdot \mathbf{I}_3 & \sigma_z \cdot \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \quad \dots(32)$$

Pode-se fazer a seguinte transformação:

$$\delta \zeta^T \cdot \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\tau} \boldsymbol{\Theta} \delta \mathbf{u} \quad \dots(33)$$

Sendo que, a matriz I_3 representa uma matriz identidade de ordem 3. Então a matriz geométrica final fica:

$$\mathbf{K}_\sigma^n = \int_{\Omega^e} (\boldsymbol{\Theta}^T \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\Theta}) d\Omega^e \quad \dots(34)$$

2.5.3 Matrizes para elemento de membrana espaciais

Um elemento utilizado para a modelagem numérica de membranas é o elemento triangular de interpolação linear para os deslocamentos u, v e w , referidos a um sistema de eixos locais, x, y e z ,

$$\mathbf{u}^e = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad \dots(35)$$

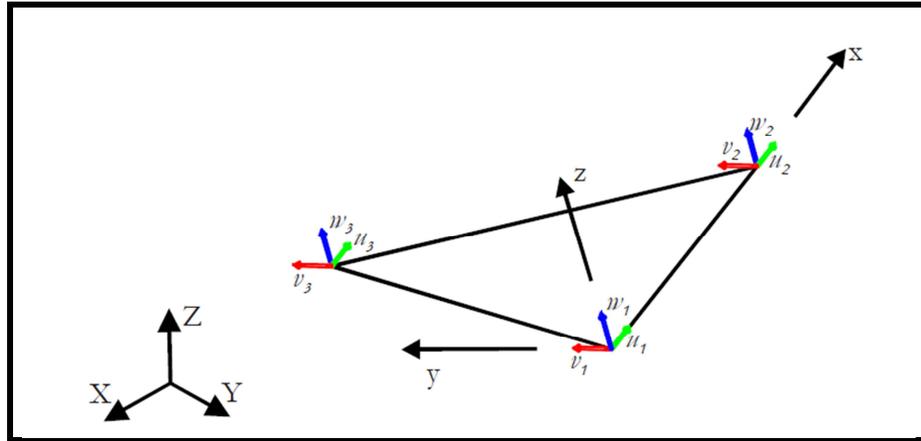
$$\mathbf{u}^e = \mathbf{N} \cdot \mathbf{U} \quad \dots(36)$$

Sendo \mathbf{N} a matriz de funções de interpolação e \mathbf{U} os deslocamentos nodais do elemento.

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \quad \dots(37)$$

$$\mathbf{U} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ w_3 \end{Bmatrix} \quad \dots(38)$$

Figura 16 - Graus de liberdade locais do elemento de membrana



Fonte: Oliveira (2003 p.46)

As funções interpoladoras são obtidas a partir de:

$$N_1 = \frac{x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2 + (y_2 - y_3) \cdot x + (x_3 - x_2) \cdot y}{2\Delta} \quad \dots(39)$$

$$N_2 = \frac{x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3 + (y_3 - y_1) \cdot x + (x_1 - x_3) \cdot y}{2\Delta} \quad \dots(40)$$

$$N_3 = \frac{x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1 + (y_1 - y_2) \cdot x + (x_2 - x_1) \cdot y}{2\Delta} \quad \dots(41)$$

Sendo x_i e y_i as coordenadas nodais e Δ a área do elemento:

$$\Delta = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad \dots(42)$$

O campo de deformações é dado:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \\ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \\ \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad \dots(43)$$

E o campo de tensões:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad \dots(44)$$

A matriz \mathbf{B}_0 se reduz a:

$$\mathbf{B}_0 = [\mathbf{B}_{01} \ \mathbf{B}_{02} \ \mathbf{B}_{03}] \quad \dots(45)$$

$$\mathbf{B}_{0i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} \quad \dots(46)$$

E a parcela não linear, \mathbf{B}_1 fica igual a:

$$\mathbf{B}_1 = \boldsymbol{\zeta} \cdot \boldsymbol{\theta} \quad \dots(47)$$

Onde:

$$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} \xi_x & 0 & \xi_y \\ 0 & \xi_y & \xi_x \end{bmatrix}^T \quad \dots(48)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{Bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix} \quad \dots(49)$$

A matriz de tensões iniciais é:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \sigma_x \cdot I_3 & \tau_{xy} \cdot I_3 \\ \tau_{yx} \cdot I_3 & \sigma_y \cdot I_3 \end{bmatrix} \quad \dots(50)$$

Com as equações (49) e (50) obtém-se a matriz geométrica do elemento.

$$\mathbf{K}_\sigma = (\boldsymbol{\Theta}^T \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\Theta}) \int_{\Omega^e} d\Omega^e = \boldsymbol{\Theta}^T \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\Theta} \cdot \Delta \cdot t \quad \dots(51)$$

Onde t , é a espessura do elemento.

Para rotacionar a matriz definida no referencial local para o global, ou seja, para localizar o elemento na estrutura global, efetua-se a seguinte operação:

$$\mathbf{K}_{TG} = \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{K}_T \cdot \mathbf{R} \quad \dots(52)$$

$$\mathbf{P}_G = \mathbf{R} \cdot \mathbf{P} \quad \dots(53)$$

Para calcular a matriz \mathbf{R} é necessário definir o sistema de eixos locais a ser adotado.

Primeiro será definido o eixo local \mathbf{x} como sendo na direção e sentido do primeiro nó (i) para o segundo (j).

$$\mathbf{x} = (\lambda_{xX} \lambda_{xY} \lambda_{xZ}) = \frac{\vec{ij}}{|\vec{ij}|} \quad \dots(54)$$

O vetor \mathbf{z} é definido perpendicular ao plano do elemento, portanto pode ser calculado pelo produto vetorial entre dois vetores não paralelos pertencentes ao plano:

$$\mathbf{z} = (\lambda_{zX} \lambda_{zY} \lambda_{zZ}) = \frac{\vec{ij} \times \vec{ik}}{|\vec{ij} \times \vec{ik}|} \quad \dots(55)$$

O vetor \mathbf{y} é definido pelo seguinte produto vetorial:

$$\mathbf{y} = (\lambda_{yX} \lambda_{yY} \lambda_{yZ}) = (\mathbf{z} \times \mathbf{x}) \quad \dots(56)$$

Assim pode ser definida a matriz de rotação como:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{L} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \quad \dots(57)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \lambda & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \lambda & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \lambda \end{bmatrix} \quad \dots(58)$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_{x,x} & \lambda_{x,y} & \lambda_{x,z} \\ \lambda_{y,x} & \lambda_{y,y} & \lambda_{y,z} \\ \lambda_{z,x} & \lambda_{z,y} & \lambda_{z,z} \end{bmatrix} \quad \dots(59)$$

2.5.4 Matrizes para elemento cabo-treliça

Outro elemento utilizado para a modelagem numérica de tensoestruturas é o elemento de treliça, ou cabo treliça, como preferem alguns autores (nomenclatura aqui adotada por conveniência). Trata-se de um elemento linear com deslocamentos espaciais u, v e w , interpolados linearmente e referidos a um sistema de eixos locais x, y e z ,

$$\mathbf{u}^e = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad \dots(60)$$

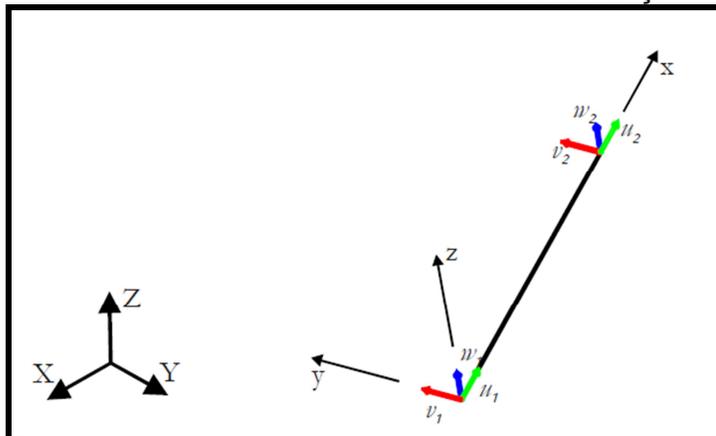
$$\mathbf{u}^e = \mathbf{N} \cdot \mathbf{U} \quad \dots(61)$$

Sendo \mathbf{N} a matriz de funções de interpolação e \mathbf{U} os deslocamentos nodais do elemento:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 \end{bmatrix} \quad \dots(62)$$

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{Bmatrix} \quad \dots(63)$$

Figura 17 - Graus de liberdade locais do elemento de cabo treliça



Fonte: Oliveira (2003 p.54)

As funções de interpolação são obtidas a partir de:

$$N_1 = 1 - \frac{1}{L} \cdot x; \quad N_2 = \frac{1}{L} \cdot x \quad \dots(64)$$

Sendo L, o comprimento do elemento:

O campo de deformações é dado por:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad \dots(65)$$

E o campo de tensões:

$$\boldsymbol{\sigma} = \sigma_x = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_x \quad \dots(66)$$

A matriz \mathbf{B}_0 se reduz a:

$$\mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} \end{bmatrix} \quad \dots(67)$$

E a parcela não linear, \mathbf{B}_1 fica igual a:

$$\mathbf{B}_1 = \boldsymbol{\zeta} \cdot \boldsymbol{\theta} \quad \dots(68)$$

Onde:

$$\boldsymbol{\zeta} = \boldsymbol{\xi}_x \quad \dots(69)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}_x = \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} \end{bmatrix} \quad \dots(70)$$

A matriz de tensões iniciais é:

$$\boldsymbol{\tau} = [\sigma_x \cdot \mathbf{I}_3] \quad \dots(71)$$

Com as equações (69) e (70), obtém-se a matriz geométrica do elemento.

$$\mathbf{K}_\sigma = (\boldsymbol{\theta}^T \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\theta}) \int_{\Omega^e} d\Omega^e = \boldsymbol{\theta}^T \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\theta} \cdot A \cdot L \quad \dots(72)$$

Onde A, é a área da seção transversal do elemento.

Para rotacionar a matriz definida no referencial local para o global, ou seja, para localizar o elemento na estrutura global, efetua-se a seguinte operação:

$$\mathbf{K}_{TG} = \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{K}_T \cdot \mathbf{R} \quad \dots(73)$$

$$\mathbf{P}_G = \mathbf{R} \cdot \mathbf{P} \quad \dots(74)$$

Para calcular a matriz \mathbf{R} é necessário definir o sistema de eixos locais a ser adotado.

Primeiro será definido o eixo local x como sendo na direção e sentido do primeiro nó (i) para o segundo (j).

$$\mathbf{x} = (\lambda_{xX}\lambda_{xY}\lambda_{xZ}) = \frac{\vec{ij}}{|\vec{ij}|} \quad \dots(75)$$

O vetor \mathbf{z} é definido perpendicular ao plano formado entre o eixo do elemento e a direção \mathbf{Y} global e a direção \mathbf{x} :

$$\mathbf{z} = (\lambda_{zX}\lambda_{zY}\lambda_{zZ}) = \mathbf{x} \times \mathbf{Y}) \quad \dots(76)$$

Se a direção \mathbf{x} for paralela a \mathbf{Y}

$$\mathbf{z} = (\lambda_{zX}\lambda_{zY}\lambda_{zZ}) = \mathbf{x} \times \mathbf{X}) \quad \dots(77)$$

O vetor \mathbf{y} é definido pelo seguinte produto vetorial:

$$\mathbf{y} = (\lambda_{yX}\lambda_{yY}\lambda_{yZ}) = (\mathbf{z} \times \mathbf{x}) \quad \dots(78)$$

Assim pode ser definida a matriz de rotação como:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \quad \dots(79)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \lambda & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \lambda & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \lambda \end{bmatrix} \quad \dots(80)$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_{x,x} & \lambda_{x,y} & \lambda_{x,z} \\ \lambda_{y,x} & \lambda_{y,y} & \lambda_{y,z} \\ \lambda_{z,x} & \lambda_{z,y} & \lambda_{z,z} \end{bmatrix} \quad \dots(81)$$

2.6 Escolha do software

Existem diversos programas disponíveis que podem ser utilizados a fim de possibilitar essa análise computacional requerida. Um *software* generalista, que contém elementos que podem ser usados na análise de tensoestruturas, com licença disponível na UNIPAMPA é o ANSYS®. Trata-se de um software conhecido,

com uso bastante difundido entre os engenheiros que trabalham com análise numérica. A disponibilidade e a confiabilidade são os dois elementos que justificam suficientemente a escolha deste software para o desenvolvimento deste trabalho.

O programa oferece diversos elementos, destinados a vários tipos de estruturas. Nesse trabalho utilizou-se 3 tipos de elementos para determinar os mastros, cabos de borda, estais e membrana. Os mesmos são descritos a seguir:

2.6.1 LINK8

Esse elemento possui diversas aplicabilidades a depender do uso necessário. Pode atuar em modelagens como de treliças, de cabos, dentre outros. Também, o link8 é um elemento unidimensional, com deslocamentos tridimensionais, e pode ser submetido à tração e compressão de forma uniaxial. Possui 2 nós (i,j) e três graus de liberdade por nó (ux, uy, uz): translações nas direções x,y e z. (ANSYS, 2005).

Conforme citado no manual do ANSYS (2005), as duas constantes geométricas admitidas para este elemento são a área da seção transversal e a deformação inicial. Sendo que, podem ser levadas em consideração várias propriedades do material, como:

- Módulo de elasticidade;
- Coeficiente de dilatação térmica;
- Massa específica;
- Coeficiente de amortecimento;

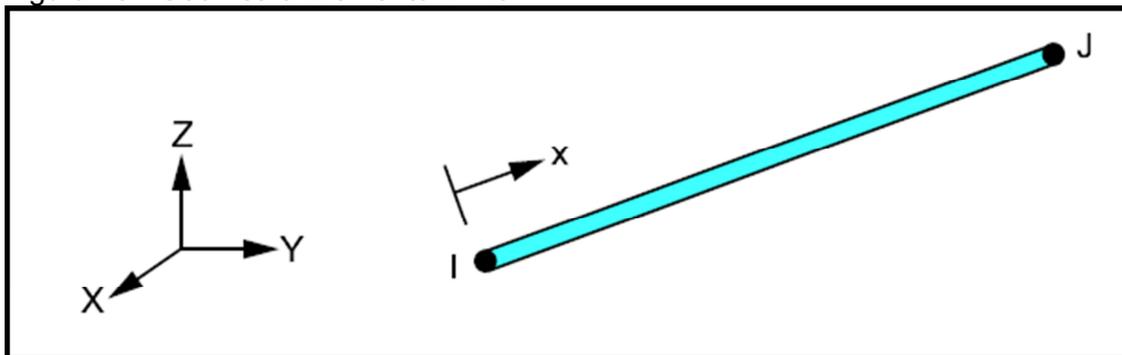
As restrições encontradas, conforme é apresentado no manual do *software*, para o elemento citado são:

- Este elemento assume a forma de uma barra reta, carregada axialmente em suas extremidades, de propriedades uniformes em todo seu comprimento;
- O comprimento do elemento deve ser positivo, portanto os nós I e J não podem ser coincidentes;
- A área da seção transversal não deve ser negativa;
- A temperatura é assumida com variação linear apenas ao longo do comprimento da barra;
- A tensão é uniforme na barra, decorrente da função de interpolação dos deslocamentos;

- A deformação inicial é também utilizada no cálculo da matriz associada à matriz de rigidez, para a primeira iteração cumulativa.

A geometria do elemento Link8 é expressa na Figura 18.

Figura 18 - Geometria Elemento Link8



Fonte: ANSYS (2005 p.4-53)

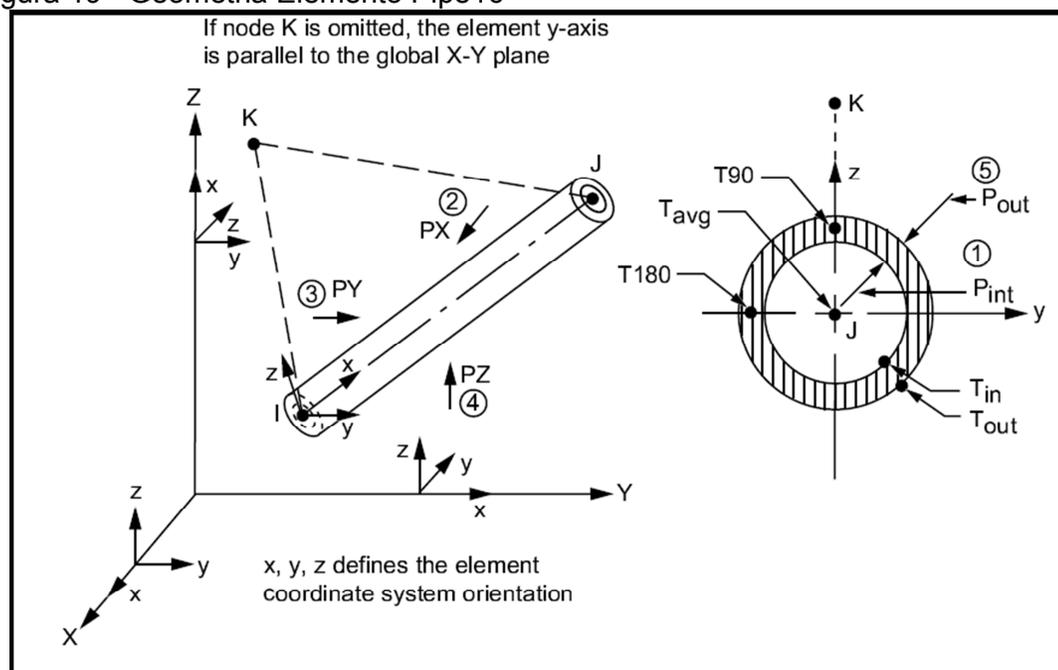
No presente trabalho, o elemento link8 foi utilizado para simular os estais e os cabos de borda.

