

**MODELO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA TENSOESTRUTURA DE
COBERTURA DO CENTRO COMUNITÁRIO
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**CRISTINA ALMEIDA BUENO E SILVA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**MODELO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA
TENSOESTRUTURA DE COBERTURA DO CENTRO
COMUNITÁRIO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

CRISTINA ALMEIDA BUENO E SILVA

ORIENTADOR: ATHAIL RANGEL PULINO FILHO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.DM – 009A/06

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2006

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

**MODELO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA
TENSOESTRUTURA DE COBERTURA DO CENTRO
COMUNITÁRIO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

CRISTINA ALMEIDA BUENO E SILVA

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

APROVADA POR:

**Prof. Athail Rangel Pulino Filho, Dr. (UnB)
(Orientador)**

**Prof. William Taylor Matias Silva, Dr.Ing. (UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Acir Mércio Loredou Souza, PhD. (UFRGS)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 14 DE DEZEMBRO DE 2006.

FICHA CATALOGRÁFICA

- S586m Silva, Cristina Almeida Bueno e.
Modelo computacional para análise da tensoestrutura de cobertura do Centro Comunitário da Universidade de Brasília. Brasília : s.n., 2006.
x, 79 p., 29,7 cm (Publicação E.DM-009A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília)
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
1. Estrutura (construção). 2. Tensoestrutura. 3. Análise não linear. 4. Estrutura de membrana. I. Título

CDD – 690.1

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, C.A.B. **Modelo computacional para análise da tensoestrutura de cobertura do Centro Comunitário da Universidade de Brasília.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-009A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília : 2006. 79 p.

CESSÃO DE DIREITOS

Nome da Autora: Cristina Almeida Bueno e Silva
Título da Dissertação de Mestrado: Modelo Computacional para Análise da Tensoestrutura de Cobertura do Centro Comunitário da Universidade de Brasília.
Grau / Ano: Mestre / 2006

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

Cristina Almeida Bueno e Silva
SHIN QI 05 Conjunto 06 Casa 20
71505-760 – Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

“Muito obrigado” não chega perto do tanto que quero agradecer...

... a Deus por estar sempre iluminando os caminhos da minha vida.

... aos meus pais, Luiz César e Néli, e irmãos, Luiz Otavio e Guilherme, por tudo! Pelo apoio incondicional desde o primeiro momento em que decidi tornar este sonho realidade e por me fazerem acreditar que tudo é possível, basta querer.

... aos familiares que sempre me incentivaram a perseguir meus objetivos, especialmente ao meu primo Antônio que ajudou a testar os programas junto com o Guilherme.

... ao Fernando pelo carinho, apoio, paciência e atenção durante este período.

... ao professor Athail Rangel Pulino Filho pela dedicação e paciência durante esses anos de pesquisa. Por orientar sem economizar puxões de orelha na medida certa e elogios quando merecidos.

... aos professores Acir Mércio Loredo Souza, William Taylor Matias Silva e José Luis Vital de Brito pela disponibilidade e interesse em participarem da banca examinadora.

... ao professor Vinícius Fernando Arcaro por responder prontamente todas as dúvidas e ajudar a solucionar os problemas ao longo do projeto.

... a toda equipe do Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC/UFRGS pela amizade e colaboração para a próxima etapa.

... aos amigos queridos que tornaram esse tempo inesquecível!

... ao CNPq pelo apoio financeiro.

... e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que esta meta fosse alcançada.

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

“Porque sou do tamanho daquilo que vejo, e não do tamanho da minha altura” (Drummond).

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

RESUMO

A utilização de estruturas executadas com mastros metálicos, cabos de alta resistência e tecido sintético, as estruturas de membrana tracionada por cabos, experimentou um crescimento bastante significativo na última década do século XX. Edificações para as mais variadas funções foram construídas com essa tecnologia.

O objetivo desta dissertação de mestrado é a integração dos programas Membrane, Lights e GiD para análise preliminar da geometria e das tensões da cobertura do Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB visto que o programa Lights embora resolva problemas enfrentados por outros sistemas (Nastran, Ansys) na análise de estruturas com deslocamentos finitos, não dispõe de métodos de pré e pós processamento. O programa GiD é destinado a esse fim, perante acoplamento com sistemas desenvolvidos pelo usuário.

Os programas Membrane, Lights e GiD foram integrados tornando possível o intercâmbio de arquivos e resultados entre esses programas, além da visualização gráfica no GiD das tensões e deslocamentos calculados pelo Membrane e pelo LightsGiD. Foi elaborado um manual com um exemplo desenvolvido passo a passo que engloba essas possibilidades de integração.

Os resultados obtidos impondo carregamento estático de vento e pré-tracionamento mostram o quanto é importante conhecer os parâmetros que definem as características mecânicas da membrana a ser utilizada e como é complexa a análise desse tipo de estrutura, sendo necessária a realização de testes em túnel de vento para que seu efeito possa ser avaliado adequadamente.

A análise dos resultados da simulação do Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB ficou prejudicada devido à falta de informações a respeito dos materiais empregados na construção e de detalhamento de projeto.

ABSTRACT

The use of structures built with metallic masts, high resistance cables and synthetic fabric, tensioned fabric structures, had a quite significant growth in the last decade of the 20th century. Constructions for different purposes were built with this technology.

The goal of this master thesis is the integration of Membrane, Lights and GiD programs for preliminary geometry and tension analysis of the roof of the Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB because even though the program Lights solves problems faced by other systems (Nastran, Ansys) in the analysis of structures with finite displacements, it doesn't have pre and post processing methods. GiD was a program made for this purpose, using systems developed by the user.

The programs Membrane, Lights and GiD were integrated, making it possible to exchange files and results among these programs, besides the graphic visualization in GiD of the tensions and displacements calculated by Membrane and LightsGiD. A manual was created with an example developed step by step which includes all these integration possibilities.

The obtained results with static wind load and pre tensioning show how important it is to know the parameters that define the mechanical characteristics of the membrane to be used and how complex is the analysis of this structure type. To evaluate properly the effects of the wind, it is necessary to make wind tunnel tests.

The Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB simulation results analysis was not very accurate due to lack of information about the materials used in the construction and a detailed project.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Centro Comunitário Athos Bulcão / UnB, Brasília	2
Figura 2.1: Tipos de tenda	3
Figura 2.2: Complexo Olímpico em Munique, Alemanha.	4
Figura 2.3: Vista aérea do Complexo Olímpico em Munique, Alemanha	5
Figura 2.4: Classificação das tensoestruturas em membrana.	6
Figura 2.5: Esquema de estruturas pneumáticas.....	6
Figura 2.6: Estruturas pneumáticas	7
Figura 2.7: Principais tipos de estruturas de membrana tracionada por cabos.....	8
Figura 2.8: Arranjos típicos dos fios nas membranas estruturais	9
Figura 2.9: Exemplo esquemático de membrana estrutural com matriz de revestimento... ..	10
Figura 2.10: Alongamento biaxial típico de membranas.....	11
Figura 2.11: Estruturas de membrana com apoios pontuais.....	12
Figura 2.12: Estruturas de membrana com apoios em arcos	12
Figura 2.13: Exemplo de estrutura de membrana no Brasil: Restaurante Barra Vento, Salvador.....	15
Figura 2.14: Auditório Araújo Viana, Porto Alegre.....	16
Figura 2.15: Foto recente do Auditório Araújo Viana, Porto Alegre.. ..	16
Figura 2.16: Etapas de projeto de uma estrutura de membrana tracionada com cabos.....	17
Figura 3.1: Esquema dos programas elaborados (azul) e modificado (verde)	26
Figura 4.1: Malha de elementos finitos triangulares de três nós obtida no GiD	28
Figura 4.2: Geometria indeformada em três dimensões obtida com o Membrane visualizada no AutoCad.....	28
Figura 4.3: Tensão principal 1 no GiD (kPa)	29
Figura 4.4: Tensão principal 2 no GiD (kPa)	29
Figura 4.5: Deslocamentos dos nós na direção z no GiD (m).....	29
Figura 4.6: Resultado do Lights com cabo 1 no AutoCad	30
Figura 4.7: Um quarto da superfície de membrana para gerar a malha a ser espelhada no GiD	31
Figura 4.8: Malha simétrica de elementos finitos triangulares de três nós obtida no GiD..	31
Figura 4.9: Geometria indeformada obtida no Membrane com visualização no AutoCad.	32
Figura 4.10: Resultado do Lights com cabo 1 no AutoCad	32

Figura 4.11: Resultado do Lights com cabo 15 no AutoCad	32
Figura 4.12: Resultado do Lights com cabo 15 renderizado no AutoCad.....	33
Figura 4.13: Resultado do Membrane (Borges) no AutoCad.....	33
Figura 4.14 - Malha simétrica de elementos finitos triangulares de três nós com flecha reduzida obtida no GiD	34
Figura 4.15: Resultado do Membrane (Borges) no AutoCad.....	34
Figura 4.16: Resultado do Membrane (Borges) com renderização no AutoCad.....	34
Figura 4.17: Malha simétrica de elementos finitos triangulares de três nós obtida no GiD	36
Figura 4.18: Geometria indeformada obtida no Membrane com visualização no AutoCad	36
Figura 4.19: Deslocamentos dos nós no GiD (m), resultado do Membrane	36
Figura 4.20: Visualização no AutoCad da geometria inicial sobre a qual foram aplicados os carregamentos.....	37
Figura 4.21: Visualização no AutoCad da configuração deformada da membrana com cabo 6, resultado do LightsGiD, sucção	37
Figura 4.22: Força atuando nos cabos de borda 6 com sucção e sobrepressão (kN).....	38
Figura 4.23: Deslocamentos dos nós com cabo 6 sem pré-tracionamento, sucção (m)	38
Figura 4.24: Tensão principal 1 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sucção e com os cabos sem pré-tracionamento (kPa)	38
Figura 4.25: Tensão principal 2 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sucção e com os cabos sem pré-tracionamento (kPa)	39
Figura 4.26: Visualização no AutoCad da configuração deformada da membrana com cabo 6, resultado do Lights, sobrepressão	39
Figura 4.27: Deslocamentos dos nós com cabo 6 sem pré-tracionamento, sobrepressão (m)	39
Figura 4.28: Tensão principal 1 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sobrepressão e com os cabos sem pré-tracionamento (kPa).....	40
Figura 4.29: Tensão principal 2 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sobrepressão e com os cabos sem pré-tracionamento (kPa).....	40
Figura 4.30: Superfície com linhas guias para geração de malha de elementos finitos	41
Figura 4.31: Visualização no AutoCad da configuração deformada da membrana com cabo 6, resultado do Lights, sucção.....	42
Figura 4.32: Força atuando nos cabos de borda 6 sob sucção (kN)	42
Figura 4.33: Tensão principal 1 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sucção e com os cabos com pré-tracionamento (kPa)	42

Figura 4.34: Tensão principal 2 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sucção e com os cabos com pré-tracionamento (kPa)	43
Figura 4.35: Visualização no AutoCad da configuração deformada da membrana com cabo 6, resultado do Lights, sobrepressão	43
Figura 4.36: Força atuando nos cabos de borda 6 sob sobrepressão (kN).....	43
Figura 4.37: Tensão principal 1 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sobrepressão e com os cabos com pré-tracionamento (kPa)	44
Figura 4.38: Tensão principal 2 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sobrepressão e com os cabos com pré-tracionamento (kPa)	44
Figura 4.39: Detalhes de fixação da membrana	45
Figura 4.40: Vista superior e inferior do modelo com elementos de membrana (verde), de cabo (azul) e mastro (magenta)	45
Figura 4.41: Vista lateral e detalhe de fixação da membrana no mastro lateral.....	46
Figura 4.42: Vista parcial do modelo com elementos de membrana, cabo e mastro além de visualização de detalhes de fixação da membrana nos mastros principais.....	46
Figure A.1: Scheme of the developed (blue) and modified (green) programs	55
Figure A.2: A view of what was drawn in AutoCAD with the corner coordinates.....	57
Figure A.3: NURBS Surface created.....	58
Figure A.4: Node, line and surface numbers	58
Figure A.5: Mesh view with node (black), cable and membrane elements (green) numbers	59
Figure A.6: Instructions to mirror the geometry, first step.....	59
Figure A.7: Instructions to mirror the geometry, second step.....	60
Figure A.8: Complete geometry	60
Figure A.9: Instructions to mirror the finite element mesh, first step	61
Figure A.10: Instructions to mirror the finite element mesh, second step.....	62
Figure A.11: Complete mesh with corner node numbers	62
Figure A.12: Generated mesh with normal vectors	63
Figure A.13: Deformed mesh top view in AutoCAD.....	66
Figure A.14: Deformed and undeformed meshes in AutoCAD	66
Figure A.15: Deformed mesh top view in GiD Postprocess	67
Figure A.16: Rotated deformed mesh top view in GiD Postprocess.....	67
Figure A.17: One of the results possibilities: Y Displacement	67
Figure A.18: View of membrane, cable and frame elements in AutoCAD.....	74

Figure A.19: Membrane (green), cable (blue) and frame (magenta) elements view in GiD Postprocess	74
Figure A.20: Some results in GiD Postprocess	75
Figure A.21: Deformed and undeformed meshes in AutoCAD	77
Figure A.22: Membrane (green) and cable (blue) elements shown in GiD Postprocess.....	77
Figure A.23: Some results in GiD Postprocess	78

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. BREVE HISTÓRICO SOBRE AS ESTRUTURAS DE MEMBRANA	3
2.2. PRINCIPAL CLASSIFICAÇÃO DAS TENSOESTRUTURAS EM MEMBRANA	5
2.2.1. Estruturas de membrana tracionadas por cabos.....	8
2.3. MATERIAIS UTILIZADOS EM TENSOESTRUTURAS	9
2.4. CARACTERÍSTICAS DAS TENSOESTRUTURAS	13
2.5. UTILIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE MEMBRANA.....	14
2.6. ETAPAS DO PROJETO DE TENSOESTRUTURAS EM MEMBRANA.....	16
2.6.1. Busca da forma	17
2.6.2. Projeto de cortes	18
2.6.3. Análise estrutural.....	19
2.7. RECOMENDAÇÕES GERAIS DE PROJETO	20
2.8. PRINCIPAIS MÉTODOS NUMÉRICOS PARA ESTRUTURA DE MEMBRANA	21
2.8.1. Lights	22
3. METODOLOGIA.....	23
3.1. ESTUDOS DIRIGIDOS	23
3.2. ANÁLISE DO PROJETO DO CENTRO COMUNITÁRIO	24
3.3. PROGRAMAS	24
3.4. ESTÁGIO	24
3.5. DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMAS E PROCEDIMENTOS EM ADA 95.....	25
3.6. ANÁLISE DE TENSÕES E DESLOCAMENTOS DA TENSOESTRUTURA DE COBERTURA DO CENTRO COMUNITÁRIO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA.....	27
3.7. ELABORAÇÃO DO MANUAL PARA UTILIZAÇÃO DOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS.....	27

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5. CONCLUSÕES.....	47
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
APÊNDICE A - MANUAL	53
A.1. GENERAL INFORMATION	53
A.2. GiD PREPROCESS	56
A.2.1. First option: Import the membrane contour drawing from AutoCAD..	56
A.2.2. Second option: Draw the membrane contour inside GiD	57
A.2.3. After importing the membrane contour from AutoCAD or drawing it	
inside GiD	58
A.3. GiDMEMBRANE	64
A.4. MEMBRANE	66
A.5. GiD POSTPROCESS.....	67
A.6. MEMBRANELIGHTS	68
A.7. GiDLIGHTS	70
A.8. LIGHTSGiD	72
A.8.1. From MembraneLights	72
A.8.2. From GiDLights.....	75
APÊNDICE B - CD	79

1. INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas executadas com mastros metálicos, cabos de alta resistência e tecido sintético (*fabric structures*) experimentou um crescimento bastante significativo na última década do século XX. Edificações para as mais variadas funções foram construídas com essa tecnologia.

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

Da pesquisa bibliográfica realizada pela autora, pelo orientador e pesquisadores da Unicamp é fácil depreender-se que não se tem ainda estabelecida uma metodologia preponderante para o cálculo (análise e dimensionamento) dessas estruturas.

O objetivo desta dissertação de mestrado é a integração dos sistemas Membrane, Lights e GiD para análise preliminar da geometria e das tensões da cobertura do Centro Comunitário Athos Bulcão da Universidade de Brasília (UnB) (Fig. 1.1) visto que o programa Lights embora resolva problemas enfrentados por outros sistemas (Nastran, Ansys) na análise de estruturas com deslocamentos finitos, não dispõe de métodos de pré e pós-processamento. O programa GiD é destinado a esse fim, perante acoplamento com sistemas desenvolvidos pelo usuário.

Os programas Membrane, Lights e GiD foram integrados através do desenvolvimento dos programas GiDLights, GiDMembrane e MembraneLights, tornando possível o intercâmbio de arquivos e resultados entre esses programas, além da visualização gráfica no GiD das tensões e deslocamentos calculados pelo Membrane e pelo LightsGiD. O LightsGiD

é uma versão do Lights com procedimentos desenvolvidos neste trabalho que geram os arquivos que permitem a visualização dos resultados no ambiente GiD de pós-processamento.

Para facilitar o uso por outras pessoas foi elaborado um manual de utilização (Apêndice A) com um exemplo disponibilizado no CD (Apêndice B), junto com os executáveis e arquivos com o código fonte dos programas.

A análise dos resultados da simulação do Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB ficou prejudicada devido à falta de informações a respeito dos materiais empregados e de detalhamento de projeto.



Figura 1.1: Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB, Brasília.¹

¹ Fotos da autora, em 20/04/2005.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. BREVE HISTÓRICO SOBRE AS ESTRUTURAS DE MEMBRANA

A origem das estruturas de membrana tensionadas se encontra nas tendas e nos toldos tradicionais. Tendas de dimensões consideráveis e de certa sofisticação remontam a pelo menos dois mil anos. Reconhece-se por meio de representações e descrições arquitetônicas, muitos teatros e anfiteatros romanos que eram feitos de velaria produzida a partir de linhas de tecido.

As tendas feitas de peles de animais ou materiais tramados foram usadas ao longo da história e têm sido utilizadas pelo mundo inteiro, particularmente em sociedades nômades que necessitam de coberturas portáteis. Exemplos de tendas usadas no passado incluem as tribos nativas americanas (Fig. 2.1: (a)), os abrigos mongóis (Fig. 2.1: (b)) e a tenda negra utilizada pelos povos nômades no Saara, Arábia e Irã (Fig. 2.1 (c)). Essa última é denominada dessa maneira por causa do emprego de tecido de pêlo negro de bode. Como apresenta cor escura, a tenda negra proporciona sombra e a trama aberta permite o escape do ar quente.

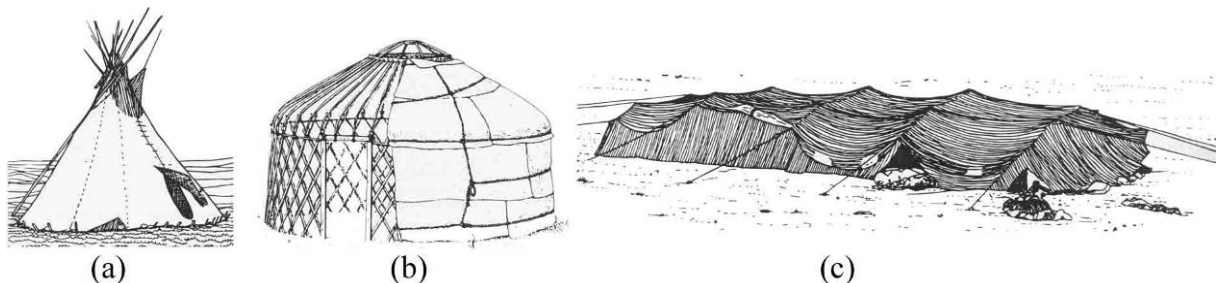


Figura 2.1: Tipos de tenda¹: (a) tenda cônica; (b) tenda “*kibitka*”; e (c) tenda negra

¹ Modificada de Harris & Li (1996)

Houve pouco desenvolvimento das tendas entre o tempo dos Romanos e o século XIX, em parte por causa da carência de demanda, e principalmente por causa da carência de avanços na manufatura de cabos, tecidos e conexões resistentes. Porém, depois da Revolução Industrial houve uma demanda por tendas grandes (utilizadas para o entretenimento de populações, como os circos) e por materiais de grande resistência, com produção em massa e relativamente barata (Borges, 2004).

A estrutura pneumática que inaugurou a era moderna das tensoestruturas foi projetada e executada por Walter Bird em 1946 na construção de uma proteção para uma antena de radar nos Estados Unidos. Com o sucesso dessas estruturas, ele abriu uma empresa especializada em tensoestruturas em 1956 que atua até hoje, a Birdair.

Em 1967, Frei Otto, um especialista alemão em estruturas tracionadas construiu o Pavilhão da Alemanha na Exposição de Montreal. Como nesta época não existia membrana com resistência suficiente para ser suspensa pelos mastros e tracionada pelos cabos de borda, foi utilizada uma rede de cabos com uma membrana sobre ela, apenas com a função de vedar. Outro projeto que segue a mesma linha, construído em 1971, também de autoria de Frei Otto é o Complexo Olímpico de Munique (Figs. 2.2 e 2.3) (Oliveira, 2001).



Figura 2.2: Complexo Olímpico em Munique, Alemanha.¹

¹ Fotos da autora, em 16/01/2005.

