UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE UMA GEODÉSICA *TENSEGRITY* METÁLICA

PAULO GUSTAVO VON KRÜGER

ORIENTADOR: FRANCISCO CARLOS RODRIGUES

CO-ORIENTADOR: LUÍS EUSTÁQUIO MOREIRA

AGOSTO DE 2007

Paulo Gustavo von Krüger

DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE UMA GEODÉSICA *TENSEGRITY* METÁLICA

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de "Doutor em Engenharia de Estruturas"

Comissão Julgadora:

_____

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
E.E. UFMG – Orientador

_____

Prof. Dr. Luís Eustáquio Moreira
E.E. UFMG – Co-orientador

_____

Prof. Dr. Edgar Mantilla Carrasco
E.E. UFMG

_____

Prof. Dr. José Ricardo Queiroz Franco
E.E. UFMG

_____

Prof. Dr. José Luis Mendes Ripper
D.A.D. / PUC-Rio

_____

Prof. Dr. João Marcos de Almeida Lopes
D.A.U. USP São Carlos

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

À minha esposa, Luciana
Aos meus pais, Maria e Reynaldo
À minha irmã, Ana Carolina
Pelo apoio incondicional nesta etapa

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo;

Ao Professor Francisco Carlos Rodrigues, pela orientação, paciência e apoio;

Ao Professor Luís Eustáquio Moreira, pela orientação, apoio, ajuda e por me "apresentar" ao *Tensegrity*;

Ao amigo (e agora Professor) Marcelo Greco, pelo suporte e sugestões na modelagem numérica, além das dicas importantes;

Ao Professor Edgar V. Mantilla Carrasco, pelas contribuições nos ensaios;

Ao Professor Telmo Deifeld pelas informações quanto às estruturas *Tensegrity*;

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas em geral, e em particular, ao Professor Ricardo Hallal Fakury, pela viabilização do modelo processual;

Aos funcionários do LAEES (Laboratório de Análise Experimental de Estruturas), pela ajuda na realização dos ensaios;

Ao Engenheiro Dietrich Wischhoff, pela consultoria e dicas importantes;

Ao Centro Universitário Metodista de Minas Izabela Hendrix pelo apoio;

Ao amigo Ezequiel Rezende pelas ajuda e presteza;

À minha esposa, Luciana, pela paciência, apoio e carinho em todas as horas;

Aos meus pais pelo apoio incondicional;

À minha irmã, também pelo apoio e constante incentivo;

À toda minha família, lastro importante nesta caminhada;

Aos meus amigos e colegas do doutorado, pela ajuda e pelos momentos importantes que compartilhamos.

A todos os meus amigos que torceram por esta realização.

RESUMO

Este trabalho consiste no desenvolvimento e análise teórico, numérico e experimental de uma estrutura geodésica metálica da categoria *Tensegrity*. Esse sistema estrutural consiste em se armar um volume no espaço utilizando-se de cabos e barras que não se tocam e que trabalham, respectivamente, à tração e compressão, dando origem ao nome *Tensegrity*. No trabalho há o desenvolvimento integrado da cúpula por meio de um programa experimental, da análise numérica, da obtenção dos parâmetros geométricos, do desenvolvimento de detalhes construtivos e de novas propostas de concepções arquitetônicas para este tipo de estrutura. O programa experimental consiste em ensaios estáticos de aplicação de cargas simétricas e assimétricas em um modelo conceptivo-processual, de forma inédita. Para a análise numérica, são simuladas as mesmas situações de aplicação de cargas do programa experimental. Comparados os valores numéricos com os experimentais, verifica-se que: os valores das forças de compressão nas barras e de tração nas cordoalhas foram menores na análise experimental em relação à numérica; há similaridade de comportamento entre os valores dos deslocamentos nodais. Os parâmetros geométricos específicos da referida estrutura, ainda inéditos, possibilitam a obtenção das coordenadas e os comprimentos das barras e cabos de uma cúpula geodésica *Tensegrity* de qualquer dimensão. Neste trabalho são desenvolvidos e apresentados os detalhes construtivos das ligações da cúpula e o dimensionamento de seus elementos estruturais (barras constituídas por tubos metálicos e cabos de aço).

Palavras-chave: Cúpula, geodésica, *tensegrity,* metálica, modelo conceptivo-processual, arquitetura.

ABSTRACT

This thesis consists in the development and analysis theoretical, numerical and experimental of a geodesic metal structure from the Tensegrity category. This structural system consists in creating a volume in space using cables and bars that do not touch each other, and works, respectively, through tension and compression, giving the name Tensegrity. Throughout this work there is an integrated development of the dome through an experimental program, a numerical analisys, the obtaining of geometric parameters, the development of the constructive details and new proposals of architectonic conceptions for this kind of structure. The experimental program consists in static tests of application of symmetrical and assymetrical loads in a conceptive-processual model in an inedit way. In the numerical analisys, the same situations of load applications used in the experimental program are simulated. Compared the numeric values with the experimental ones, it is verified that: the values of the compression forces in the bars, and the tension values in the cables, were smaller in the experimental program than in the numerical analisys; there is a behavioral similarity between the values of nodal displacement. The specific geometric parameters of this structure, still unpublished, make possible the obtaining of the coordinates and lengths of the bars and cables of a tensegrity geodesic dome of any size. In this thesis is developed and presented the constructive details of the dome and the dimensions of its structural elements (metal pipes bars, and cables of steel).

Key Words: Dome, Geodesic, Tensegrity, Metallic, Conceptive-Processual Model, Architecture.

SUMÁRIO

Lista de Figuras xi
Lista de Tabelas xxiii
Lista de Abreviaturas e Siglas xxiv
Lista de Símbolos xxv
1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Generalidades 1
1.2 Objetivos 5
1.2.1 Objetivo Geral 5
1.2.2 Objetivos Específicos 5
1.3 Justificativas 6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8
2.1 Generalidades 8
2.2 As Estruturas da natureza 11
2.3 Conceito de mímesis e analogia.. 13
2.4 A Geodésica 17
2.5 Estruturas *Tensegrity* 22
2.5.1 Aplicação do Tensegrity em outras áreas 24
2.5.1.1 Micro e macro-cosmo 24
2.5.1.2 Nanotecnologia 25
2.5.1.3 Biomecânica 25
2.5.1.4 Anatomia 26
2.5.1.5 Robótica 26
2.5.1.6 Engenharia aeroespacial 27
2.5.1.7 Design 29
2.5.2 Tipologias das estruturas *Tensegrity* 30
2.5.2.1 Figuras simples 31
2.5.2.2 Padrão diamante 34
2.5.2.3 Padrão circuito 35

2.5.2.4 Padrão *zig-zag*..... 36
2.5.2.5 Demais sistemas *Tensegrity*..... 36
2.5.3 Processos de montagem..... 37
2.5.3.1 Sistemas unidimensionais..... 37
2.5.3.2 Montagens bidimensionais..... 40
2.5.3.3 Montagens tridimensionais..... 41
2.5.4 Equilíbrio, estabilidade e busca de forma..... 42
2.5.5 Análise experimental..... 45
2.6 A Geodésica *Tensegrity*..... 48
2.6.1 Definições geométricas em modelos físicos reduzidos..... 48
2.6.2 Sobre os modelos físicos em escala reduzida..... 50
2.7 Exemplos de arquitetura *Tensegrity*..... 52
2.7.1 Domos de cabos..... 53
2.7.2 Sony Center..... 55
2.7.3 Blur Building..... 56
2.7.4 Torre de *Rostock*..... 58
2.7.5 Sherwood Forest Visitor Complex..... 59
2.7.6 Projetos e propostas..... 62
2.7.6.1 Treliça espacial *Tensegrity*..... 62
2.7.6.2 Mastro *Tensegrity*..... 62
2.7.6.3 Outros projetos..... 64
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL..... 65
3.1 Experimento de design..... 65
3.1.1 Desenvolvimento e implementação da estrutura *Tensegrity*..... 66
3.1.1.1 Preparação dos materiais componentes do modelo..... 67
3.1.1.2 Montagem da primeira etapa do poliedro..... 68
3.1.1.3 Montagem da segunda etapa do poliedro..... 69
3.1.1.4 Montagem da etapa final do poliedro..... 71
3.1.2 Modelo conceptivo-processual metálico..... 71
3.2 Projetos dos Experimentos Estáticos..... 75
3.2.1 O modelo..... 75

3.2.1.1 Medições nas cordoalhas..... 76
3.2.1.2 Medições nas barras: uso de EER ligados em ¼ de ponte.... 77
3.2.1.3 Medições nas barras: uso de EER ligados em ponte completa..... 78
3.2.1.4 Disposição e nomenclatura adotada para os EER fixados à estrutura..... 80
3.2.1.5 Sistema de aplicação de carga..... 82
3.2.1.6 Verificações quanto às resistências dos elementos estruturais..... 84
3.2.2 Aplicação de cargas em todos os nós do modelo..... 87
3.2.3 Aplicação de cargas nos cinco nós da parte superior da cúpula. 88
3.2.4 Aplicação de cargas assimétricas..... 90

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS... 92

4.1 Resultados dos ensaios estáticos..... 92
4.1.1 Aplicação de cargas em todos os nós..... 95
4.1.2 Aplicação de cargas nos cinco nós da parte superior da cúpula. 106
4.1.3 Aplicação de cargas assimétricas..... 117

5 ANÁLISES NUMÉRICAS..... 119

5.1 Introdução..... 119
5.2 Desenvolvimento das análises numéricas..... 120
5.2.1 Aplicação de cargas em todos os nós..... 125
5.2.2 Aplicação de cargas nos cinco nós da parte superior da cúpula 136
5.2.3 Aplicação de cargas assimétricas..... 147

6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS. 159

6.1 Introdução..... 159
6.2 Aplicação de cargas em todos os nós..... 160
6.3 Aplicação de cargas nos cinco nós da parte superior da cúpula..... 175
6.4 Aplicação de cargas assimétricas..... 180

7 PROJETO DE UM PROTÓTIPO..... 181

7.1 Parâmetros geométricos..... 181

7.1.1 Definições geométricas da Cúpula Geodésica *Tensegrity*..... 182
7.2 Projeto de um protótipo..... 191
7.2.1 Condições de semelhança..... 191
7.2.1.1 Análise dimensional da barra tubular..... 192
7.2.1.2 Análise dimensional da cordoalha..... 194
7.2.2 Dimensionamento do protótipo..... 195
7.2.3 Especificação dos elementos estruturais no pré-dimensionamento..... 197
7.2.4 Detalhamento..... 203
7.3 Propostas de aplicações arquitetônicas..... 204
7.4 Proposta de esquema de montagem de um protótipo..... 211
8 CONCLUSÕES..... 216
7.1 Considerações finais..... 216
7.2 Sugestões..... 218
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 219
10 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA..... 228
ANEXO A..... 235
ANEXO B..... 240
ANEXO C..... 254
ANEXO D..... 258
ANEXO E..... 260
ANEXO F..... 268

LISTA DE FIGURAS

1 INTRODUÇÃO

FIGURA 1.1 - Vista interna e externa de um dos Pavilhões da *Waterland*, Holanda..... 2

FIGURA 1.2 - Ponte *Goltzschtalbrücke*, construída entre 1846 e 1851 na região da Saxônia, Alemanha..... 2

FIGURA 1.3 - Escultura intitulada *Easy-K*, montada em 1970 em Arnhem, Holanda..... 4

FIGURA 1.4 - Nanoestrutura em forma de troncoicosaedro..... 4

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

FIGURA 2.1 – O centro de uma margarida e seu padrão geométrico..... 9

FIGURA 2.2 – O centro de uma margarida e seu padrão geométrico..... 10

FIGURA 2.3 – Retângulo de proporções áureas..... 10

FIGURA 2.4 – Comparação do Homem Vitruviano de Leonardo da Vinci e o Modulor de Le Corbusier..... 15