2.6.2 PIPE16

É um elemento uniaxial, de formato tubular, com deformação elástica, o qual pode suportar tração, compressão, torção, flexão dentre outros esforços, sendo que possui 6 graus de liberdade nos dois nós das extremidades: translação nos nós em x, y e z e rotações nos eixos x, y e z (ANSYS, 2005).

A geometria do elemento é apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Geometria Elemento Pipe16



Fonte: ANSYS (2005 p.4-95)

Este elemento tem como dados de entrada o diâmetro externo e espessura da parede, além do módulo de rigidez, densidade, dentre outros (ANSYS, 2005).

As restrições desse elemento são de que nem o comprimento nem a espessura da parede podem ser igual a zero e o diâmetro externo não pode ser igual ou inferior a zero (ANSYS, 2005).

No presente trabalho utilizou-se o elemento Pipe16 para simular os mastros.

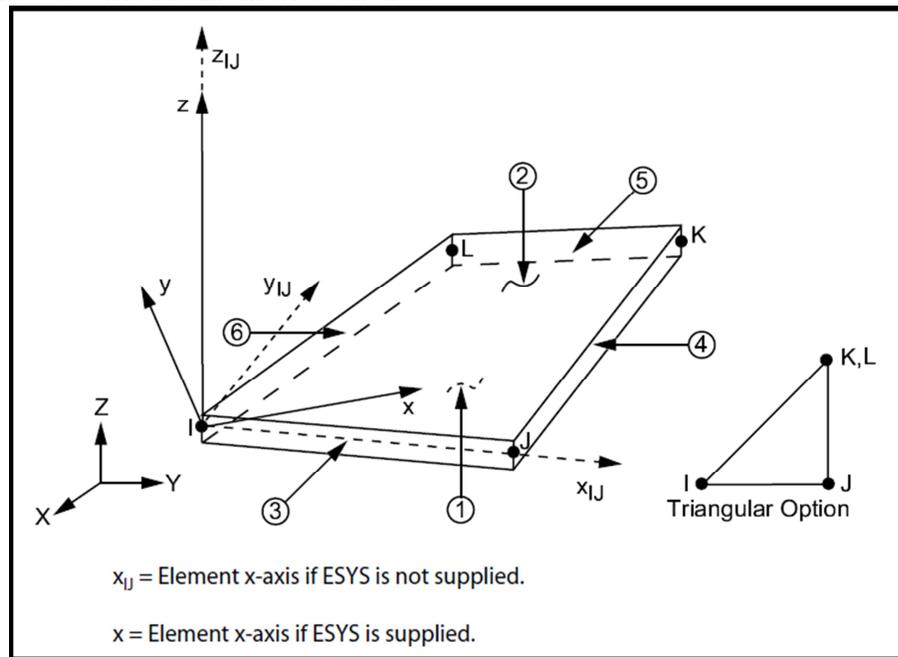
2.6.3 SHELL 41

O elemento é destinado a estruturas de cobertura, onde os elementos submetidos à flexão não são o estudo principal. Pois esse elemento resiste bem à tração. Também, possui 3 graus de liberdade em cada nó, sendo translações em x, y e z (ANSYS, 2005).

Esse elemento tem características como, espessura variável de forma homogênea em toda a superfície do elemento, podendo ser submetido a grandes deformações (ANSYS, 2005).

A geometria do elemento Shell41 é apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Geometria Elemento Shell41



Fonte: ANSYS (2005 p.4-237)

As restrições, conforme informado pelo manual (ANSYS, 2005), para o elemento citado são:

- o elemento que possuir área nula não será considerado;
- o elemento não pode ter espessura nula em nenhum nó;
- elementos colapsados para a forma triangular têm os nós K e L com mesmo número.

Nesse trabalho utilizou-se o elemento Shell41 para simular a membrana.

3 METODOLOGIA

Apresenta-se a seguir a metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho, sendo que se limitou em seguir as etapas descritas no capítulo 2, necessárias para o projeto de uma tensoestrutura. A análise foi feita usando simulação numérica, com a utilização de elementos finitos, tendo como objeto de estudos o projeto apresentado no Trabalho de Conclusão de Curso que propôs a cobertura dos passeios que interligam os prédios da UNIPAMPA, Campus Alegrete, realizada por Rafaela Kluge.

Este trabalho seguiu as etapas descritas no Capítulo 2, necessárias para o projeto de uma tensoestrutura, deixando fora apenas a etapa da padronagem¹:

- Busca da forma;
- Escolha dos materiais utilizados;
- Simulação numérica;
- Análise da resposta aos carregamentos;

Etapa 1: Escolha de um trecho do caminho objeto do trabalho anterior (experimental) para fazer a simulação numérica;

Etapa 2: Escolha, a partir de modelagem numérica do trecho selecionado na etapa 1, uma forma equilibrada, que se aproxime da forma escolhida no trabalho anterior (experimental);

Etapa 3: Definição de carregamentos provocados pelo vento;

Etapa 4: Escolha dos materiais utilizados;

Etapa 5: Simulação numérica para obtenção das forças de protensão e das tensões atuantes na membrana, nos cabos de bordo e nos mastros;

Etapa 6: Obtenção das forças atuantes nos elementos de fundação.

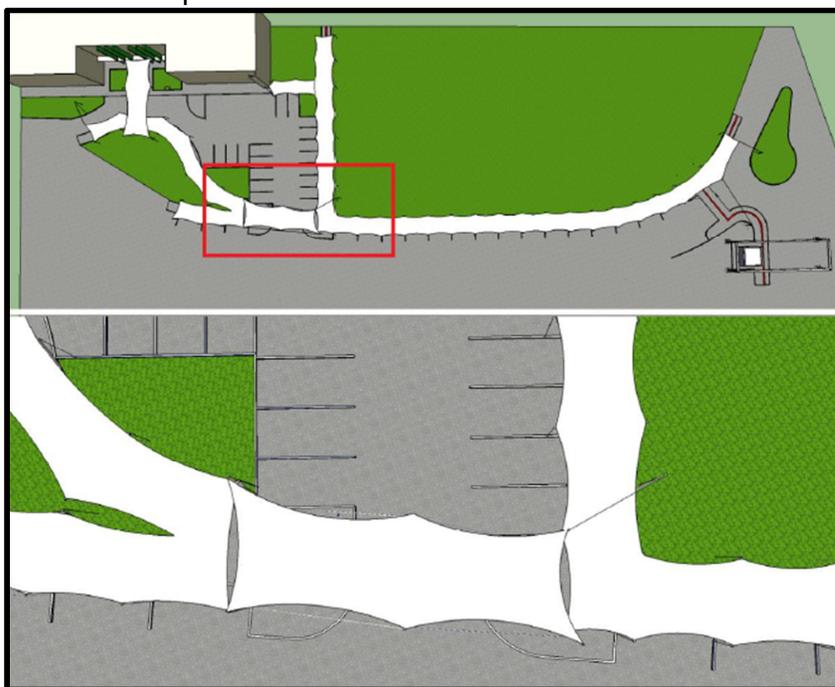
¹ A realização desta etapa estava inicialmente prevista, mas devido às dificuldades encontradas, percebeu-se que não teríamos tempo para cumprir todas as etapas do projeto. Optou-se por não realizar a esta etapa, pois é a única que poderia ser excluída sem prejuízo às demais.

4 RESULTADOS

4.1 Escolha de um trecho

Kluge, após desenvolver o projeto em maquete eletrônica, elegeu um trecho para a construção da maquete física (Figura 21). Da maquete física, elegeu um sub trecho (Figura 22) para fazer experimentalmente a busca da forma e os padrões de corte.

Figura 21 - Vista da maquete virtual



Fonte: KLUGE (2014, p.57)

Figura 22 - Sub trecho escolhido para a busca da forma



Fonte: Adaptado de KLUGE (2014, p.57)

Optou-se pela utilização deste mesmo sub trecho para a realização da simulação numérica, a fim de ser possível a comparação da forma encontrada a partir da maquete física com a forma encontrada com a simulação numérica.

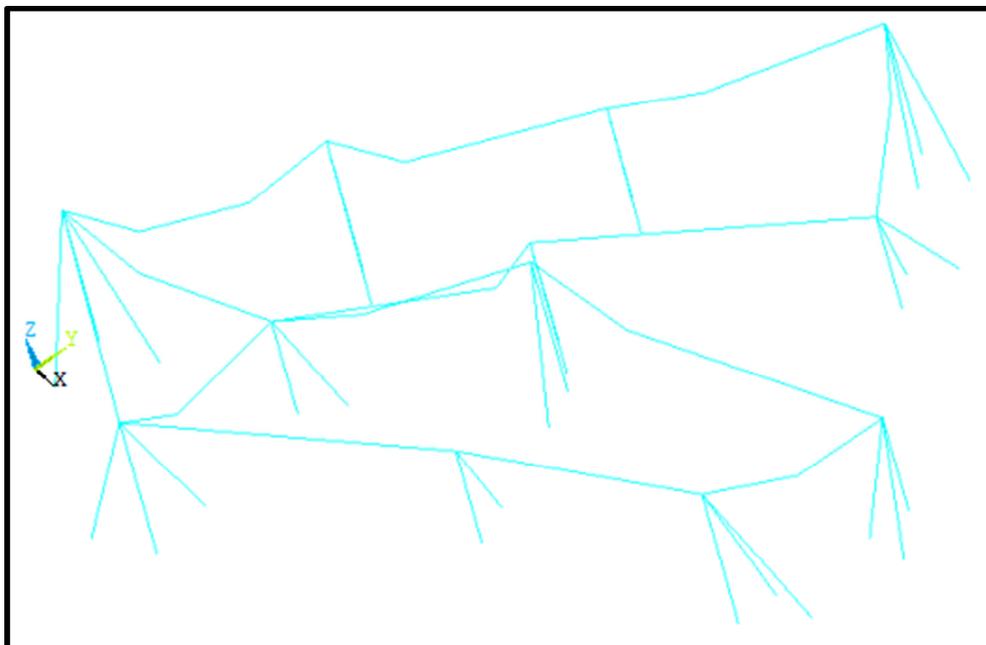
4.2 Busca da forma

4.2.1 Modelo numérico

Escolhida a parte do projeto para a análise através do método computacional, partiu-se para a elaboração do modelo numérico. Como já mencionado, foram utilizados os elementos: SHELL41 para simular a membrana; LINK8 para simular os cabos de borda e estais; e PIPE16 para simular os mastros.

Para a busca da forma, partiu-se de uma área plana ao nível do topo dos mastros mais curtos, tendo elevações apenas no entorno dos mastros mais altos, sempre com áreas planas, como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Estrutura inicial



Fonte: Elaboração própria

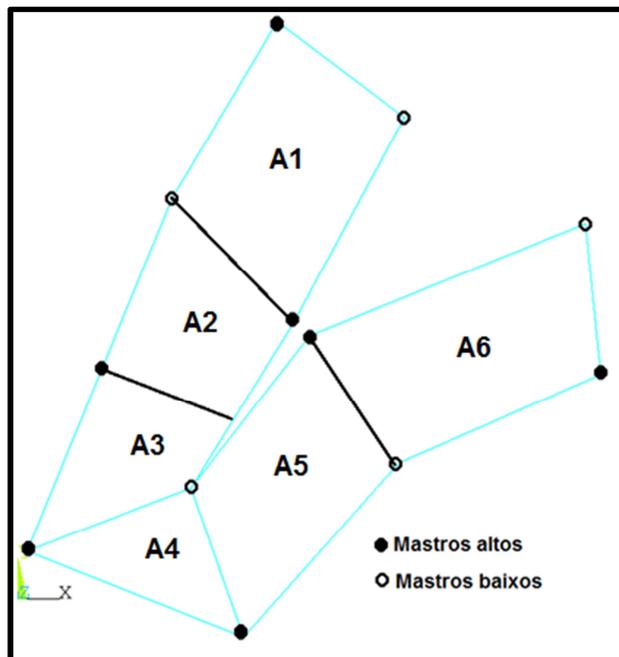
Interferência do vento na modelagem

Como descrito no item 2.4.5 (p. 21), a membrana foi dividida em áreas para possibilitar a vinculação dos diferentes coeficientes de pressão do vento, conforme ilustrado na Figura 24. Buscou-se, sempre que possível, a geração de áreas correspondentes, na forma final da membrana, a paraboloides hiperbólicos, de modo a permitir a geração de zonas equivalentes às da Figura 13 (p. 23).

Foram consideradas duas direções de ação do vento, nesse trabalho denominadas de transversal e longitudinal (Figura 25).

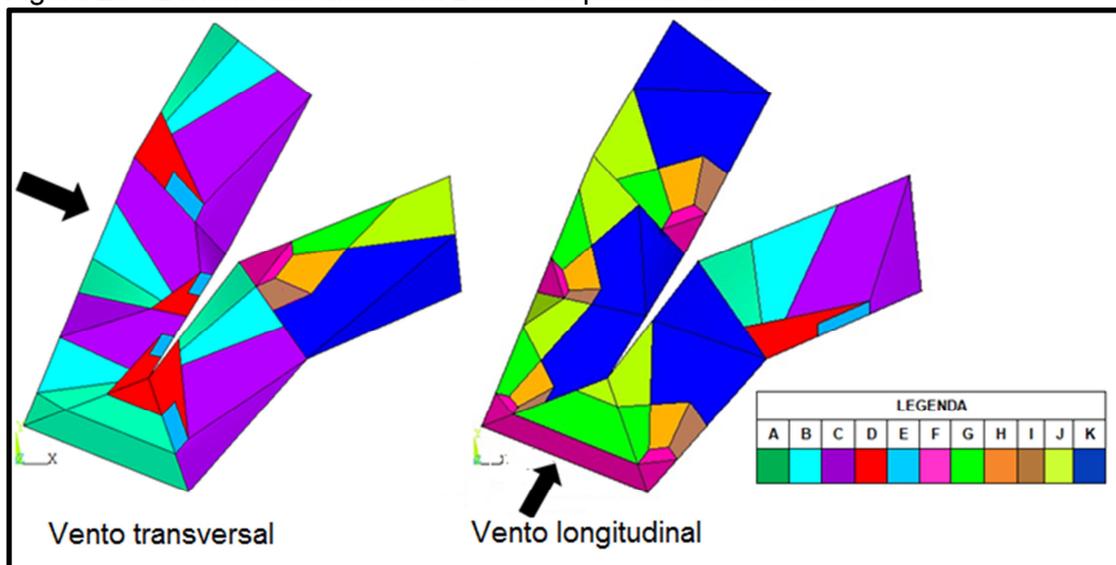
Na situação do vento transversal as áreas A1, A2, A3 e A5 foram consideradas equivalentes ao primeiro caso e a área A6 ao segundo caso da Figura 13. Na situação do vento longitudinal as equivalências se inverteram. Nas duas situações as zonas da área A4 foram obtidas levando em conta as zonas colaterais, optando-se pelo maior valor de coeficiente de pressão quando díspares. O resultado da divisão de áreas em zonas esta ilustrado na Figura 25.

Figura 24 - Divisão da membrana em áreas



Fonte: Elaboração própria

Figura 25 - Divisão das áreas em zonas de pressão do vento

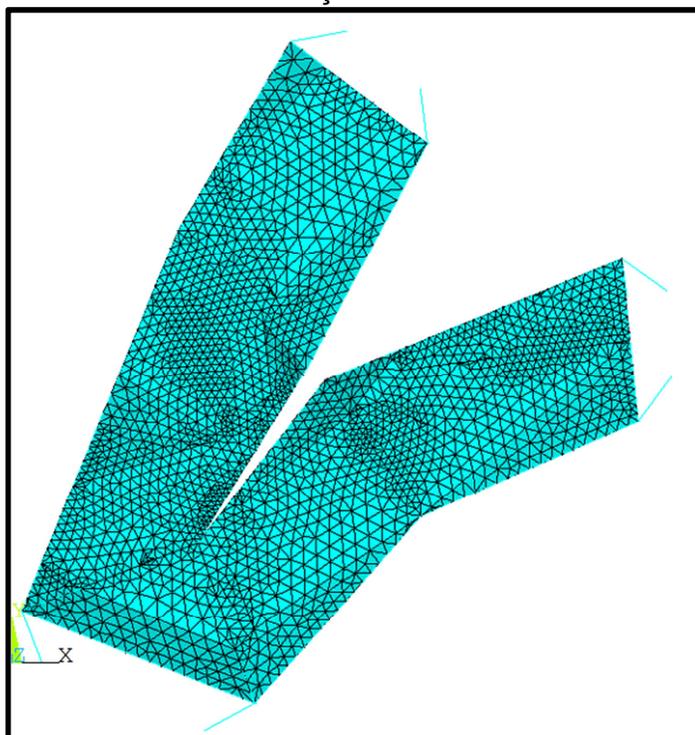


Fonte: Elaboração própria

Geração das malhas

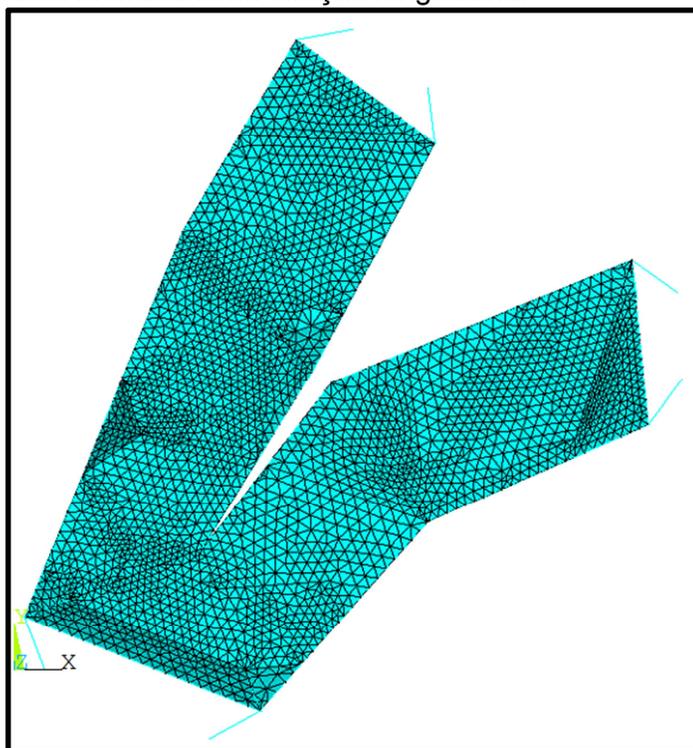
Para cada direção de atuação do vento, foi gerada uma malha diferente. Como é apresentado na Figura 26 e Figura 27.