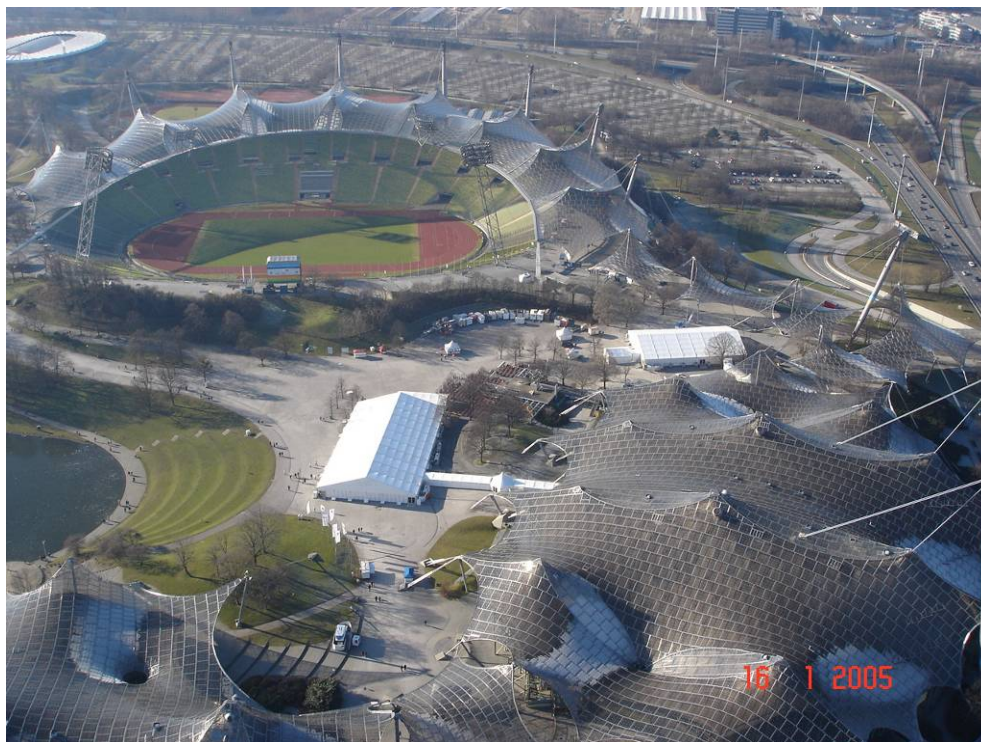


Figura 2.3: Vista aérea do Complexo Olímpico em Munique, Alemanha.¹

2.2. PRINCIPAL CLASSIFICAÇÃO DAS TENSOESTRUTURAS EM MEMBRANA

Segundo Lewis (1998), a *tensoestrutura em membrana* é uma das categorias de um amplo grupo de estruturas não-convencionais chamadas *tensoestruturas leves* (Fig. 2.4), que além da estrutura de membrana ainda inclui as *redes de cabos tracionados* e os *sistemas cabos-treliça*. A membrana estrutural é o principal elemento que distingue as tensoestruturas em membrana das demais. Para um desempenho satisfatório, como colocam Haber & Abel (1982), essas estruturas precisam ser projetadas de maneira que mesmo quando não se considere qualquer carregamento atuante, toda a membrana esteja submetida a um estado de tensão de tração. Esse estado de tensão, chamado “*pré-tracionamento*”, é um dos pontos

¹ Foto da autora, em 16/01/2005.

fundamentais do projeto das tensoestruturas em membrana. Ele exerce influência direta sobre a forma da estrutura, sua durabilidade e a amplitude de seus deslocamentos quando carregada.

Os principais elementos de aplicação do pré-tracionamento à membrana desse tipo de tensoestruturas são: cabos tensores e pressão de ar. Quando o principal elemento de tracionamento da membrana é o cabo tensor, a estrutura é chamada *estrutura de membrana tracionada por cabos*. Da mesma forma, quando o tracionamento da membrana se dá por pressão de ar, a estrutura é classificada como *estrutura pneumática* (Figs. 2.5 e 2.6) (Lewis, 1998; Oliveira, 2001).

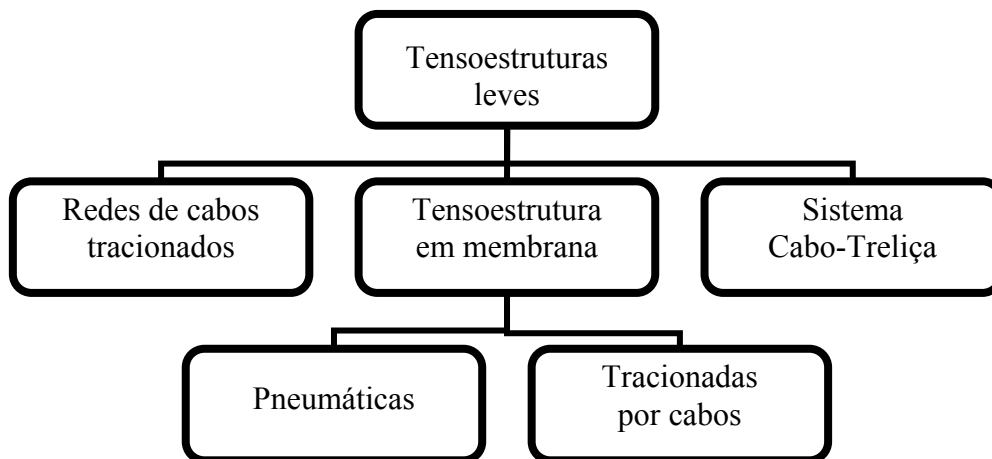


Figura 2.4: Classificação das tensoestruturas em membrana.



Figura 2.5: Esquema de estruturas pneumáticas.¹

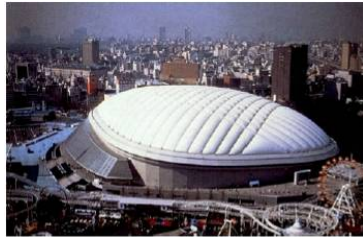
¹ Pauletti (2003).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2.6: Estruturas pneumáticas: (a) Arena Romana de Nîmes, França¹; (b) Pavilhão alemão da Expo'92 em Sevilha, Espanha²; (c) *Tokyo Dome*, Japão¹; (d) Cobertura de Campo de Golfe, EUA¹; (e) Pavilhão de Exposições da Mercedes-Benz, Brasil³.

¹ Oliveira (2001)

² Pauletti (2003)

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

2.2.1. Estruturas de membrana tracionadas por cabos

Entre as estruturas de membrana tracionada por cabos, o principal aspecto que assegura a estabilidade da membrana é a superfície de dupla curvatura oposta (“*antitlastic surface*”). Segundo Vandenberg (1996), existem duas famílias consideradas “formas puras” com superfície de dupla curvatura oposta e curvatura média nula, os *parabolóides hiperbólicos*, (Fig. 2.7: (a)), e os *catenóides*, (Fig. 2.7: (b)). Quando essas superfícies correspondem à superfície de mínima área para um dado contorno, são chamadas *superfícies de mínima área*. Essas são formas ideais que proporcionam uma distribuição uniforme de tensão, sem cisalhamento, por toda a membrana. Os modelos produzidos com filme de sabão têm a interessante propriedade de sempre assumirem a forma de mínima área. As formas dos parabolóides hiperbólicos e catenóides podem ser modificadas com a introdução de picos agudos, picos abaulados (Fig. 2.7: (c)) e cristas (Fig. 2.7: (d)) (Borges, 2004).

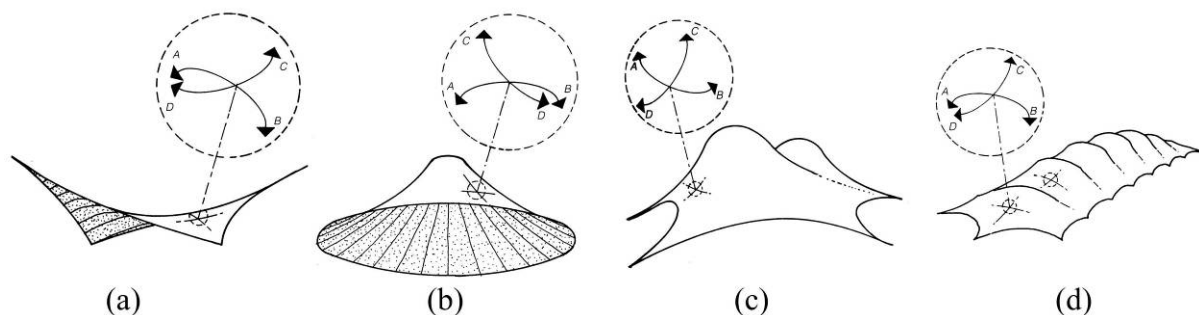


Figura 2.7: Principais tipos de estruturas de membrana tracionada por cabos¹: (a) parabolóide hiperbólico; (b) catenóide; (c) e (d) superfícies modificadas.

¹ Modificado de Vandenberg (1996).

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

2.3. MATERIAIS UTILIZADOS EM TENSOESTRUTURAS

Os componentes básicos de tensoestruturas são as membranas (mantas sintéticas), as cordoalhas de aço, as estruturas de suporte e os elementos de ancoragem e fundação. O principal material utilizado para a confecção das tensoestruturas são as mantas.

O tecido e a matriz de revestimento são os componentes básicos das membranas estruturais. Muitas vezes também é acrescentado um revestimento de superfície (Figs. 2.8 e 2.9).

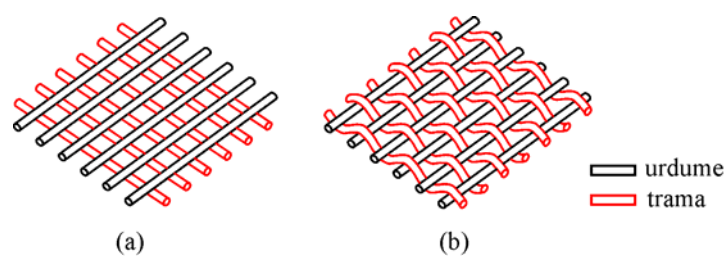


Figura 2.8: Arranjos típicos dos fios nas membranas estruturais¹:
(a) *fios sobrepostos*; e (b) *tecido padrão*.

¹ Borges (2004).

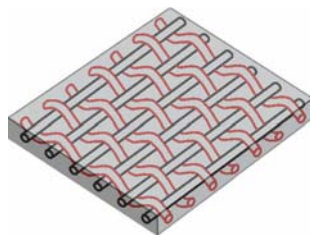


Figura 2.9: Exemplo esquemático de membrana estrutural com matriz de revestimento.¹

Existem muitos tipos de tecidos que podem ser utilizados na construção das tensoestruturas. A escolha varia de acordo com a demanda; como malha estrutural podem-se citar a fibra de vidro, o poliéster, o kevlar (fibra de carbono), ou o nylon e como revestimento existem o cloreto polivinílico (PVC), o politetrafluoretileno (PTFE), o teflon (PVDF), ou o silicone.

A escolha do tipo de membrana deve levar em consideração características tais como resistência mecânica, permeabilidade, resistência ao fogo, peso próprio, durabilidade, isolamento térmico e translucidez. Como o custo é fortemente influenciado pela durabilidade, geralmente projetos temporários são confeccionados com membrana de tecido poliéster revestido com PVC e projetos permanentes mais requintados com membrana constituída por fibras de vidro revestidas com *teflon* ou silicone (Oliveira, 2001).

As membranas revestidas com PVC/Poliéster são auto-retardantes em caso de incêndio. Já as membranas de PTFE e Teflon não pegam fogo. Todas essas membranas são aceitas pelas normas internacionais para utilização em estruturas permanentes (Figuerola, 2004).

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

¹ Borges, 2004.

O conhecimento da relação tensão-deformação é muito importante em todas as etapas de projeto de tensoestruturas, mas sua determinação pode ser difícil em virtude do comportamento não-linear, ortotrópico e muitas vezes inelástico que as membranas estruturais apresentam. As relações tensão-deformação na direção do urdume e da trama são significativamente diferentes (Fig. 2.10). Além disso, em geral, existe grande diferença entre o comportamento da membrana no primeiro carregamento e nos carregamentos subsequentes (Borges, 2004).

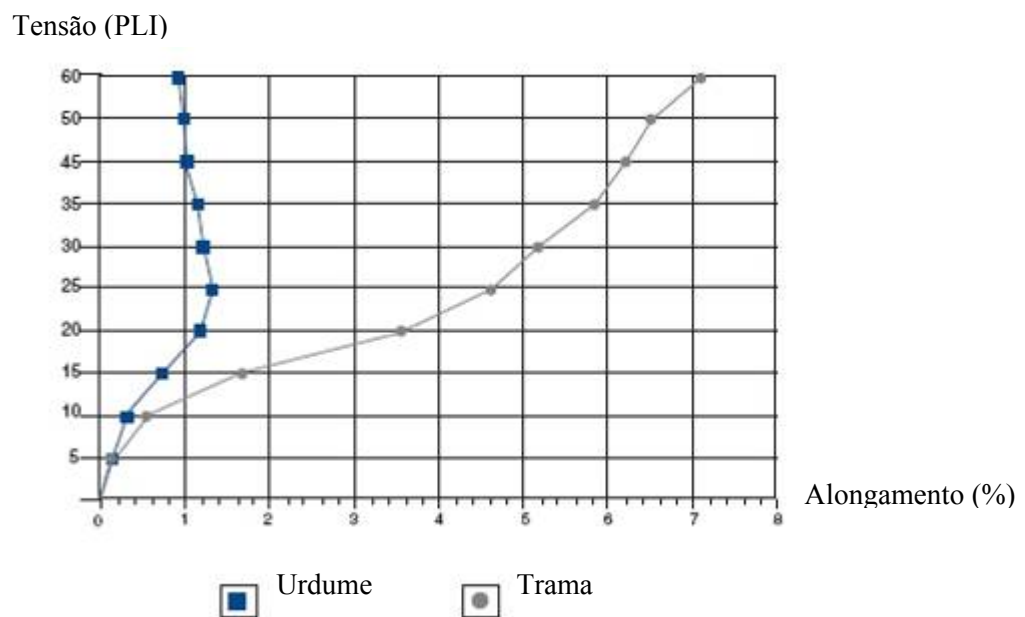


Figura 2.10: Alongamento biaxial típico de membranas.¹

A estrutura de sustentação das membranas tensionadas pode ser madeira ou ligas metálicas como aço e alumínio, com apoios pontuais (Fig. 2.11) ou em arcos (Fig. 2.12).

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

Os arranjos estruturais, via de regra, consistem em reticulados espaciais em que as barras ficam sujeitas exclusivamente a esforços axiais de compressão. Essa configuração

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

garante alta eficiência estrutural, uma vez que as barras são solicitadas da forma que permite o melhor aproveitamento da capacidade resistente do material.

As barras que compõem a estrutura em geral possuem seção transversal tubular. Essa forma garante boa rigidez com pouca quantidade de material, resultando em estruturas leves e muito resistentes (Borges, 2004).

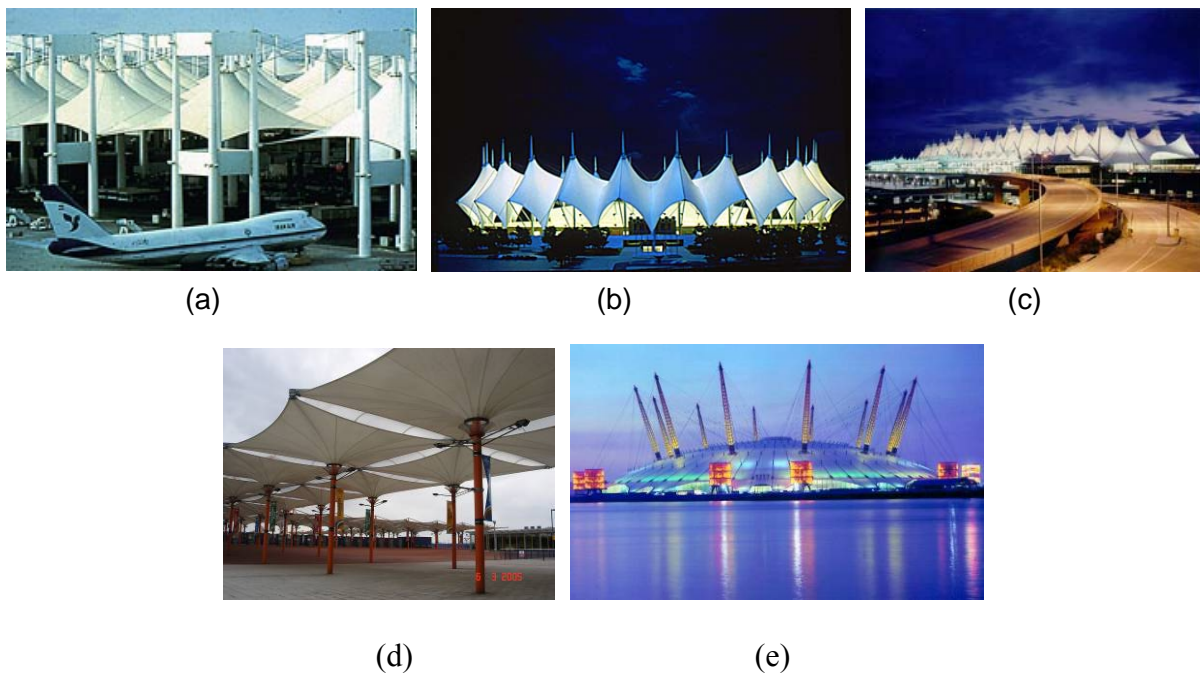


Figura 2.11: Estruturas de membrana com apoios pontuais: (a) Terminal Haj, Arábia Saudita¹; (b) Estádio do Rei Fahd, Arábia Saudita¹; (c) Aeroporto de Denver, EUA²; (d) acesso ao Millenium Dome, Inglaterra³; e (e) Millenium Dome, Inglaterra⁴.

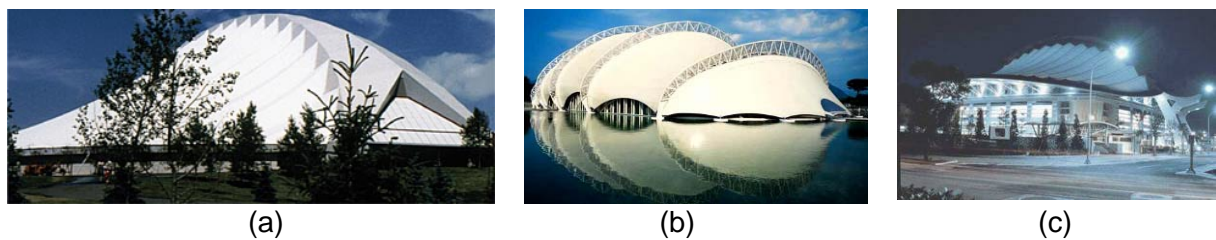


Figura 2.12: Estruturas de membrana com apoios em arcos: (a) Lindsay Park, Canadá¹; (b) Laboratório de pesquisa da M&G, Itália⁵; e (c) Myao Li Arena, Taiwan¹.

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

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

³ Foto da autora, em 06/03/2005.

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

⁵ Foto obtida do site e modificada:

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

2.4. CARACTERÍSTICAS DAS TENSOESTRUTURAS

- Facilidade de desmontar: Apesar de existirem várias estruturas permanentes deste tipo, as desmontáveis já possuem uma fatia do mercado. Os investidores têm percebido a importância de se deslocar até onde o público está, seja por questões geográficas ou por questões sazonais. Principalmente as construções para entretenimento têm adotado este partido e seus proprietários têm percebido seus benefícios, pois elas atraem o público com um diferencial, uma imagem arquitetônica de grande beleza. Implícitos na desmontabilidade se encontram conceitos importantíssimos atualmente como flexibilidade e possibilidade de reuso.
- Evocação simbólica: Existem tensoestruturas que remetem às tendas utilizadas no deserto ou formas arquitetônicas islâmicas, como também velas de navios, ou montanhas.
- Iluminação: O espaço coberto por membranas tensionadas transmite uma iluminação natural difusa graças à translucidez do material. A iluminação interior noturna é possível e eficiente por causa da alta refletividade da superfície.
- Energia: O impacto energético de uma tensoestrutura depende da relação entre a economia de energia devido à iluminação natural diurna e os maiores gastos com aquecimento em regiões onde ele se faz necessário. A avaliação dos gastos com energia deve incluir iluminação, aquecimento e resfriamento, além dos custos com os equipamentos.
- Vencimento de grandes vãos: Pelos materiais e sistema estrutural utilizado as tensoestruturas são capazes de vencer vãos maiores que qualquer outro tipo de sistema construtivo convencional.

- Baixo peso: Apresentam peso de duas ordens de grandeza menor do que o de estruturas em concreto armado e uma ordem de grandeza menor que estruturas convencionais de aço.
- Variabilidade formal e geométrica: Respeitando princípios de projeto podem ser criadas inúmeras formas.
- Relação custo/benefício: Por serem fruto de uma tecnologia sofisticada, as estruturas de membrana tensionadas normalmente possuem custos elevados em relação a construções convencionais. Porém, atualmente a relação custo/benefício tem imperado, e levando-se em conta que estas estruturas podem vencer grandes vãos, ser totalmente dobradas, desmontadas e transportadas de acordo com a necessidade; elas são vantajosas para determinados casos.

2.5. UTILIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE MEMBRANA

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

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

- Decorações internas de lojas e shoppings.

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

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

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

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



Figura 2.13: Exemplo de estrutura de membrana no Brasil: Restaurante Barra Vento, Salvador¹.

¹ Fotos da autora, em 21/05/2005.



Figura 2.14: Auditório Araújo Viana, Porto Alegre¹.



Figura 2.15: Foto recente do Auditório Araújo Viana, Porto Alegre².

Em várias cidades do Brasil têm sido construídas tensoestruturas para os mais diversos fins (Figs. 2.13 e 2.14). No entanto, um problema que também existe em relação às estruturas convencionais de concreto e aço é a falta de manutenção e inspeção periódica, como pode ser observado comparando as figuras 2.14 e 2.15.

2.6. ETAPAS DO PROJETO DE TENSOESTRUTURAS EM MEMBRANA

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

¹ Oliveira (2003).

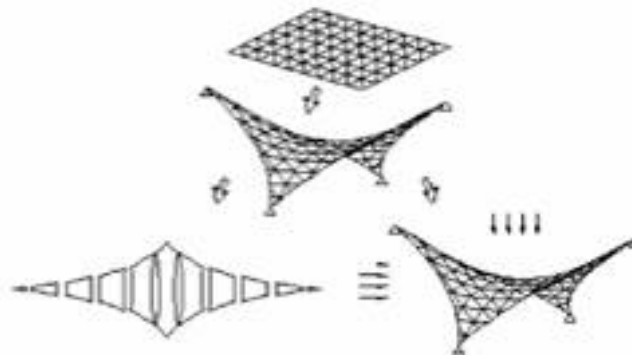
² Foto da autora, em 23/07/2005.