FIGURA 2.5 – Construção do domo por Walter Bauersfeld..... 17

FIGURA 2.6 – Domo de Walter Bauersfeld concluído..... 18

FIGURA 2.7 – Foto, anotações e Patente do domo de Walter Bauersfeld..... 18

FIGURA 2.8 – Vista lateral e foto do *"Halle au Blé"*, atual Bourse de Commerce de Paris et la colonne Médicis..... 19

FIGURA 2.9 – Cúpula geodésica em Baton Rouge, Luisiana..... 21

FIGURA 2.10 – Domo para a Exposição Internacional de Montreal, 1967..... 21

FIGURA 2.11 – *Proto-tensegrity* de Karl Ioganson..... 23

FIGURA 2.12 – Algumas formas de utilização de estruturas *Tensegrity* em robôs..... 27

FIGURA 2.13 – Montagem, em oito estágios, de um modelo físico de um mastro..... 28

FIGURA 2.14 – Antena refletora *Tensegrity*: a) Modelo numérico; b) Seqüência de montagem..... 28

FIGURA 2.15 – Mobiliário *Tensegrity* desenvolvida pelo autor: a) Mesa de canto; b) Mesa de jantar..... 29
FIGURA 2.16 – Mobiliário *Tensegrity*: a) Luminária; b) Cadeiras..... 30
FIGURA 2.17 – Brinquedos *Tensegrity*: a) *Tensegritoy*; b) Decoração..... 30
FIGURA 2.18 – Rede de cabos mapeado em uma esfera..... 31
FIGURA 2.19 – Figura bidimensional formada por duas barras..... 32
FIGURA 2.20 – Figura cujas barras passam por seu centro geométrico..... 32
FIGURA 2.21 – Figura de camada única ou sistema *simplex*: a) Prisma triangular; b) *Simplex*..... 33
FIGURA 2.22 – Configuração das barras e tendões de uma figura de camada única..... 33
FIGURA 2.23 – Sistema prismático com base hexagonal..... 33
FIGURA 2.24 – Octaedro expandido..... 34
FIGURA 2.25 – Padrão diamante: a) Polígonos definidos pelos tendões; b) Plano denominado diamante..... 35
FIGURA 2.26 – Padrão diamante: a) Camada única; b) Camada dupla..... 35
FIGURA 2.27 – Princípio do padrão circuito..... 35
FIGURA 2.28 – Alteração da fixação dos tendões: a) Padrão diamante; b) Padrão *zig-zag*..... 35
FIGURA 2.29 – Alteração da fixação dos cabos: a) Octaedro expandido; b) Tetraedro truncado..... 36
FIGURA 2.30 – Mastro Tensegrity: a) Universidade de Oregon, 1953; b) Museu de Arte Moderna de New York – primeira exposição..... 38
FIGURA 2.31 – Mastro Tensegrity: a) Fuller com o mastro criado por Snelson; b) Mastro Tensegrity construído na North Carolina State College..... 38
FIGURA 2.32 – Mastro Tensegrity: a) *Needle Tower I*; b) *Needle Tower II*..... 39
FIGURA 2.33 – Mât Autotentant..... 40
FIGURA 2.34 – Outros sistemas de montagem unidimensionais: a) Toro; b) Arco..... 40

FIGURA 2.35 – Sistema de montagem bidimensional: a) LABORATOIRE DE MÉCANIQUE ET GÉNIE CIVIL; b) FEST..... 40
FIGURA 2.36 – Sistemas de montagem bidimensionais: a) Curvatura simples; b) Dupla curvatura..... 41
FIGURA 2.37 – Sherwood Forest Visitor Complex…… 42
FIGURA 2.38 Parábola que representa o comportamento de um sistema *Tensegrity*..... 43
FIGURA 2.39 – Ensaio de uma torre *Tensegrity*: a) O sistema completo; b) A mesa vibratória..... 45
FIGURA 2.40 – Reforço estrutural dos nós: a) Cilindro de reforço do nó central; b) Anel de reforço dos nós de cabos..... 46
FIGURA 2.41 – Instrumentação do modelo para análise experimental..... 47
FIGURA 2.42 – Modelo reduzido da cobertura do estádio La Plata no túnel de vento: a) Modelo rígido; b) Modelo aero-elástico..... 47
FIGURA 2.43 – Icosaedro..... 48
FIGURA 2.44 – Icosaedro de freqüências de 1 a 4..... 48
FIGURA 2.45 – Treliça geodésica..... 49
FIGURA 2.46 – Dimensionamento das barras a e b do icosaedro de freqüência dois..... 49
FIGURA 2.47 – Organização do Domo *Tensegrity*..... 50
FIGURA 2.48 – Nós do Domo *Tensegrity*..... 50
FIGURA 2.49 – Modelo conceptivo com membrana estrutural..... 51
FIGURA 2.50 – Adaptador existente nas extremidades das barras..... 51
FIGURA 2.51 – *Tensegrity* montado por Fuller..... 52
FIGURA 2.52 – Exemplos mais relevantes de domos de cabos: a) Olympic Gymnastics Arena e Olympic Fencing Arena; b) Amagi Dome; c) Georgia Dome; d) Tao Yuan Sports Arena..... 54
FIGURA 2.53 – Sony Center: a) Vista geral do complexo; b) Cobertura em forma de cone assimétrico; c) Anel de compressão; d) *Flying mast*; e) Vidro da cobertura; f) Membrana..... 56
FIGURA 2.54 – Vista do Blur Building……... 57
FIGURA 2.55 – A estrutura *Tensegrity* do Blur Building: a) Anel de

	sustentação e malha estrutural; b) Corte esquemático da estrutura; c) Elevação lateral da instalação.....	58
FIGURA 2.56	– Comparação do caminhamento dos esforços em uma treliça convencional e uma *Tensegrity*	58
FIGURA 2.57	– Torre de Rostock.....	59
FIGURA 2.58	– Vistas do Sherwood Forest Visitor Complex.....	60
FIGURA 2.59	– Módulo *Tensegrity*: a) Modelo em escala reduzida; b) Módulo como galho; c) Módulo como raiz.....	61
FIGURA 2.60	– Treliça espacial *Tensegrity*.....	62
FIGURA 2.61	– Mastro *Tensegrity*: a) o Módulo básico; b) Possibilidades de uso; c) Detalhe do nó; d) Detalhe do nó; e) Perspectiva humanizada do abrigo; f) Perspectiva da estrutura.....	63
FIGURA 2.61	– Outras propostas para estruturas *Tensegrity*: a) Domo; b) Cobertura para estádios; c) Cobertura piramidal; d) Passarela.....	64
3	**PROGRAMA EXPERIMENTAL**	
FIGURA 3.1	– Dimensão das barras.....	67
FIGURA 3.2	– Rasgo e furo de fixação do cordão de algodão à barra.....	67
FIGURA 3.3	– Esquema de fixação do cordão à barra.....	68
FIGURA 3.4	– Disposição das cinco primeiras barras.....	68
FIGURA 3.5	– Conclusão da primeira etapa da montagem do poliedro.....	69
FIGURA 3.6	– Fixação das duas primeiras barras.....	69
FIGURA 3.7	– Formação da estrela de cinco pontas.....	70
FIGURA 3.8	– Finalização da segunda etapa.....	70
FIGURA 3.9	– Finalização do modelo da geodésica *Tensegrity*.....	71
FIGURA 3.10	– Modelo conceptivo-processual composto por barras de alumínio e cordoalhas de aço.....	72
FIGURA 3.11	– Modelo conceptivo-processual instrumentado.....	77
FIGURA 3.12	– Fixação das cordoalhas: a) Prensa-cabo; b) Grampo.....	74
FIGURA 3.13	– Detalhe e foto da chapa de aço inoxidável.....	76
FIGURA 3.14	– Esticador gancho / olhal em aço galvanizado com 50 mm de comprimento.....	77

FIGURA 3.15 – Posicionamento dos EER nas barras e cordoalhas..... 77
FIGURA 3.16 – Posicionamento dos EER nas barras: a) EER na parte superior das barras; b) EER na parte inferior das barras 78
FIGURA 3.17 – Posicionamento dos EER ligados em ponte completa..... 79
FIGURA 3.18 – Vista superior do modelo com a nomenclatura dos EER..... 80
FIGURA 3.19 – Detalhe com a nomenclatura dos EER..... 81
FIGURA 3.20 – Numeração dos apoios da cúpula (BASES)..... 81
FIGURA 3.21 – Sistema de tração dos nós..... 82
FIGURA 3.22 – Sistema completo de aplicação de carga..... 84
FIGURA 3.23 – Medição do diâmetro da cordoalha..... 85
FIGURA 3.24 – Colocação da células de carga LM-100KA..... 88
FIGURA 3.25 – Simulação de mezanino, mostrando os relógios comparadores para a medição dos deslocamentos radiais..... 89
FIGURA 3.26 – Linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para $f / d = 1 / 2$..... 91
FIGURA 3.27 – Comparação das linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa e a estrutura de uma cúpula geodésica..... 91

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

FIGURA 4.1 – Deformações nas barras e cordoalhas, notando-se alterações bruscas nas respostas dos ensaios..... 93
FIGURA 4.2 – Fixação das barras às cordoalhas, por meio de grampos..... 94
FIGURA 4.3 – Fixação das barras da base às cordoalhas, por meio de grampos..... 94
FIGURA 4.4 – Deformação das cordoalhas para aplicação de cargas em todos os nós..... 95
FIGURA 4.5 – Deformação das barras para aplicação de cargas em todos os nós..... 96
FIGURA 4.6 – Curvas típicas de deformação das ligas de alumínio..... 98
FIGURA 4.7 – Comparação das deformações das barras para aplicação de cargas em todos os nós..... 99

FIGURA 4.8 – Deslocamentos dos nós..... 102
FIGURA 4.9 – Distribuição das cargas nos apoios..... 103
FIGURA 4.10 – Deformação das barras para aplicação de cargas que simulam mezanino apoiado nas cinco estruturas nodais da parte superior da cúpula..... 107
FIGURA 4.11 – Deformação das cordoalhas para aplicação de cargas na simulação de mezanino..... 109
FIGURA 4.12 – Comparação das deformações das barras para aplicação de cargas que simulam mezanino apoiado nos cinco nós da parte superior da cúpula..... 110
FIGURA 4.13 – Superposição dos gráficos de deformação das cordoalhas na simulação de cargas em todos as estruturas nodais e de mezanino..... 112
FIGURA 4.14 – Distribuição das cargas nos apoios..... 113
FIGURA 4.15 – Deslocamentos nos nós..... 115
FIGURA 4.16 – esquemas das configurações deformadas da estrutura, destacando-se o nó 1..... 116
FIGURA 4.17 – Deslocamentos nos nós..... 118

5 ANÁLISES NUMÉRICAS

FIGURA 5.1 – Retirada da primeira barra..... 121
FIGURA 5.2 – Retirada da segunda e terceira barras..... 122
FIGURA 5.3 – Gráfico das deformações ao longo da desmontagem parcial da cúpula..... 123
FIGURA 5.4 – Numeração das barras (compressão) e cordoalhas (tração) da cúpula..... 124
FIGURA 5.5 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas: a) Vista superior; b) Perspectiva; c) Vista A; d) Vista B..... 125
FIGURA 5.6 – Vista superior da cúpula com a numeração e os deslocamentos dos nós (numeração das ordenadas e abcissas em cm)..... 128