Figura 26 - Malha da membrana na direção transversal



Fonte: Elaboração própria

Figura 27 - Malha da membrana na direção longitudinal



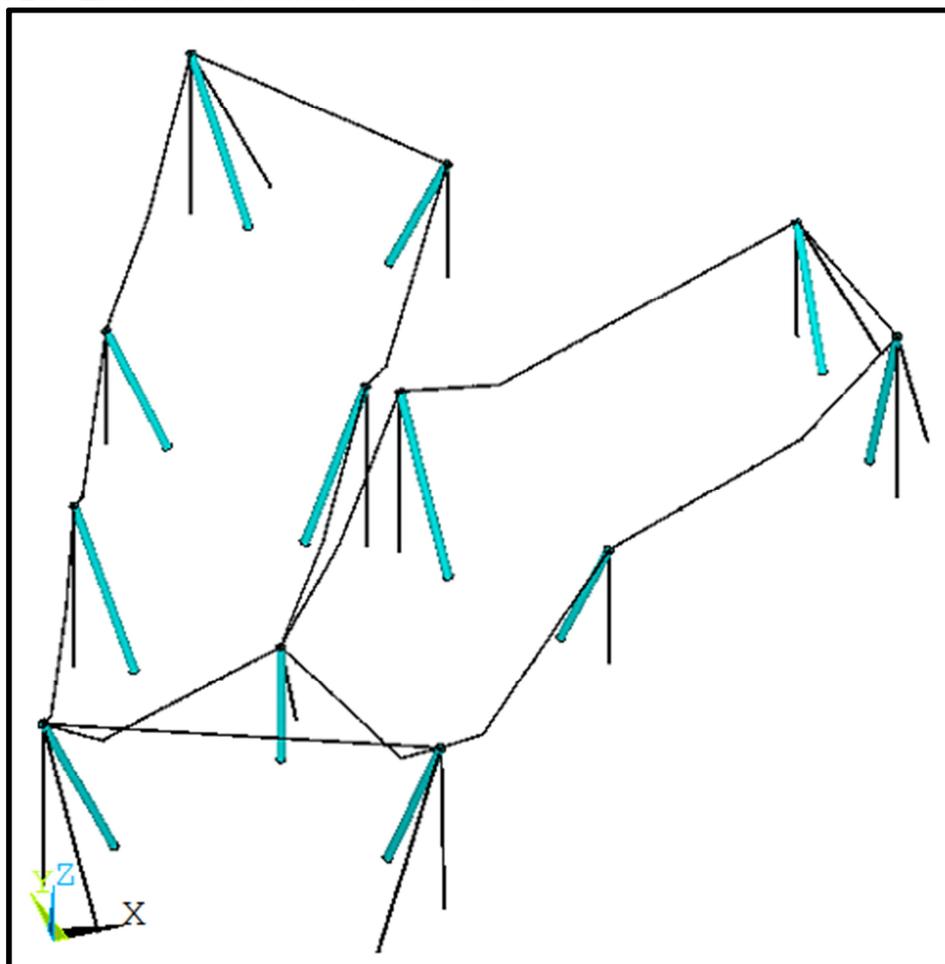
Fonte: Elaboração própria

Nas duas malhas geradas para simular a membrana foram utilizados elementos triangulares. Em decorrência da irregularidade da forma das zonas definidas a partir dos coeficientes de pressão do vento, optou-se pela utilização de uma malha de geração livre pelo *software*, controlando apenas a divisão das linhas, buscando a homogeneidade da malha.

A malha na com vento atuando direção transversal foi gerada com 5230 elementos e 2608 nós (Figura 26). Já para a malha com vento atuando na direção longitudinal foram utilizados 4202 elementos e 2099 nós (Figura 27).

Já para os mastros e estais, a malha gerada é composta por apenas um elemento cada, não sendo necessárias maiores divisões, conforme pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 - Elementos dos mastros e estais



Fonte: Elaboração própria

4.2.2 Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais utilizados no estudo são:

- ✓ Módulo de elasticidade da membrana → $E = 1 \text{ GPa}^2$, nas duas direções
- ✓ Módulo de elasticidade dos mastros, estais e cabos de borda → $E = 210 \text{ GPa}$

Também, foram definidas propriedades geométricas, as quais são especificadas para cada elemento utilizado na estrutura. Nos cabos de borda utilizaram-se diâmetros de 1,25 cm (área de 1,22 cm²) e nos estais utilizaram-se diâmetros de 2,54 cm (área de 5,0 cm²). Já os mastros são tubos de diâmetro externo de 15 cm, com espessura da parede de 0,8 cm.

² Valor médio adotado em projeto de tensoestruturas.

4.2.3 Processo de busca da forma

Inicialmente, optou-se por engastar os graus de liberdade dos nós formados no encontro de cabos com mastros nas fundações, restringindo deslocamentos e rotações em todas as direções, a fim de garantir a indeslocabilidade dos elementos da estrutura que não fossem membrana.

Na busca da forma, o primeiro passo é a restrição de todos os nós da membrana. Impondo-se uma variação negativa de temperatura à membrana. Ao buscar a solução, o *software* consegue convergência rápida, pois os nós estão restritos. Assim é gerado um campo de tensões internas na membrana.

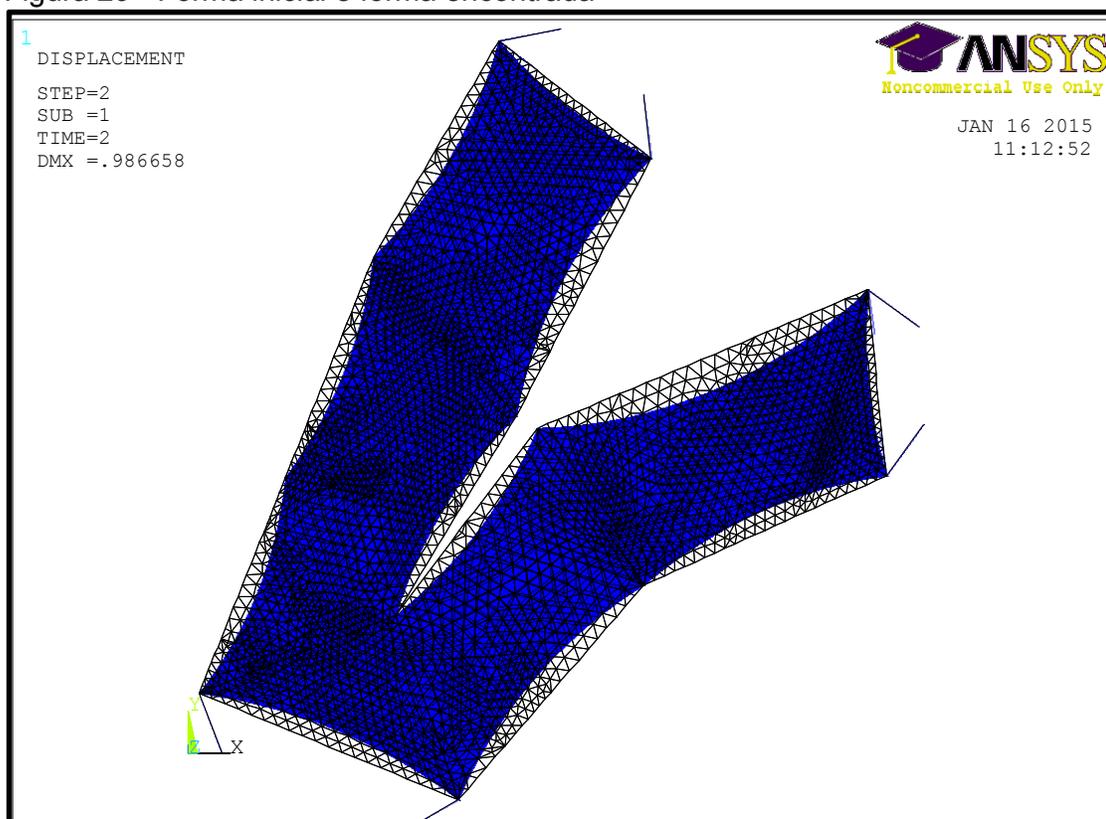
O segundo passo é a liberação dos nós da membrana e a busca de uma nova solução. Aí sim a forma da membrana é encontrada.

Duas variáveis podem ser usadas na busca da forma de uma membrana: a variação da temperatura e o coeficiente de dilatação térmica. Normalmente considera-se este último igual à unidade, reduzindo-se a um problema de uma só variável. Assim, torna-se necessário testar valores de variação de temperatura até encontrar um que gere a forma desejada para a membrana.

Apenas como exemplo, nas simulações deste trabalho, o coeficiente de dilatação térmica foi considerado como sendo igual a 1,0 e variação de temperatura imposta à membrana foi de $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Quanto à forma encontrada para a membrana, quando sobrepostas à estrutura no seu formato original com a deformada é possível perceber o quanto a estrutura deformou no seu todo até chegar a forma final, como é apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Forma inicial e forma encontrada

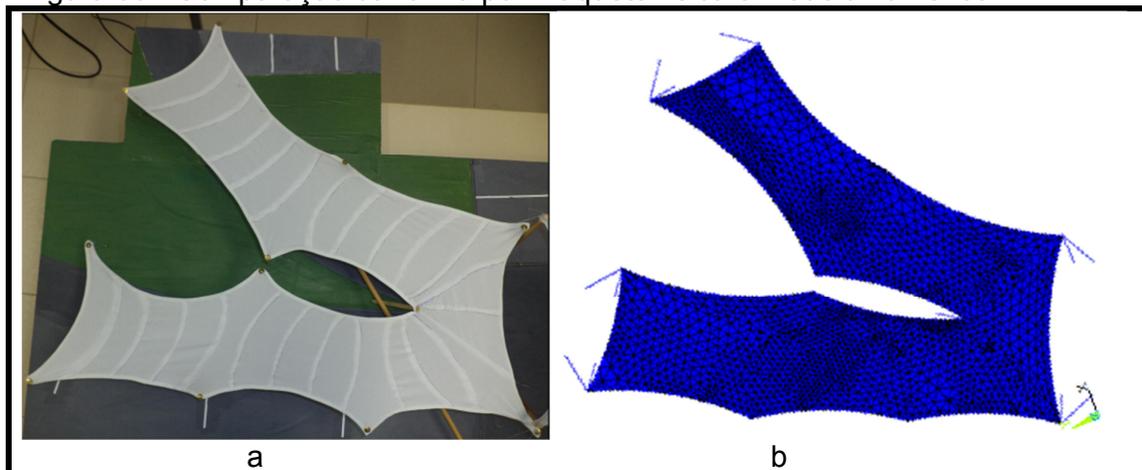


Fonte: Elaboração própria

Analisando as duas formas, a encontrada experimentalmente por Kluge através de maquete física (Figura 30 - a) e a gerada pelo modelo numérico (Figura 30 - b), é possível perceber que ambas as formas são muito semelhantes. Porém, como o módulo de elasticidade utilizado para os estais, cabos de borda e mastros foi elevado, percebe-se que pelo modelo numérico, a curvatura é menor, pois esses elementos ficam com menor flexibilidade.

Assim, verifica-se que para a busca da forma os dois processos são eficazes, porém, o modelo numérico traz mais segurança na realização dos projetos. Além de ser possível várias outras análises, que de forma experimental não se consegue realizar.

Figura 30 - Comparação da forma por maquete física e modelo numérico



Fonte: Elaboração própria

4.3 Protensão inicial

A partir da definição da forma, buscou-se encontrar um campo de tensões a ser aplicado à tensoestrutura, com o objetivo de manter a forma, com certa rigidez. Primeiramente, definiu-se a vinculação dos mastros como rotulados na base, impedindo apenas o giro em torno do seu próprio eixo. E os estais como ancorados ao solo. Posteriormente, partindo-se da forma encontrada no processo de busca da forma, repetiu-se o processo em que se impôs-se um variação de temperatura na membrana, com deslocamentos nos nós restringidos, busca-se uma solução equilibrada, libera-se os nós e busca-se novamente uma solução equilibrada. Mas desta feita o coeficiente de variação térmica foi diminuído sensivelmente, de forma que o valor da variação de temperatura, necessário para gerar tensões factíveis, continuasse assumindo valores compatíveis com o senso comum.

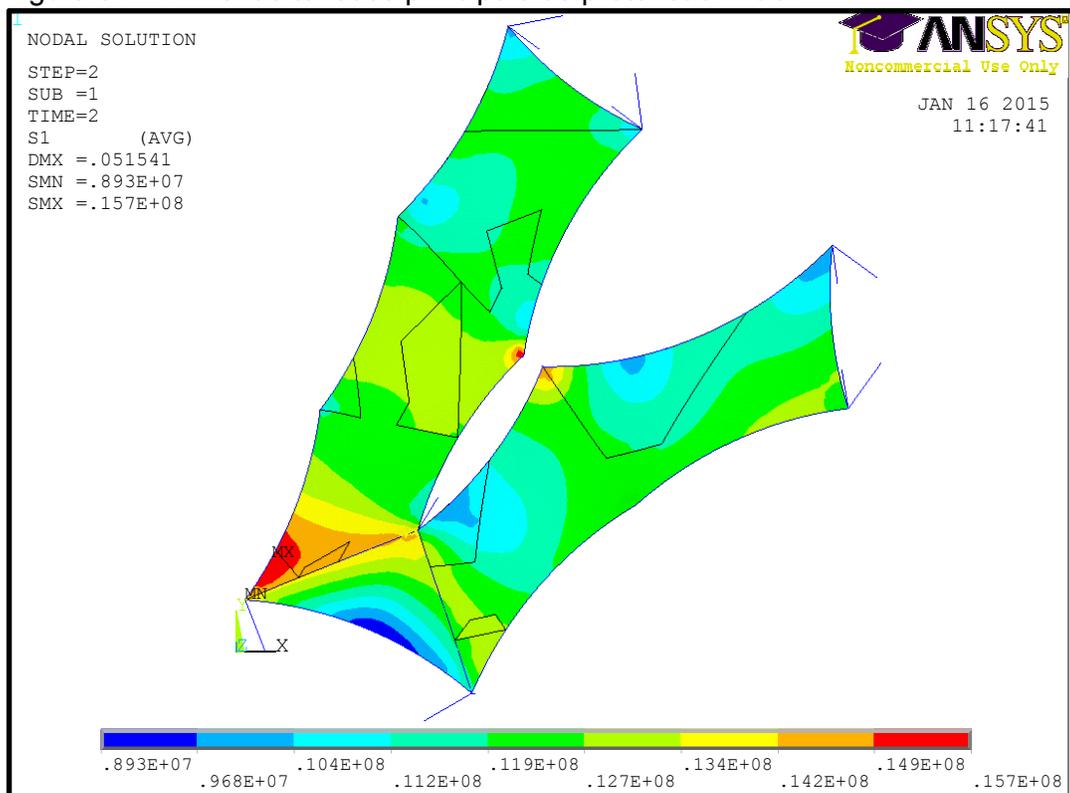
Além da variação térmica na membrana, definiu-se protensões iniciais para todos os cabos. Os cabos de borda foram todos definidos com a mesma protensão. Já os estais, possuem protensões diferentes, a depender do esforço solicitado, da inclinação e posição em que se encontram.

Mesmo tendo dois modelos numéricos diferentes, em decorrência da mudança de valores nos coeficientes de pressão em função da direção do vento, os resultados relacionados à protensão inicial, são numericamente equivalentes para as duas malhas geradas.

Pode ser verificado, nas Figuras 31 e Figura 32, que as tensões iniciais encontradas, são relativamente baixas, apenas tendo picos de tensão elevada em dois pontos. Pela Figura 31 (primeiras tensões principais), é possível perceber que o pico gerado é decorrente da geometria da área do seu entorno, e também, por haver uma protensão elevada nos estais que ligam o ponto da extremidade dessa área.

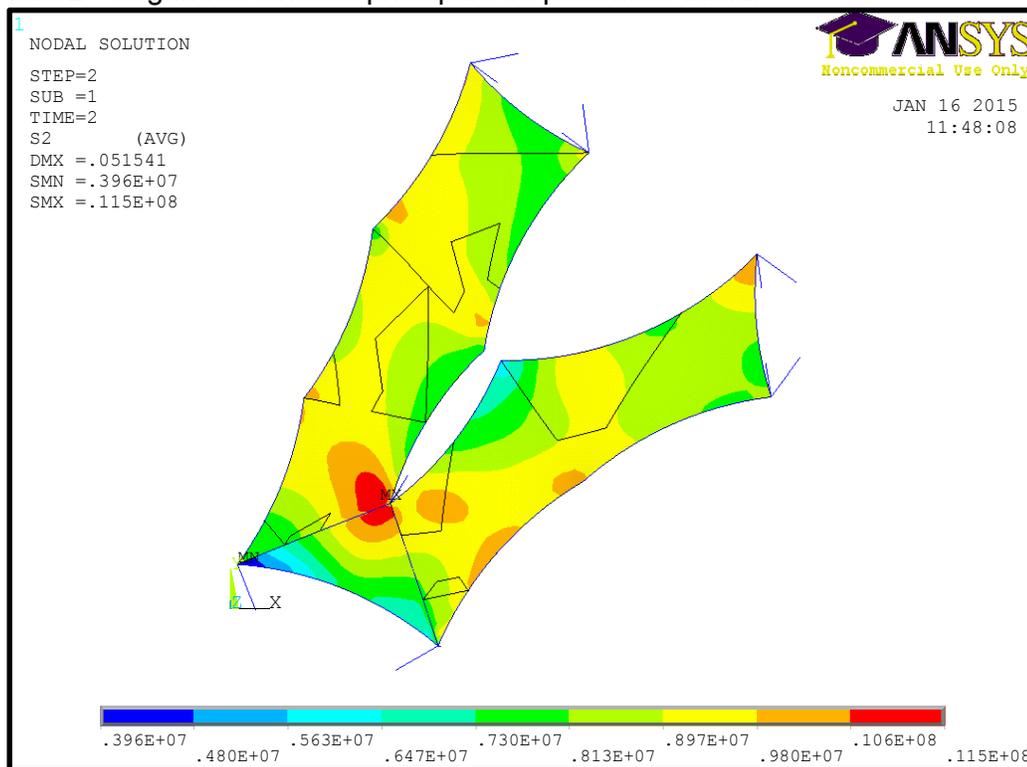
As segundas tensões principais (Figura 32) se redistribuem, alterando esse pico encontrado para outra região.