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

Intenção
Arquitetônica



Projeto e
Análise



Solução de
Projeto



Figura 2.16: Etapas de projeto de uma estrutura de membrana tracionada com cabos.¹

2.6.1. Busca da forma

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

¹ Modificado de Figuerola (2004).

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

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

2.6.2. Projeto de cortes

A superfície espacial é dividida em recortes planos correspondentes, com largura e comprimento limitados pelas medidas das peças de membrana estrutural comercializadas e pela impossibilidade de obter uma planificação perfeita da maioria das superfícies utilizadas. Na definição das dimensões dos recortes, considera-se o efeito da relaxação do estado de tensão inicial da membrana.

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

A definição das peças de corte pode ser abordada como um problema em que devem ser minimizados: a diferença entre a estrutura aproximada e a real, o gasto de tecido e o gasto

na costura. Nesse processo, é necessário considerar as restrições devido à largura máxima da tira do tecido, que é função das dimensões dos rolos, e o alongamento diferenciado na direção das fibras do urdume e da trama.

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

2.6.3. Análise estrutural

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

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

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

Uma vez conhecidos deslocamentos e tensões, devem ser feitas verificações que comprovem a estabilidade estrutural e para que os limites determinados pelas normas não

sejam ultrapassados. Atenção especial também deve ser dada para evitar o aparecimento de tensões compressivas na membrana.

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

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

Ainda hoje, em algumas empresas, as duas primeiras etapas do projeto citadas acima, busca da forma e projeto de cortes, são realizadas com auxílio de modelos físicos em escala geométrica reduzida ou através de moldes definidos de forma empírica. Para definição de padrão de corte, por exemplo, a superfície é modelada fisicamente em escala. Sobre essa superfície são posicionadas tiras de papel, representando as tiras de tecido a serem cortadas. A partir dessas tiras são determinadas as geometrias dos pedaços de tecido em escala reduzida (Borges, 2004; Oliveira, 2001; Oliveira, 2003).

2.7. RECOMENDAÇÕES GERAIS DE PROJETO

No caso de estruturas com dupla-curvatura oposta, à medida que cresce o carregamento, a tração aumenta em uma das direções principais e diminui na outra até que não haja mais tração e que a membrana fique folgada. Geralmente, é indesejável que se perca a tração em uma área significativa sob a ação de qualquer combinação de carregamento. Quando surgem regiões com folga, podem ocorrer enrugamentos ou a formação de bolsa, que, além de esteticamente indesejáveis, contribuem para fatores deletérios como: a retenção de

água ou neve; e a propensão a rápidos movimentos como o drapejamento sob a ação do vento. Assim, o pré-tracionamento é prescrito de maneira que não ocorram regiões com folga na membrana quando a estrutura é submetida aos carregamentos (Shaeffer et al, 1996).

As tensoestruturas em membrana são projetadas de maneira que se instale um estado de tensão uniforme, pois além de um sistema estruturalmente eficiente, isso contribui para a durabilidade da membrana e a manutenção do pré-tracionamento inicial ao longo de sua vida útil. Por isso, os modelos que fornecem a configuração com superfície de mínima área, que está associada a um estado de tensão isotrópica e uniforme, são muito visados.

2.8. PRINCIPAIS MÉTODOS NUMÉRICOS PARA ESTRUTURA DE MEMBRANA

Embora as tensoestruturas existam há muito tempo, até por volta de 1968 o projeto de estruturas de membrana se dava exclusivamente por meio de conhecimentos empíricos e com base em modelos físicos. Até hoje, há quem se utilize apenas desses conhecimentos para projetar tensoestruturas.

Com a crescente acessibilidade a computadores, cada vez mais velozes e poderosos, e o desenvolvimento de técnicas numéricas eficientes, diversos métodos numéricos foram desenvolvidos e estão disponíveis para auxiliar na solução de problemas das mais diversas áreas do conhecimento. No caso do projeto de tensoestruturas em membrana, três grupos se destacam: o método da densidade de forças (Schek, 1974), o da relaxação dinâmica (Day, 1965) e o método não-linear dos deslocamentos (Argyris et al, 1974).

2.8.1. Lights

O programa Lights desenvolvido por Arcaro (2006) permite o projeto e a análise de tensoestruturas através do método dos elementos finitos, incluindo a membrana, os cabos e elementos estruturais de suporte.

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

3. METODOLOGIA

3.1. ESTUDOS DIRIGIDOS

O capítulo 2 de Pulino (1991) foi lido para absorção dos conceitos fundamentais sobre a análise não linear de estruturas, com enfoque em estruturas reticuladas.

O texto de Arcaro (2006), que descreve um modelo para a análise não linear de membranas com o uso de elementos finitos triangulares de três nós, foi lido para aplicação posterior à tensoestrutura em estudo.

Tendo em vista a complexidade da estrutura em estudo, optou-se pela adoção do sistema GiD de pré e pós-processamento de estruturas (geração de malhas de elementos finitos e visualização de tensões e deslocamentos), desenvolvido no CIMNE, de Barcelona, Espanha. Para utilização do programa, fez-se um estudo dirigido baseado nos manuais de utilização e de referência da versão 7 e posteriormente da versão 8, de Ribó (2002, 2005 e 2006).

O manual do programa Gmsh de Geuzaine e Remacle (2003) foi estudado e os tutoriais disponíveis foram feitos para geração de malha de elementos finitos triangulares de três nós no programa citado.

Para aprender a linguagem de programação Ada 95 utilizada nos programas Lights e Membrane, o livro de Lopes (1997), de Skansholm (1997) e do material disponível em Pulino (2003) foram estudados.

3.2. ANÁLISE DO PROJETO DO CENTRO COMUNITÁRIO

Foi feito um levantamento da geometria do projeto da cobertura do Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB para recuperar os dados a serem usados nos programas GiD, Membrane, Lights e Membrane (Borges).

3.3. PROGRAMAS

O programa GiD foi utilizado para geração de malhas de elementos finitos triangulares de três nós e visualização de tensões e deslocamentos. Os programas Membrane, Lights e Membrane (Borges) foram usados na obtenção da geometria indeformada tridimensional da membrana do Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB com visualização dos resultados no AutoCad.

3.4. ESTÁGIO

Para adquirir conhecimentos sobre como são realizadas as etapas de projeto e construção de tensoestruturas foi feito um estágio voluntário na Pistelli Engenharia, em São Paulo, empresa responsável pela construção do Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB.

3.5. DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMAS E PROCEDIMENTOS EM ADA 95

Os programas GiDMembrane, GiDLights e MembraneLights foram elaborados para permitir a geração de arquivos de entrada e intercâmbio de resultados entre o Membrane, o Lights e o GiD (pré e pós-processamento).

Um procedimento desenvolvido no programa Membrane foi adaptado e aprimorado para ser implementado no Lights. Este procedimento permite que o resultado do cálculo de tensões na membrana desenvolvido pelo programa utilizado seja visualizado dentro do ambiente GiD de pós-processamento, facilitando a análise da tensoestrutura, no caso do Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB.

Os resultados obtidos nos elementos de cabo e de pórtico foram incluídos no procedimento GiD de pós-processamento desenvolvido para o programa Lights. A versão do programa Lights que apresenta essa possibilidade de visualização de resultados de elementos de membrana, cabo e pórtico no ambiente GiD de pós-processamento passou a ser chamada LightsGiD (Fig. 3.1).

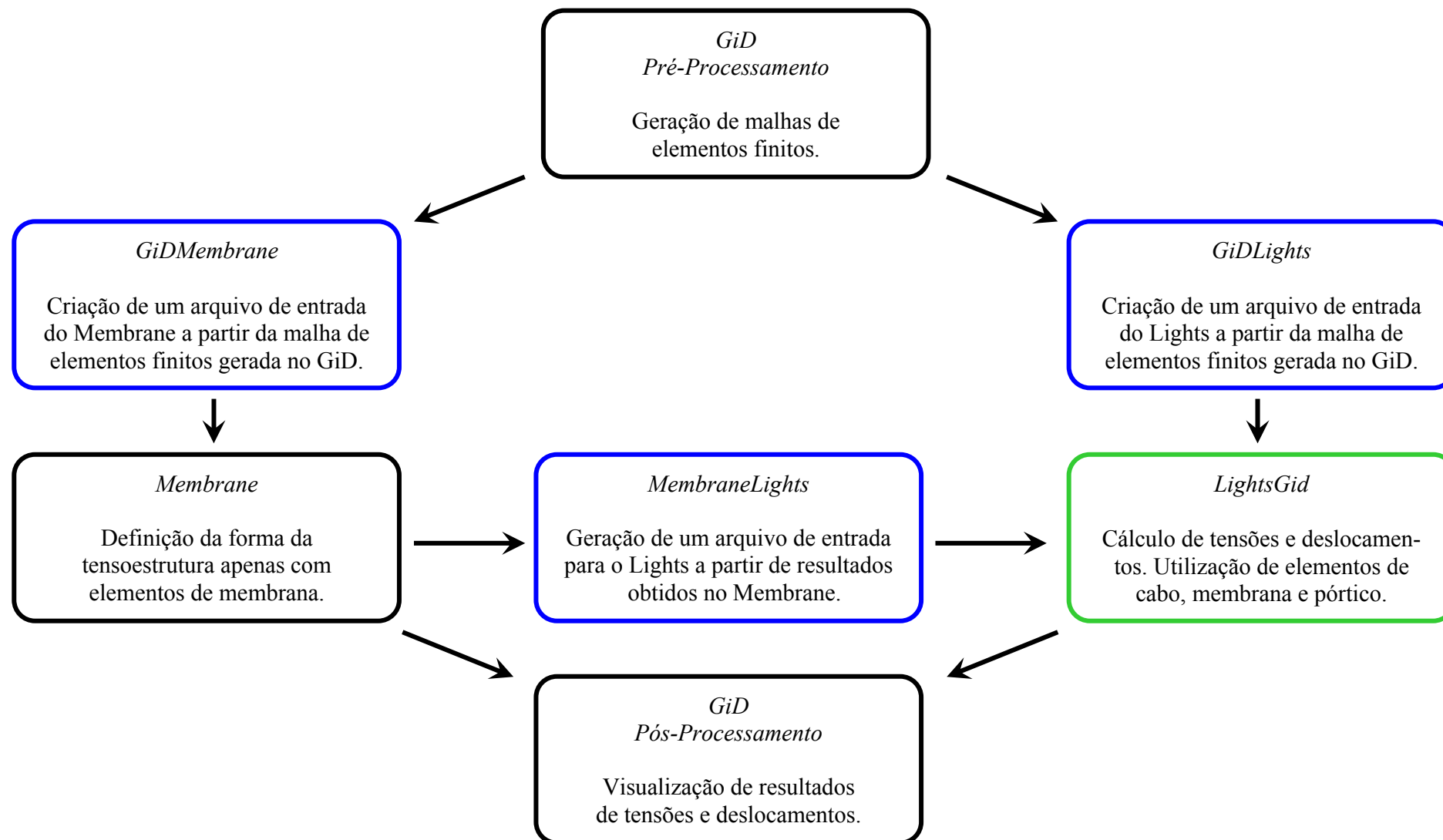


Figura 3.1: Esquema dos programas elaborados (azul) e modificado (verde).

3.6. ANÁLISE DE TENSÕES E DESLOCAMENTOS DA TENSOESTRUTURA DE COBERTURA DO CENTRO COMUNITÁRIO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Foi feita análise dos resultados dos cálculos do programa Lights de tensões e deslocamentos da membrana e dos cabos que compõe a tensoestrutura de cobertura do Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB no ambiente GiD de pós-processamento e no AutoCad. Foram impostos carregamentos distribuídos em todos os elementos da membrana simulando um carregamento estático de vento de sobrepressão e de sucção de 75 kgf/m^2 . Depois disso os cabos de borda foram tracionados, em busca de uma configuração sem elementos de membrana submetidos a esforços de compressão.

3.7. ELABORAÇÃO DO MANUAL PARA UTILIZAÇÃO DOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

Para facilitar a utilização dos programas desenvolvidos e aprimorados, foi elaborado um manual, apresentado no Apêndice A, com uma tensoestrutura em forma de parabolóide hiperbólico como exemplo.

No CD incluído no Apêndice B estão os arquivos executáveis e os que contém o código fonte dos programas desenvolvidos e utilizados, o manual de utilização, os arquivos gerados no exemplo que faz parte do manual e ainda estão disponíveis seis exemplos de estruturas encontrados em Arcaro (2003) que podem ser analisados no LightsGiD.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o levantamento da geometria do Centro Comunitário da UnB foi elaborada uma planta baixa da estrutura no AutoCad posteriormente levada para o GiD para obtenção da malha de elementos finitos triangulares de três nós (Fig. 4.1) correspondente à projeção horizontal da forma desejada.

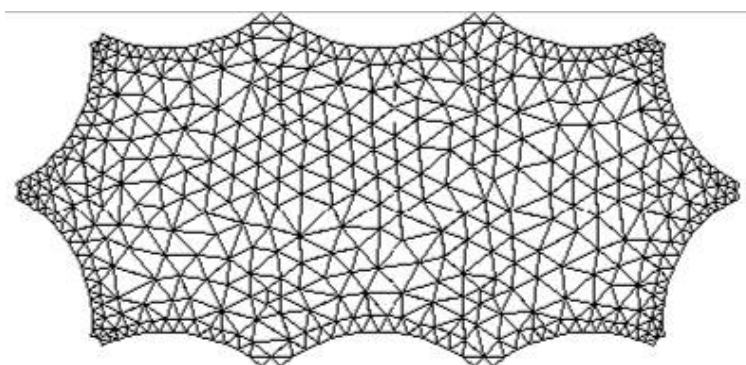


Figura 4.1: Malha de elementos finitos triangulares de três nós obtida no GiD.

A partir da malha plana (Fig. 4.1), no programa Membrane obteve-se a geometria indeformada em três dimensões com visualização dos resultados no AutoCad (Fig. 4.2) e no GiD (Figs. 4.3, 4.4 e 4.5) aplicando deslocamentos prescritos aos nós que correspondem aos pontos de apoio dos mastros. As posições dos nós livres foram encontradas através da solução do sistema não linear da estrutura. Os deslocamentos dos nós mostrados nas figuras 4.5, 4.19, 4.23 e 4.27 foram calculados a partir da cota zero.

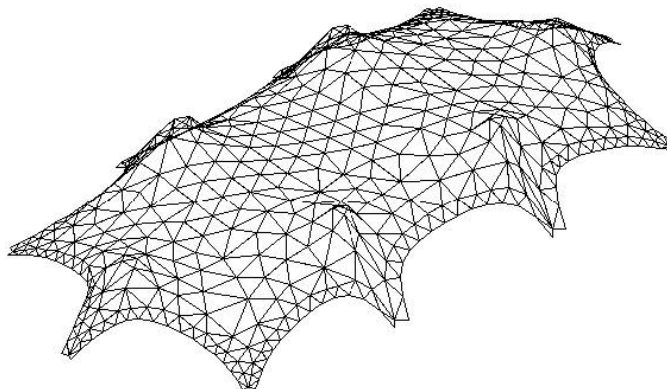


Figura 4.2: Geometria indeformada em três dimensões obtida com o Membrane visualizada no AutoCad.

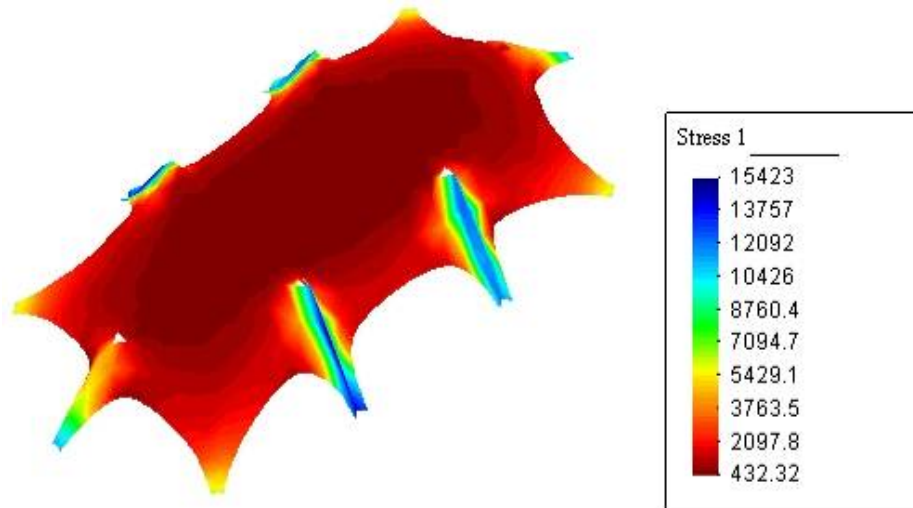


Figura 4.3: Tensão principal 1 no GiD (kPa).

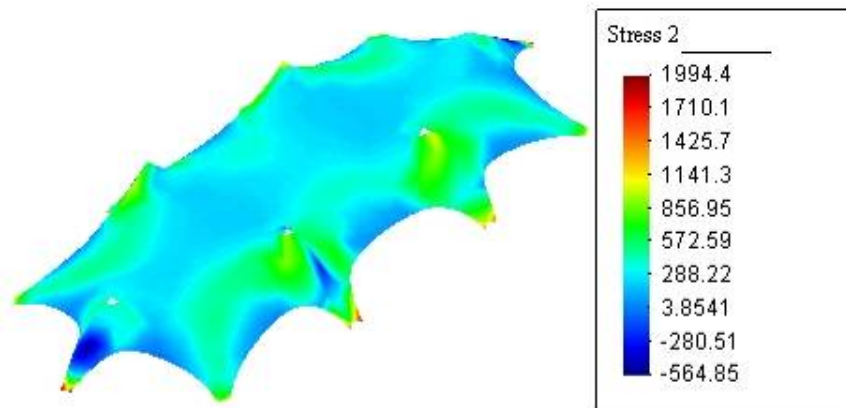


Figura 4.4: Tensão principal 2 no GiD (kPa).

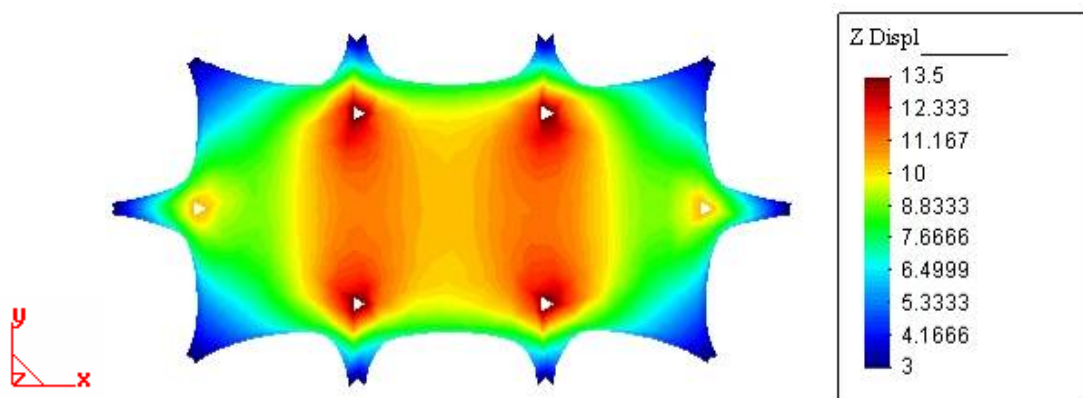


Figura 4.5: Deslocamentos dos nós na direção z no GiD (m).

Com a utilização do programa Membrane conseguiu-se uma aproximação da forma da estrutura real, mas a região central apresentou uma depressão que não é compatível com a realidade.

Aumentando o módulo de elasticidade da malha no mesmo programa obteve-se uma depressão menor no centro da estrutura.

A partir da observação que a região central do tecido assume forma inicial com curvatura indesejável como elemento de cobertura (concavidade para cima) e que o programa Membrane não permite a utilização de cabos, e estes contribuem para solucionar o problema citado, decidiu-se tentar, na obtenção da forma inicial, a inclusão de cabos de borda (que seria inevitável na análise real de tensões) com a utilização do programa Lights (Fig. 4.6).

No Lights foi possível adicionar cabos em toda a borda da malha, reduzindo ainda mais a depressão central. Observou-se que com o aumento da seção do cabo a aproximação da forma obtida com a real é ainda maior.

A numeração dos cabos (Tab. 4.1) citada ao longo do texto refere-se aos dados fornecidos por Arcaro (2006) no primeiro exemplo do programa Lights, dentro do arquivo de entrada material.txt.

Tabela 4.1: Dados de entrada dos cabos no Lights.

Número do cabo	Módulo de Young (kPa)	Peso/unidade de comprimento (kN/m)	Área da seção transversal (m ²)	Carga última (kN)
1	$1,568 \times 10^8$	$7,994154 \times 10^{-3}$	$9,627400 \times 10^{-5}$	$1,186878 \times 10^2$
6	$1,470 \times 10^8$	$2,420796 \times 10^{-2}$	$2,920180 \times 10^{-4}$	$3,493700 \times 10^2$
15	$1,225 \times 10^8$	$1,004598 \times 10^{-1}$	$1,234024 \times 10^{-3}$	$1,527526 \times 10^3$

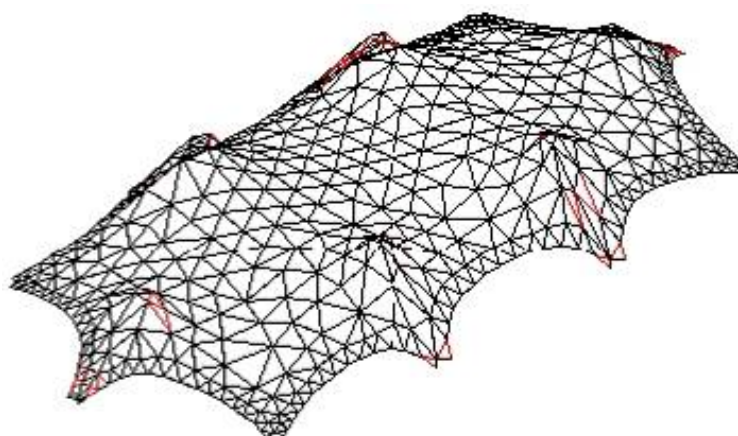


Figura 4.6: Resultado do Lights com cabo 1 no AutoCad.