FIGURA 5.7 – Deslocamentos radiais para aplicação de carga em todos os nós: a) Pontos 1 a 5; b) Pontos 6 a 35; c) Pontos 36 a 90; Pontos 91 a 110..... 129
FIGURA 5.8 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N: a) Vista superior; b) Perspectiva; c) Vista A..... 132
FIGURA 5.9 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N: a) Cordoalhas de 6 a 10 e barras de 156 a 160; b) Cordoalhas de 41 a 60 e barras de 161 a 180; c) Cordoalhas de 116 a 145 e barras de 181 a 210..... 134
FIGURA 5.10 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas: a) Vista superior; b) Perspectiva; c) Vista A; d) Vista B..... 137
FIGURA 5.11 – Vista superior da cúpula com a numeração e os deslocamentos dos nós (numeração das ordenadas e abcissas em cm)..... 139
FIGURA 5.12 – Deslocamentos radiais para aplicação de carga nos cinco nós da parte superior da cúpula: a) Pontos 1 a 5; b) Pontos 6 a 35; c) Nós 36 a 90; d) Pontos 91 a 110..... 140
FIGURA 5.13 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N: a) Vista superior; b) Perspectiva; c) Vista A..... 143
FIGURA 5.14 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N: a) Cordoalhas 6 a 10 e barras 156 a 160; b) Cordoalhas 41 a 60 e barras 161 a 180; c) Cordoalhas 116 a 145 e barras 181 a 210..... 144
FIGURA 5.15 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas: a) Vista superior; b) Perspectiva; c) Vista A; d) Vista B..... 147
FIGURA 5.16 – Elevação superior da cúpula com a numeração e os deslocamentos dos nós (numeração das ordenadas e abcissas em cm)..... 150

FIGURA 5.17 – Deslocamentos radiais dos pontos: a) Pontos 1 a 5; b) Pontos 6 a 35; c) Pontos 36 a 90; d) Pontos 91 a 110..... 151

FIGURA 5.18 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N: a) Vista superior; b) Perspectiva; c) Vista A; d) Vista B..... 154

FIGURA 5.19 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N: a) Cordoalhas 6 a 10 e barras 156 a 160; b) Cordoalhas 41 a 60 e barras 161 a 180; c) Cordoalhas de 116 a 145 e barras de 181 a 210..... 156

6 Comparação dos Resultados Numéricos e Experimentais

FIGURA 6.1 – Deslocamentos obtidos nos ensaios (em vermelho) e na análise numérica (em verde): a) Vista superior; b) Perspectiva; c) Vista lateral..... 161

FIGURA 6.2 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas no ensaio experimental: a) Perspectiva; b) Vista lateral..... 163

FIGURA 6.3 – Valores comparativos dos deslocamentos obtidos na análise numérica (linha contínua) e na experimental (linha tracejada): a) Nós 1, 3 e 6; b) Nós 7 a 16..... 164

FIGURA 6.4 – Valores comparativos dos deslocamentos obtidos na análise numérica (linha contínua) e na experimental (linha tracejada) após excluir diferença no primeiro passo de carga: a) Nó 12; b) Nós 1, 3 e 6..... 165

FIGURA 6.5 – Comparação dos valores das forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais instrumentados, em N: a) Perspectiva (experimental); b) Perspectiva (análise numérica); c) Vista superior (experimental); c) Vista superior (análise numérica)..... 167

FIGURA 6.6 – Comparação dos valores das forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais instrumentados, em N: a) Cordoalhas; b) Barras..... 168
FIGURA 6.7 – Comparação entre os resultados das análises numérica e experimental das reações nos apoios: a) Base I; b) Base II; c) Base III; d) Base IV; e) Base V; f) Base VI; g) Base VII; h) Base VIII; i) Base IX; j) Base X..... 169
FIGURA 6.8 – Deslocamentos obtidos nos ensaios (em vermelho) e na análise numérica (em verde): a) Vista superior; b) Perspectiva; c) Vista lateral..... 175
FIGURA 6.9 – Valores comparativos dos deslocamentos obtidos na análise numérica (linha contínua) e na experimental (linha tracejada).... 177
FIGURA 6.10 – Valores comparativos dos deslocamentos obtidos na análise numérica (linha contínua) e na experimental (linha tracejada) após excluir diferença no primeiro passo de carga..... 177
FIGURA 6.11 – Cúpula geodésica antes e após a aplicação de cargas experimentais: a) Perspectiva; b) Vista lateral..... 178
FIGURA 6.12 – Comparação dos valores das forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais instrumentados, em N: a) Perspectiva (experimental); b) Perspectiva (análise numérica); c) Vista superior (experimental); d) Vista superior (análise numérica)..... 179

7 PROJETO DE UM PROTÓTIPO

FIGURA 7.1 – Icosaedro de freqüência 2..... 182
FIGURA 7.2 – Orientação dos ângulos das coordenadas esféricas..... 183
FIGURA 7.3 – Vista superior da cúpula geodésica com a numeração dos nós. 183
FIGURA 7.4 – Relações geométricas da cúpula geodésica: a) Sobreposição da geodésica comum com a cúpula *Tensegrity*; b) icosaedro de freqüência dois truncado; c) plano formado por uma estrutura nodal (nó) e o ângulo reto entre as arestas do icosaedro e do hexágono..... 203

FIGURA 7.5 – Relações geométricas da cúpula geodésica: a) linha que une o centro geométrico do icosaedro e do hexágono; b) detalhe do centro geométrico do hexágono..... 185
FIGURA 7.6 – Valores dos raios que circunscrevem os polígonos: a) pentágono; b) hexágono..... 186
FIGURA 7.7 – Obtenção de R_5 = 60,6 cm e R_6 = 60,83 cm..... 186
FIGURA 7.8 – Obtenção do comprimento das barras e cabos..... 189
FIGURA 7.9 – Desenho com as linhas que representam as cordoalhas e barras..... 189
FIGURA 7.10 – Comprimento das barras e cabos..... 190
FIGURA 7.11 – Detalhes do cabo de aço..... 200
FIGURA 7.12 – Tipo de laço empregado..... 201
FIGURA 7.13 – Dimensões da sapatilha adotada..... 202
FIGURA 7.14 – Dimensões do grampo adotado..... 202
FIGURA 7.15 – Dimensões do esticador adotado..... 203
FIGURA 7.16 – Dimensões da manilha adotada..... 203
FIGURA 7.17 – Stand onde poderá ser utilizada a geodésica *Tensegrity* como estrutura para a cobertura..... 205
FIGURA 7.18 – Mezanino em uma cúpula..... 206
FIGURA 7.19 – Espaço de meditação para residência projetada pelo autor..... 208
FIGURA 7.20 – Cúpulas funcionando como suporte das tendas delimitando espaços..... 209
FIGURA 7.21 – Cobertura interna à geodésica *Tensegrity*..... 210
FIGURA 7.22 – Unidade estrutural constituída por tubo e cabo de aço..... 211
FIGURA 7.23 - Seqüência de montagem de um protótipo: a) Montagem de um mastro para içamento da cúpula; b) Montagem da primeira etapa do poliedro; c) Fixação de cabos para içamento da primeira etapa do poliedro; d) Fixação de cabos para içamento da primeira etapa do poliedro; e) Içamento do poliedro e fixação de duas barras por nó; f) Içamento do poliedro e fixação de duas barras por nó; g) Içamento da etapa anterior e fixação de duas barras por nó; h) Içamento da etapa anterior e fixação

de duas barras por nó; i) Içamento da etapa anterior e fixação das duas últimas barras por nó; j) Içamento da etapa anterior e fixação das duas últimas barras por nó; k) Desmontagem dos cabos e mastro de içamento; l) Desmontagem dos cabos e mastro de içamento..... 212

ANEXO A

FIGURA A.1 – Direção e sentido do movimento analisado..... 236
FIGURA A.2 – Curva de deslocamento em função do tempo..... 236
FIGURA A.3 – Instrumentação para o ensaio dinâmico..... 237
FIGURA A.4 – Acelerômetro unidirecional..... 238
FIGURA A.5 – Acelerômetro para três direções..... 239
FIGURA A.6 – DT vertical..... 239

ANEXO C

FIGURA C.1 – Tipos e numeração dos elementos estruturais..... 255
FIGURA C.2 – Vista lateral com os valores das forças das barras e cordoalhas..... 256
FIGURA C.3 – Vista superior com os valores das forças das barras e cordoalhas..... 256
FIGURA C.4 – Gráfico tensão X deformação para os três corpos de prova (barras de alumínio), onde A é a área da seção transversal destes..... 257

ANEXO E

FIGURA E.1 – Nomenclatura dos pontos do icosaedro de freqüência dois truncado..... 261
FIGURA E.2 – Ângulo vertical φ de um vértice do pentágono do topo da Cúpula..... 262
FIGURA E.3 – Ângulo horizontal θ de um vértice do pentágono do topo da Cúpula..... 263
FIGURA E.4 – Ângulo vertical φ do vértice 23: a) coordenada cartesiana Z; b) coordenadas cartezianas Z_B e Z`..... 264
FIGURA E.5 – Ângulo horizontal θ do vértice 23..... 265

FIGURA E.6 – Ângulos vertical e horizontal do vértice 103..... 266

LISTA DE TABELAS

7 PROJETO DE UM PROTÓTIPO

TABELA 7.1 – Coordenadas dos nós do icosaedro de freqüência 2..... 182

TABELA 7.2 – Equações das coordenadas esféricas dos nós do icosaedro de freqüência 2 truncado..... 187

TABELA 7.3 - Dimensões e propriedades geométricas do tubo estrutural especificado..... 197

ANEXO C

TABELA D – Coordenadas esféricas da cúpula geodésica *Tensegrity*..... 259

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
AISC	American Institute of Steel Construction Inc.
EER	Extensômetro elétrico de resistência
L.R.T.	Limite de Resistência à Tração
L.E.	Limite de Escoamento
PC	Ponte completa

LISTA DE SÍMBOLOS

μ é o coeficiente de Poisson

ϕ_t é o fator de resistência para tração

T_n é a resistência nominal para barras quando solicitadas à tração

A_n é a área líquida da seção transversal da barra

F_y é a resistência ao escoamento do aço

r é o raio de giração

I é o momento de inércia

λ é o índice de esbeltez

E é o Módulo de Elasticidade

F_{cy} é a resistência ao escoamento à compressão do alumínio

ϕF_L é o estado limite de compressão

C_e é o coeficientes de pressão externa

ε_y é a deformação do início do escoamento

ε_{y0} é a deformação inicial da cordoalha

d é a distância entre dois pontos inscritos em uma superfície esférica

R_5 e R_6 são os raios das esferas que circunscrevem, respectivamente, os vértices dos pentágonos e hexágonos do icosaedro de freqüência dois truncado

φ_5 *e* φ_6 são os ângulos verticais dos vértices dos pentágonos e hexágonos deste poliedro

θ_5 e θ_6 são os ângulos horizontais dos vértices dos pentágonos e hexágonos deste poliedro

R é o raio do icosaedro de freqüência dois

r_5 e r_6 são os raios das circunferências circunscritas aos pentágonos e hexágonos, respectivamente

a_5 e a_6 são as aresta dos pentágonos e hexágonos, respectivamente

X, Y e Z são as coordenadas cartesianas dos vértices do icosaedro de freqüência dois

θ_i são as coordenadas horizontais dos vértices do icosaedro de freqüência dois

φ_i são as coordenadas verticais dos vértices do icosaedro de freqüência dois

φ e θ são os ângulos verticais e horizontais dos pontos que representam estes vértices, respectivamente

Π é o produto adimensional

R_p é o raio da cúpula protótipo

r_{5p} e r_{6p} são as circunferências circunscritas aos nós compostos por cinco e seis barras, respectivamente

α é o fator de imperfeição inicial

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal da barra

N_e é a força normal de flambagem elástica da barra

ρ é o fator de redução associado à flambagem

N_{ex} é a força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal x

N_{ey} a força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal y

N_{et} é a força normal de flambagem elástica por torção

C_w é a constante de empenamento da seção da barra

G é o módulo de elasticidade transversal

K_xL_x é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo x

K_yL_y é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo y

K_tL_t é o comprimento efetivo de flambagem por torção

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção

r_x e r_y são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y, respectivamente

x_0 e y_0 são as coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais x e y, respectivamente, em relação ao centróide da seção.

1

INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Com o desenvolvimento de materiais estruturais, a engenharia de estruturas cada vez mais passou a se dedicar também ao desenvolvimento e sofisticação das ferramentas e técnicas de cálculo, fazendo grandes avanços nesta área, minimizando gastos e aumentando a precisão e segurança quanto ao dimensionamento estrutural.