Figura 31 - Primeiras tensões principais de protensão inicial



Fonte: Elaboração própria

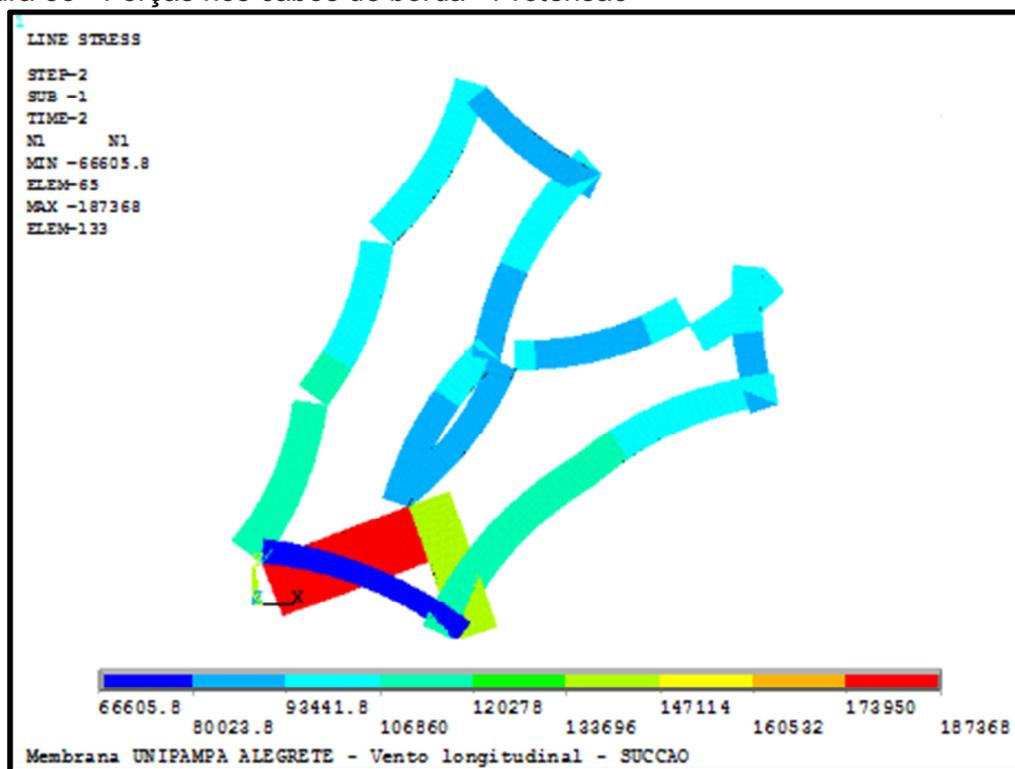
Figura 32 - Segundas tensões principais de protensão inicial



Fonte: Elaboração própria

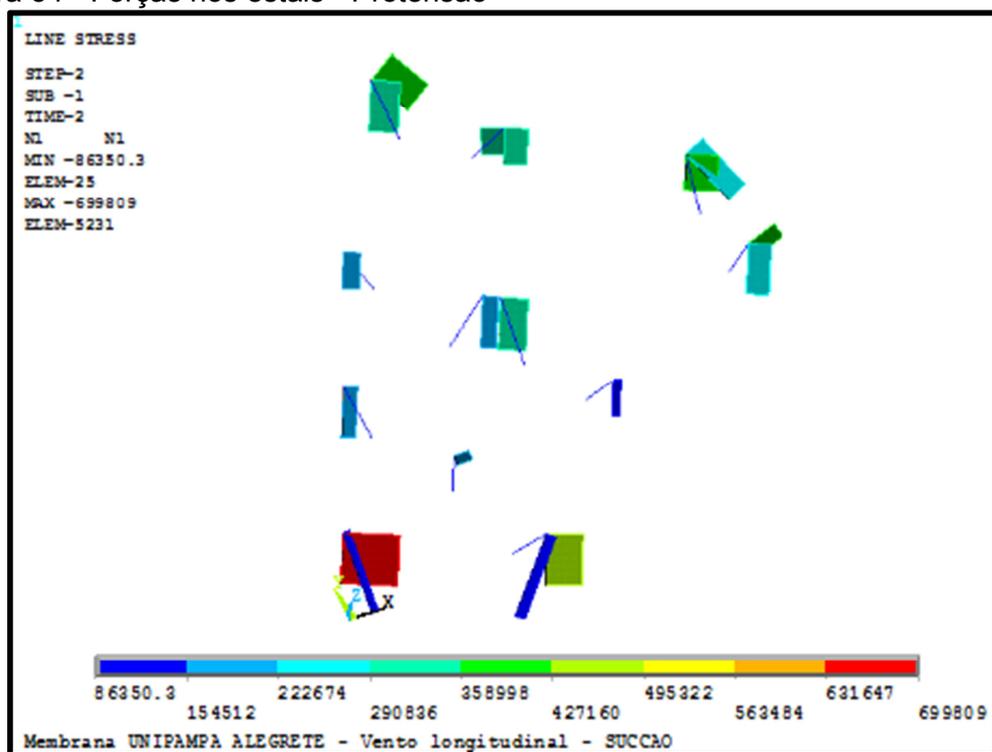
Para a protensão considerada, geraram-se as forças aplicadas nos cabos de borda e nos estais da estrutura, conforme é visualizado na Figura 33 e 34, respectivamente, bem como o valor das tensões geradas nos mastros, como apresentado na Figura 35. As forças são dadas em N (Newton) e as tensões em MPa. Sendo que boa parte da membrana está submetida à tensões que variam entre 11 e 12 MPa. E as tensões de pico, são da ordem de 15,7 MPa.

Figura 33 - Forças nos cabos de borda - Protensão



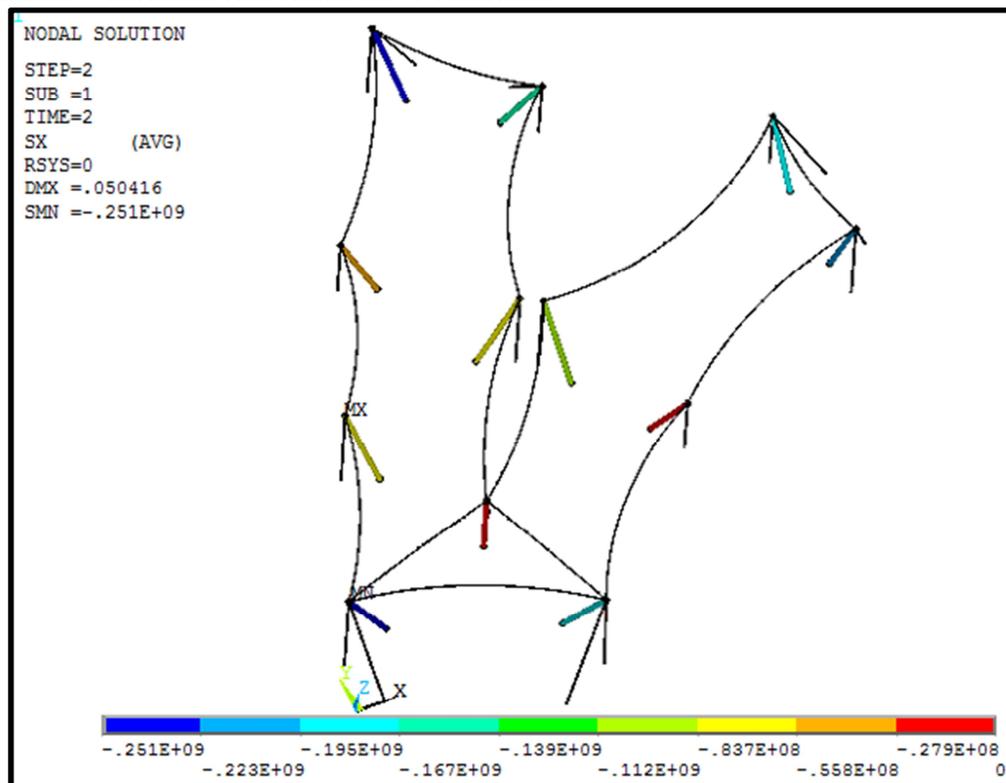
Fonte: Elaboração própria

Figura 34 - Forças nos estais - Protensão



Fonte: Elaboração própria

Figura 35 - Tensões nos mastros - Protensão



Fonte: Elaboração própria

4.4 Definição de carregamentos provocados pelo vento

A partir das definições das áreas e zonas apresentadas no item 4.2.1, foi aplicada a pressão do vento em cada zona delimitada com os valores especificados no item 2.4.5 (Tabela 2 e Tabela 3).

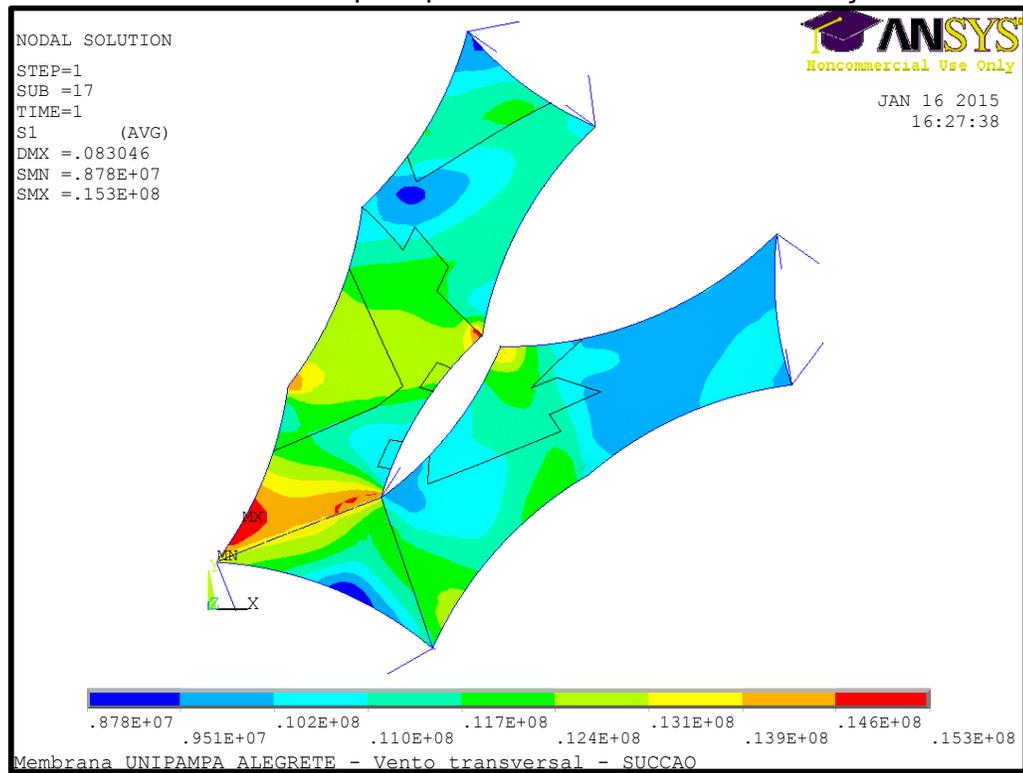
Sendo assim, para cada direção do vento, se obteve duas situações diferentes: uma para sucção; e outro para sobrepressão do vento.

4.4.1 Direção Transversal

Vento de Sucção

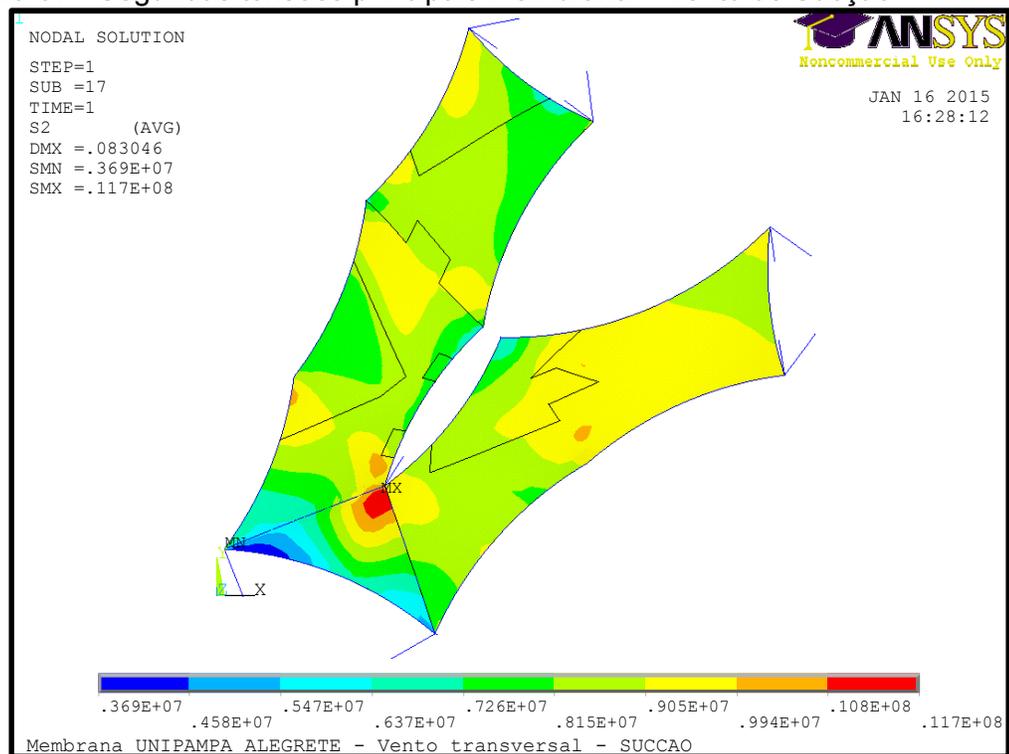
As tensões principais (1^{as} e 2^{as}) geradas na membrana são apresentadas nas Figuras 36 e 37, respectivamente. As unidades de tensões em todos os casos são dadas em Pa.

Figura 36 - Primeiras tensões principais membrana – Vento de Sucção



Fonte: Elaboração própria

Figura 37 - Segundas tensões principais membrana – Vento de Sucção



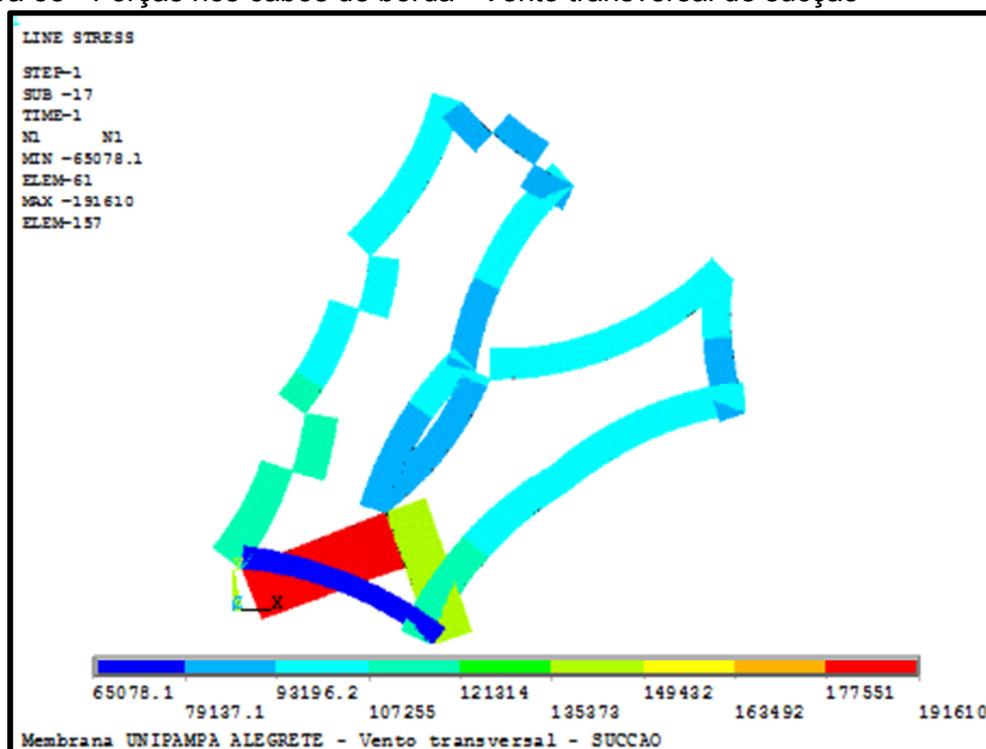
Fonte: Elaboração própria

Como já havia sido estabelecida a protensão mencionada no item 4.3, percebe-se que com a aplicação da pressão do vento, houve uma redução no valor das tensões principais. Sendo que boa parte da membrana está submetida à tensões que variam entre 11 e 12 MPa. E as tensões de pico, são da ordem de 15,4 MPa.