As partes da cobertura que se apresentam em vermelho (Fig. 4.6) são aquelas submetidas à compressão, ou seja, o tecido está frouxo. As outras regiões estão sob esforço de tração, condição desejável neste tipo de estrutura.

Como a inclusão de cabos de borda não foi suficiente para que a curvatura da região central da estrutura apresentasse concavidade para baixo, decidiu-se gerar no GiD uma malha plana simétrica em relação a um eixo orientado segundo a maior dimensão e outro ortogonal ao primeiro.

Utilizou-se apenas um quarto da planta baixa da estrutura (Fig. 4.7) para geração de uma malha de elementos finitos triangulares de três nós no GiD rebatida para obtenção da malha inicial simétrica completa (Fig. 4.8).

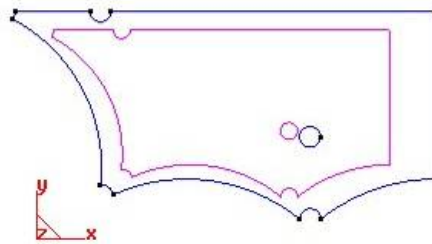


Figura 4.7: Um quarto da superfície de membrana para gerar a malha a ser espelhada no GiD.

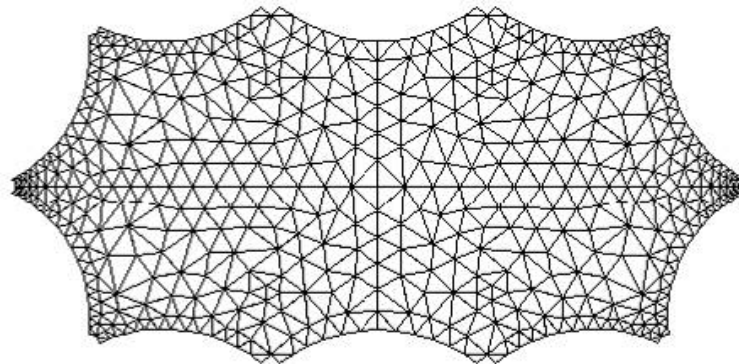


Figura 4.8: Malha simétrica de elementos finitos triangulares de três nós obtida no GiD.

Foi utilizado o programa Membrane para obtenção da geometria indeformada em três dimensões a partir da malha simétrica com visualização dos resultados no AutoCad (Fig. 4.9).

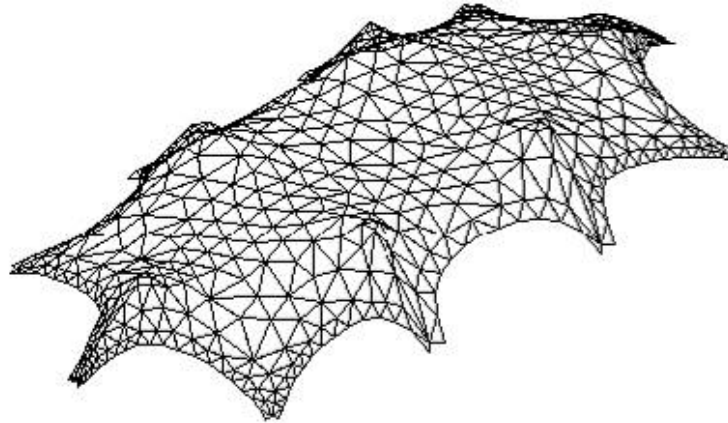


Figura 4.9: Geometria indeformada obtida no Membrane com visualização no AutoCad.

A geometria indeformada obtida com o Membrane a partir da malha simétrica (Fig. 4.9) apresentou na região central uma concavidade menos acentuada do que aquela observada com a malha inicial (Fig. 4.2). Os resultados foram ainda melhores quando a malha simétrica foi utilizada no Lights na geração da geometria indeformada (Figs. 4.10 e 4.11).

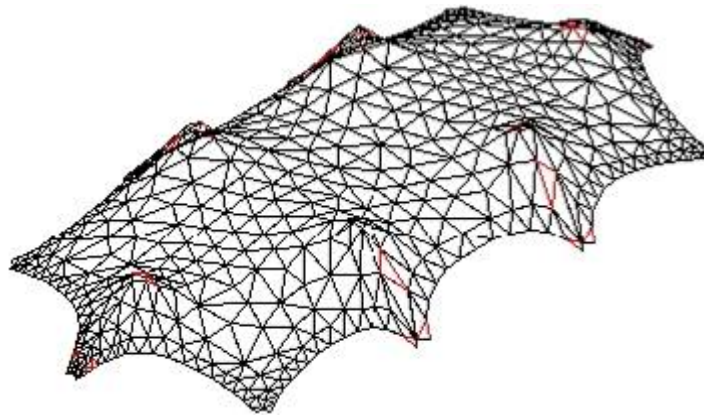


Figura 4.10: Resultado do Lights com cabo 1 no AutoCad.

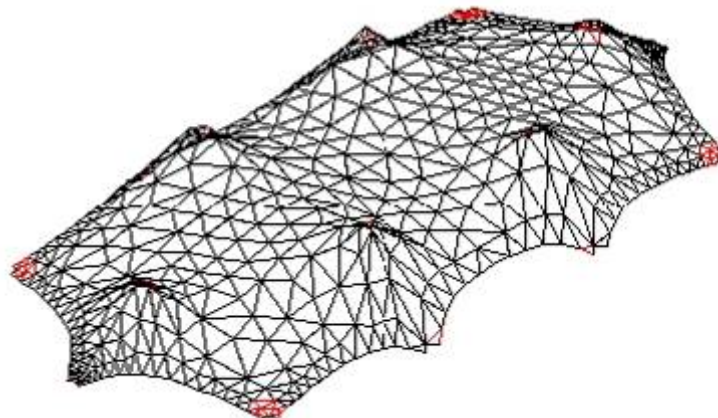


Figura 4.11: Resultado do Lights com cabo 15 no AutoCad.

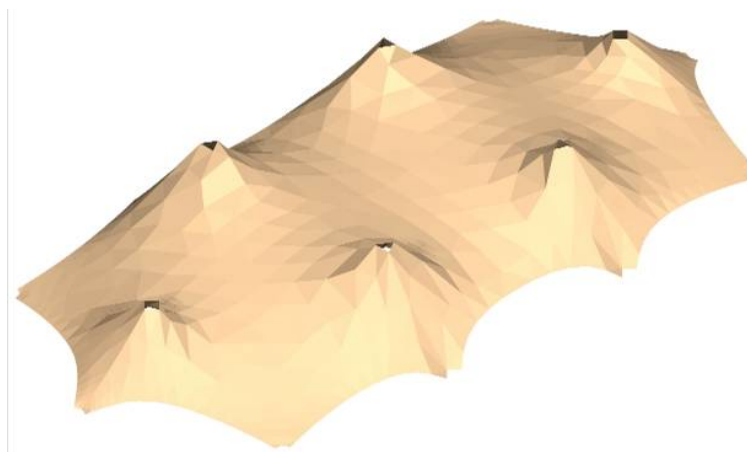


Figura 4.12: Resultado do Lights com cabo 15 renderizado no AutoCad.

Observou-se uma redução no número de elementos da malha submetidos à compressão quando se compara a geometria indeformada gerada no Lights com cabo 1 a partir da malha sem (Fig. 4.6) e com simetria (Fig. 4.10).

Com o aumento do diâmetro dos cabos de borda praticamente toda a cobertura está tracionada e a concavidade da região central está para baixo, condição necessária em coberturas (Fig. 4.11).

O programa Membrane (Borges) que trata a malha como material hiperelástico foi utilizado para geração da geometria indeformada com visualização de resultados no AutoCad (Fig. 4.13).

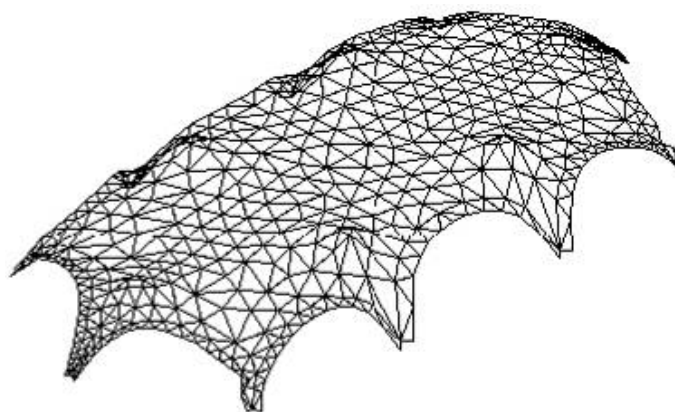


Figura 4.13: Resultado do Membrane (Borges) no AutoCad.

No Membrane (Borges) foi obtida uma forma da estrutura a partir da malha simétrica com arcos laterais mais altos (Fig. 4.13) do que os da estrutura construída na UnB então foi

feita uma redução de um terço da flecha nos arcos de borda da malha simétrica no GiD (Fig. 4.14) e uma nova geometria indeformada foi gerada (Fig. 4.15).

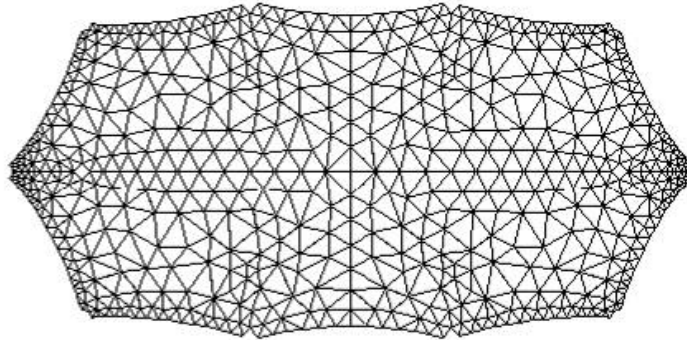


Figura 4.14 - Malha simétrica de elementos finitos triangulares de três nós com flecha reduzida obtida no GiD.

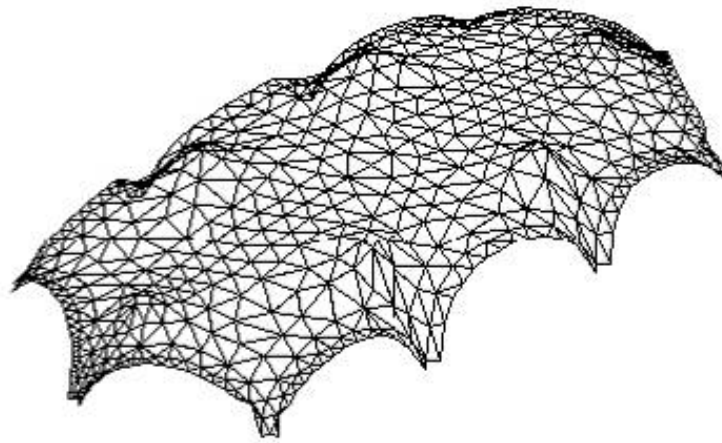


Figura 4.15: Resultado do Membrane (Borges) no AutoCad.

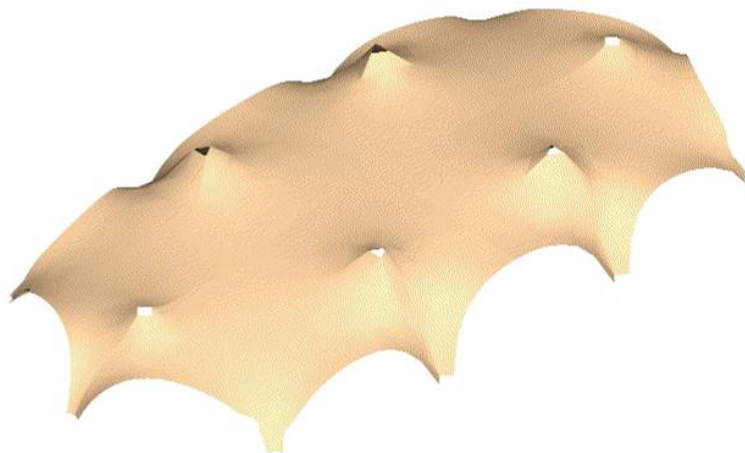


Figura 4.16: Resultado do Membrane (Borges) com renderização no AutoCad.

Não foi possível comparar os resultados obtidos com os do autor do projeto pois a Prefeitura do Campus da UnB não disponibilizou esse material (declarou não ter em seu poder projeto executivo ou memória de cálculo).

A tentativa de utilizar o programa Gmsh na geração de malhas de elementos finitos não obteve muito sucesso devido à dificuldade de entendimento do manual e dos tutoriais disponíveis e pelo programa não ser de fácil utilização.

Os tutoriais e exercícios disponíveis para aprendizagem da linguagem de programação Ada 95 foram executados sem grandes dificuldades permitindo uma rápida absorção dos conhecimentos necessários para utilização da linguagem.

Os parâmetros de entrada de dados da membrana foram sugeridos por Arcaro, conforme utilizado em empresas de projeto de tensoestruturas:

- Módulo de elasticidade * espessura: 700 kN/m;
- Coeficiente de Poisson: 0,20;
- Massa: 1050 g/m²;

A adaptação do procedimento GiD disponível apenas no programa Membrane é de grande importância visto que o programa citado permite análise apenas da membrana e o Lights realiza cálculo de tensões e deslocamentos não só da membrana mas dos mastros e cabos de borda.

Após a adaptação citada acima estar concluída e os programas de intercâmbio de arquivos de entrada de dados e resultados entre o GiD, o Lights e o Membrane estarem prontos, foi gerada uma nova malha simétrica de elementos finitos triangulares de três nós (Fig. 4.17) com elementos com a medida lateral do triângulo duas vezes menor do que aqueles gerados anteriormente (Fig. 4.8) mas com o mesmo contorno externo, visto que agora a geração de cabos e a atribuição de materiais ficou bem mais rápida com os programas GiDMembrane, GiDLights e MembraneLights.

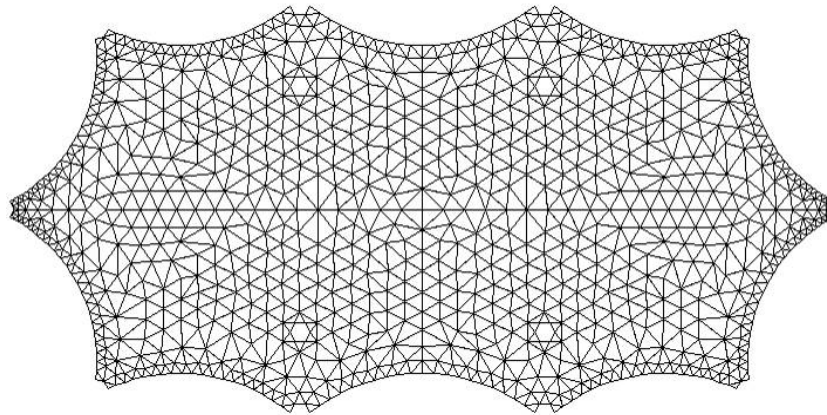


Figura 4.17: Malha simétrica de elementos finitos triangulares de três nós obtida no GiD.

Depois foram impostos deslocamentos aos nós que correspondem aos pontos de apoio dos mastros no programa Membrane para obtenção da geometria indeformada (Fig. 4.18).

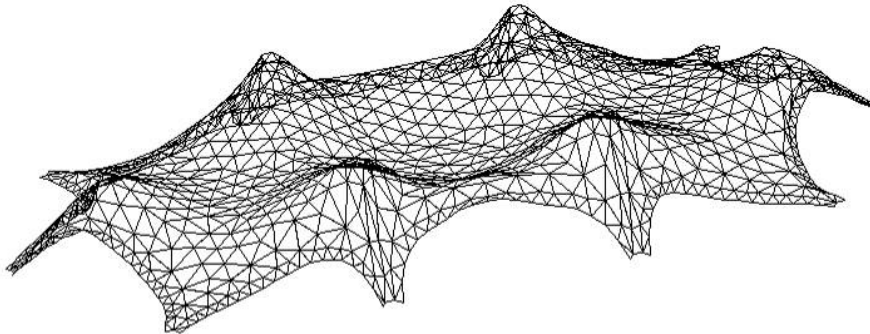


Figura 4.18: Geometria indeformada obtida no Membrane com visualização no AutoCad.

Como os elementos da malha foram reduzidos de tamanho, a forma da membrana com a concavidade voltada para cima no centro da estrutura (Figs. 4.18 e 4.19) ficou mais bem definida do que com a malha gerada anteriormente (Fig. 4.9).

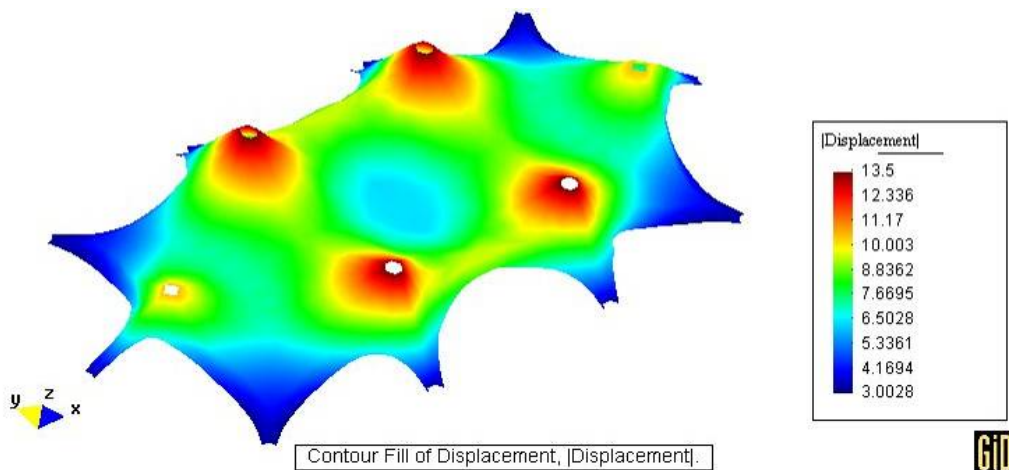


Figura 4.19: Deslocamentos dos nós no GiD (m), resultado do Membrane.

Para reduzir a depressão central, a partir da malha plana, foram impostos deslocamentos aos nós de apoio nos mastros no LightsGiD (versão do Lights desenvolvida que permite visualização de resultados no ambiente GiD pós-processamento), com cabo 15 na borda, para obter uma geometria indeformada mais compatível com a realidade (Fig. 4.20).

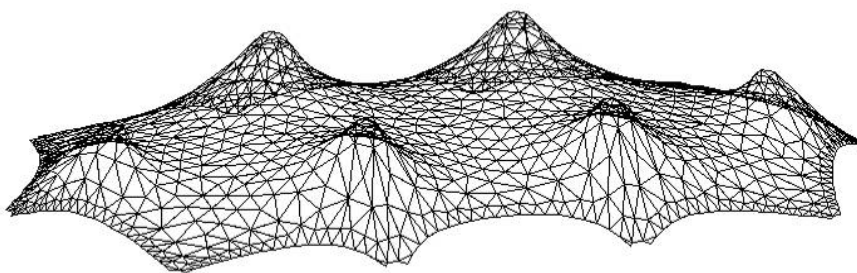


Figura 4.20: Visualização no AutoCad da geometria inicial sobre a qual foram aplicados os carregamentos.

Foram aplicados dois carregamentos distribuídos ortogonais à superfície dos elementos de membrana de 75 kgf/m^2 ($0,7355 \text{ kN/m}^2$) com sentidos opostos para simular os carregamentos de sucção e sobrepressão na membrana com cabos de borda 6 sem pré-tracionamento.

Os resultados da análise feita pelo programa LightsGiD com sucção podem ser observados no AutoCad (Fig. 4.21) e no GiD (Figs. 4.22 a 4.25), da mesma forma foram apresentados os resultados com sobrepressão (Figs. 4.26 a 4.29).

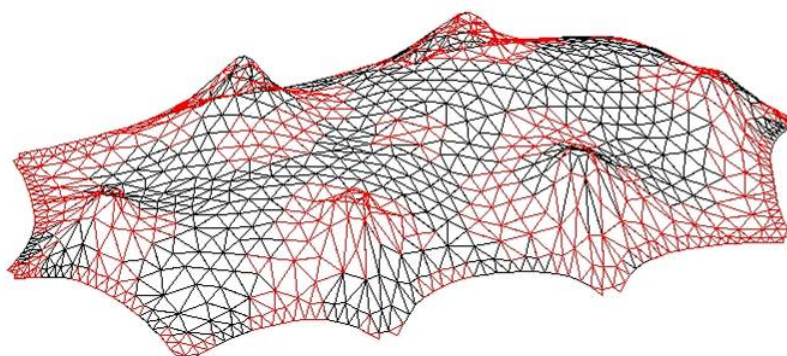


Figura 4.21: Visualização no AutoCad da configuração deformada da membrana com cabo 6, resultado do LightsGiD, sucção.

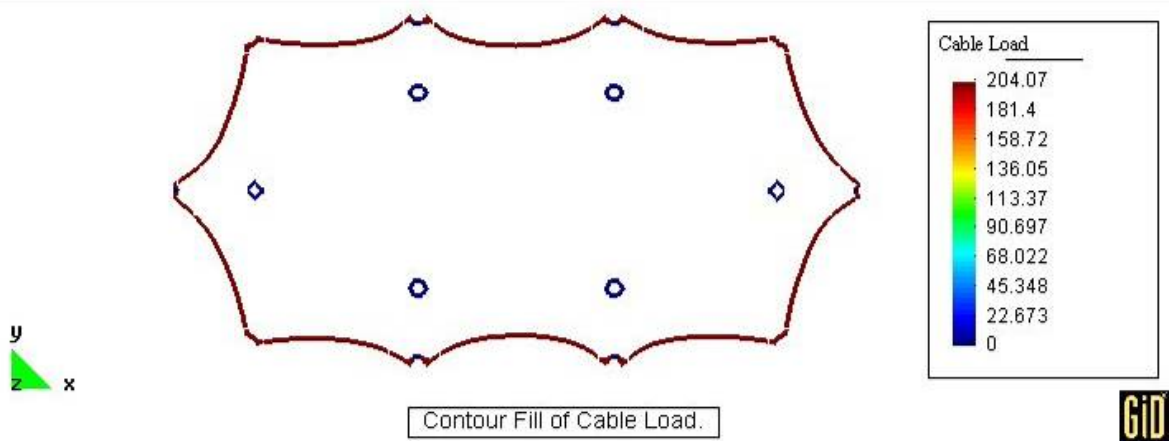


Figura 4.22: Força atuando nos cabos de borda 6 com sucção e sobrepressão (kN).