Neste sentido, tendo em vista o ferramental teórico-experimental de projeto atualmente disponível, novas formas podem ser pesquisadas, possibilitando um aumento de repertório quanto à geometria das edificações e seus sistemas estruturais (FIG. 1.1).

Arquitetos e engenheiros começam a investigar, de forma mais contundente, os modelos por vezes denominados não convencionais. Ao se buscarem sistemas estruturais eficientes, seguros e econômicos, a riqueza geométrica de uma superfície pode auxiliar

no seu desempenho estrutural. Formas não ortogonais podem, assim, propiciar respostas adequadas a determinadas solicitações de uso, tais como rapidez de montagem, facilidade de transporte, modulação e dimensão dos elementos estruturais compatíveis com a disponibilidade de mercado ou disponibilidade dos mesmos na natureza.

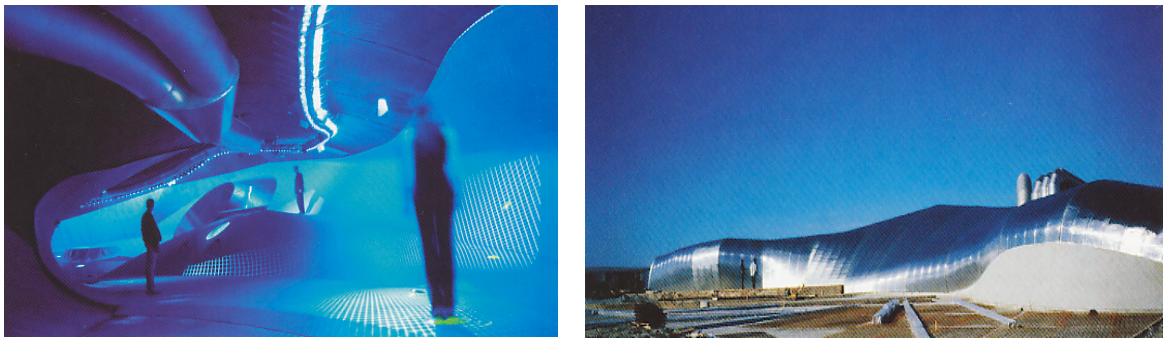


FIGURA 1.1 – Vista interna e externa de um dos Pavilhões da *Waterland*, Holanda (LYALL, 2002).

Até o século XVIII, arcos, cúpulas e abóbodas eram utilizadas para possibilitar que determinada edificação pudesse vencer vãos cujas vigas horizontais não fossem capazes de fazê-los. Pontes como a *Goltzschtalbrücke*, eram construídas utilizando-se dos elementos anteriormente descritos, pois tais formas permitiam facilidade de transporte e montagem, uma vez que eram utilizadas diversas peças de menor dimensão e peso unitário em relação a uma única peça necessária para vencer o mesmo vão.



FIGURA 1.2 – Ponte *Goltzschtalbrücke*, construída entre 1846 e 1851 na região da Saxônia, Alemanha (JANBERG, 2004).

Entretanto, os sistemas estruturais mais utilizados eram, e ainda são, as superfícies físicas essencialmente planas, como as lajes, apoiadas em elementos retos, tais como pilares e vigas. Estes elementos estruturais são os mais utilizados por se adequarem ao desenvolvimento dos sistemas e técnicas construtivas existentes no mercado, da padronização e industrialização dos elementos e materiais construtivos e de uma crescente absorção de tal tecnologia na cultura da construção civil.

O desenvolvimento de novos materiais, de tecnologias de fabricação dos elementos estruturais, o maior entendimento dos sistemas estruturais proporcionado pelas análises experimentais conjugadas com análises numéricas computacionais, têm permitido um avanço nas formas, bem como nas conexões dos elementos estruturais, de forma a atender a alguns requisitos econômicos e arquitetônicos, como facilidade de montagem, transporte, baixo custo, qualidade estética, de conforto e funcionalidade dos ambientes, com desempenho mecânico também otimizado.

Diante das observações anteriormente relacionadas, somadas à possibilidade de interdisciplinaridade - entendida também como uma atividade que consiste em se poder utilizar, de forma coerente e consistente, modelos e conceitos explicativos de uma área do conhecimento, para explicar fenômenos e desenvolver objetos em outras áreas - é desenvolvida, neste trabalho, uma estrutura geodésica metálica da categoria *Tensegrity*.

Trata-se de um sistema estrutural proposto pelo escultor Keneth Snelson (FIG. 1.3), aluno de Buckminster Fuller (RIPPER *et al.*, 2004), que consiste em se armar um volume no espaço, segundo uma geometria discreta e definida, utilizando-se uma rede de cabos e elementos rígidos de barra. Neste caso, tem-se como resultado um campo contínuo de tração nos cabos e um campo descontínuo de compressão nas barras, donde se origina o nome *Tensegrity*, cuja tradução mais aproximada seria Tensão Integrada.

Proposto inicialmente para geração de esculturas, as conexões do domo *Tensegrity* foram posteriormente utilizadas como modelo para explicar ligações atômicas em nanoestruturas poliméricas, em forma de troncoicosaedro, FIG. 1.4, denominadas “Buckball, fulereno ou nanobolas”.



FIGURA 1.3 – Escultura intitulada *Easy-K*, montada em 1970 em Arnhem, Holanda (SNELSON, 2005).

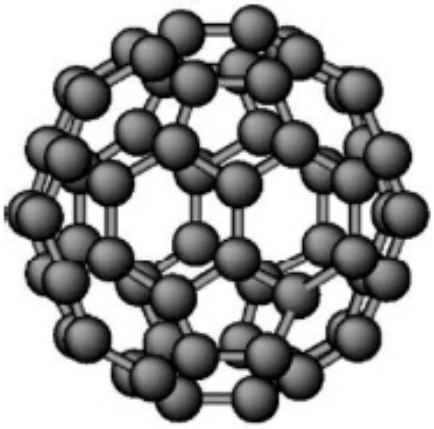


FIGURA 1.4 – Nanoestrutura em forma de troncoicosaedro (FRANCO, 2001).

Recentemente, estas mesmas formas têm sido aplicadas para estruturas de bambu para a construção civil (RIPPER *et al*., 2004). Esse trabalho incluiu todo um desenvolvimento local para aprimoramento das conexões, de forma a atender às propriedades geométricas e constitutivas do bambu, viabilizando, portanto, a Cúpula Geodésica *Tensegrity* de Bambu.

Além disso, são poucos os estudos do comportamento mecânico da Cúpula Geodésica *Tensegrity*, tanto sob carregamentos estáticos como dinâmicos. Deste modo, o levantamento dos dados experimentais é fundamental para que se possam entender e dimensionar adequadamente essas estruturas, possibilitando detalhes construtivos e de montagem da estrutura, facilitando inclusive o desenvolvimento de vedações bem ajustadas.

Desta forma, na presente pesquisa, foram executados ensaios em um modelo processual de uma cúpula geodésica *Tensegrity*, com aplicação de cargas em todas as suas estruturas nodais (nós), aplicação de cargas nos cinco nós do topo do modelo e aplicação de cargas assimétricas, sendo obtidos os parâmetros geométricos da geodésica analisada e realizadas simulações numéricas da mesma.

Além disto, foram realizados testes dinâmicos no modelo (Anexo A) e elaborado um anteprojeto de um protótipo a ser construído para estudos futuros.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Pretende-se neste trabalho desenvolver a Cúpula Geodésica *Tensegrity* metálica e realizar estudos teóricos e experimentais sobre a mesma, apoiando-se em alguns conceitos da teoria dos sistemas aplicados à engenharia estrutural e propor concepções arquitetônicas para o sistema estrutural desenvolvido.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Desenvolver detalhes construtivos para exeqüibilidade da Cúpula Geodésica *Tensegrity* com tubos metálicos e cabos de aço e adaptações construtivas que levem a Cúpula a atender aos requisitos estáticos e geométricos da Engenharia de Estruturas.

- Determinar o comportamento da Cúpula Geodésica *Tensegrity* a partir de modelos processuais.

- Realizar análises numéricas para a determinação de esforços e deslocamentos da estrutura estudada, confrontando-os com os respectivos resultados experimentais.

- Definir os parâmetros geométricos da geodésica *Tensegrity* analisada.

1.3 Justificativas

A Cúpula Geodésica *Tensegrity* metálica aponta para três vantagens em relação às demais estruturas:

- Facilidade de montagem, desde que a partir de uma base geométrica adequadamente definida.

- Ausência de ligações rígidas ou semi-rígidas, que necessitam de elementos (parafusos, rebites ou soldas) ou meios de ligação (chapas, cantoneiras) em grande quantidade ou complexidade, tal como nas estruturas metálicas convencionais.

- Uso de material industrializado nos componentes estruturais.

A facilidade de montagem está diretamente relacionada à ausência de ligações rígidas ou semi-rígidas, uma vez que a inexistência de chapas, cantoneiras, parafusos e soldas nas ligações dispensa o uso de mão-de-obra especializada, equipamentos sofisticados e onerosos no canteiro, além de cuidados quanto à qualidade final das peças e componentes das ligações.

A ausência de ligações rígidas ou semi-rígidas permite que se obtenha estruturas com diferentes níveis de rigidez, a depender da abertura dada no ponto de encontro das barras, denominado por PUGH (1975) como GAP, e do sistema de travamento interno.

O uso de tubos metálicos e cabos de aço permitem uniformidade dimensional e facilidade de obtenção das peças no mercado e leveza estrutural. Estes fatores, característicos dos materiais industrializados, poderão otimizar o uso deste tipo de estrutura para situações que exijam rapidez de montagem, além da facilidade de execução já mencionada.

Aliadas a estas características, o fato de se utilizar de modelos estruturais reduzidos poderá acrescentar não só na pesquisa deste tema especificamente, mas bem como criar as possibilidades de desenvolvimento de outras linhas de pesquisa utilizando o modelo reduzido como parte do processo da pesquisa.

A utilização de modelos reduzidos contribui para o reconhecimento das características e propriedades dos componentes do objeto, o que poderá abrir caminho para diversas outras pesquisas similares e que possam utilizar materiais diversos, aproveitando a metodologia adotada e acrescentando novas opções de modelos estruturais.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Generalidades

Segundo REBELLO (2001, p. 199) "... de todas as coisas que existem ao nosso redor, a natureza é, sem dúvida nenhuma, a mais agradável de estudar. Ademais, a natureza é também um bom exemplo de como os problemas estruturais podem ser resolvidos, visando à estética, à economia e à funcionalidade".

A natureza como fonte de informação para a busca de novas formas geométricas ou soluções estruturais pode dar respostas quanto à organização e à proporção dos elementos que constituem sua estrutura.

Até mesmo a observação de uma flor (FIG. 2.1) poderá propiciar o surgimento do conceito de unidade e ordem comum. Esta ordem pode ser percebida seja através da repetição encontrada nas relações de diversas proporções, seja na dinâmica do

crescimento, tanto das coisas naturais como das construídas pelo homem (DOCZI, 1990).