Para essa direção do vento em análise, as forças aplicadas nos cabos de borda e nos estais da estrutura, é apresentado na Figura 38 e 39, respectivamente, bem como o valor das tensões geradas nos mastros, como apresentado na Figura 40. As forças são dadas em N (Newton) e as tensões em MPa.

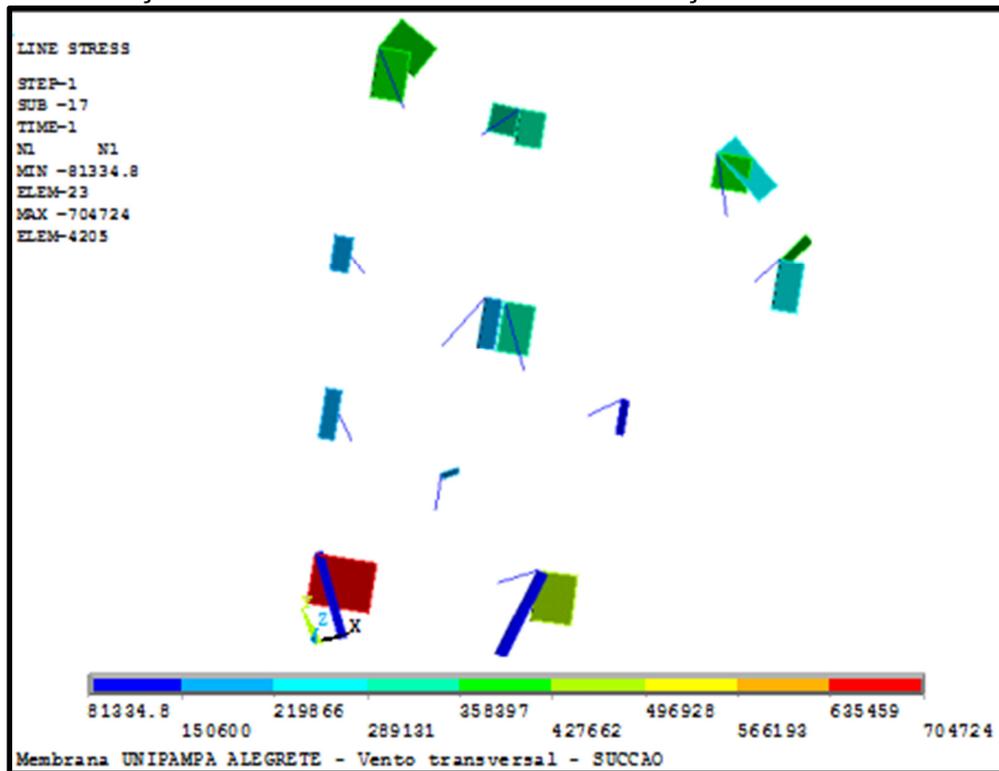
Comparando os valores encontrados para os elementos estruturais das Figuras 38, 39 e 40, com os encontrados para esses mesmos elementos apenas com a aplicação da protensão (Figuras 33,34 3 35), verifica-se que teve um aumento em todos eles quando aplicada a pressão do vento, porém em uma análise mais precisa, percebe-se que essas variações são pouco significativas.

Figura 38 - Forças nos cabos de borda - Vento transversal de sucção



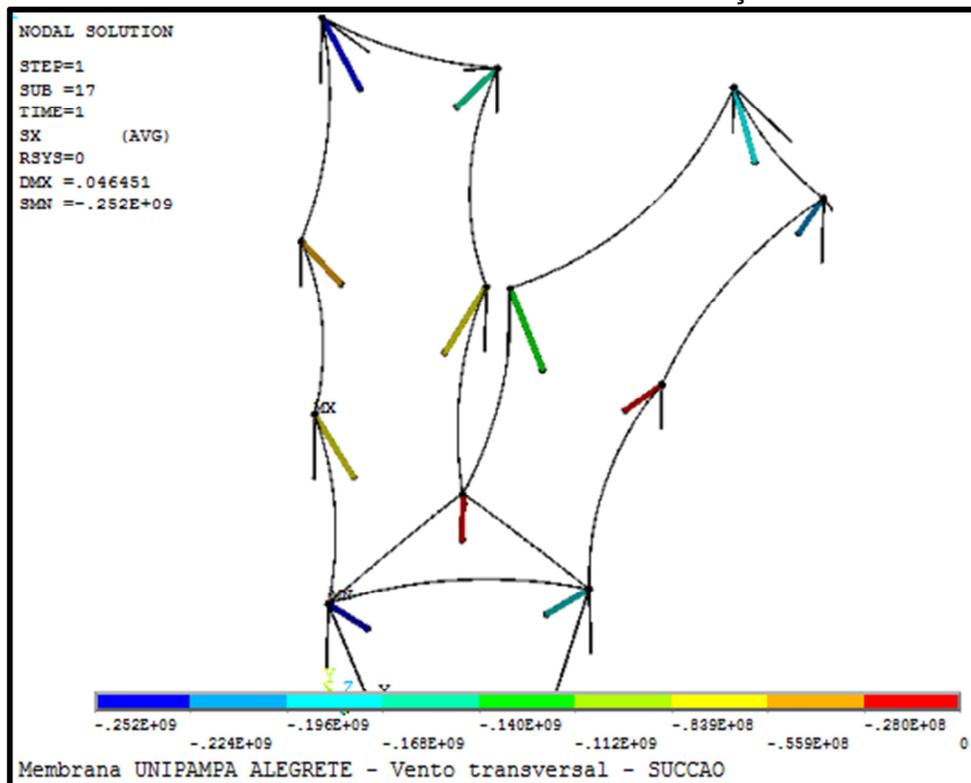
Fonte: Elaboração própria

Figura 39 - Forças nos estais - Vento transversal de sucção



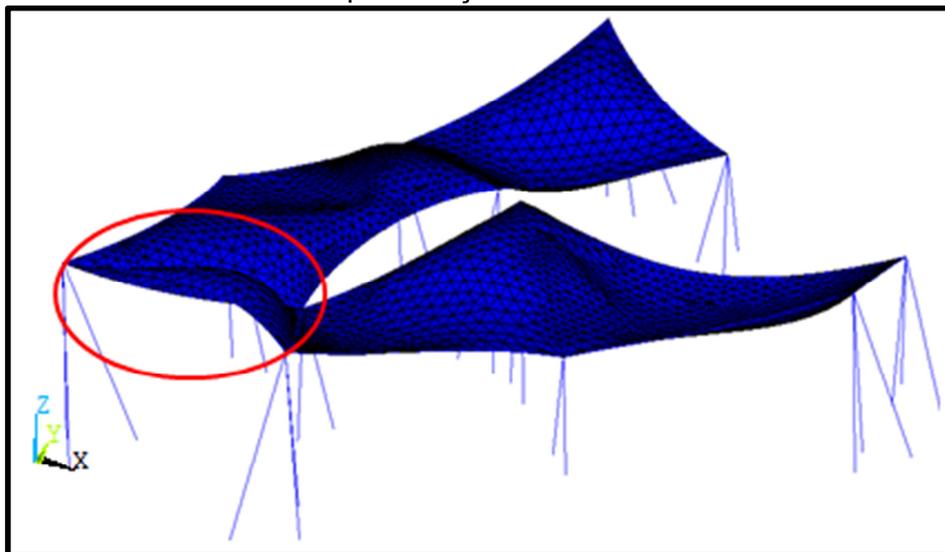
Fonte: Elaboração própria

Figura 40 - Tensões nos mastros – Vento transversal de sucção



Fonte: Elaboração própria

Figura 41 - Deformada causada pela sucção do vento transversal



Fonte: Elaboração própria

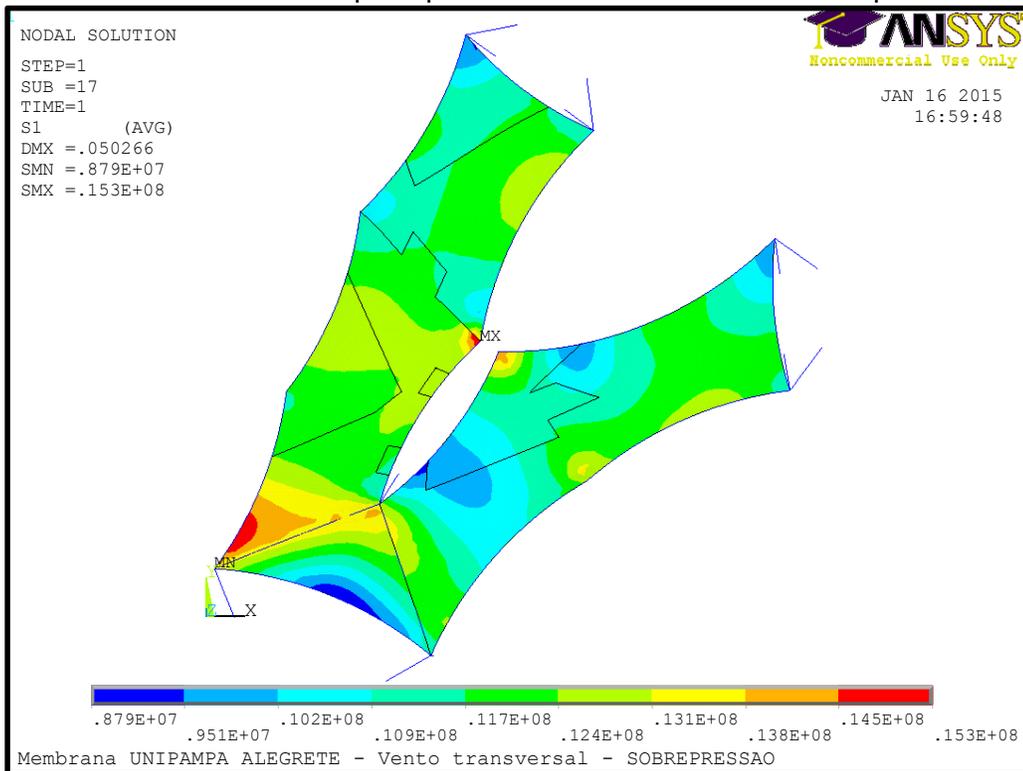
A partir da ação do vento, a membrana tende a se deformar. Na Figura 41, essa deformação para o caso de sucção na direção transversal é apresentada, com fator de escala aumentado em 20 vezes, para melhor visibilidade. É possível verificar que criam-se “ondulações” na membrana, mesmo sendo um valor pequeno. Nesse caso, o deslocamento máximo que a membrana tem é de 8 cm, na região delimitada por cabos, os quais formam um triângulo, onde a malha tende a “subir”.

Vento de Sobrepressão

Para o vento de sobrepressão, os valores das tensões principais (1^{as} e 2^{as}) geradas na membrana são apresentados na Figura 42 e Figura 43, respectivamente.

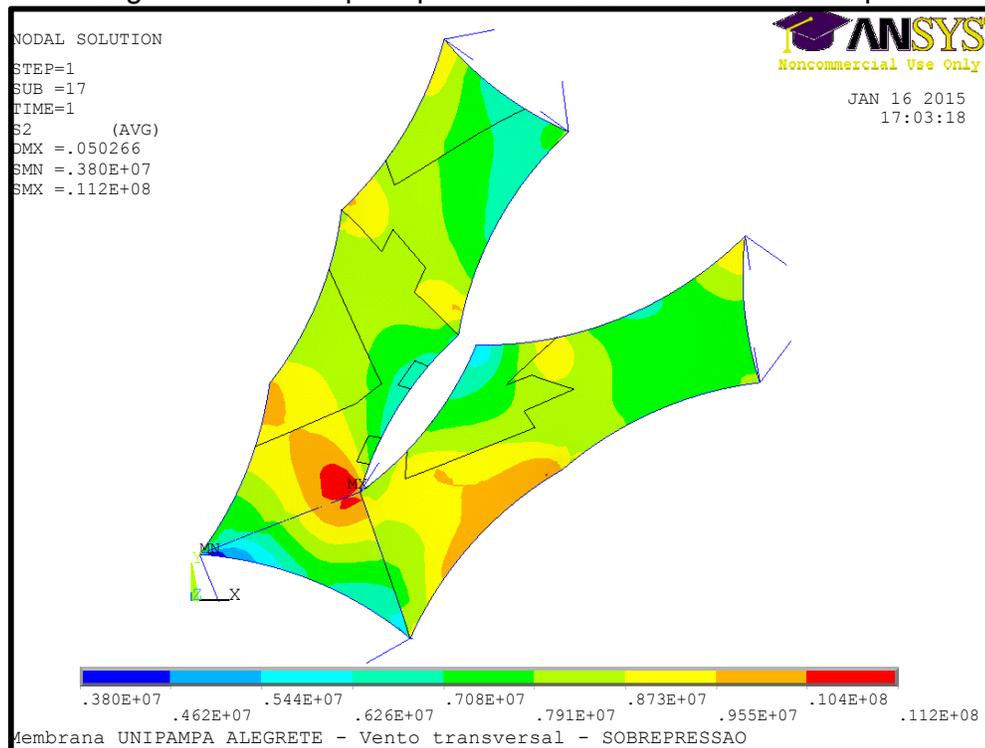
E quando comparadas com as tensões geradas para a mesma direção de vento, porém de sucção, é possível perceber que os valores de tensões geradas na membrana em ambos os casos, são numericamente equivalentes, ou seja, da mesma ordem de grandeza.

Figura 42 - Primeiras tensões principais membrana – Vento de Sobrepressão



Fonte: Elaboração própria

Figura 43 - Segundas tensões principais membrana – Vento de Sobrepressão

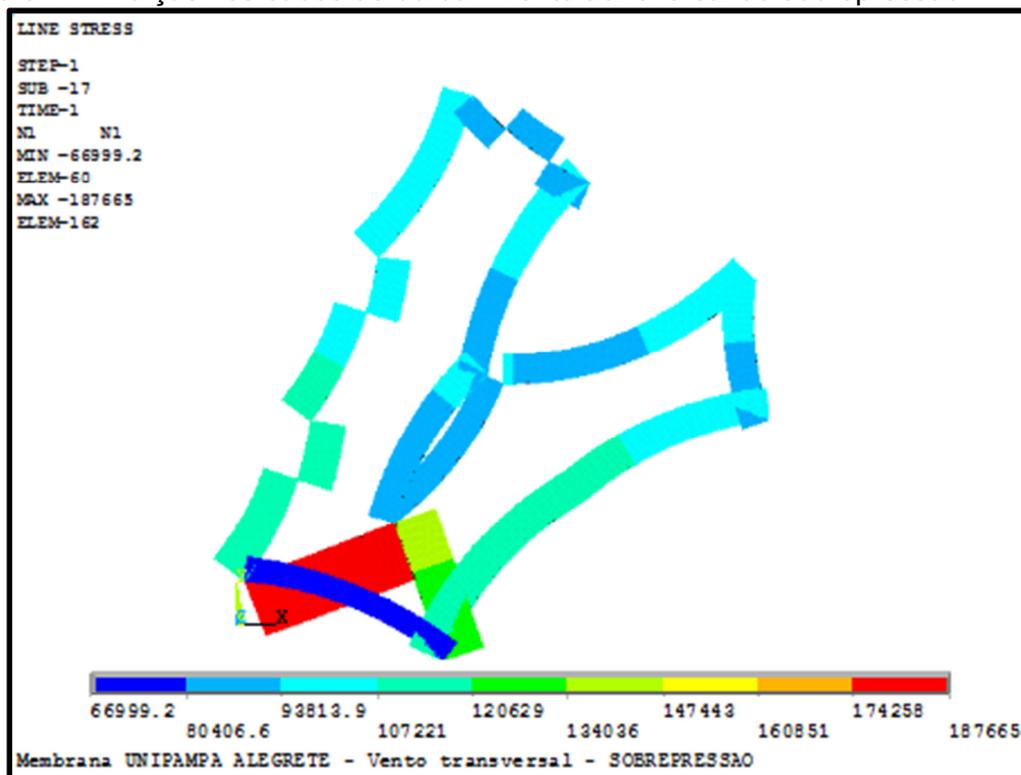


Fonte: Elaboração própria

Quando aplicada a pressão de vento na direção transversal com os coeficientes relacionados a sobrepressão, as forças encontradas para os cabos de borda e nos estais são as apresentadas na Figura 44 e 45, respectivamente. E as tensões geradas nos mastros são ilustradas na Figura 46. Sendo que boa parte da membrana está submetida à tensões que variam entre 10 e 12 MPa. E as tensões de pico, são da ordem de 15,4 MPa.