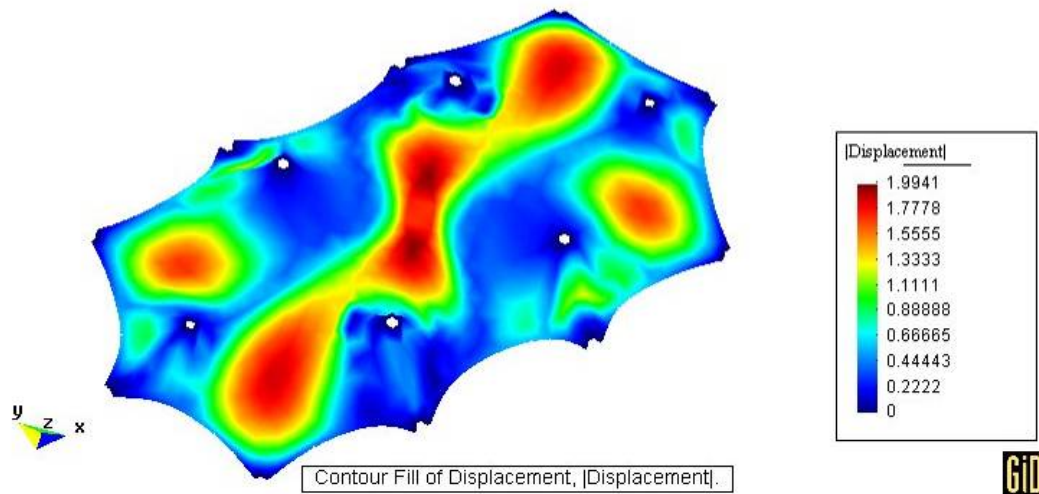


Figura 4.23: Deslocamentos dos nós com cabo 6 sem pré-tracionamento, sucção (m).

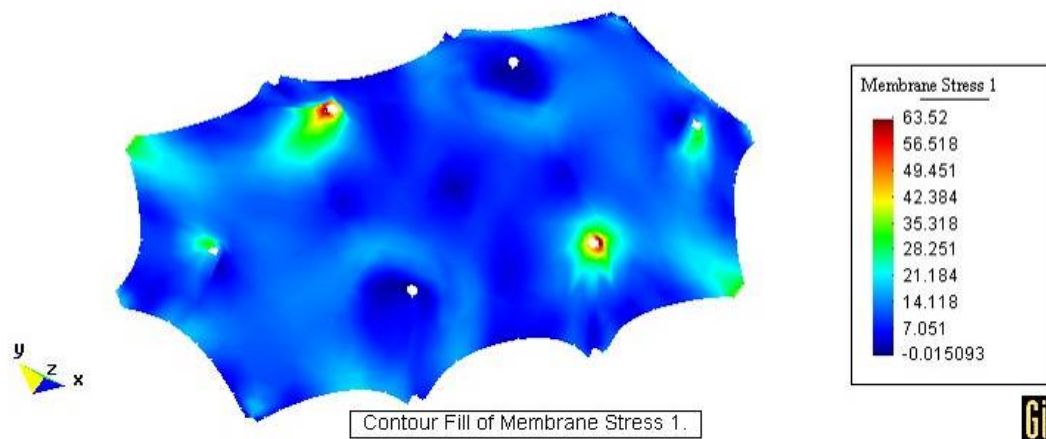


Figura 4.24: Tensão principal 1 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sucção e com os cabos sem pré-tracionamento (kPa).

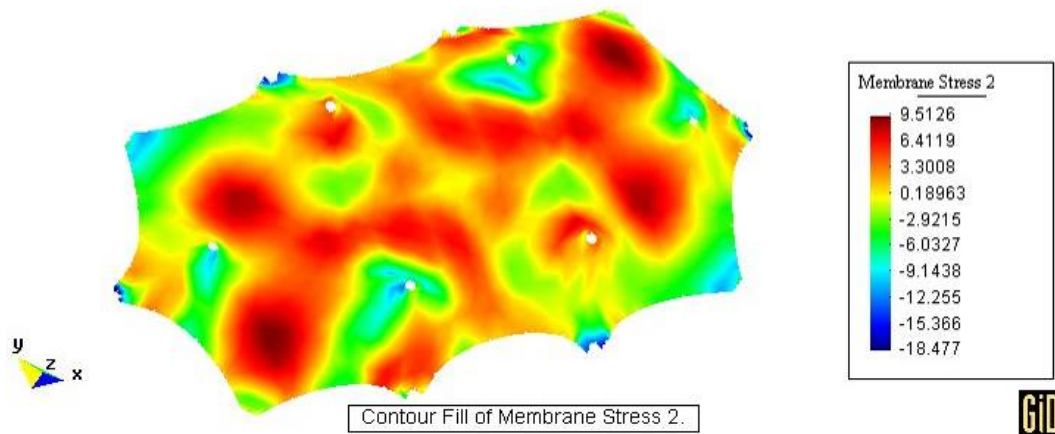


Figura 4.25: Tensão principal 2 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sucção e com os cabos sem pré-tracionamento (kPa).

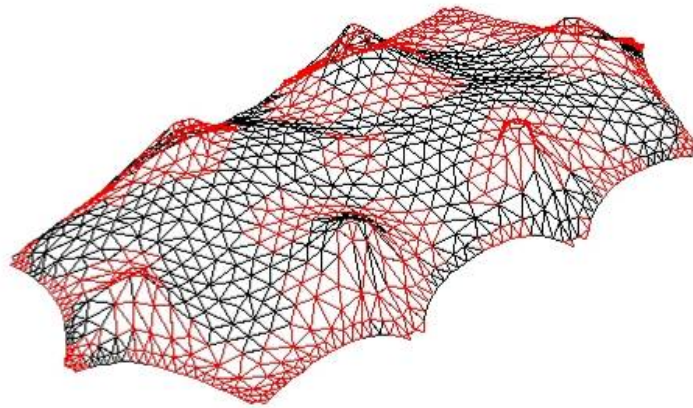


Figura 4.26: Visualização no AutoCad da configuração deformada da membrana com cabo 6, resultado do Lights, sobrepressão.

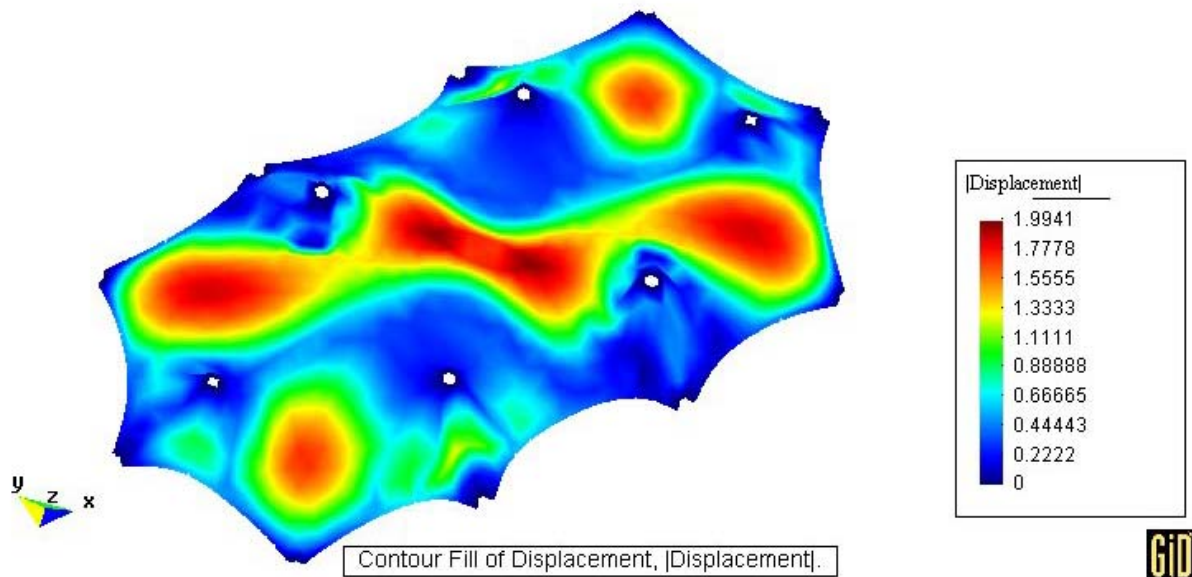


Figura 4.27: Deslocamentos dos nós com cabo 6 sem pré-tracionamento, sobrepressão (m).

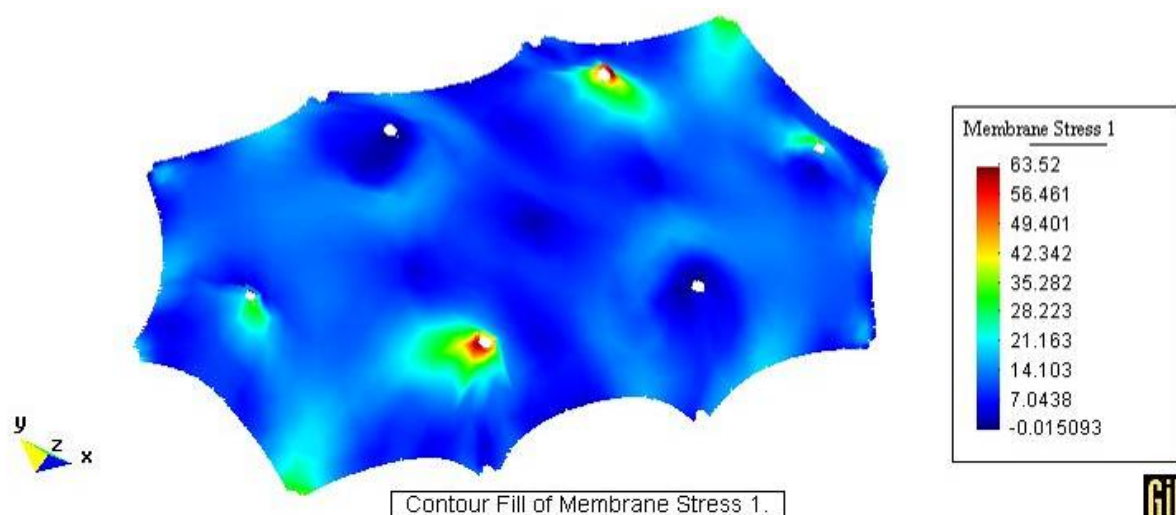


Figura 4.28: Tensão principal 1 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sobrepressão e com os cabos sem pré-tracionamento (kPa).

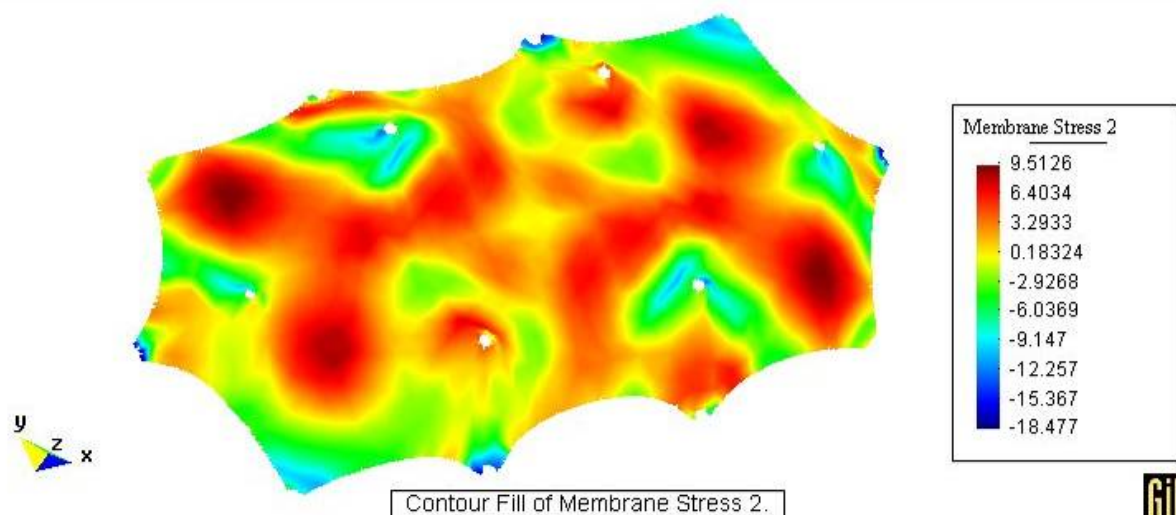


Figura 4.29: Tensão principal 2 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sobrepressão e com os cabos sem pré-tracionamento (kPa).

Nos gráficos de resultados de carregamentos mostrados acima (Figs. 4.21 a 4.29) observa-se uma simetria diagonal. De início cogitou-se a possibilidade disso ser conseqüência do coeficiente de Poisson, pois a membrana se deforma de maneira diferente na direção da urdidura e da trama, mas após alguns testes em que foram anulados os efeitos do coeficiente de Poisson, verificou-se que a causa de tal simetria não era essa.

Como a análise não linear convergiu para uma configuração de equilíbrio, era possível que esse resultado apresentado fosse apenas uma das possíveis configurações de equilíbrio encontradas. Para melhorar esse resultado é recomendável fazer testes com várias unidades diferentes nos arquivos de entrada de dados para o programa LightsGiD, visto que na análise

não linear, a ordem de grandeza dos valores utilizados nos cálculos influi na configuração de equilíbrio obtida.

Depois de tentar solucionar o problema da simetria diagonal, conforme descrito anteriormente, sem sucesso, foi mandado um correio eletrônico para uma lista que troca informações e dúvidas sobre a utilização do GiD. Nesta lista participam também engenheiros ligados ao CIMNE, centro onde o programa foi desenvolvido. A resposta obtida foi que o GiD versão 7.2, a mais nova versão disponível naquele momento, ao espelhar um quarto da malha para ir formando a malha completa simétrica, espelhava também o vetor normal dos elementos, invertendo seu sentido em relação ao original. Como esse vetor é utilizado para dar a correta direção e sentido das cargas aplicadas no LightsGiD, cada pedaço de um quarto de malha apresentou uma resposta diferente ao mesmo carregamento.

Para que não fosse necessário espelhar a membrana mas fosse possível trabalhar com simetria, descobriu-se que ao colocar linhas guias dividindo a superfície (Fig. 4.30) onde a malha seria gerada, era possível gerar toda a malha de uma só vez com simetria (Fig. 4.17), evitando a inversão dos vetores normais dos elementos.

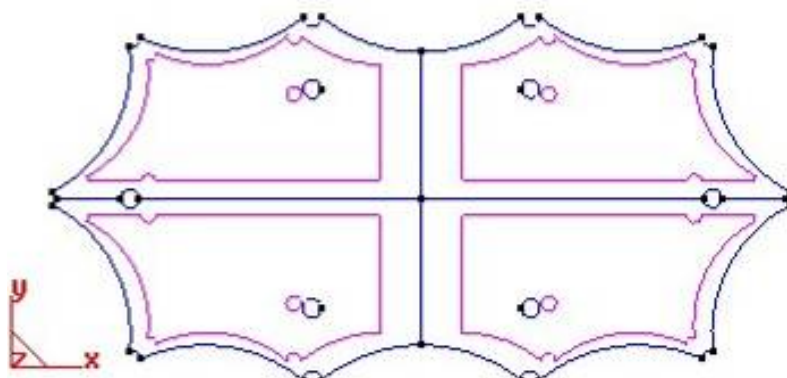


Figura 4.30: Superfície com linhas guias para geração de malha de elementos finitos.

Os dois carregamentos distribuídos ortogonais à superfície dos elementos de membrana de 75 kgf/m^2 ($0,7355 \text{ kN/m}^2$) com sentidos opostos foram aplicados novamente, para simular os carregamentos de sucção e sobrepressão na membrana com cabos de borda 6 com pré-tracionamento.

A visualização dos resultados calculados pelo LightsGiD foi feita no AutoCad (Fig. 4.31) e no GiD (Figs. 4.32 a 4.34) para o carregamento de sucção, da mesma forma foram apresentados os resultados para o carregamento de sobrepressão (Figs. 4.35 a 4.38).

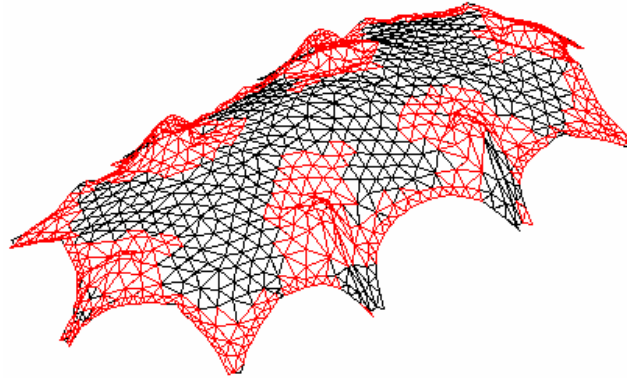


Figura 4.31: Visualização no AutoCad da configuração deformada da membrana com cabo 6, resultado do Lights, sucção.

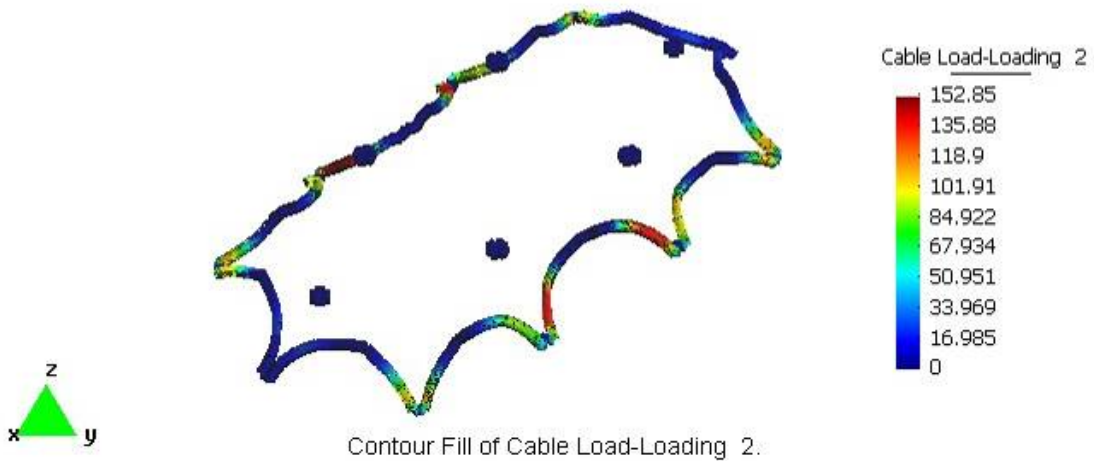


Figura 4.32: Força atuando nos cabos de borda 6 sob sucção (kN).

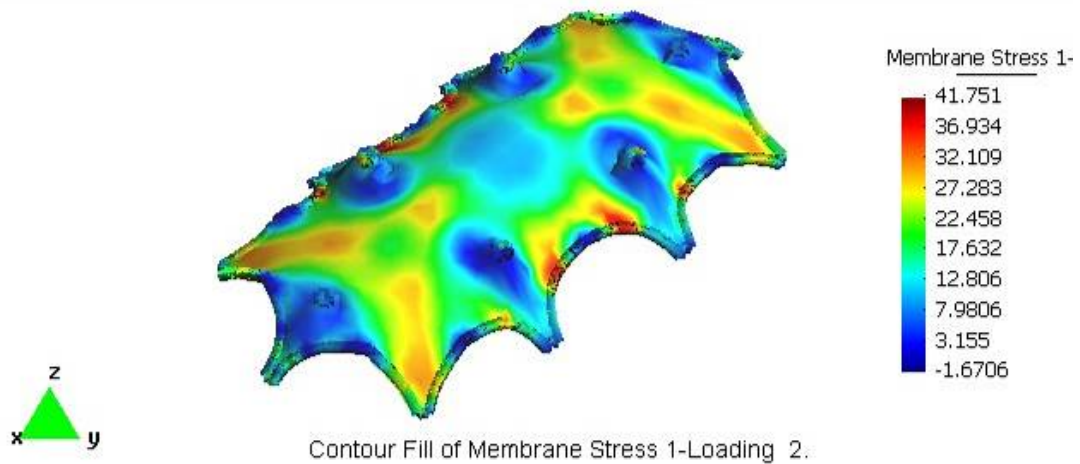


Figura 4.33: Tensão principal 1 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sucção e com os cabos com pré-tracionamento (kPa).

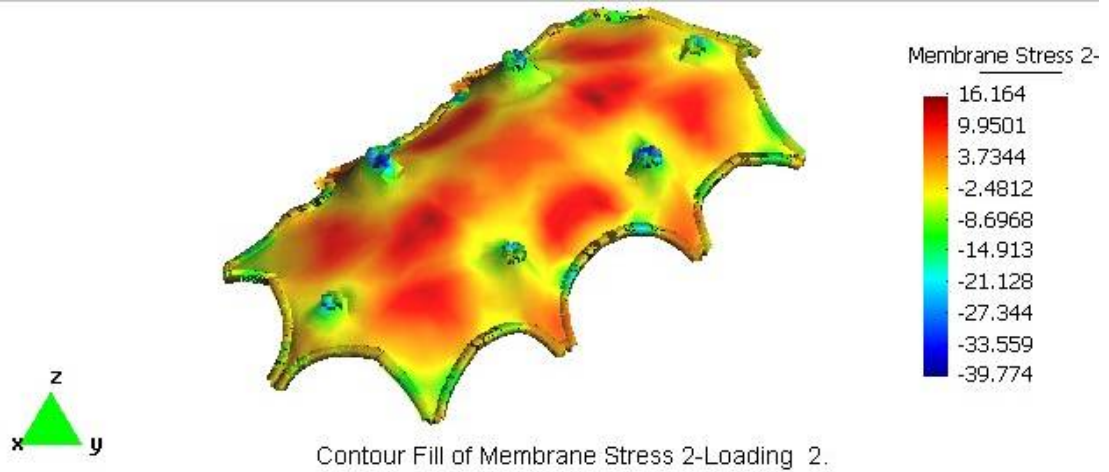


Figura 4.34: Tensão principal 2 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sucção e com os cabos com pré-tracionamento (kPa).