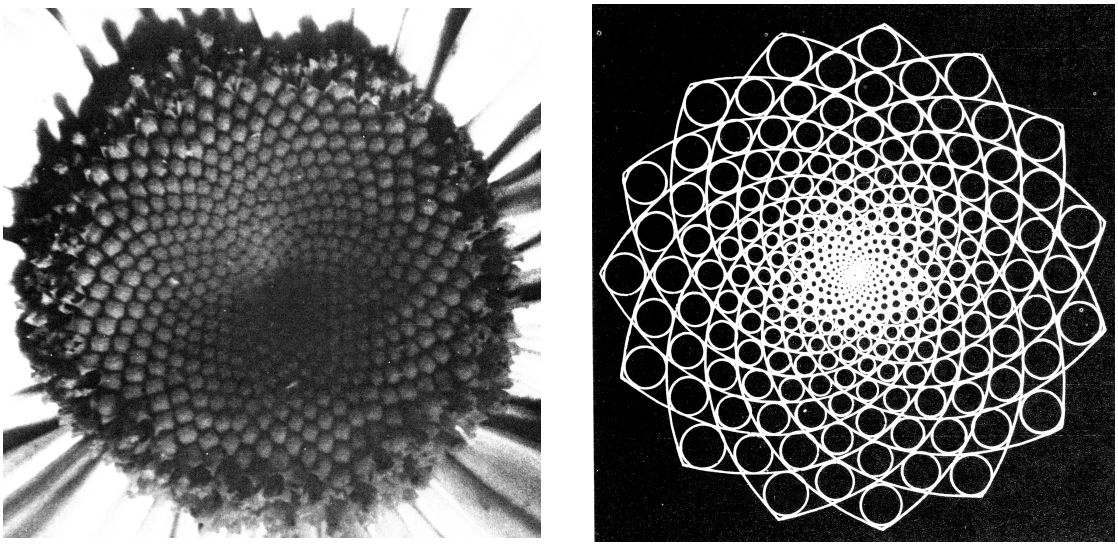


FIGURA 2.1 – O centro de uma margarida e seu padrão geométrico (DOCZI, 1990).

DOCZI (1990) afirma que a proporção e a padronização ocorridas nos fenômenos naturais são inerentes e se manifestam nas obras mais harmoniosas e perenes desenvolvidas pelo homem.

O conceito de proporção pode ser verificado na FIG. 2.2, que mostra o desenvolvimento de uma espiral. À medida que esta espiral se abre a partir de seu centro, a ordem de crescimento aumenta na mesma proporção. Pode-se expressar a relação entre as dimensões A e B constantes na figura como A/B = B/(A + B), ou seja, a equação da seção áurea. É uma relação de reciprocidade entre duas partes desiguais de um todo, onde "a parte menor está para a maior assim como a parte maior está para o todo" (DOCZI, 1990, p. 2). Esta proporção possui esta denominação por sua singularidade, uma vez que, em qualquer linha existente, somente um ponto a dividirá em duas partes desiguais de acordo com a equação descrita anteriormente.

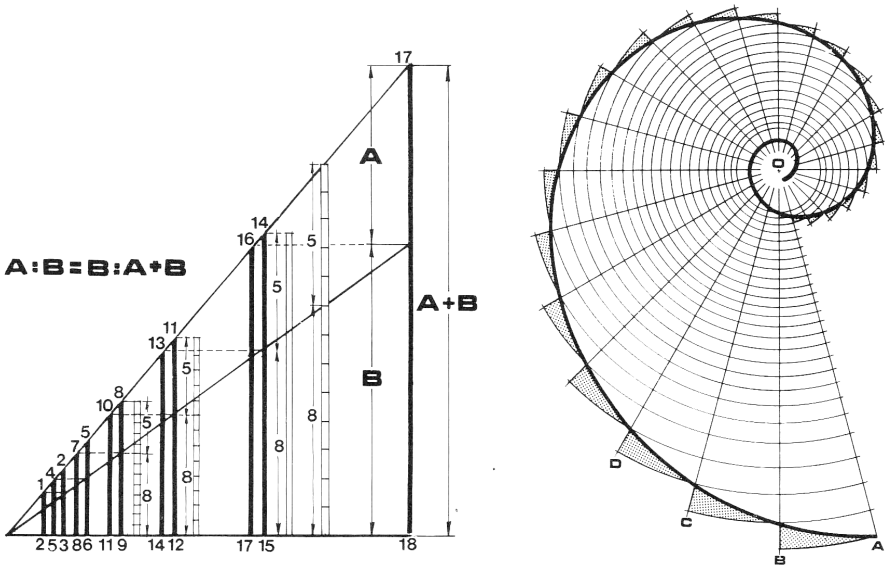


FIGURA 2.2 – O centro de uma margarida e seu padrão geométrico (DOCZI, 1990).

Entretanto, a proporção áurea é também assim denominada por propiciar harmonia e sensação agradável. Experiências conduzidas pelo professor Fechner em 1876 demonstraram que mais de 75% de uma amostragem de pessoas selecionadas ao acaso preferem o retângulo de proporções da seção áurea (FIG. 2.3) em relação a qualquer outro tipo (DOCZI, 1990), o que demonstra a total inter-relação entre a proporção mais encontrada na natureza e o conceito intuitivo e inerente ao ser humano.

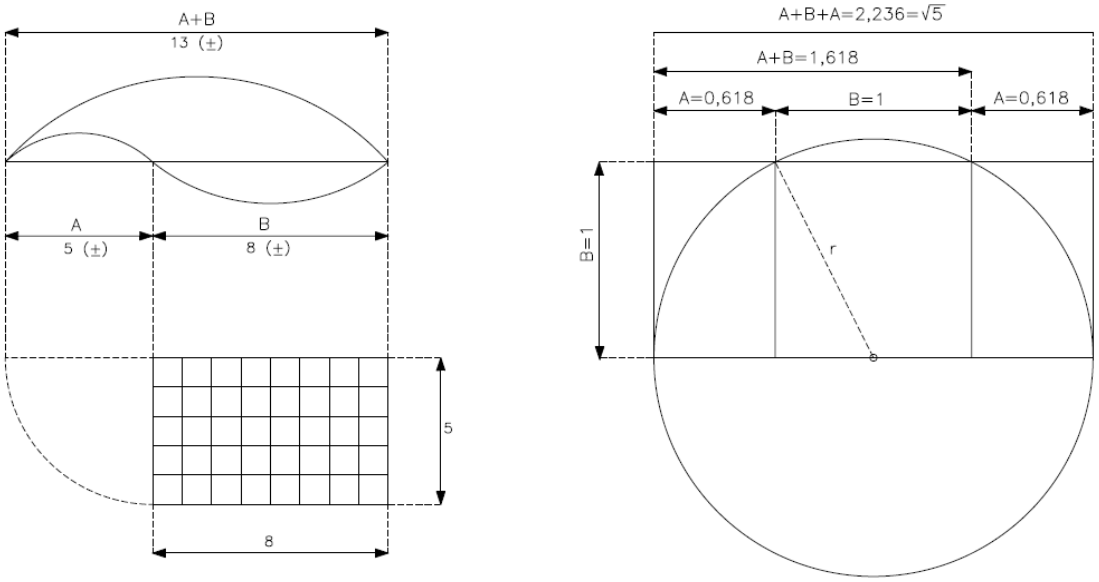


FIGURA 2.3 – Retângulo de proporções áureas (DOCZI, 1990).

Sinergia significa comportamento integral, ou seja, do sistema como um todo, que não pode ser previsto pelo comportamento de suas partes tomadas separadamente (FULLER, 1985).

O conceito de sinergia pode servir como base para o desenvolvimento de um sistema estrutural que poderá ser utilizado para eventos, shows e mostras, cujas dimensões muitas vezes podem ir alem da proporção humana, uma vez que tais estruturas poderão reunir centenas de pessoas.

Aparentemente discordante, um espaço que poderá chegar à escala urbana deverá seguir o conceito de proporção humana, uma vez que o mesmo deverá atender, de forma harmônica, a grupos de pessoas.

2.2 As Estruturas da natureza

Segundo GAUDI (2002), "tot surt del gran libre de la naturalesa". Ou seja, para o catalão, o arquiteto deve eleger a natureza como ponto de partida para o desenvolvimento e criação de suas obras, sendo ainda uma fonte de informação quanto à estabilidade e exeqüibilidade estrutural.

O arquiteto catalão tinha uma forma muito peculiar, mas eficiente e acertiva, de criação e desenvolvimento do sistema estrutural de seus projetos. Ele criava maquetes de redução onde, ao pendurar pequenos pesos a cordas fixas em dois ou mais apoios, criavam catenárias ou funiculares que se moldavam à tendência natural de um peso sob a ação da gravidade. Uma vez terminada a maquete, Gaudi espelhava tal sistema e obtinha a resposta quanto à estrutura mais eficaz e econômica para a construção de cúpulas, abóbadas ou outras formas inovadoras e de plasticidade única e arrojada até mesmo para os dias atuais.

REBELLO (2001, p.199) afirma que "... uma das formas mais eficientes de aprendizado é através da observação do que existe", ou seja, desenvolver soluções para problemas estruturais através da observação de soluções já existentes na natureza apresenta uma maneira eficaz de desenvolvimento de sistemas estruturais que visam não só a economia, mas bem como a funcionalidade e estética, fatores primordiais ao conforto ambiental humano.

Ainda segundo REBELLO (2001), alguns exemplos podem ser enumerados:

- Com base no comportamento do besouro, desenvolveu-se um olho artificial de duas faces capaz de medir a velocidade de aviões, uma vez que o aparelho calcula a velocidade de traços luminosos em movimento;

- Uma bússola celeste de luz polarizada, capaz de determinar a posição do sol independente do tempo, foi construída a partir da constatação de que as abelhas podem se orientar pelo sol, mesmo em dias nublados;

- Mesmo voando desordenadamente, as moscas conseguem manter seu equilíbrio. Graças a esta observação, pesquisas propiciaram o desenvolvimento de um giroscópio, utilizado para a manutenção da rota de mísseis, do tamanho aproximado de uma pilha;

- Materiais elásticos próprios para revestimento de submarinos foram desenvolvidos com base no estudo da pele dos golfinhos;

- Também com base no estudo da pele de outro animal, o tubarão, foi desenvolvido um tecido utilizado por nadadores para a redução do atrito da pele com a água;

- Um aparelho capaz de acentuar automaticamente os contrastes em televisões e radares teve como modelo o caracol.

Algumas estruturas da natureza possuem soluções tão avançadas sob o ponto de vista tecnológico que, mesmo diante de tanto desenvolvimento de novos materiais, tentar atender a todas as especificações de uso ainda é inviável ou até mesmo impossível. É o caso do ovo, cujos princípios de funcionamento e exigências de uso são extremos ou, em alguns casos, conflitantes. São eles:

- Conter nutrientes necessários para a manutenção da vida e ser hermeticamente fechada;

- Ser envolto por membrana elástica e ter resistência suficiente para resistir ao peso do material armazenado;

- Possuir resistência a rolamentos suaves sem perder a capacidade de utilização;

- Ser impermeável à água, mas permitir difusão de gases por meio de poros, possibilitando a entrada de oxigênio e saída de gás carbônico;
- Não ser excessivamente resistente para permitir sua ruptura quando findada a vida útil da estrutura, mas possuir resistência externa que possibilite resistir a cargas altas de compressão;
- Ser elástico a ponto de não romper no ato da postura do ovo e enrijecimento rápido posterior (VASCONCELOS, 2000).

2.3 Conceitos de mímesis e analogia

Este método de trabalho, ou seja, a observação de um determinado sistema da natureza e sua posterior tradução em um sistema desenvolvido pelo homem, pode ser melhor explicado através de um conceito há muito difundido: a mímesis.

Este conceito, muitas vezes traduzido como imitação, possui um significado muito mais abrangente ao se analisar a forma como era encarado na Grécia Antiga (SILVA, 2005).

Na Grécia Antiga, não havia o conceito de arte tal qual é empregado atualmente. O vocábulo arte, derivado do latim *ars*, *artis*, encontra correspondência com a palavra grega *téchne*, que significa meio de fazer ou produzir, ou ainda, uma capacidade de produzir que envolve o reto raciocínio (ARISTÓTELES: Ética 11396/15-18), que é o conceito atual de técnica. Ou seja, o conceito de arte tal como é utilizado atualmente possuía uma conotação diferenciada, mais voltada a um conceito aproximado de técnica, ou manufatura, englobando ainda o conceito atual dos termos profissão, ofício e artesanato (DURANT, 1996).

Assim, os artífices da Grécia Antiga estavam no mesmo nível que os agricultores, por exemplo, pois a arte era considerada um trabalho manual. Dentro deste contexto, a função da arte era criar imagens o mais próximas possível da realidade, não apenas imitando-a, mas num sentido mais amplo de representação (SILVA, 2005).