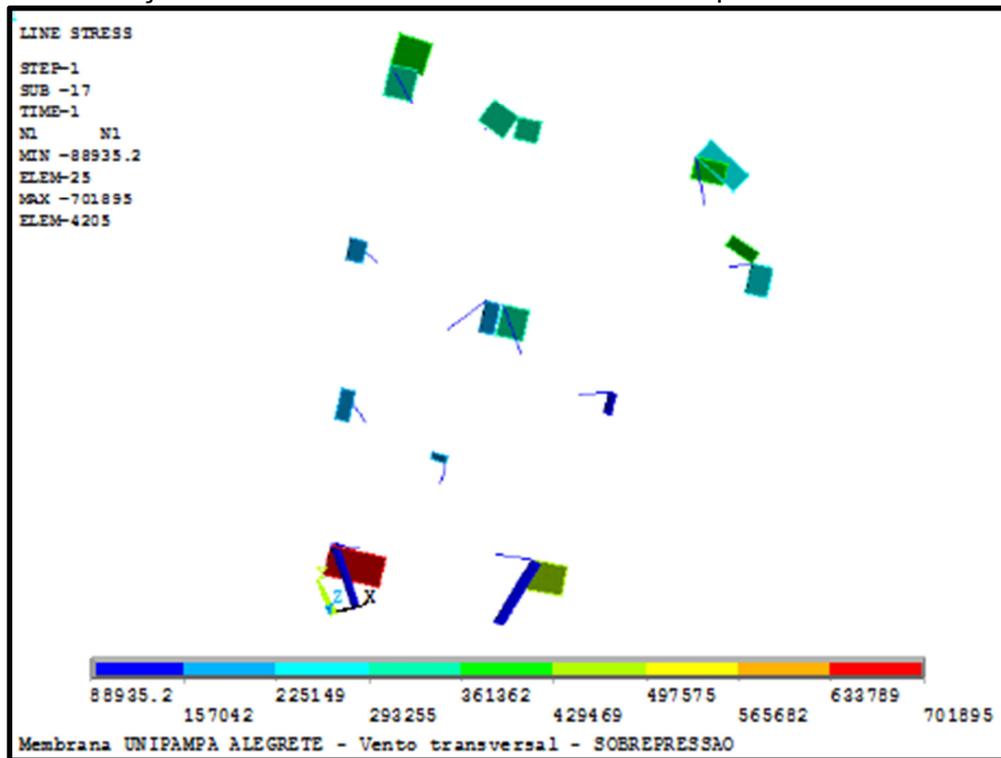
Quando comparados esses valores, com os encontrados na mesma direção de vento, porém de sucção, percebe-se que as forças nos cabos de borda e dos estais quando se aplica a pressão do vento de sobrepressão diminuem um pouco. Já as tensões encontradas nos mastros permanecem as mesmas.

Figura 44 - Forças nos cabos de borda - Vento transversal de sobrepressão



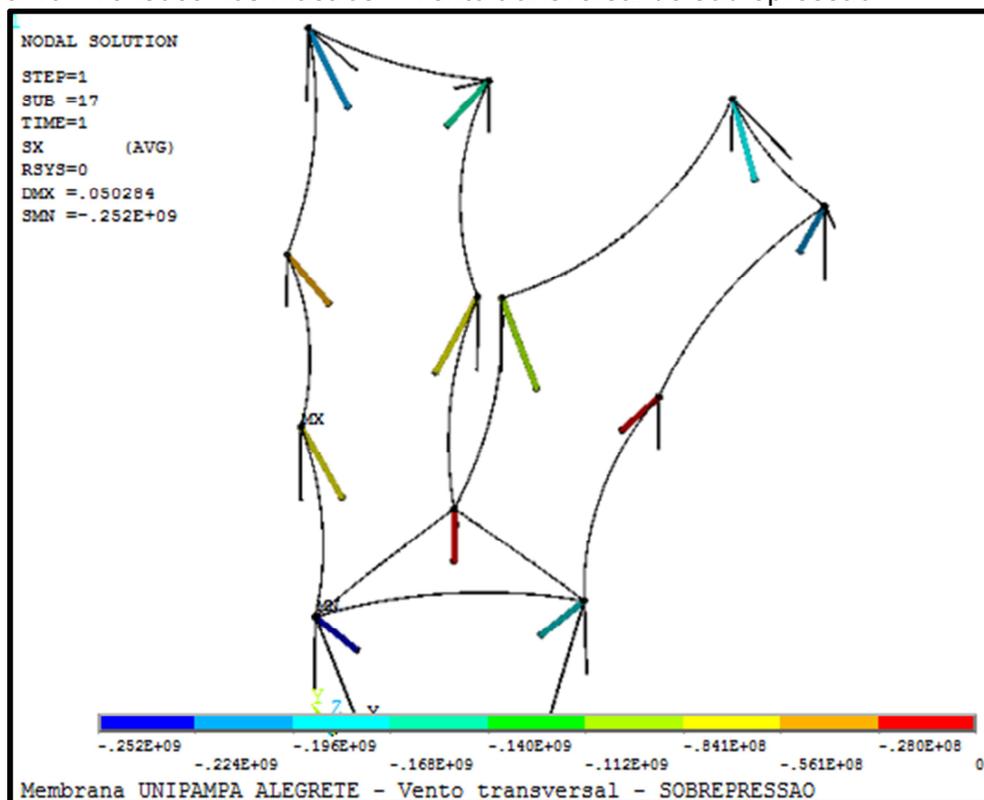
Fonte: Elaboração própria

Figura 45 - Forças nos estais - Vento transversal de sobrepessão



Fonte: Elaboração própria

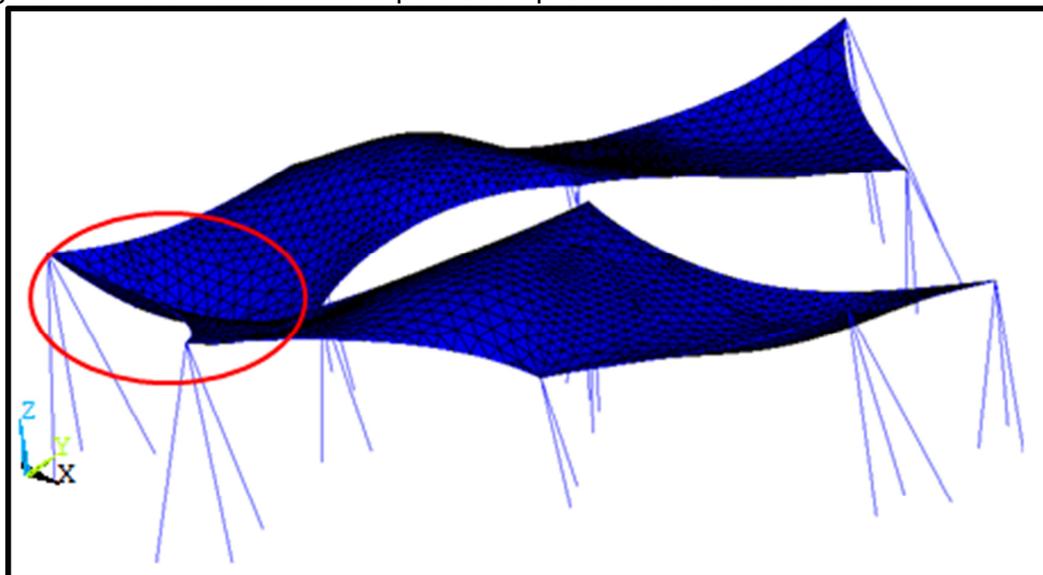
Figura 46 - Tensões nos mastros – Vento transversal de sobrepessão



Fonte: Elaboração própria

A deformada encontrada com a aplicação do vento nessa situação é apresentada na Figura 47. O deslocamento máximo foi de 5 cm, na mesma região que a citada para o vento transversal – sucção (área circulado de vermelho).

Figura 47 - Deformada causada pela sobrepressão do vento transversal



Fonte: Elaboração própria

4.4.2 Direção Longitudinal

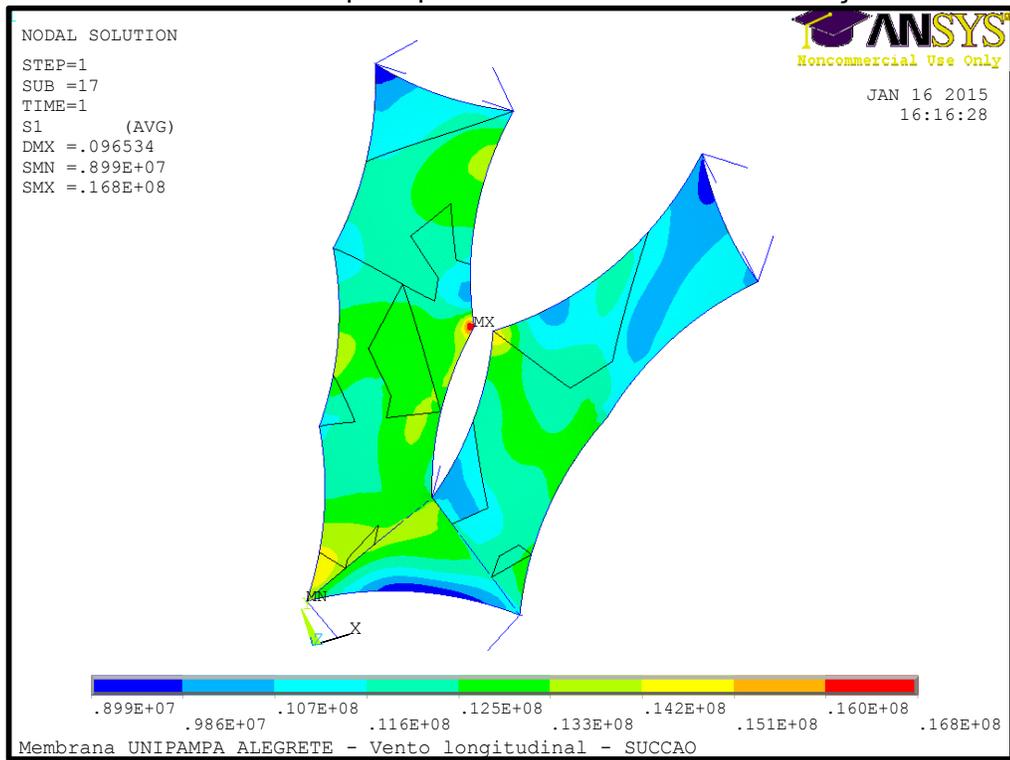
A outra direção em que se aplica o vento é na direção longitudinal, analisando também, o vento de sucção e de sobrepressão.

Vento de Sucção

As tensões principais (1^{as} e 2^{as}) geradas na membrana são apresentadas nas Figuras 48 e 49, respectivamente. As unidades de tensões em todos os casos são dadas em MPa.

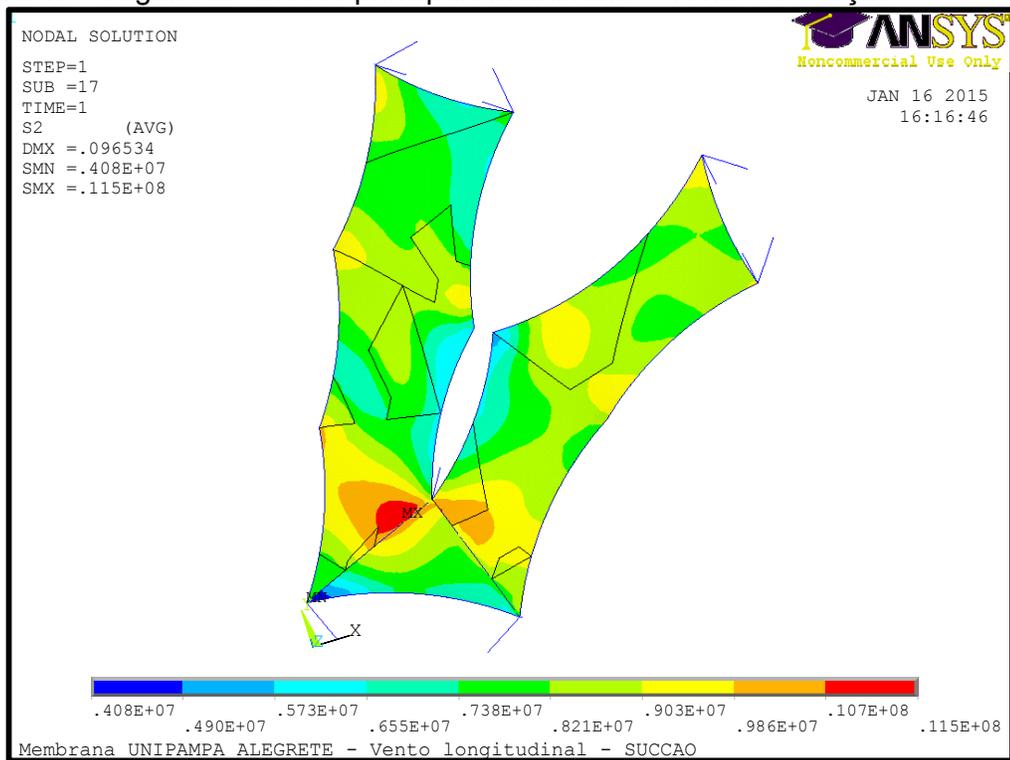
Nesse caso as 1^{as} tensões principais apresentam pouca variação em toda a membrana, apenas tendo um pico em uma pequena região posicionada sobre um mastro. Já as 2^{as} Tensões principais apresentam valores mais altos em uma região não no entorno de um mastro, mas adjacente ao um cabo (neste caso um cabo que não é de borda). Sendo que boa parte da membrana está submetida à tensões que variam entre 11 e 12 MPa. E as tensões de pico, são da ordem de 16,8 MPa.

Figura 48 - Primeiras tensões principais membrana – Vento de Sucção



Fonte: Elaboração própria

Figura 49 - Segundas tensões principais membrana – Vento de Sucção

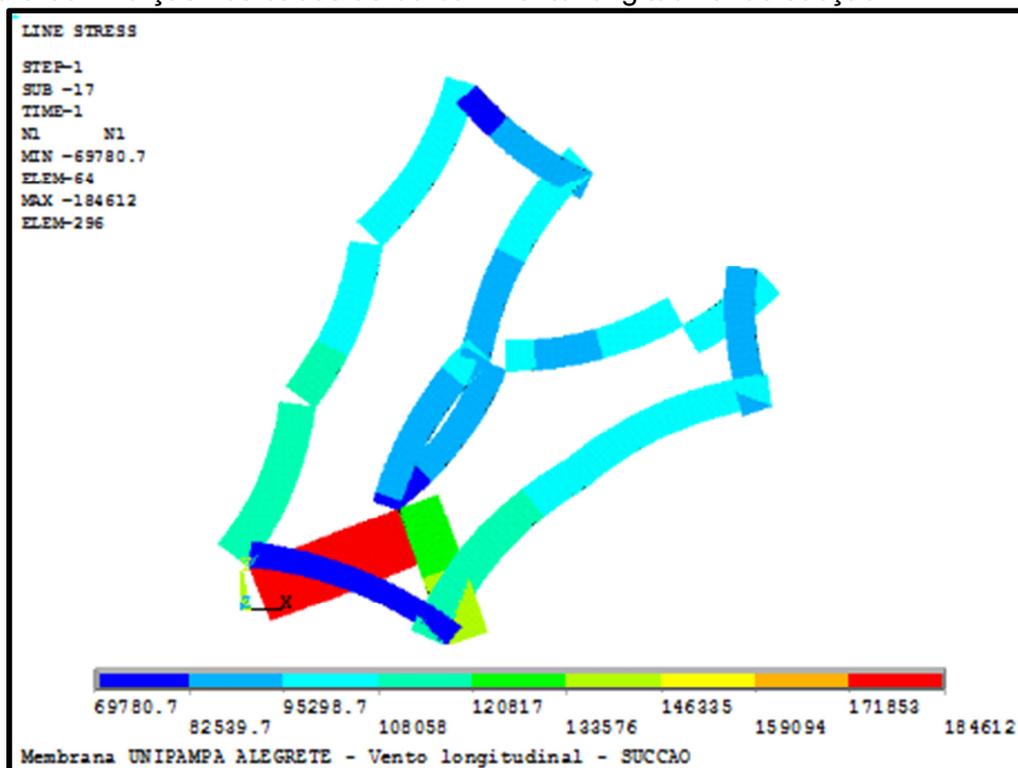


Fonte: Elaboração própria

Nas Figuras 50 e 51, são apresentados os valores de forças nos cabos de borda e as forças nos estais que a estrutura está sujeita quando aplicada a pressão do vento longitudinal de sucção. E as tensões geradas nos mastros, são apresentadas na Figura 52.

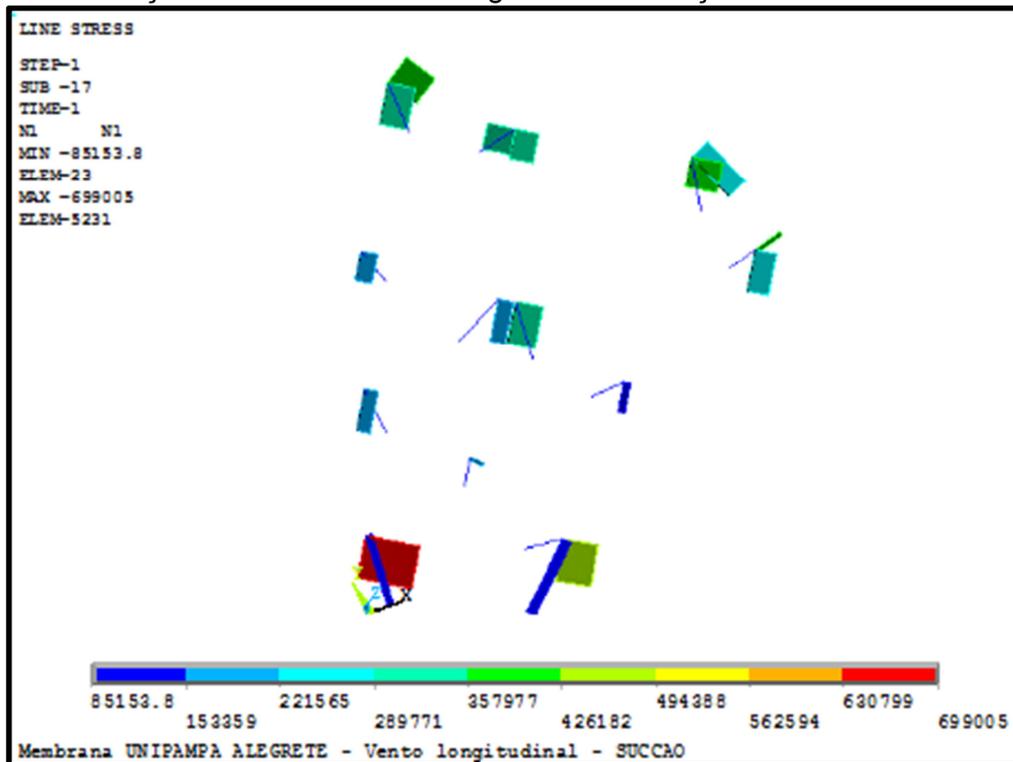
Quando comparados os valores encontrados nesse caso, para as três situações citadas, com os encontrados também para a sucção, porém na direção do vento transversal, verifica-se que todas diminuiram.