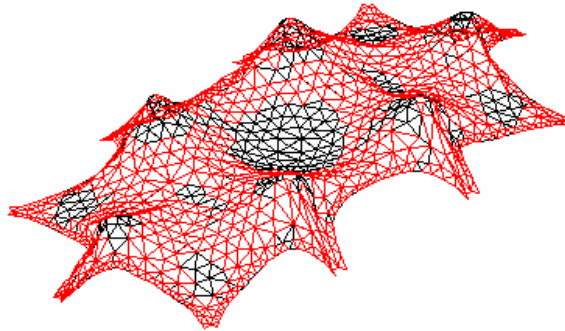


Figura 4.35: Visualização no AutoCad da configuração deformada da membrana com cabo 6, resultado do Lights, sobrepressão.

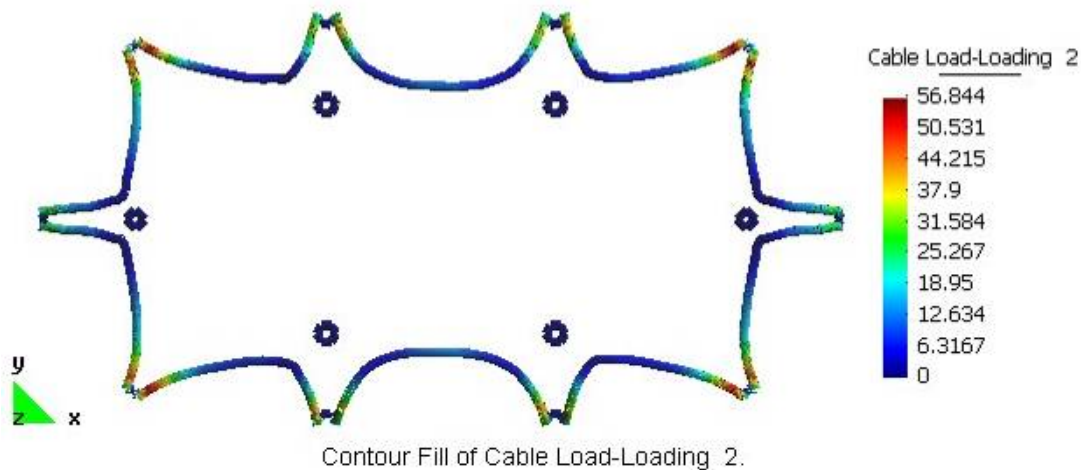


Figura 4.36: Força atuando nos cabos de borda 6 sob sobrepressão (kN).

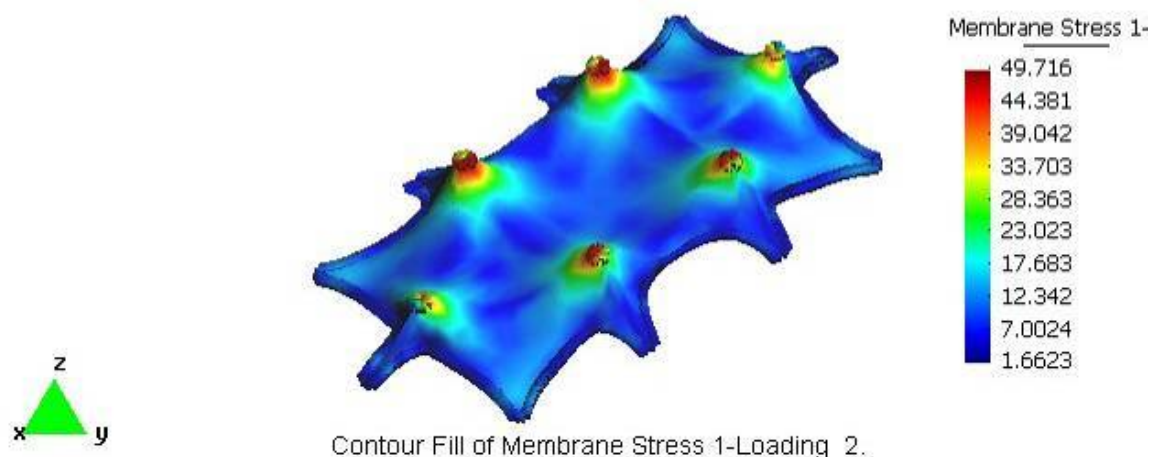


Figura 4.37: Tensão principal 1 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sobrepressão e com os cabos com pré-tracionamento (kPa).

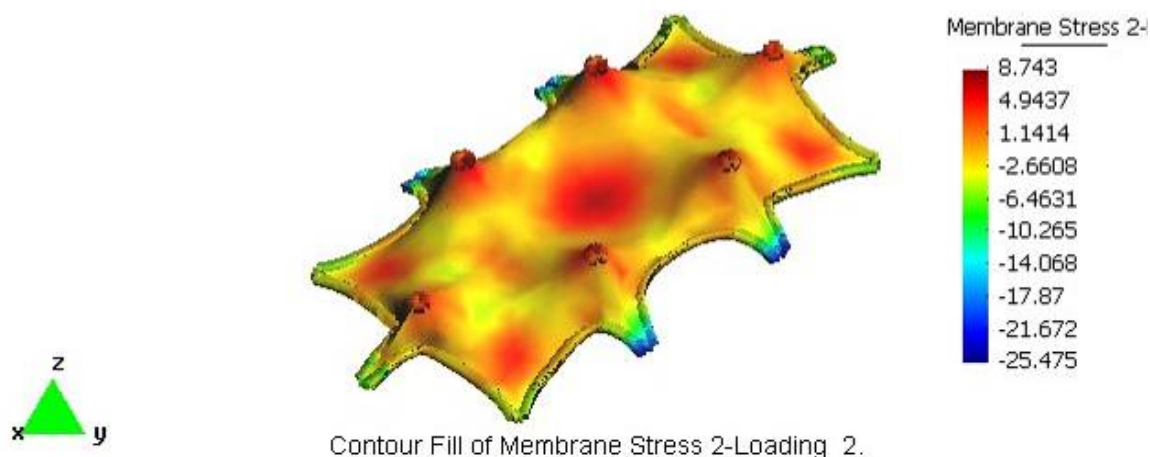


Figura 4.38: Tensão principal 2 nos elementos da membrana com a estrutura submetida a sobrepressão e com os cabos com pré-tracionamento (kPa).

O problema da simetria diagonal mostrado anteriormente (Figs. 4.21 a 4.29) foi resolvido com a nova estratégia de geração da malha no GiD versão 7.2 (Fig. 4.30).

Atualmente existe uma nova versão do GiD, 8.0, que não inverte mais o vetor normal quando o usuário espelha uma malha de elementos finitos. Essa versão espelha a malha, mas mantém o vetor normal na mesma direção e sentido da malha original, permitindo a geração de apenas um quarto da malha como foi tentado inicialmente para o Centro Comunitário e mostrado no exemplo do parabolóide hiperbólico no Manual (Apêndice A).

Aplicando pré-tracionamento, os cabos permanecem tracionados quando submetidos aos dois carregamentos, de sucção e sobrepressão (Figs. 4.32 e 4.36).

Já os elementos de membrana apresentaram grandes áreas de compressão (Figs. 4.31, 4.34, 4.35 e 4.38) mesmo tendo aplicado pré-tracionamento nos cabos para procurar manter a estrutura toda sempre tracionada, condição essencial para este tipo de estrutura.

Para que os elementos de membrana não sejam submetidos a esforços de compressão é necessário obter os parâmetros reais da membrana e dos cabos de borda utilizados no Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB além de mais informações do projeto, incluindo os mastros e detalhes de fixação da membrana (Fig. 4.39).

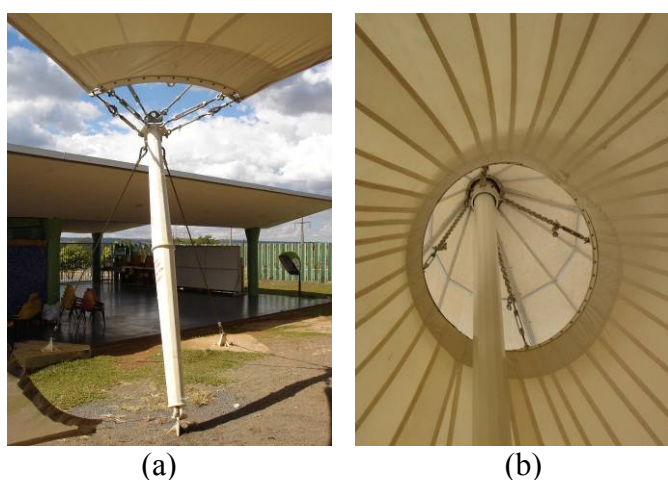


Figura 4.39: Detalhes de fixação da membrana: (a) nos mastros laterais e (b) nos mastros principais.

As figuras 4.40, 4.41 e 4.42 mostram um modelo computacional com elementos de membrana, cabo e mastro e detalhes de fixação do Centro Comunitário Athos Bulcão/UnB no ambiente GiD de pós-processamento gerado através do LightsGiD com dados hipotéticos.

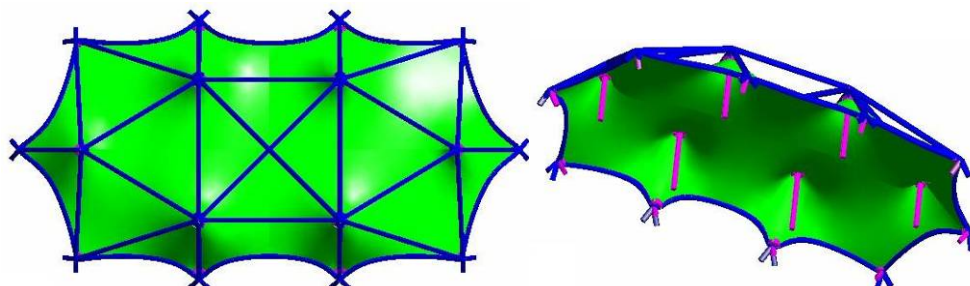


Figura 4.40: Vista superior e inferior do modelo com elementos de membrana (verde), de cabo (azul) e mastro (magenta).

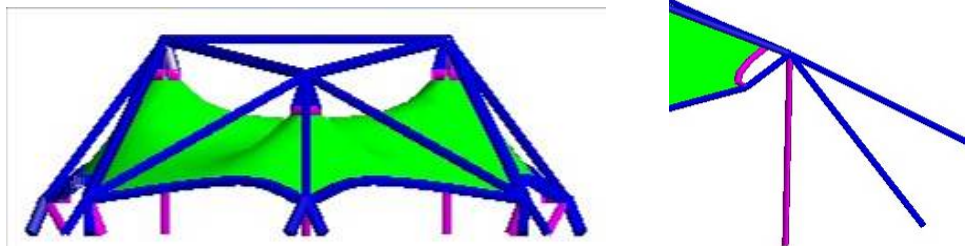


Figura 4.41: Vista lateral e detalhe de fixação da membrana no mastro lateral.

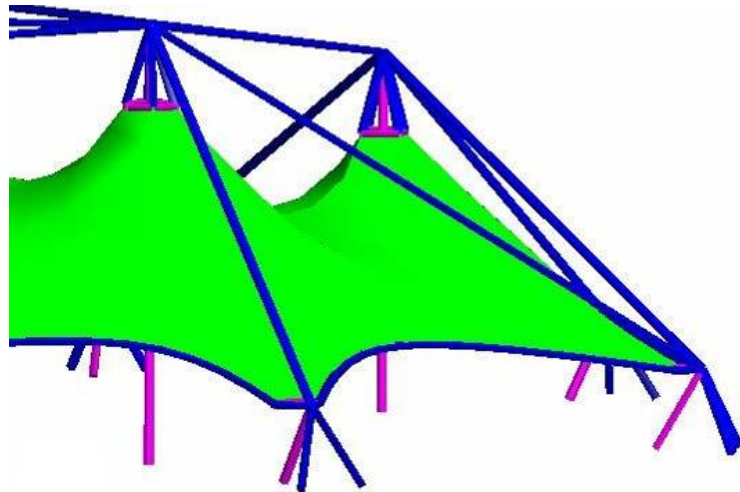


Figura 4.42: Vista parcial do modelo com elementos de membrana, cabo e mastro além de visualização de detalhes de fixação da membrana nos mastros principais.

5. CONCLUSÕES

As duas formas da estrutura em estudo obtidas mais próximas da realidade foram aquelas geradas pelo programa Lights (Fig. 4.20) e pelo programa Membrane (Borges) (Fig. 4.15). Enquanto o programa Membrane (Borges) não apresentar possibilidade de inserir cabos de borda, recomenda-se utilizar a forma obtida com o Lights para futuro estudo de tensões sob carregamento externo.

A diferença entre os resultados obtidos com os programas Lights e Membrane (Borges) resulta da utilização de modelos diversos para tratamento da estrutura. O Lights adota o modelo CST – *Constant Strain*, onde o material é elástico linear, submetido a um estado plano de tensões (Fig. 4.12). No Membrane (Borges) o modelo usado é o Neo Hookeano, considerando a malha como material hiperelástico (Fig. 4.16), evitando angulações entre os elementos triangulares.

Os resultados obtidos impondo carregamento estático de vento e pré-tracionamento mostram o quanto é importante conhecer os parâmetros que definem as características mecânicas da membrana, dos cabos e dos mastros a serem utilizados, e como é complexa a análise desse tipo de estrutura, sendo necessária a realização de testes em túnel de vento para que seu efeito possa ser avaliado adequadamente.

Os programas GiD, Membrane e Lights foram integrados através dos programas GiDMembrane, GiDLights e MembraneLights. Por meio de alguns procedimentos novos e outros adaptados, o Lights passou a permitir a visualização de resultados na membrana, nos cabos e nos elementos de pórtico no ambiente GiD de pós-processamento, essa nova versão é chamada LightsGiD.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns temas para futuros trabalhos de pesquisa em tensoestruturas:

- Determinação do padrão de corte da membrana buscando uma distribuição mais uniforme de tensões e uma redução nas perdas do tecido;
- Efeitos das costuras na distribuição de tensões na membrana após a montagem da estrutura.
- Experimentos em túnel de vento com tensoestruturas para avaliar melhor os esforços provocados pelo vento;
- Experimentos com diferentes membranas para determinar suas características, como tensões de ruptura, módulo de Elasticidade, coeficiente de Poisson, desempenho acústico, durabilidade, resistência ao fogo, entre outras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

ARCARO, V. F. *Conceitos Fundamentais e Métodos Computacionais Básicos para a Análise Não Linear de Estruturas*. Campinas, 1996.

ARCARO, V. F. *Minimizing Total Potential Energy to Find Equilibrium*. Campinas, 2006. Disponível em: < <http://www.arcaro.org/tension>>. Acesso em: 25 mar. 2005.

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

ARGYRIS, J. H.; ANGELOPOULOS, T.; BICHAT, B. A general method for the shape finding of lightweight tension structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 3, p. 135-149, 1974.

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

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

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

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

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

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

BORGES Fº, J. P. *Tese de Qualificação para Doutorado: Projeto de tensoestruturas em membrana com o uso de programação não-linear*. Brasília: UnB, 2004.

DAY, A. S. An introduction to dynamic relaxation. *The Engineer*, v. 219. n. 5688, p. 218-221, 1965.

ELIAS, B.S. Membranas Tensionadas: permanentes ou efêmeras?. *Revista Assentamentos Humanos*, Marília, v. 4. n. 1, p. 59-71, 2002.

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

GEUZAINÉ, C., REMACLE, J. F. *Gmsh Reference Manual*. Disponível em: <<http://www.geuz.org/gmsh/>>. Acesso em: 25 ago. 2003.

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

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

KORABI, E. A. R. *Materials Consumption Investigation In Saddle-Shaped Cable Roof*. Rica: Bachelor work, Civil Engineering Faculty, Rega Technical University. 2003.

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

LOPES, A. V. *Introdução à Programação com Ada 95*. Canoas: Editora da ULBRA, 1997. ISBN 85-85692-38-3.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Architectural Fabric Structures: The Use of Tensioned Fabric Structures by Federal Agencies*. Advisory Board on the Built Environment. Commission on Engineering and Technical Systems. University Press of the Pacific Honolulu: Hawaii, 1985. ISBN: 1-4102-0391-3, 2003.

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

OLIVEIRA, M. B.; BARBATO, R. L. A. A tecnologia das estruturas de membrana. *Téchne: revista de tecnologia da construção*, São Paulo: PINI, v. 68, p. 70-73, nov. 2002.

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

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

PULINO F^o, A. R. *Contribuição ao Estudo das Coberturas Pênseis*. Campinas, Tese (Doutorado), DMC-FEM-Unicamp. 1991.

PULINO F^o, A. R. *Programação em Ada: curso, exemplos e exercícios*. Disponível em: <<http://www.athail.pro.br/adaunb/>>. Acesso em: 15 jul. 2003.

RIBÓ, R. et al. *GiD The Personal Pre and Postprocessor: Reference Manual*. Barcelona, 2005. Version 7. Disponível em: <<http://www.gidhome.com>>. Acesso: 20 mar. 2005.

RIBÓ, R. et al. *GiD The Personal Pre and Postprocessor: User Manual*. Barcelona, 2002. Version 7. Disponível em: <<http://www.gidhome.com>>. Acesso: 20 mar. 2005.

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

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

SCHEK, H.-J. The force density method for form finding and computation of general networks. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 3, p. 115-134, 1974.

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

SKANSHOLM, J. *Ada 95: From the Beginning*. Essex: Addison Wesley Longman, 1997. ISBN 0-201-40376-5.

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

APÊNDICE A – MANUAL

Este manual foi elaborado para facilitar a utilização dos programas Membrane, Lights, GiD, GiDMembrane, GiDLights, MembraneLights e LightsGiD, assim como a geração dos seus arquivos de entrada e o intercâmbio de resultados entre eles. Ao longo do texto é feito um exemplo passo-a-passo de um parabolóide hiperbólico. O manual é apresentado em inglês para facilitar a manutenção de um padrão de nomenclaturas e comandos já existentes nos programas Membrane, Lights e GiD.

A.1. GENERAL INFORMATION

Files with the extensions:

- .ads and .adb are program source code files written in Ada95.
- .exe are executable files of the programs. If the user wants just to run the program, the .exe file is the only one necessary.
- .post.msh and .post.res are GiD postprocess files, where the results may be seen in GiD.
- .gid are GiD preprocess files, where the finite element mesh was generated.

A consistent system of units must be used during the whole process.

All the programs used, developed or updated in this master thesis (Fig. A.1) are available in the CD in a folder called “Programs” with the same name of the program.

GiD is a pre and postprocess program available at <http://gid.cimne.upc.es/>. This master thesis used GiD version 8.0. This version can be installed from the CD folder Program/GiD8 where the user can find also Reference and User Manuals.

Membrane and Lights are available at <http://www.arcaro.org/tension/>. The Membrane version included in the CD folder “Membrane” was updated to work together with GiD version 8.0. The theory developed by Arcaro for this computer code is explained in “A simple procedure for shape finding and analysis of fabric structures” in the CD folder Program/Membrane, the file with this article is called “membrane.pdf” or “membrane.doc”.

GiDMembrane is a program developed in this master thesis that makes it easier for the user that generated a mesh inside GiD to create the input file to run Membrane (input.txt).

The program MembraneLights helps the user that wants to run Lights or LightsGiD starting with the deformed mesh obtained from Membrane to create one of the input files necessary to run Lights or LightsGiD (structure.txt). It was also developed in this master thesis.

GiDLights is also a program developed in this master thesis to create one of the input files necessary to run Lights or LightsGiD (structure.txt) from a mesh generated in GiD.

LightsGiD is a version of Lights with some procedures developed in this master thesis that create the files necessary to see the results inside GiD Postprocess.

The files created in the example shown in this manual are in the CD folder “Example”, separated in folders with the name of the programs.