O ato de produzir, ou processo, pode ser entendido como técnica (*téchne*), mas a sua atividade criadora corresponde à *poiesis*. Aristóteles adota para a arte este conceito,

entendendo que sua essência comum estava na imitação (*mimese*) da realidade da natureza, não intencionando apenas a representação externa das coisas, mas o seu significado (DURANT, 1996).

Aristóteles acreditava, através do raciocínio lógico, que o intelecto humano teria a capacidade de separar de um objeto concreto o que ele possui de singular, isolando mentalmente seu aspecto formal.

Para Platão, antecessor e mestre de Aristóteles, a genuína beleza imitaria a verdade; distinguia entre a natureza as artes imitativas (música, drama, pintura, escultura) e as artes não representativas (arquitetura, bordado, cerâmica), enquadrando a narrativa como uma arte intermediária.

A técnica e a mímesis podem ser entendidas como conceitos que, por vezes, se inter-relacionam. Enquanto a técnica pode ser o conjunto de meios dos quais um artista se utiliza, a mimesis pode denotar a urgência do conhecimento da realidade, que pode chegar ao mais alto grau de abstração (DURANT, 1996).

Foi somente na Renascença que se deu a união teórica do belo com a arte, isto graças ao uso do conceito de natureza, que passa a ter um significado mais preciso, sendo um conjunto de fenômenos sujeitos a leis, contendo formas perfeitas, cunhando assim o termo beleza natural.

Desta forma, a arte passa a condição de trabalho intelectual, assumindo lugar de maior destaque que à época da Grécia Antiga. É neste contexto que a mímesis passa a ter uma conotação de reprodução exata e fiel, mantendo estreita relação com a ciência empírica, ou seja, a arte imita a natureza baseada em descobertas científicas.

Assim, são incorporadas às artes a perspectiva, a teoria matemática das proporções (que possibilita a ilusão da terceira dimensão no plano), a astronomia, a botânica, a filosofia e a anatomia (SILVA, 2005).

Entretanto, os princípios surgidos na Renascença e, em particular, o conceito de mímesis como imitação fiel da natureza, foram reduzidos a um sistema, dando origem ao academicismo, ou seja, o classicismo ensinado nas academias de arte, estabelecendo

regras para o fazer artístico, tolhendo a criatividade e a individualidade artística (SILVA, 2005).

Foi somente na segunda metade do Século XIX que houve a ruptura do academicismo por meio dos impressionistas, que passaram a priorizar as variações de luz e não aos objetos a serem representados (SILVA, 2005).

A forma como a mímesis é encarada pelos antigos gregos, onde o padrão retrata a pessoa ideal, e não a real, propiciou o surgimento das teorias de proporção do corpo humano. Entretanto, o conceito de mímesis da Renascença estabelece a proporção do corpo humano de forma científica e, com a ruptura dos padrões estabelecidos pelo academicismo, o estudo da proporção humana passa a ter uma conotação diferente, como mostra a FIG. 2.4, que compara o Homem Vitruviano de Leonardo da Vinci e o Modulor de Le Corbusier.

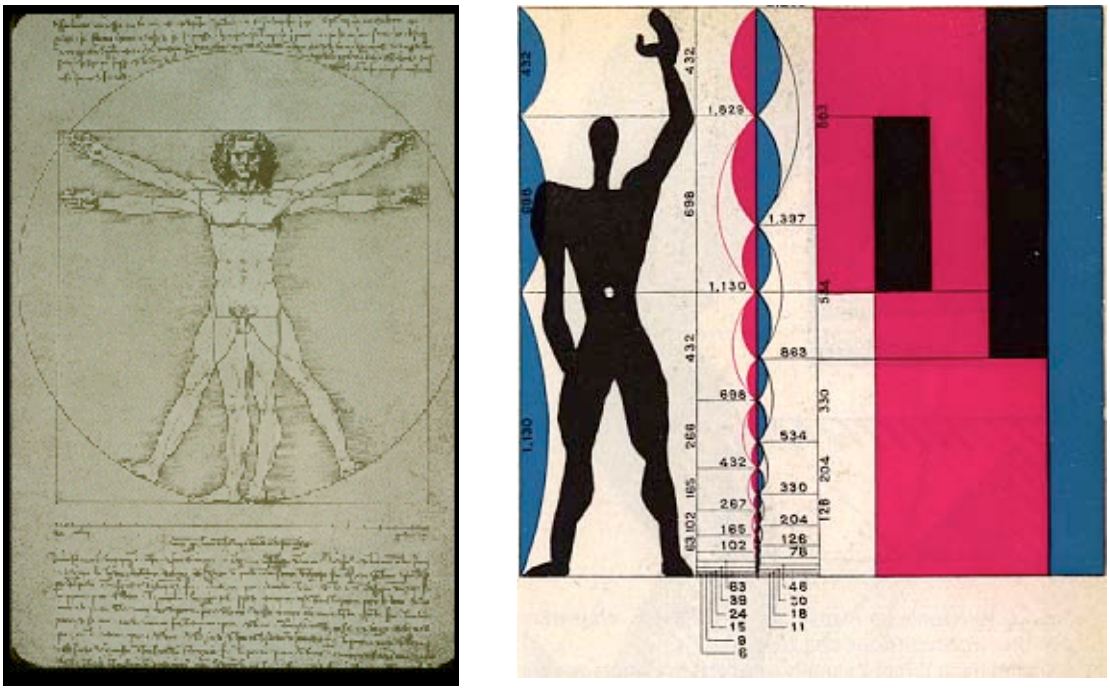


FIGURA 2.4 – Comparação do Homem Vitruviano de Leonardo da Vinci e o Modulor de Le Corbusier (RAPOSO, DUARTE e ROSÁRIO, 2000?).

Foi também com Aristóteles que a noção de analogia adquiriu papel filosófico primordial como conceito chave para a formulação da idéia metafísica de ser.

A analogia, que possui o significado matemático de semelhança entre relações (por exemplo, a/b = c/d), pode também ser entendida como a correlação entre termos de dois ou mais sistemas; uma semelhança entre realidades distintas.

O conceito de analogia passa então, a partir de Aristóteles e, em particular, na filosofia escolástica (filosofia dominante na Europa entre os Séculos X e XVI), a ser tema de profundas investigações através da lógica. Foram estabelecidos, assim, dois tipos de analogia: a analogia de atribuição e analogia metafórica.

A primeira refere-se a um conceito que transfere seu sentido único e preciso a outros (pessoa sadia, ambiente sadio), enquanto que, na segunda, um conceito empresta seu sentido também único a outros de forma simbólica (gorila – animal, gorila - pessoa truculenta).

A análise das estruturas da natureza utiliza a analogia e a mímesis como forma de proporcionar o entendimento de suas várias correlações.

A proporção áurea nada mais é que uma forma de analogia entre as proporções encontradas na natureza e as proporções matemáticas, baseada no conceito de mímesis da Renascença, onde a natureza encontra lastro científico através da matemática.

Entretanto, o objetivo da mímesis da Antiga Grécia não era simplesmente imitar uma determinada forma da natureza, mas sim entender sua essência, que neste caso pode ser traduzido como entender seu comportamento estrutural, suas características físicas, mecânicas etc.

Mesmo FULLER (1985), ao propor a Análise dos Sistemas Gerais, utiliza o conceito de analogia de atribuições ampliando, contudo, a área de abrangência (o mais amplo possível) e a forma como deve ser feita (através do conceito de cibernética, eliminando uma de cada duas opções de forma sucessiva), para que o resultado possa ser o mais eficaz e permanente.

Assim, este trabalho, em determinada fase, utiliza o conceito de mímesis, pois a característica *Tensegrity* da cúpula geodésica aqui proposta é fruto da observação

humana de sistemas que trabalham à tração e compressão, ou seja, analogia do comportamento estrutural.

Interessante notar que o próprio conceito de *Tensegrity* auxiliou no entendimento, por analogia, de ligações moleculares dos materiais poliméricos, onde as ligações moleculares não são rígidas, como no caso do *Tensegrity*, cujo modelo, ao ser aplicado às moléculas, pôde explicar o seu funcionamento.

2.4 A Geodésica

A primeira geodésica que se tem notícia foi projetada pelo cientista alemão e chefe de design da indústria ótica Zeiss, Walter Bauersfeld (FIG. 2.5, 2.6 e 2.7) em 1922, na cidade de Jena, Alemanha. Este domo foi construído para ser um planetário e sua estrutura em aço foi a armação da casca composta por ferro-cimento (LOTUFO e LOPES, 1981).

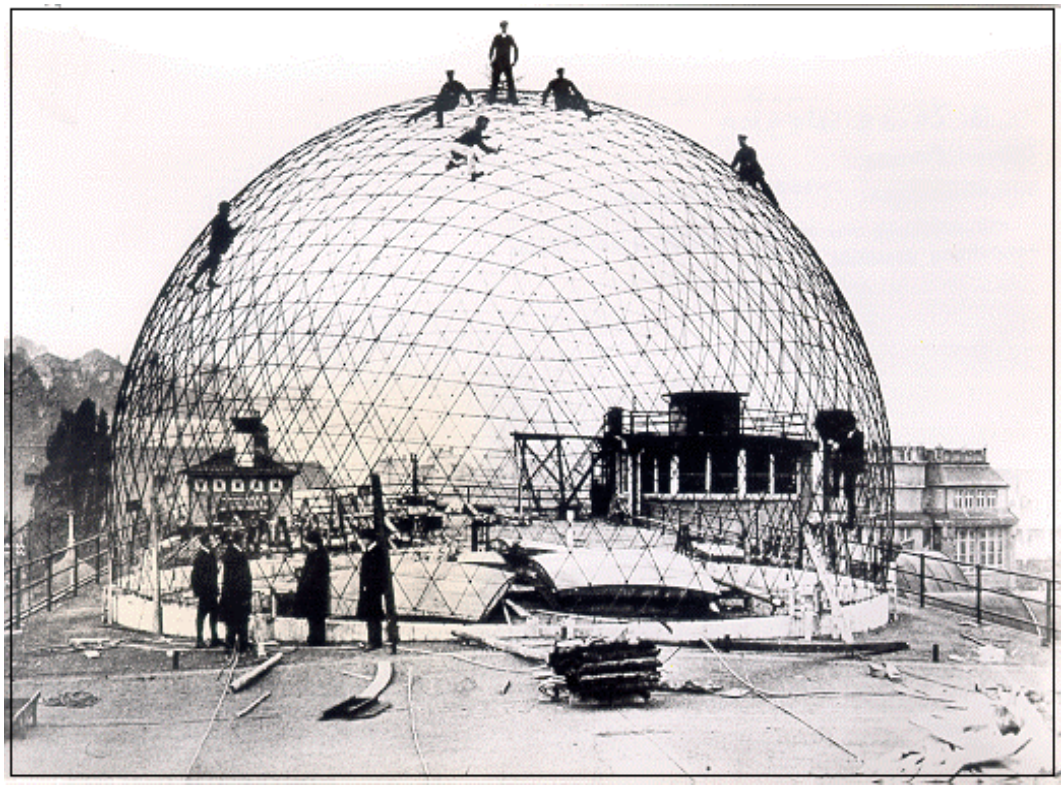


FIGURA 2.5 – Construção do domo por Walter Bauersfeld (ROTHMAN, 1989).