Figura 50 - Forças nos cabos de borda - Vento longitudinal de sucção



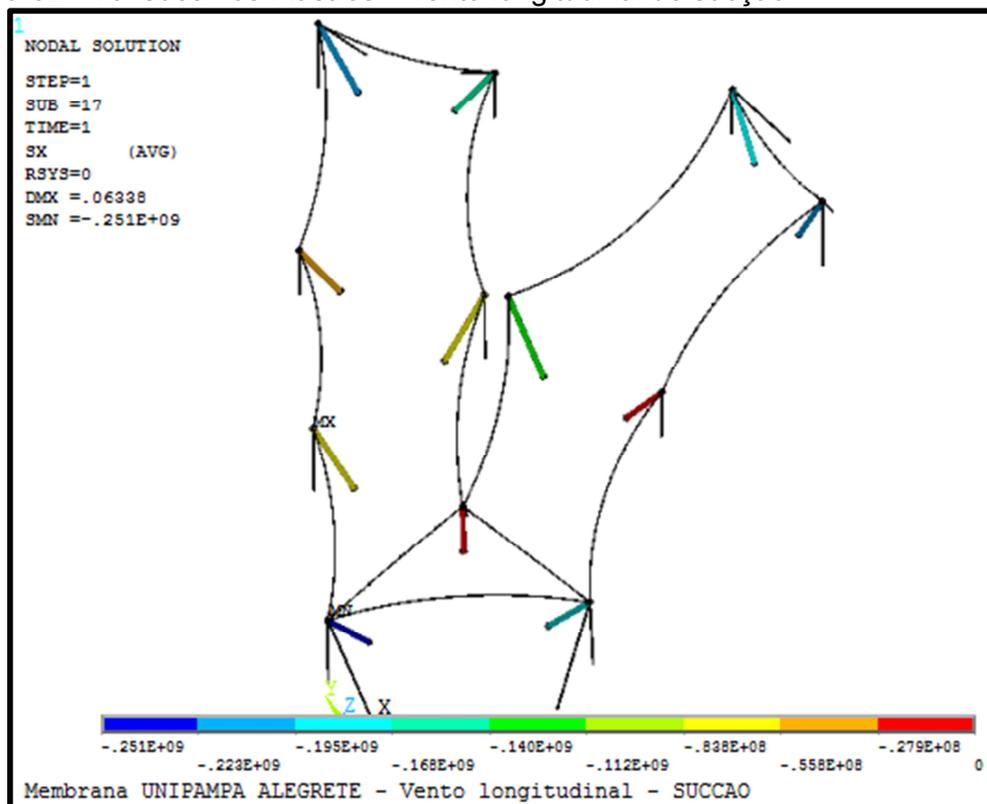
Fonte: Elaboração própria

Figura 51 - Forças nos estais - Vento longitudinal de sucção



Fonte: Elaboração própria

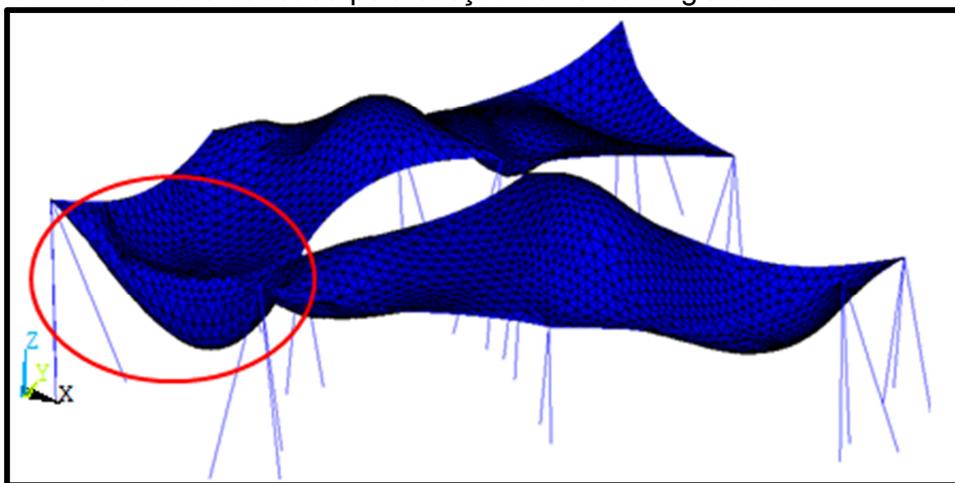
Figura 52 - Tensões nos mastros – vento longitudinal de sucção



Fonte: Elaboração própria

A membrana apresentou um deslocamento máximo de 9 cm, localizado na mesma região que as demais deformadas mostradas até o momento (área circulado de vermelho). A causada pela sucção do vento longitudinal é apresentada na Figura 53.

Figura 53 - Deformada causada pela sucção do vento longitudinal



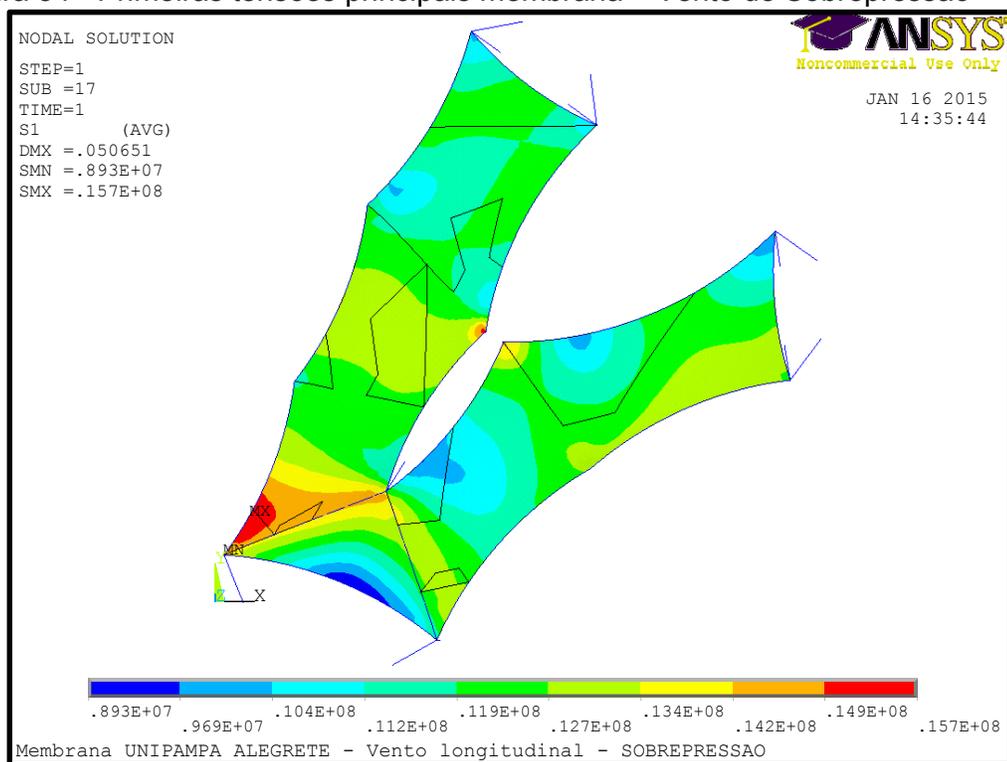
Fonte: Elaboração própria

Vento de Sobrepressão

Para o vento de sobrepressão, os valores de 1^{as} tensões principais e 2^{as} tensões principais geradas na membrana, são apresentados na Figura 54 e 55, respectivamente.

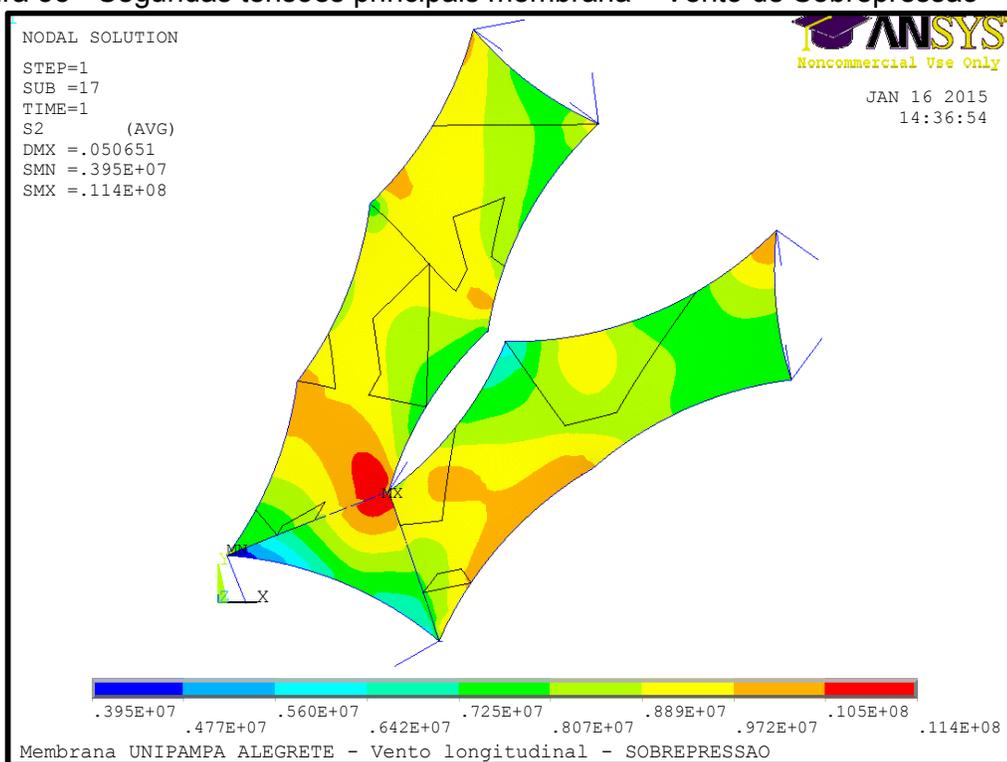
Ao comparar-se as tensões geradas para a mesma direção de vento, porém causadas por vento de sucção, é possível perceber que os valores das 1^{as} Tensões principais geradas para o vento de sucção é mais elevado do que para o vento de sobrepressão. Isso ocorre em razão da disposição das zonas relacionadas aos coeficientes de pressão do vento. Já para as 2^{as} Tensões principais, os valores apresentados são numericamente equivalentes. Sendo que boa parte da membrana está submetida à tensões que variam entre 11 e 12 MPa. E as tensões de pico, são da ordem de 15,7 MPa.

Figura 54 - Primeiras tensões principais membrana – Vento de Sobrepressão



Fonte: Elaboração própria

Figura 55 - Segundas tensões principais membrana – Vento de Sobrepressão

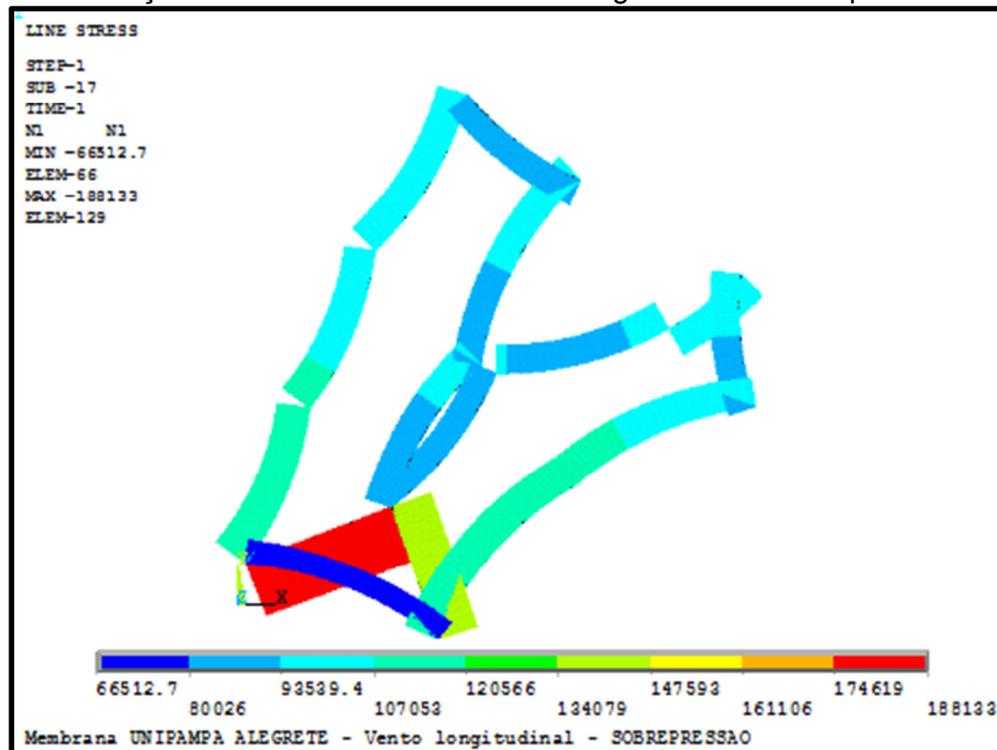


Fonte: Elaboração própria

Quando aplicada a pressão de vento longitudinal de sobrepressão, são encontradas as forças aplicadas nos cabos de borda e nos estais, conforme Figura 56 e 57 e as tensões nos mastros, conforme Figura 58.

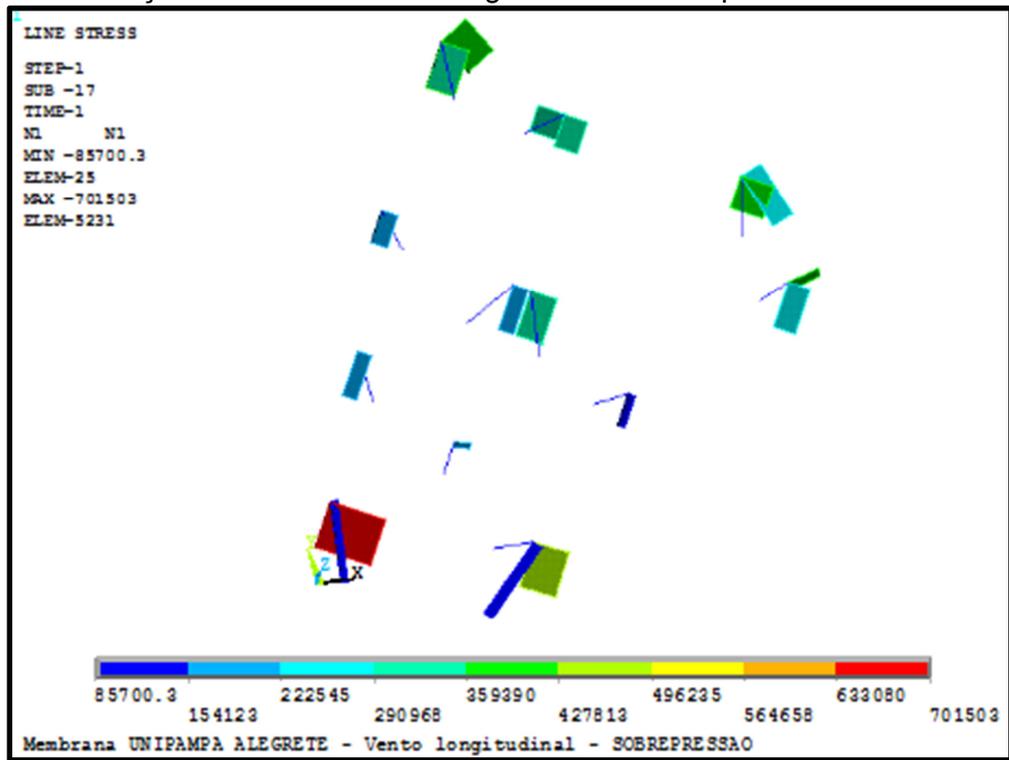
Se comparadas com a força na mesma direção, porém para a sucção, percebe-se que as mesmas tiveram um aumento, já se comparadas com as encontradas para a mesma situação, porém no vento transversal, elas tiveram um aumento pequeno, numericamente equivalente.