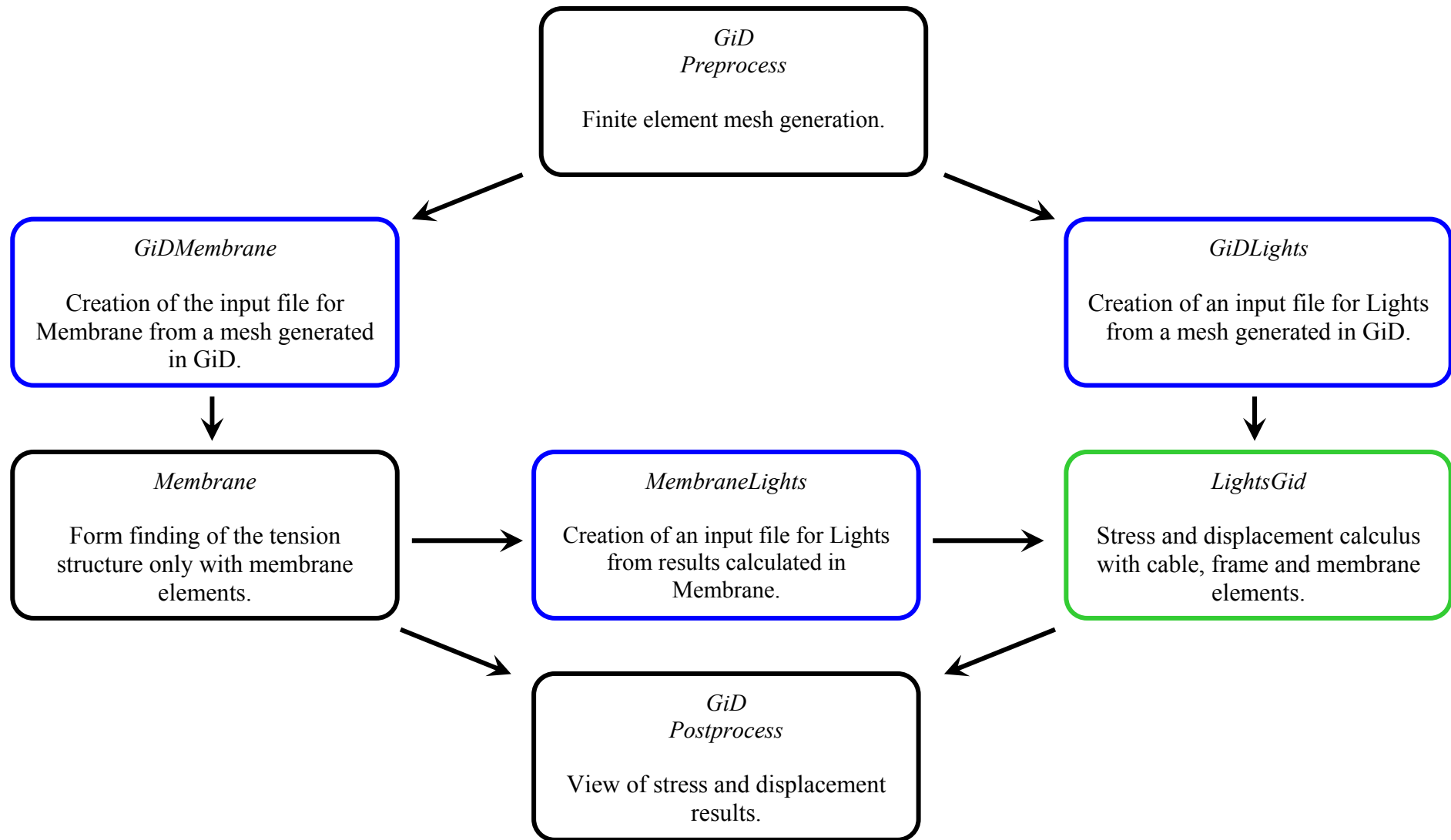


Figure A.1: Scheme of the developed (blue) and modified (green) programs.

A.2. GiD PREPROCESS



*GiD
Preprocess*

This part of the manual will show how to generate a finite element mesh using GiD.

There are several ways to provide GiD the contour of the surface that the user wants to generate a mesh on. Two possibilities will be shown here.

It is recommended to use GiD version 8.0, available at <http://gid.cimne.upc.es/>. This version maintains the normal vector of a mirrored mesh in the same direction of the original mesh. The older versions reverse the direction of the normal vector when a mesh is mirrored, causing problems when loading the structure.

An example will be done while the procedures are explained. Everything related to this example will be written in *italic*. When working in your own project, this information in *italic* will be replaced by your own data. The menus inside the programs will be written in **bold**.

Since this example is symmetric, only one fourth of the mesh will be generated and then it will be mirrored.

A.2.1. First option: Import the membrane contour drawing from AutoCAD

If the membrane contour already exists in AutoCAD (*Contour.dwg*) or the user prefers to draw in this software (Fig. A.2), when the drawing is finished it is only necessary to go to **File** → **Save as...** and at the window that opens, type a file name and change the file type to *.dxf (Contour.dxf)*. Then click on **Save**.

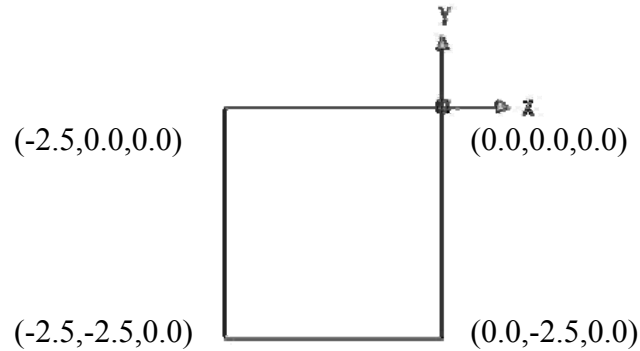


Figure A.2: A view of what was drawn in AutoCAD with the corner coordinates.

Open GiD and go to **Files** → **Import** → **DXF** and select the file that was saved in AutoCAD (*Contour.dxf*).

A.2.2. Second option: Draw the membrane contour inside GiD

Open GiD and go to **Geometry** → **Create** → **Straight Line**. Enter the point coordinates.

*-2.5,-2.5,0 0,-2.5,0 and press ENTER. Press ESC and go to **Geometry** → **Create** → **Straight Line**. Click on the left point and then **Join**. Enter the following point coordinates: -2.5,0,0 0,0,0 and press ENTER then click on the point on the bottom right corner and click **Join**. Press ESC twice.*

A.2.3. After importing the membrane contour from AutoCAD or drawing it inside GiD

Inside GiD, go to **Geometry** → **Create** → **NURBS Surface** → **By contour**. Click on the contour lines and press ESC twice (Fig. A.3).

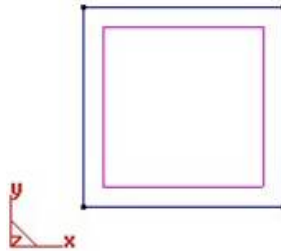


Figure A.3: NURBS Surface created.

To see node, line or surface numbers, go to **View** → **Label** and choose the desired option (Fig. A.4).

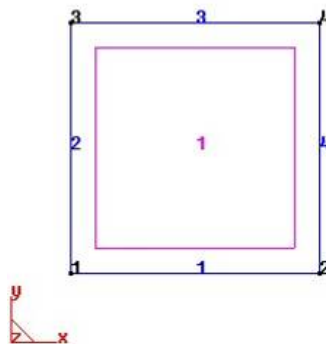


Figure A.4: Node, line and surface numbers.

To generate a mesh including membrane and cable elements, go to **Mesh** → **Mesh criteria** → **Mesh** → **Lines**. Click on the lines that represent cables (*1 and 2*). Press ESC and then **Mesh** → **Mesh criteria** → **Mesh** → **Surfaces**. Click on the surface with the mouse and then press ESC. Now go to **Mesh** → **Generate Mesh** and type the size of the elements (*0.4*). Click on **OK** twice.

To see node or element numbers, go to **View** → **Label** and choose the desired option (Fig. A.5).

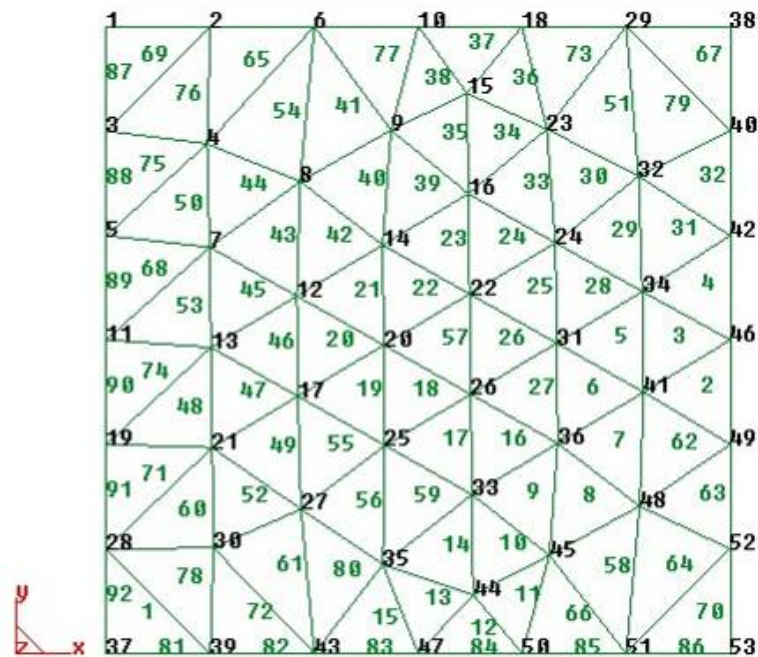


Figure A.5: Mesh view with node (black), cable and membrane elements (green) numbers.

Go to **View** → **Mode** → **Geometry**

To mirror the surface, go to **Utilities** → **Copy** and enter the information shown below (Fig. A.6).

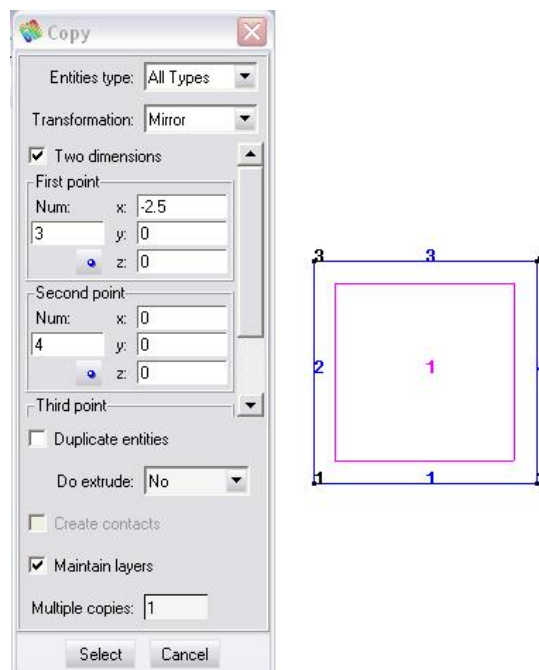


Figure A.6: Instructions to mirror the geometry, first step.

Click on **Select** and with the mouse select the whole surface. On the bottom of the **Copy** window, click on **Finish**.

Go to the menu **View** → **Zoom** → **Frame** in order to see the result.

Repeat this procedure to mirror again, entering the information shown in the **Copy** window below (Fig. A.7).

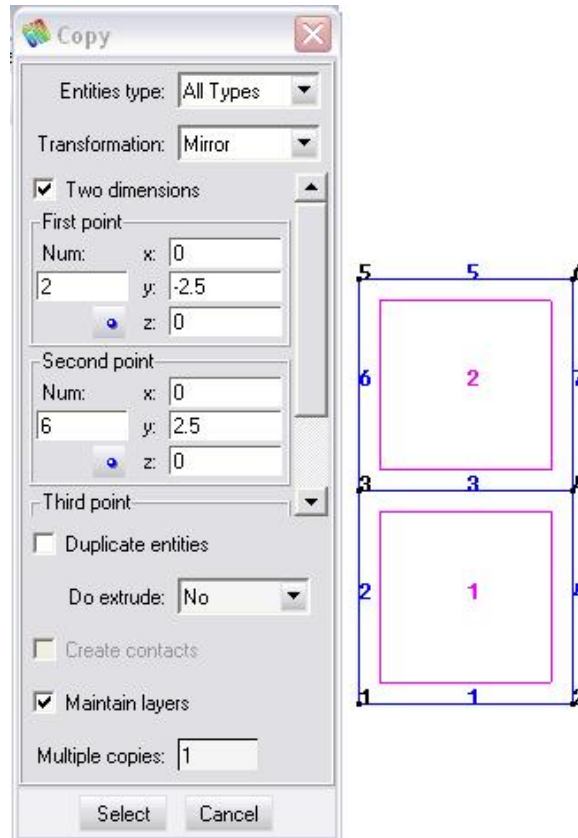


Figure A.7: Instructions to mirror the geometry, second step.

Click on **Select** and with the mouse select the whole surface. On the bottom of the **Copy** window, click on **Finish**. Close the **Copy** window by clicking on **Cancel**.

Go to the menu **View** → **Zoom** → **Frame** in order to see the result (Fig. A.8).

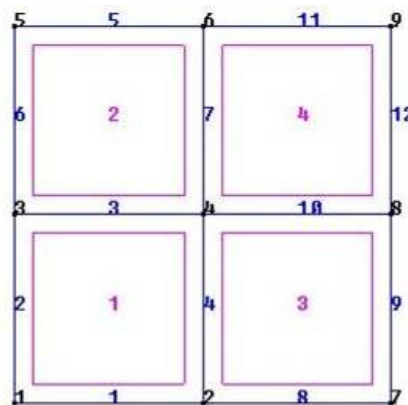


Figure A.8: Complete geometry.

Go to **View** → **Mode** → **Mesh**.

To mirror the mesh, go to **Utilities** → **Copy** and enter the information shown in the following figure (Fig. A.9).

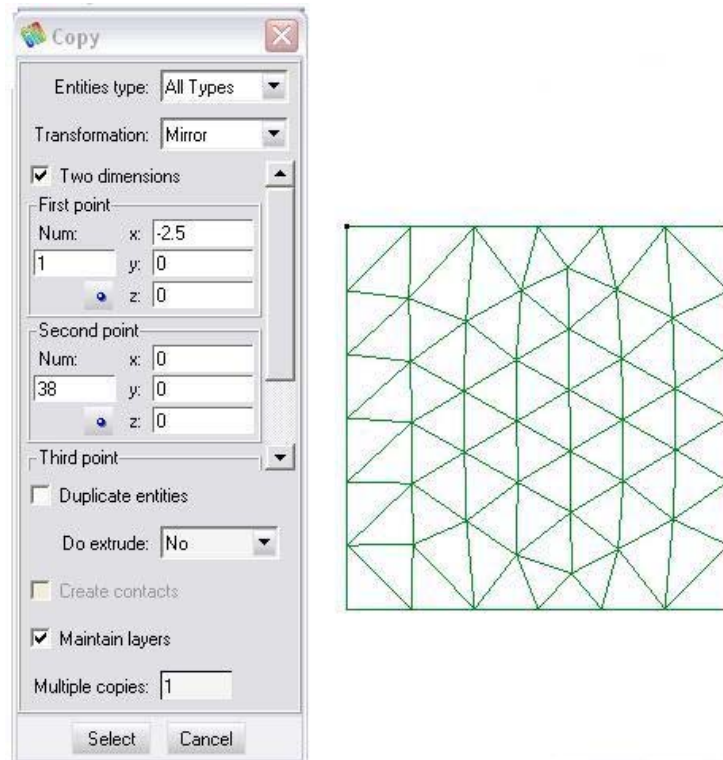


Figure A.9: Instructions to mirror the finite element mesh, first step.

Click on **Select** and with the mouse select the whole mesh. On the bottom of the **Copy** window, click on **Finish**.

Go to the menu **View** → **Zoom** → **Frame** in order to see the result.

Repeat this procedure to mirror again, entering the information shown in the **Copy** window in the next page (Fig. A.10).

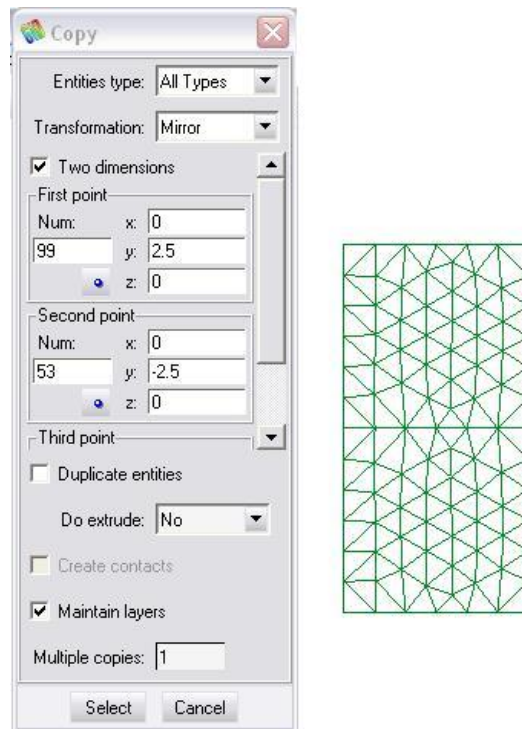


Figure A.10: Instructions to mirror the finite element mesh, second step.

Click on **Select** and with the mouse select the whole mesh. On the bottom of the **Copy** window, click on **Finish**. Close the **Copy** window by clicking on **Cancel**.

Go to the menu **View** → **Zoom** → **Frame** in order to see the result (Fig. A.11).

★ It is very important to renumber nodes and elements after the mesh is ready,

Utilities → **Renumber** then click **OK**.

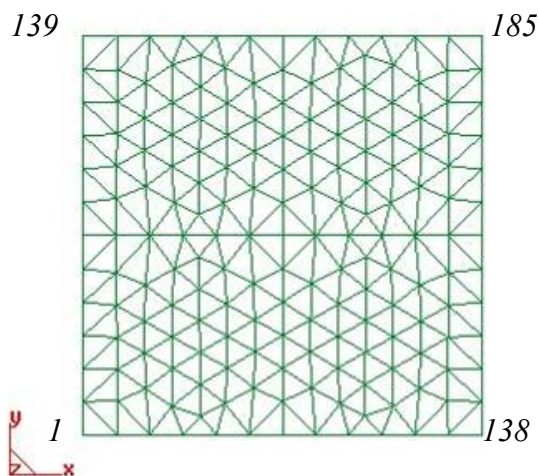


Figure A.11: Complete mesh with corner node numbers.

To save, **Files** → **Save as...** and type the file name (*Example.gid*). Click on **Save**.

To generate the data file that will be used to create Membrane, Lights or LightsGiD input files, go to **Files** → **Export** → **Text data report...** and write the file name (*Example.txt*). Click on **Save**.

To see the normal vectors, **View** → **Normals** → **Elements** select the elements with the mouse and if the user would like to have a view from a different angle, **View** → **Rotate** → **Trackball** (Fig. A.12). When finished, press ESC twice.

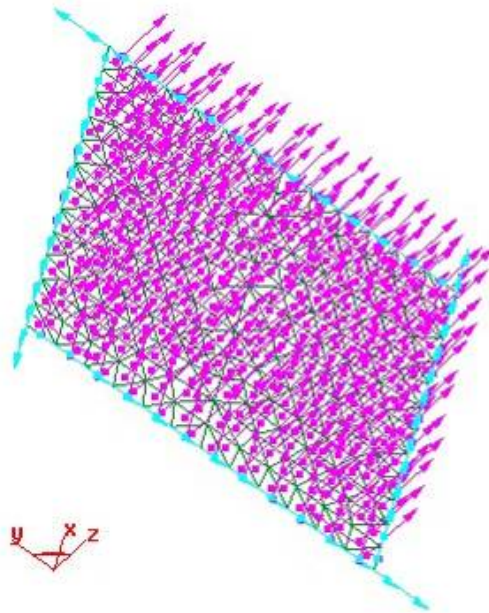
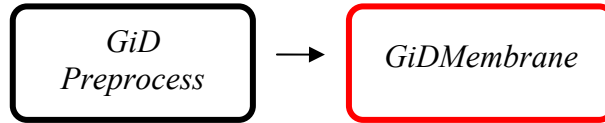


Figure A.12: Generated mesh with normal vectors.

Close GiD, go to **Files** → **Quit**.

A.3. GiDMEMBRANE



The program GiDMembrane makes it easier for the user that generated a mesh inside GiD to create the input file to run Membrane (input.txt).

Inside the Windows Explorer, copy the text data report file exported from GiD (*Example.txt*) into the same folder where gidmembrane.exe is. Click on gidmembrane.exe, a window will open where the required information should be typed:

Please enter the name of the text data report file exported from GiD (without extension).

Example

**Please write the following values:
lstol, maxls, mntol, mnref, maxminor and maxlist.**

0.1 20 0.000001 0 6000 3

— lstol: controls the accuracy of the line search. It must lie in the range $0.0 \leq \text{lstol} < 1.0$.

Decreasing this value tends to increase the accuracy of the line search. It is usually 0.1.

— maxls: The maximum number of cubic interpolations allowed in the line search. It must be greater than one. It is usually 20.

The iterations terminate if the infinity norm of the residue becomes less than or equal to maxnorm, which is calculated as: $\text{maxnorm} = \text{mntol} * \text{mnref}$.

If mntol is specified as a non-positive value, it is replaced by 0.001. If mnref is specified as a non-positive value, it is replaced by the infinite norm of the residue, evaluated with all displacements equal to zero.

— maxminor: The maximum number of iterations allowed. It must be greater than zero. It is usually ten times the number of degrees of freedom.

— maxlist: the number of BFGS corrections kept. These corrections are stored separately on a doubly linked circular list. Used only with the limited memory BFGS method. It is usually between 3 and 20.

**Please write the following values:
stiffness, poisson and density**

500 0.2 0

— stiffness: The membrane stiffness (Young's modulus * thickness).

— poisson: The Poisson's ratio associated with the membrane material.

— density: Weight per unitary area.

How many nodes will be displaced?

4

Please write the node number and the displacement in x, y and z directions – do this for each node.

1	-1.0	-1.0	3.0
138	1.0	-1.0	5.0
139	-1.0	1.0	5.0
185	1.0	1.0	3.0

Would you like to apply nodal forces? Y=Yes N=No

N

The following questions will only appear if the answer to the previous question is Y.

How many nodes will have applied forces?

Please write the node number and the forces in x, y and z directions – do this for each node.

The input.txt file that will be used to run Membrane will be created automatically in the same folder where gidmembrane.exe is. If the user would like to check anything or if there were any mistakes while entering the data asked before, the file input.txt can be opened with Note Pad or Word Pad.

A.4. MEMBRANE



To run Membrane, copy the file input.txt into the same folder where membrane.exe is. Click on membrane.exe. The following files with the results will be created: output.txt, autocad.scr, results.post.msh and results.post.res.

Open AutoCAD and go to **Tools** → **Run Script...** click on autocad.scr. The deformed mesh will appear (Fig. A.13) and the user can turn on another layer to see also the undeformed mesh (Fig. A.14).

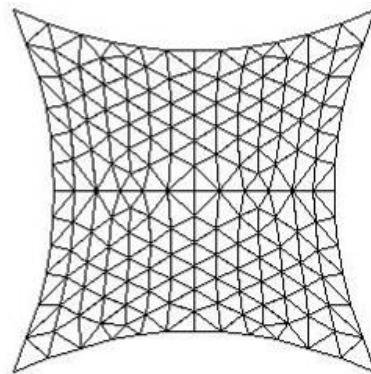


Figure A.13: Deformed mesh top view in AutoCAD.