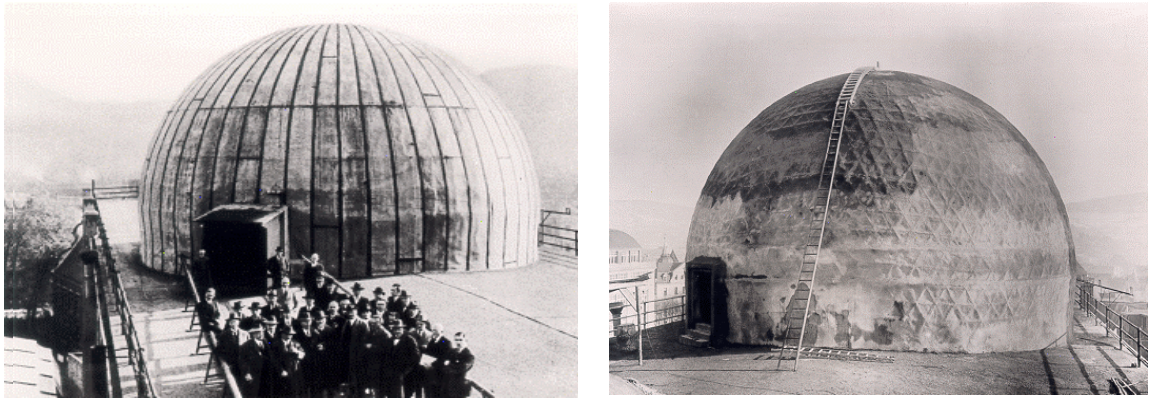
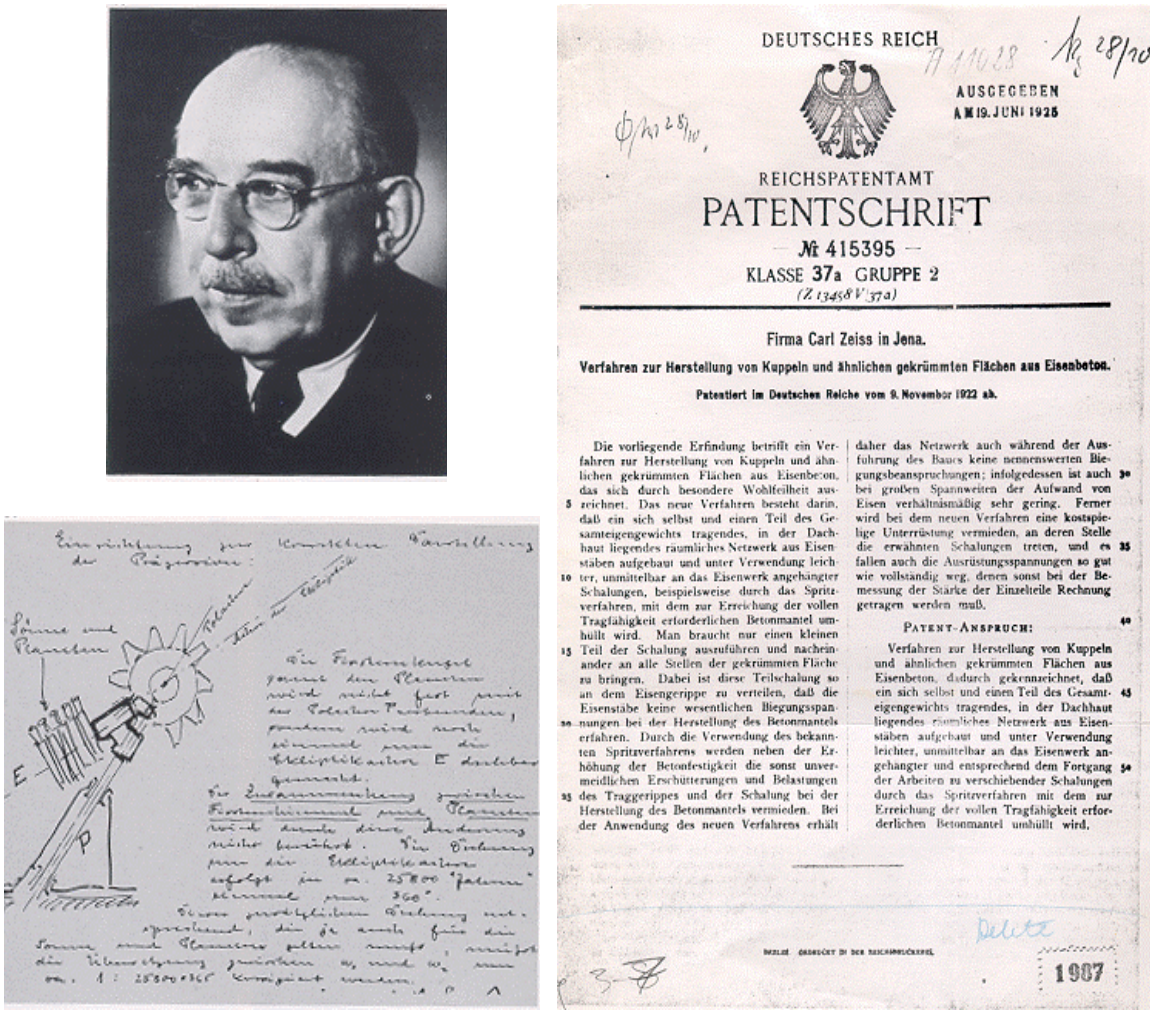


FIGURA 2.6 – Domo de Walter Bauersfeld concluído (ROTHMAN, 1989).



DEUTSCHES REICH

AUSGEGEBEN AM 19. JUNI 1926

REICHSPATENTAMT

PATENTSCHRIFT

— № 415395 —

KLASSE 37a GRUPPE 2

Firma Carl Zeiss in Jena.

Verfahren zur Herstellung von Kuppeln und ähnlichen gekrümmten Flächen aus Eisenbeton.

Patentiert im Deutschen Reiche vom 9. November 1922 ab.

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von Kuppeln und ähnlichen gekrümmten Flächen aus Eisenbeton, das sich durch besondere Wohlfeilheit auszeichnet. Das neue Verfahren besteht darin, daß ein sich selbst und einen Teil des Gesamteigengewichts tragendes, in der Dachhaut liegendes räumliches Netzwerk aus Eisenstäben aufgebaut und unter Verwendung leichter, unmittelbar an das Eisenwerk angehängter Schalungen, beispielsweise durch das Spritzverfahren, mit dem zur Erreichung der vollen Tragfähigkeit erforderlichen Betonmantel umhüllt wird. Man braucht nur einen kleinen Teil der Schalung auszuführen und nacheinander an alle Stellen der gekrümmten Fläche zu bringen. Dabei ist diese Teilschalung so an dem Eisengerippe zu verteilen, daß die Eisenstäbe keine wesentlichen Biegungsspannungen bei der Herstellung des Betonmantels erfahren. Durch die Verwendung des bekannten Spritzverfahrens werden neben der Erhöhung der Betonfestigkeit die sonst unvermeidlichen Erschütterungen und Belastungen des Traggerippes und der Schalung bei der Herstellung des Betonmantels vermieden. Bei der Anwendung des neuen Verfahrens erhält daher das Netzwerk auch während der Ausführung des Baues keine nennenswerten Biegungsbeanspruchungen; infolgedessen ist auch bei großen Spannweiten der Aufwand von Eisen verhältnismäßig sehr gering. Ferner wird bei dem neuen Verfahren eine kostspielige Unterrüstung vermieden, an deren Stelle die erwähnten Schalungen treten, und es fallen auch die Ausrüstungsspannungen so gut wie vollständig weg, denen sonst bei der Bemessung der Stärke der Einzelteile Rechnung getragen werden muß.

PATENT-ANSPRUCH:

Verfahren zur Herstellung von Kuppeln und ähnlichen gekrümmten Flächen aus Eisenbeton, dadurch gekennzeichnet, daß ein sich selbst und einen Teil des Gesamteigengewichts tragendes, in der Dachhaut liegendes räumliches Netzwerk aus Eisenstäben aufgebaut und unter Verwendung leichter, unmittelbar an das Eisenwerk angehängter und entsprechend dem Fortgang der Arbeiten zu verschiebender Schalungen durch das Spritzverfahren mit dem zur Erreichung der vollen Tragfähigkeit erforderlichen Betonmantel umhüllt wird.

1927

FIGURA 2.7 – Foto, anotações e Patente do domo de Walter Bauersfeld (ROTHMAN, 1989).

Contudo, ao se analisar a história das primeiras construções constituídas por um sistema estrutural espacial, seria relevante citar o *"Halle au Blé"*, ou Mercado de Trigo (PORTO, 2007). Já na esteira de construções de ferro fundido (como a ponte em Coalbrookdale, projetada por Pritchard e Darby e construída sobre o Rio Severn, na Inglaterra, em 1779), o Mercado do Trigo, projetado e construído por Bélanger e Brunet entre 1806 e 1811, em Paris (FIG. 2.8), é um domo esférico com dimensões já bastante significativas, constituído por elementos estruturais esbeltos de ferro fundido e apoiado sobre uma construção tradicional.

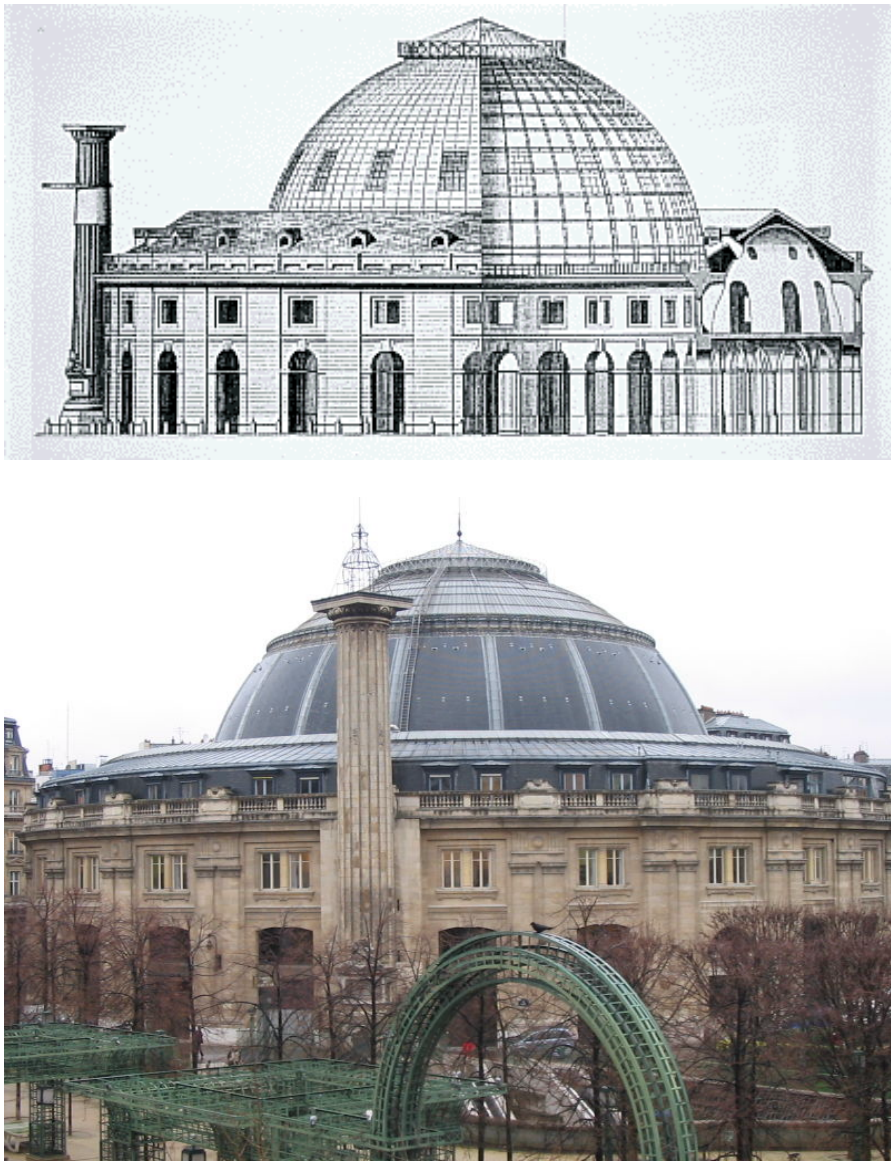


FIGURA 2.8 – Vista lateral e foto do *"Halle au Blé"*, atual Bourse de Commerce de Paris et la colonne Médicis (WIKIPÉDIA, 2007).