Figura 56 - Forças nos cabos de borda - Vento longitudinal de sobrepressão



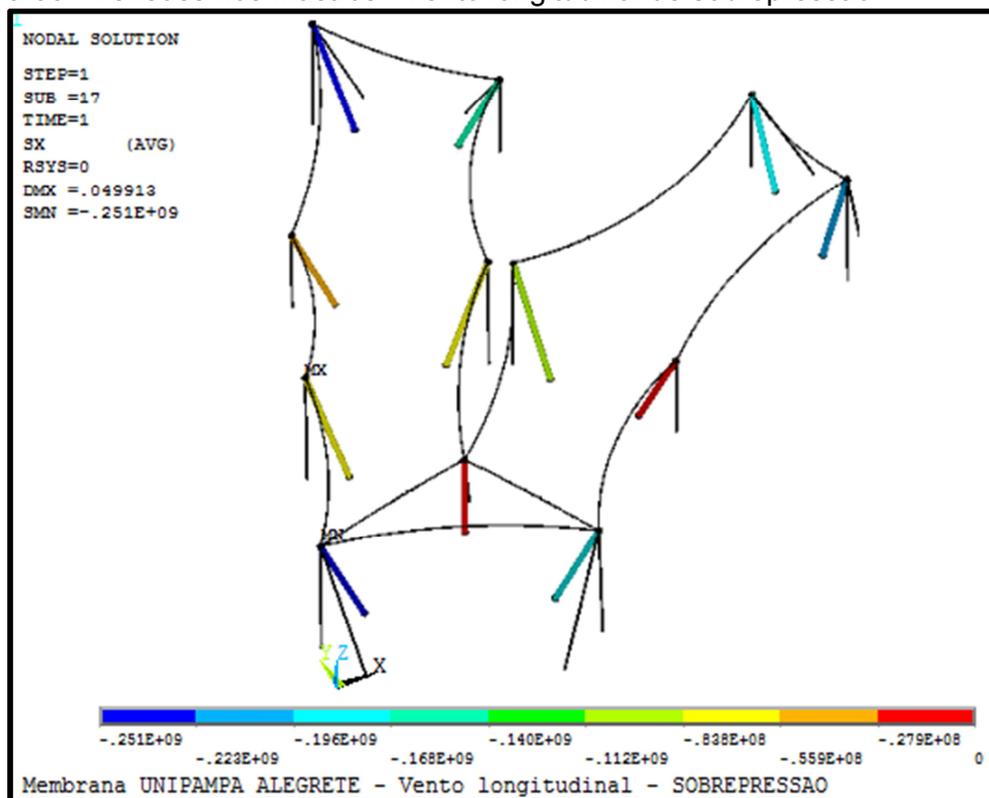
Fonte: Elaboração própria

Figura 57 - Forças nos estais - Vento longitudinal de sobrepressão



Fonte: Elaboração própria

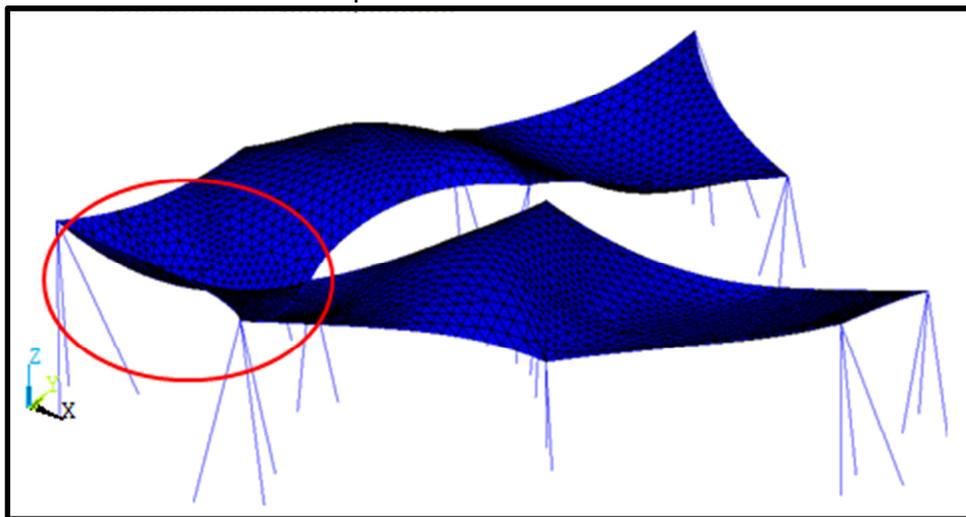
Figura 58 - Tensões nos mastros– Vento longitudinal de sobrepressão



Fonte: Elaboração própria

A deformada encontrada apresenta um deslocamento máximo de 5 cm, localizado na mesma região que as demais deformadas citadas até o momento (área circulada de vermelho). A mesma é apresentada na Figura 59.

Figura 59 - Deformada de sobrepressão

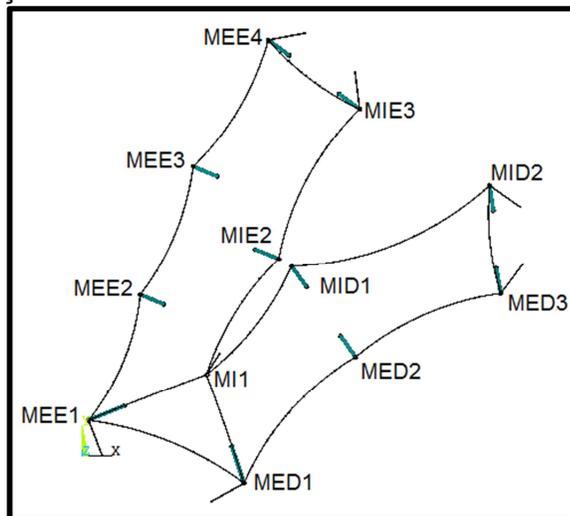


Fonte: Elaboração própria

4.5 Alterações da estrutura

Para que fosse possível a aplicação da protensão e das cargas devidas ao vento, foi necessário adicionar 6 estais ao projeto apresentado por Rafaela Kluge, pois verificou-se que sem a presença destes, o modelo numérico não obtinha convergência, indicando falta de estabilidade da estrutura, impossibilitando a sua execução. Estes estais foram acrescentados nas três extremidades da estrutura, formando um ângulo de 90° com os já existentes. A Figura 60 identifica os mastros. Por esta identificação, o estais adicionados correspondem as posições dos MEE1, MDE1, MEE4, MIE3, MID2 e MED3.

Figura 60 - Identificação dos mastros



Fonte: Elaboração própria

Foi invertida a posição de um estais com um mastro. Trata-se do ponto interno de junção das duas partes da membrana (mastro MI1). Esta inversão foi necessária por outra alteração. Foram acrescentados dois cabos, ligando os mastros MEE1 e MED1, ambos com o MI1. O mastro MI1 anteriormente estava inclinado, depois da alteração ficou na posição vertical. O contrário aconteceu com o estais correspondente.

Outra alteração foi o aumento da inclinação dos mastros MEE1 e MED1, também necessária pela introdução dos cabos internos supracitado.

Todas as alterações foram feitas por falta de estabilidade na estrutura, o que gera não convergência no modelo numérico.

4.6 Escolha dos materiais utilizados

Com as tensões definidas após a aplicação da carga de vento, foi possível escolher o tipo de membrana mais apropriado, que abrange as propriedades e características dessa estrutura.

A membrana deve apresentar as especificações compatíveis com a comercializada pela empresa Serge Ferrari, modelo 902 S2. Este modelo pode ser utilizado tanto para estruturas móveis ou permanentes. A tensão resistente de 400 a 420 daN/5cm, o que equivale a aproximadamente 80 MPa.

Como é necessário trabalhar com coeficientes de segurança altos (de 4 a 5), de modo a diminuir o risco de propagação do rasgo, optou-se por trabalhar com uma membrana com estas especificações, mesmo que a tensão principal que atua na membrana não tenha excedido 17 MPa em nenhuma das situações.

Mais características da membrana selecionada são descritas na Figura 61, retirada do próprio catálogo da empresa (STUDIO SERGE FERRARI, 2012).

Figura 61 - Catálogo Sergio Ferrari

Technical properties	Précontraint 902 S2	Standards
Application	Mobile or permanent structures	
Surface treatment (top/back)	PVDF / PVDF	
Making up	Weldable	
Yarn	PES HT 1100 Dtex	
Weight	950 g/sqm • 28 oz/sqyd	EN ISO 2286-2
Total thickness	0.72 mm	
Width	267 cm • 105.1 in	(+1mm /-1mm)
Tensile strength (warp/weft)	420/400 daN/5cm 480/450 lbs/in	EN ISO 1421 ASTM D 751-00 Cut Strip
Tear resistance (warp/weft)	55/50 daN 105/100 lbs	DIN 53.363 ASTM D 751-00 Trapezoid
Adhesion	12 daN/5cm	EN ISO 2411
Flame retardancy		
Euroclass	B-s2,d0 /EN 1350-1	
Rating	M2/NFP 92-507 • B1/DIN 4102-1 • Test 2/NFPA 701 • CSMF T19	
Guarantee*		

Fonte: Studi Serge Ferrari, (2012)

4.7 Obtenção das forças e tensões máximas

A partir da obtenção das tensões e forças atuantes em todos os elementos estruturais, constatou-se que os valores mais críticos para cada situação analisada, são os apresentados na Tabela 4. Assim, para dimensionamento dos elementos de fundações são esses os valores que deverão ser considerados.

Tabela 4: Valores máximos para tensões e forças

CARREGAMENTOS		CABOS DE BORDA	ESTAIS	MASTROS	
		Forças (KN)	Forças (KN)	Tensões (MPa)	Forças (KN)
Protensão		187,36	699,81	251,0	460,50
Vento Transversal	SUCÇÃO	191,61	704,72	252,0	462,34
	SOBREPRESSÃO	187,66	701,89	252,0	462,34
Vento Longitudinal	SUCÇÃO	184,61	699,00	251,0	460,50
	SOBREPRESSÃO	188,13	701,50	251,0	460,50

Fonte: Elaboração própria

4.8 Obtenção das forças atuantes nos elementos de fundação

Para o dimensionamento dos elementos de fundações, foram utilizadas as forças atuantes do caso mais crítico (vento de sucção na transversal), levando em consideração a inclinação de cada elemento estrutural. Dessa forma, os valores encontrados para cada direção são os apresentados na Tabela 5 para os mastros e na Tabela 6 para os estais.

A nomenclatura utilizada segue a apresentada na Figura 60, e no caso dos estais, a adição de P nessa nomenclatura, é correspondente aos estais das extremidades que são paralelos ao seguimento da membrana.

Tabela 5: Forças mastros

MASTROS	DIREÇÃO		
	x	y	z
MEE1	166,00	66,15	-426,41
MEE2	27,13	-11,37	-106,27
MEE3	32,44	-13,33	-87,15
MEE4	91,36	-66,82	-400,80
MI1	0,00	0,00	-24,03
MIE2	-30,45	12,53	-117,10
MIE3	-92,15	67,60	-286,26
MID1	32,39	-45,62	-199,63
MID2	19,48	-138,12	-349,29
MED1	-43,32	128,54	-321,12
MED2	-5,20	7,45	-22,65
MED3	-15,66	89,21	-321,40

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6: Forças estais

ESTAIS	DIREÇÃO		
	x	y	z
MEE1-P	-12,00	30,87	80,90
MEE1	0,00	0,00	704,72
MEE2	0,00	0,00	177,67
MEE3	0,00	0,00	205,95
MEE4	0,00	0,00	365,08
MEE4-P	-46,09	-8,49	114,02
MIE3	0,00	0,00	291,16
MIE3-P	15,29	-120,67	209,41
MIE2	0,00	0,00	190,49
MI1	-25,72	-41,68	124,25
MID1	0,00	0,00	354,13

MID2	0,00	0,00	399,77
MID2-P	-84,60	59,88	178,68
MED3-P	1724,64	668,59	376,16
MED3	0,00	0,00	282,38
MED2	0,00	0,00	81,33
MED1-P	41,24	22,92	114,02
MED1	0,00	0,00	456,70

Fonte: Elaboração própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar os resultados obtidos em termos de tensões principais consideradas as duas direções de vento (transversal e longitudinal), pode-se afirmar que os valores são compatíveis com uma estrutura de membrana. Assim como, ao compará-las, é possível perceber que os valores são da mesma ordem de grandeza, distanciando-se muito pouco um do outro, não apresentando alterações significativas.

Uma consideração deve ser realizada caso a estrutura seja executada, pois no nó que obteve uma tensão muito elevada (mastro MEE1), será necessário o acréscimo de mais estais para que as tensões no mesmo diminuam, pois nesse local, além de ser o encontro de dois cabos de borda e mais um cabo interno, o ângulo formado entre eles é muito obtuso, tornando este o ponto que mais exige atenção no trecho até agora estudado.

Quanto as deflexões geradas pela ação do vento, apresentam valores compatíveis com estruturas de membrana.

Tem-se como sugestão para trabalhos futuros a padronagem, não realizada neste trabalho, e o detalhamento das peças que fazem as ligações entre os cabos, as membranas e os mastros, e entre os mastros e cabos e os elementos de fundação.

Sem dúvidas, é necessário desenvolver o projeto na sua totalidade, e não somente em partes, como tem sido feito até o momento.

REFERÊNCIAS

- ACRITICA, 2014. **Cobertura Arena Fonte Nova**. Disponível em: <http://acritica.uol.com.br/craque/Amazonas-Manaus-Craque-futebol-copa_do_mundo-futebol-Membrana-estrutura-metalica-finalizada-Arena_0_1075692474.html> Acessado em: 15 jul. 2104.
- ANSYS. **ANSYS Elements Reference: ANSYS Release 10.0**. U.S.A, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças Devido ao Vento. Rio de Janeiro, 2008.
- AZEVEDO, A.F.M. **Método dos elementos finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2003.
- BASTOS, Maria Alice Junqueira. Renato Anelli enfoca a arquitetura contemporânea no Brasil. **Revista Resenhas Online**. São Paulo: Romano Guerra Editora, ano 10, fev. 2011. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/resenhasonline/10.110/3853>>. Acesso em: 01 jul. 2014.
- BEM PARANA, 2013. **Cobertura Arena Fonte Nova**. Disponível em: <<http://www.bemparana.com.br/noticia/259054/rompe-painel-da-membrana-de-cobertura-da-arena-fonte-nova>> Acessado em: 15 jul. 2014.
- CENTRAL BRASILEIRAO, 2014. **Cobertura do Estádio Beira Rio**. Disponível em: <<http://www.centralbrasileirao.com.br/time/internacional/noticia/20949/membrana-transparente-e-esperada-sabado-para-dar-recheio-ao-beira-rio#.U83IBONdUXs>> Acessado em: 15 jul. 2014.
- COPA 2014. **Cobertura Arena da Amazônia – Manaus**. Disponível em: <<http://www.copa2014.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=1257>> Acessado em: 07 jun. 2014.
- ESPORTE, 2012. **Cobertura Estádio Mané Garrincha**. Disponível em: <<http://esporte.ig.com.br/futebol/2012-10-30/obras-no-estadio-mane-garrincha-em-brasilia-chegam-a-81-concluidas.html>> Acessado em: 12 jul. 2014.
- ESTADÃO ESPORTES, 2013. **Cobertura do Estádio Beira Rio**. Disponível em: <<http://esportes.estadao.com.br/noticias/futebol,estadio-beira-rio-comeca-a-finalizar-instalacao-da-cobertura,1098813>> Acessado em: 12 jul 2014.
- FIGUEROLA, Valentina. Tabelas mostram referenciais de custo e desempenho de tensoestruturas. **Revista Infraestrutura Urbana**. São Paulo: PINI, ed. 30, set. 2013.

Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/30/artigo294294-1.aspx>>. Acesso em: 01 jul. 2014.

GLOBO ESPORTES, 2013. **Cobertura Arena Fonte Nova**. Disponível em: <<http://globoesporte.globo.com/am/noticia/2013/11/para-ugp-projeto-sustentavel-da-arena-da-amazonia-ja-rende-frutos.html>> Acessado em: 15 jul. 2014.

INFRAESTRUTURA URBANA, 2014b. **Cobertura Arena Fonte Nova**. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/20/arena-fonte-nova-estadio-da-copa-na-capital-baiana-271661-1.aspx>> Acessado em: 03 jun. 2014.

INTERNACIONAL. **Cobertura Estádio Beira Rio**. Disponível em: <<http://www.internacional.com.br/pagina.php?modulo=16&setor=195>> Acessado em: 04 jun. 2014.

JORNAL GRANDE BAHIA, 2013. **Cobertura Arena Fonte Nova**. Disponível em: <<http://www.jornalgrandebahia.com.br/2013/05/uma-das-membranas-de-cobertura-da-arena-fonte-nova-rompe-com-as-chuvas.html>> Acessado em: 15 jul. 2014.

KLUGE, R. **Tensoestrutura: Uma proposta para passeios da Unipampa Campus Alegrete**. 2014. 72p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.

NEWS RONDONIA, 2013. **Cobertura Estádio Mané Garrincha**. Disponível em: <<http://www.newsrondonia.com.br/noticias/fifa+veta+mane+garrincha+no+estadio+d+e+brasil/30982>> Acessado em: 12 jul. 2014.

OLIVEIRA, V. M. B. **Análise e projeto de tenso-estrutura têxteis para coberturas**. 2003. 90 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

PASQUAL, T. C. S. **Um estudo sobre a ação do vento nas estruturas de membrana**. 2011. 97 f.. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PAULETTI, R. M. de O. **História, Análise e Projeto das Estruturas Retesadas**. Tese de Doutorado. 2003. 129 f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PET ENGENHARIA CIVIL – UFPR. **ANSYS 9.0: Análise Estrutural**. Temporada de Cursos PET Engenharia Civil. Programa de Educação Tutorial (PET) – Engenharia Civil UFPR. ANSYS® ED 9.0 Disponível em:

<<http://www.cesec.ufpr.br/pet/biblioteca/temporada/ANSYS.pdf>> Acessado em 03 de novembro de 2014.

PORTAL 2014, 2013. **Cobertura Estádio Mané Garrincha**. Disponível em: <<http://www.portal2014.org.br/noticias/11431/MANE+GARRINCHA+ESTA+89+CONCLUIDO+CONFIRA+IMAGENS+AERAS.html>> Acessado em: 04 jun. 2014.

PORTAL METALICA, 2014a. **A cobertura da IBC: Igreja Batista Central em Fortaleza**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/a-cobertura-da-ibc-igreja-batista-central-em-fortaleza>>. Acesso em: 03 jun. 2014.

SALVADORI, M. **Porque os edifícios ficam de pé**. São Paulo: Martins Fontes, 2006.

SOBRINO, A. da S. C. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2006.

SOUZA, R.M. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Apostila Núcleo de instrumentação e computação aplicada à Engenharia. Belém. 2003.

STUDIO SERGE FERRARI. **Precontraint 902 S2**: Fotografia: de set. 2012, V.1 01, Stadium Nelson Oyarzun Arenas, Chile [S.l.], 2012. 1 catálogo. Disponível em: <www.sergeferrari.com>. Acesso em: jan. 2015.

VILELA, C. A. B. e S. Ação estática do vento em tensoestruturas. **Tese de Doutorado**. 2011. 84 f. Universidade de Brasília – Faculdade de tecnologia, Brasília, 2011.