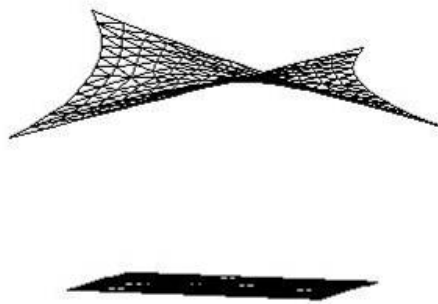
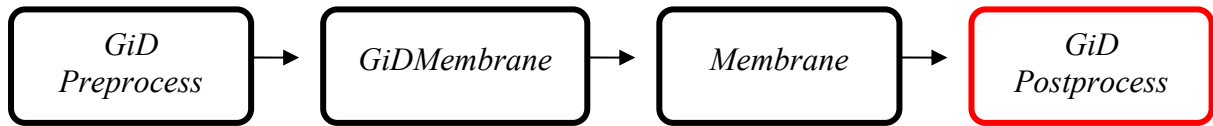


Figure A.14: Deformed and undeformed meshes in AutoCAD.

A.5. GiD POSTPROCESS



To see Membrane output results in GiD (Fig. A.15), open GiD and go to **Files** → **Postprocess**, then **Files** → **Open** and click on results.post.res.

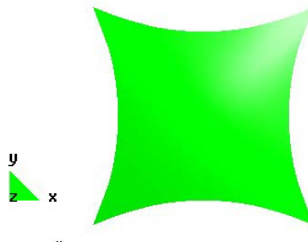


Figure A.15: Deformed mesh top view in GiD Postprocess.

It is possible to view different angles with **View** → **Rotate** → **Trackball** (Fig. A.16).



Figure A.16: Rotated deformed mesh top view in GiD Postprocess.

To see the results, go to the menu **View results** and choose between the options available that show stress or displacements (Fig. A.17).

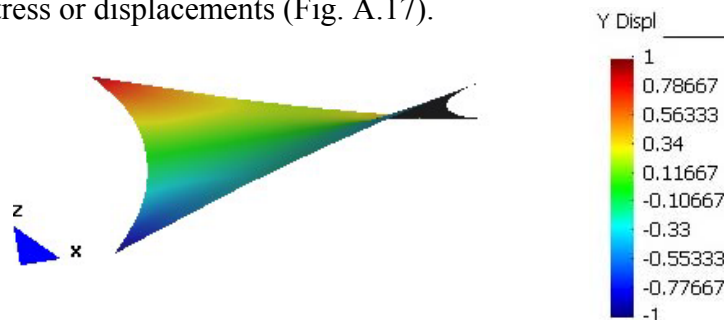
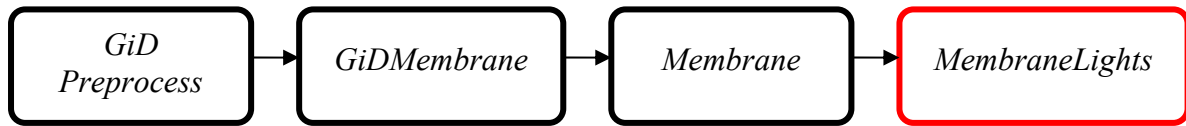


Figure A.17: One of the results possibilities: Y Displacement.

A.6. MEMBRANELIGHTS



The program MembraneLights makes it easier for the user that wants to run Lights or LightsGiD starting with the deformed mesh obtained from Membrane to create one of the input files necessary to run Lights or LightsGiD (`structure.txt`).

To understand better what is asked while running MembraneLights, what is written in the file `structure.txt` and also the information necessary in the other two input files needed for Lights or LightsGiD, `material.txt` and `loading.txt`, please read Lights user's manual in this CD at `Programs/Lights/manual.pdf` or `Programs/Lights/manual.doc`.

Inside the Windows Explorer, copy the text data report file exported from GiD (`Example.txt`) and the `output.txt` file from Membrane into the same folder where `membranelights.exe` is. Click on `membranelights.exe`, a window will open where the required information should be typed:

Please enter the name of the text data report file exported from GiD (without extension).

Example

Were cable elements generated in GiD? Y=Yes N=No

Y

Please write the following values:

lstol, maxls, mntol, mnref, maxminor and maxlist.

0.1 20 0.0001 0 10000 3

— `lstol`: controls the accuracy of the line search. It must lie in the range $0.0 \leq \text{lstol} < 1.0$.

Decreasing this value tends to increase the accuracy of the line search. It is usually 0.1.

— `maxls`: The maximum number of cubic interpolations allowed in the line search. It must be greater than one. It is usually 20.

The iterations terminate if the infinity norm of the residue becomes less than or equal to maxnorm , which is calculated as: $\text{maxnorm} = \text{mntol} * \text{mnref}$.

If mntol is specified as a non-positive value, it is replaced by 0.001. If mnref is specified as a non-positive value, it is replaced by the infinite norm of the residue, evaluated with all displacements equal to zero.

— maxminor : The maximum number of iterations allowed. It must be greater than zero. It is usually ten times the number of degrees of freedom.

— maxlist : the number of BFGS corrections kept. These corrections are stored separately on a doubly linked circular list. Used only with the limited memory BFGS method. It is usually between 3 and 20.

The next question is only asked if the user answered “Y” to the question “Were cable elements generated in GiD?”.

What is the number that corresponds to the cable material in the input file material.txt?

1

What is the number that corresponds to the membrane material in the input file material.txt?

1

How many nodes will be displaced?

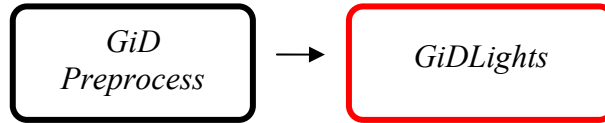
0

The following question is only asked if the answer to the previous question was a number bigger than zero.

Please write the node number and the displacement in x, y and z directions – do this for each node.

The structure.txt file that will be used to run Lights or LightsGiD will be created automatically in the same folder where membranelights.exe is. If the user would like to check anything or if there were any mistakes while entering the data asked before, the file structure.txt can be opened with Note Pad or Word Pad.

A.7. GiDLIGHTS



The program GiDLights makes it easier for the user that generated a mesh inside GiD to create one of the input files necessary to run Lights or LightsGiD (`structure.txt`).

Inside the Windows Explorer, copy the text data report file exported from GiD (*Example.txt*) into the same folder where `gidlights.exe` is. Click on `gidlights.exe`, a window will open where the required information should be typed:

Please enter the name of the text data report file exported from GiD (without extension).

Example

**Please write the following values:
l stol, maxls, mntol, mnref, maxminor and maxlist.**

0.1 20 0.0001 0 10000 3

— `l stol`: controls the accuracy of the line search. It must lie in the range $0.0 \leq \text{l stol} < 1.0$.

Decreasing this value tends to increase the accuracy of the line search. It is usually 0.1.

— `maxls`: The maximum number of cubic interpolations allowed in the line search. It must be greater than one. It is usually 20.

The iterations terminate if the infinity norm of the residue becomes less than or equal to `maxnorm`, which is calculated as: $\text{maxnorm} = \text{mntol} * \text{mnref}$.

If `mntol` is specified as a non-positive value, it is replaced by 0.001. If `mnref` is specified as a non-positive value, it is replaced by the infinite norm of the residue, evaluated with all displacements equal to zero.

— `maxminor`: The maximum number of iterations allowed. It must be greater than zero. It is usually ten times the number of degrees of freedom.

— maxlist: the number of BFGS corrections kept. These corrections are stored separately on a doubly linked circular list. Used only with the limited memory BFGS method. It is usually between 3 and 20.

What is the number that corresponds to the cable material in the input file material.txt?

1

What is the number that corresponds to the membrane material in the input file material.txt?

1

How many nodes will be displaced?

4

The following question is only asked if the answer to the previous question was a number bigger than zero.

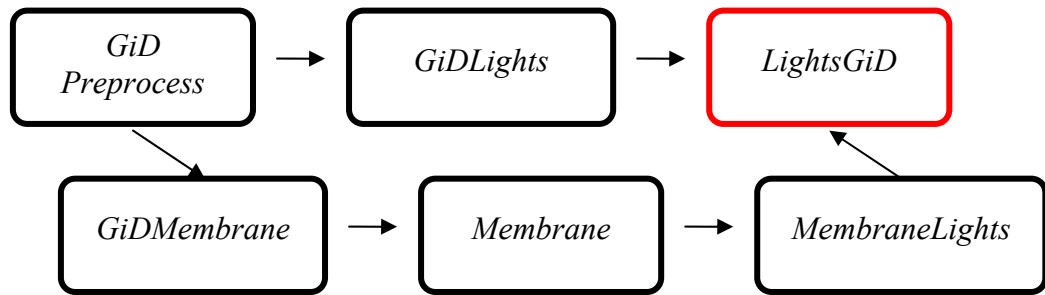
Please write the node number and the displacement in x, y and z directions – do this for each node.

<i>1</i>	<i>-1.0</i>	<i>-1.0</i>	<i>3.0</i>
<i>138</i>	<i>1.0</i>	<i>-1.0</i>	<i>5.0</i>
<i>139</i>	<i>-1.0</i>	<i>1.0</i>	<i>5.0</i>
<i>185</i>	<i>1.0</i>	<i>1.0</i>	<i>3.0</i>

The structure.txt file that will be used to run Lights or LightsGiD will be created automatically in the same folder where gidlights.exe is.

If the user would like to check anything or if there were any mistakes while entering the data asked before, the file structure.txt can be opened with Note Pad or Word Pad.

A.8. LIGHTSGiD



At this point you have already created structure.txt with GiDLights or MembraneLights. To be able to create the other two files necessary to run Lights or LightsGiD (material.txt and loading.txt), please read Lights user's manual in this CD at Lights/manual.pdf or Lights/manual.doc.

If the user started the project creating a mesh in GiD, there are two possible ways to get to LightsGiD, as shown in the diagram above: from MembraneLights or from GiDLights.

A.8.1. From MembraneLights

The form finding part was done in Membrane and now the user wants to be able to apply different loadings not only into membrane elements, but also cable and frame elements. There is an example at the CD folder Example/LightsGiD/FromMembraneLights.

Some changes were done manually in structure.txt created by MembraneLights available in this folder to add frame elements and more cable elements.

With the autocad.scr output file from Membrane, the drawing created with the deformed membrane was used to draw 4 frame elements and 8 cable elements necessary (FrameCablesMembrane.dwg). Then only the frame elements were saved in Frame.dxf and only cable elements in Cables.dxf.

*Inside GiD and at **Files** → **Import** → **DXF** the files saved in AutoCAD were selected (Cables.dxf or Frame.dxf), one at a time, and a mesh was generated **Mesh** → **Mesh criteria** → **Mesh** → **Lines**. After clicking on the lines, press ESC and go to **Mesh** → **Generate Mesh** and type the size of the elements (0.8). Then click on **OK** twice. After that, the text data report was exported **Files** → **Export** → **Text data report...** (Cableoriginal.txt or Frameoriginal.txt).*

Since new nodes were created, and the numbers must follow the sequence that is already in the structure.txt created by MembraneLights, the node numbers and elements were manually changed (Cablechanged.txt and Framechanged.txt) in order to be added inside structure.txt.

The other input files necessary to run LightsGid, material.txt and loading.txt, are available at Example/LightsGiD/FromMembraneLights/Input together with structure.txt. These 3 files must be in the same folder where lightsgid.exe is. Click on lightsgid.exe.

If there are membrane elements, the program will ask for the membrane highest node number. In this example, there are 247 nodes, but only the nodes from 1 to 185 are part of membrane elements. The nodes from 186 to 247 are the ones created later for extra cables and frame elements.

Please write the membrane highest node number.

185

Wait while the program calculates the results.

For each loading informed in loading.txt input file, the program will ask the user for a name in order to write the GiD postprocess files with the results after applying that loading (*r01.post.msh, r01.post.res, r02.post.msh, r02.post.res, ...*). The files results.post.res and results.post.msh contain the results of all loadings applied with the mesh coordinates of the last loading.

Enter a name for the file with the results of loading 1

r01

Wait while the program calculates.

The output files will be created in the same folder: autocad.scr, cable.txt, coordinate.txt, displacement.txt, frame.txt, membrane.txt, reaction.txt, spring.txt, results.post.res, results.post.msh and other .post.msh and .post.res files which names are given by the user.

Open AutoCAD and go to **Tools** → **Run Script...** click on autocad.scr. The undeformed mesh will appear (Fig. A.18) and the user can turn on other layers called “loading ___” to see also the deformed mesh that corresponds to each loading. If some elements are drawn in red that means they are under compression.

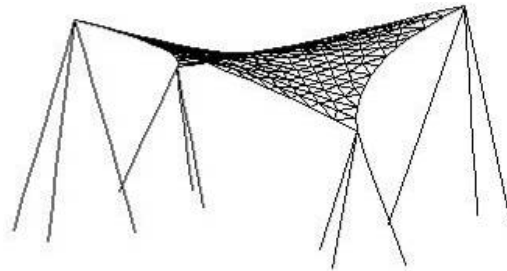
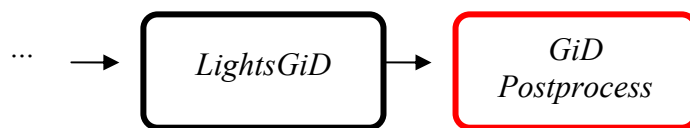


Figure A.18: View of membrane, cable and frame elements in AutoCAD.



To see the results in GiD Postprocess, open GiD and go to **Files** → **Postprocess**, then **Files** → **Open** and click on one of the .post.res files generated (Fig. A.19).



Figure A.19: Membrane (green), cable (blue) and frame (magenta) elements view in GiD Postprocess.

It is possible to view different angles with **View** → **Rotate** → **Trackball**.

To see the results, go to the menu **View results** and choose between the options available that show stress or displacements (Fig. A.20).

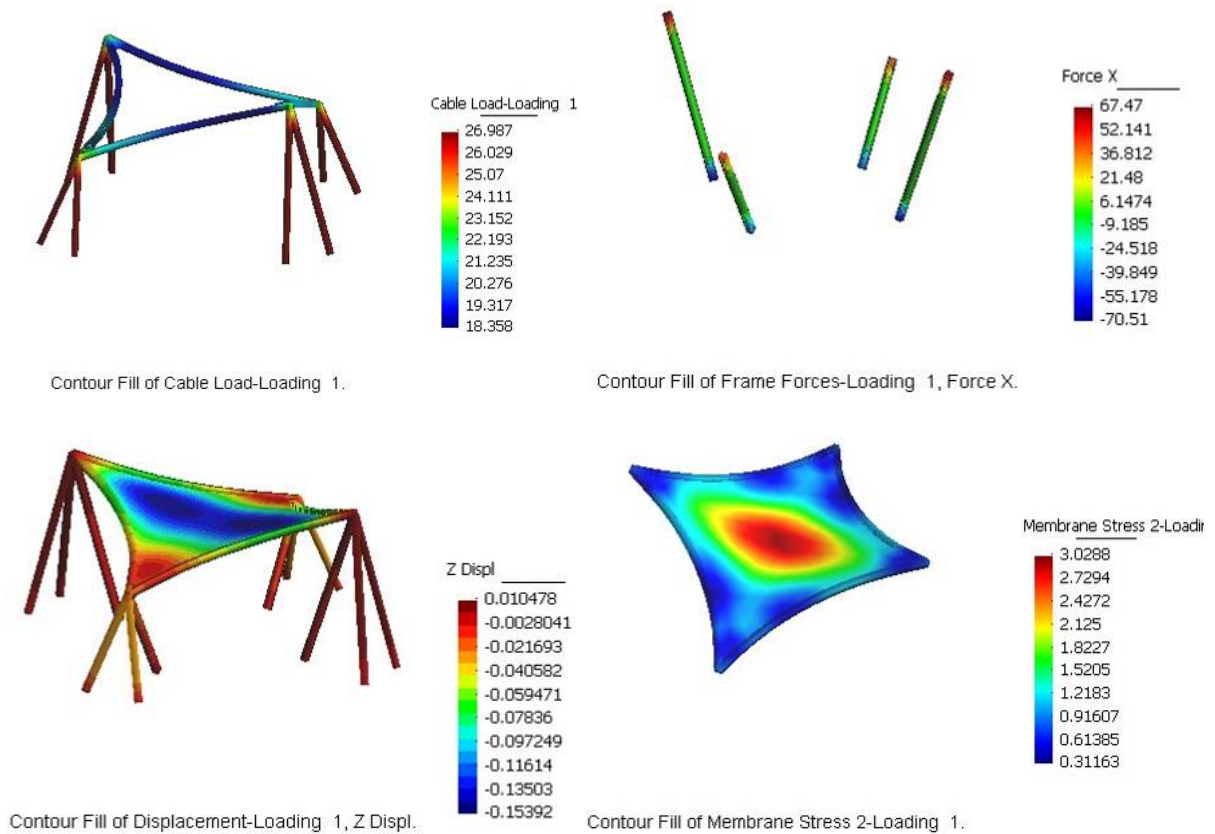


Figure A.20: Some results in GiD Postprocess.

A.8.2. From GiDLights

If the user didn't find a satisfying form with Membrane and wants to try LightsGiD by adding stressed cable elements or loading the membrane. There is an example at [Example/LightsGiD/FromGiDLights](#).

In this example membrane and cable elements will appear in the output files with high tensions because of the displacements imposed to the nodes. To analyze stresses caused by real loadings applied it is recommended to run LightsGiD again with the node coordinates of the best form found. Since it is still a form finding example, no frame elements were added.

The other input files necessary to run LightsGid, material.txt and loading.txt, are available at Example/LightsGiD/FromGiDLights/Input together with structure.txt. These 3 files must be in the same folder where lightsgid.exe is. Click on lightsgid.exe.

If there are membrane elements, the program will ask for the membrane highest node number.

Please write the membrane highest node number.

185

Wait while the program calculates.

For each loading informed in loading.txt input file, the program will ask the user for a name in order to write the GiD postprocess files with the results after applying that loading (*r01.post.msh, r01.post.res, r02.post.msh, r02.post.res, ...*). The files results.post.res and results.post.msh contain the results of all loadings applied with the mesh coordinates of the last loading.

Enter a name for the file with the results of loading 1

r01

Wait while the program calculates.

The output files will be created in the same folder: autocad.scr, cable.txt, coordinate.txt, displacement.txt, frame.txt, membrane.txt, reaction.txt, spring.txt, results.post.res, results.post.msh and other .post.msh and .post.res files which names are given by the user.

Open AutoCAD and go to **Tools** → **Run Script...** click on autocad.scr. The undeformed mesh will appear and the user can turn on other layers called “loading __” to see also the deformed mesh that corresponds to each loading (Fig. A.21). If some elements are drawn in red that means they are under compression.

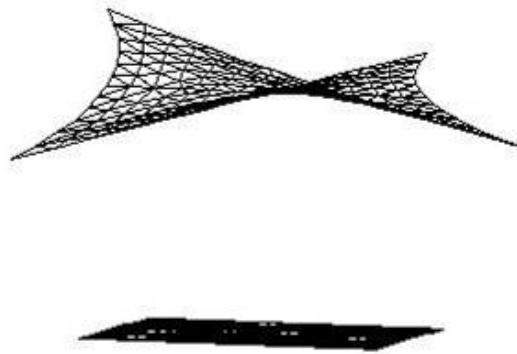
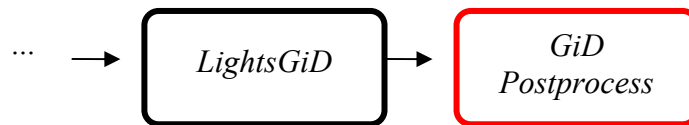


Figure A.21: Deformed and undeformed meshes in AutoCAD.



To see the results in GiD Postprocess, open GiD and go to **Files** → **Postprocess**, then **Files** → **Open** and click one of the .post.res files generated (Fig. A.22).

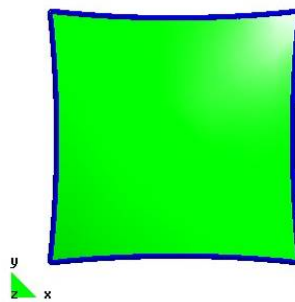


Figure A.22: Membrane (green) and cable (blue) elements shown in GiD Postprocess.

It is possible to view different angles with **View** → **Rotate** → **Trackball**.

To see the results, go to the menu **View results** and choose between the options available that show stress or displacements (Fig. A.23).

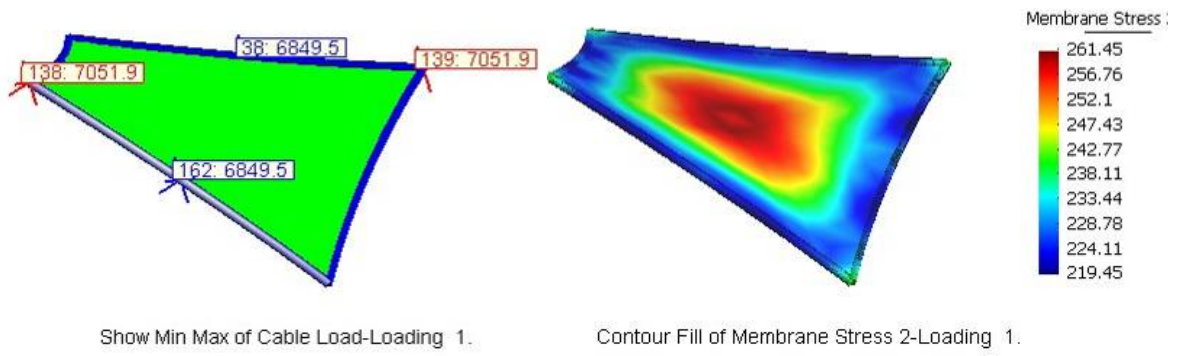


Figure A.23: Some results in GiD Postprocess.

APÊNDICE B – CD

Este CD contém os arquivos com o código fonte em Ada 95 e o executáveis dos programas Membrane, Lights, GiD, GiDLights, GiDMembrane, MembraneLights e LightsGiD, além do manual de utilização apresentado no Apêndice A com os arquivos gerados em cada etapa do exemplo mostrado.