Na Inglaterra, os primeiros domos foram construídos em meados de 1820, apresentando, contudo, problemas de estabilidade, isto porque houve a simples substituição da madeira pelo ferro fundido, sem levar em consideração as características mecânicas do mesmo (PORTO, 2007).

Em 1934, Robert Le Ricolais publica, na França, um estudo sobre a partição geodésica da esfera.

Na Alemanha, estruturas espaciais, em geral, eram utilizadas desde 1942. O primeiro sistema espacial do mundo, denominado Mero, foi desenvolvido nesta época, por Max Mengeringhausen, sendo sua fabricação industrial (PORTO, 2007).

Entretanto, este tipo de estrutura teve seu uso consolidado graças a Buckminster Fuller, cientista, matemático, filósofo e inventor americano que formulou matematicamente o problema para discretização da geodésica com diferentes freqüências de barras.

Suas pesquisas datam de 1917, quando começa a estudar a repartição geodésica da esfera. Em 1944, Fuller desenvolveu um sistema baseado em poliedros que denominou *Synergetic Energetic Geometry*, construindo assim cúpulas geodésicas de grandes vãos com peso reduzido (PORTO, 2007).

Entre as inúmeras cúpulas construídas por Fuller, destacam-se o domo de alumínio das Usinas Ford, em Dearborn (1953), com 27,4 m de diâmetro, o pavilhão do Departamento do Comércio dos Estados Unidos na Feira Comercial de Kabul (1956), duas cúpulas para a Union Tank Car Company, uma em Baton Rouge, Luisiana, FIG. 2.9 (1958), e outra em Wood River (1958-59), Illinois, ambos com 117 m de diâmetro e o Climatron, em Saint-Louis (1960), Mississipi, com 53 m de diâmetro (PORTO, 2007).

É dele também o projeto do macro domo norte-americano (FIG. 2.10). Esta estrutura, que teve a função de pavilhão na Exposição Internacional de Montreal, ocorrida em 1967, tem como dimensões 76 metros de diâmetro, altura máxima de 61 metros e superfície média de 14.000 metros quadrados. Foi construída com 24.000 barras, totalizando 600 toneladas de tubos, ou seja, o equivalente a 40 kg/m^2 (LOTUFO e LOPES, 1981).



FIGURA 2.9 – Cúpula geodésica em Baton Rouge, Luisiana (PORTO, 2007).

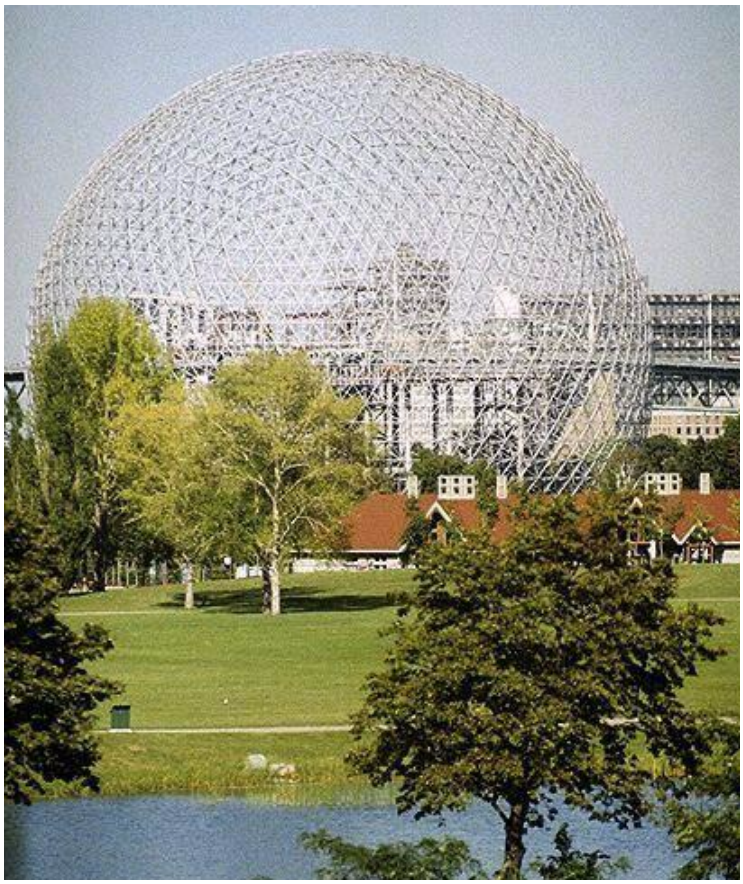


FIGURA 2.10 – Domo para a Exposição Internacional de Montreal, 1967 (GREATBUILDINGS, 1994-2004).

2.5 Estruturas *Tensegrity*

O conceito mais utilizado para definir uma estrutura *Tensegrity*, cuja melhor tradução seria Tensão Integral, consiste em um volume no espaço construído a partir de um campo contínuo de tração dos cabos e um campo descontínuo de compressão das barras, segundo uma geometria discreta e definida.

Tanto a tração como a flexo-compressão trabalham co-relacionadas, ou seja, os cabos não estão trabalhando à tração se as barras não estiverem sendo solicitadas à flexo-compressão, e vice e versa.

Citando PUGH (1976, p. 3), um sistema *Tensegrity* é estabelecido quando um conjunto de componentes comprimidos descontínuos interage com um conjunto de componentes tracionados contínuos para definir um volume estável no espaço (tradução livre).

PUGH (1976) ainda salienta que não foram utilizadas, nesta conceituação, palavras como estrutura, barras e tendões, isto porque o conceito *Tensegrity* não é aplicado necessariamente apenas no campo das estruturas (como será mostrado no item 2.5.1). Contudo, o importante nesta definição é que os componentes comprimidos sejam descontínuos e, os tracionados, contínuos. Caso isto não ocorra, o sistema perderá sua integridade tensional.

Três autores são considerados os inventores do *Tensegrity*: Richard Buckminster Fuller, David Georges Emmerich e Kenneth D. Snelson (JÁUREGUI, 2004). A ordem dos nomes aqui mencionados está em função das datas das concessões das patentes referidas às estruturas *Tensegrity*, sendo 1962, 1964 e 1965 respectivamente (JÁUREGUI, 2004).

Diante de diversas controvérsias quanto ao verdadeiro inventor do referido sistema, talvez a versão mais aceita seja que este sistema estrutural foi proposto inicialmente pelo escultor Kenneth Snelson, quando ainda era estudante na *Black Mountain College*. Na mesma época (verão de 1948), Buckminster Fuller tornou-se o novo professor da referida instituição e, durante uma de suas palestras, Snelson, influenciado pelos modelos geométricos de Fuller, decidiu iniciar seus estudos sobre modelos tridimensionais (JÁUREGUI, 2004).

Quanto à participação de David Georges Emmerich, o mesmo relata que o primeiro sistema, denominado por ele como *proto-tensegrity* (MOTRO, 2003), foi criado pelo artista construtivista russo Karl Ioganson, em 1920 (FIG. 2.11).

A descrição da estrutura criada por Emmerich é muito similar à escultura criada por Ioganson, diferindo apenas pelo número de cabos (o *proto-tensegrity* possui mais cabos sem tensão para permitir a alteração inicial do sistema, mantendo, mesmo assim, seu equilíbrio) e pela inexistência de tensão inicial, característica básica das estruturas *Tensegrity*. Foi esta última diferença que não possibilitou que a escultura de Ioganson pudesse ser caracterizada como a primeira estrutura *Tensegrity* (JÁUREGUI, 2004).

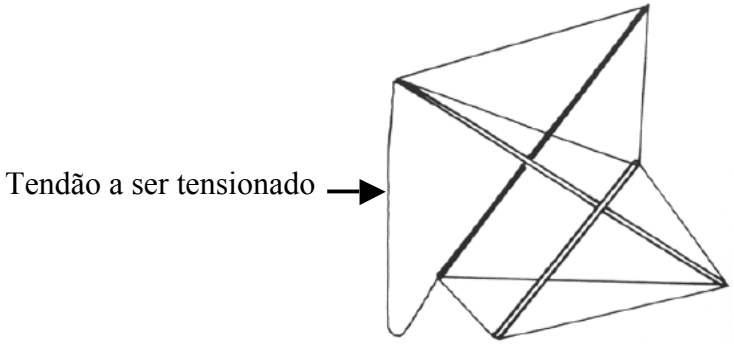


FIGURA 2.11 – *Proto-tensegrity* de Karl Ioganson (GENGNAGEL, 2002).

Entretanto, foi Fuller quem criou a palavra *Tensegrity* através da contração de duas outras: *tension* e *integrity* ou *"tensional integrity"* (PUGH, 1976). Apesar do próprio Snelson preferir o termo *"Floating Compression"* (SNELSON, 2005), a palavra cunhada e difundida por Fuller passou a ser aceita para definir o conceito de um sistema de interação entre um campo descontínuo de barras, que trabalham à flexo-compressão, e um campo contínuo de cabos, que trabalham à tração, criando assim um volume estável no espaço, conforme uma geometria discreta e definida.

O grande diferencial desta estrutura é a substituição dos nós, que são, supostamente, vínculos articulados fixos, por vértices formados pelo conjunto de três ou mais vínculos articulados (FIG. 2.46).

A flexibilidade formal deste tipo de vértice permite que diferentes propriedades estruturais sejam estudadas em função dos diversos posicionamentos das barras, a partir do deslizamento destas nos cabos.

2.5.1 Aplicação do *Tensegrity* em outras áreas

Apesar deste trabalho ser referente ao uso do conceito *Tensegrity* para um sistema estrutural, o mesmo surgiu dentro do mundo das artes. Entretanto, seu uso (ou seu conceito básico de inter-relação entre elementos tracionados e comprimidos) transcende a estes dois usos mais citados neste trabalho, e vão desde a física do micro e do macro-cosmo à engenharia aeroespacial.

Entretanto, não faz parte do escopo desta pesquisa uma revisão bibliográfica quanto ao uso do *Tensegrity* em outras áreas, o que demandaria uma descrição prolongada e que não acrescentaria dados significativos a este trabalho em particular.

Assim, segue uma breve descrição dos diversos campos de pesquisa e utilização do *Tensegrity* a título de ilustração e de informação do quão abrangente e interdisciplinar é este tema.

2.5.1.1 Micro e macro-cosmo

O conceito de um campo contínuo de tração e um campo descontínuo de compressão pode ser associado à repulsão e atração e assim, associar aos campos gravitacionais e comportamento dos átomos, e esta correlação foi sempre mencionada por SNELSON (2005).

Fuller também sempre se referia ao *Tensegrity* como um princípio universal (JÁUREGUI, 2004) e desde o início de seus estudos de repartição das geodésicas, relacionava os dados obtidos com combinações de átomos.

Ele demonstrou que para circunscrever esferas idênticas a uma determinada esfera, uma ao lado da outra, são necessárias doze esferas. Caso se crie uma segunda camada, seriam necessárias quarenta e duas esferas e, para uma terceira camada, noventa e duas. A soma das esferas destas três camadas é cento e quarenta e seis, ou seja, a mesma quantidade de nêutrons do urânio (PORTO, 2007).

2.5.1.2 Nanotecnologia

Como mencionado no item 1.2, o conceito *Tensegrity* foi utilizado como modelo para explicar ligações atômicas em nanoestruturas poliméricas, em forma de troncoicosaedro. Estas estruturas estão melhorando as características de condutividade de determinado tipo de polímero e permitiu que, em 1985, o pesquisador britânico Harold Kroto e os americanos Robert Curl Jr. e Richard Smalley desenvolvessem estruturas para materiais sólidos superduros (MEDEIROS, 2004).

A denominação desta estrutura (buckyball, fulereno ou nanobolas) depende de seu uso e é uma homenagem a Buckminster Fuller (FRANCO, 2001).

2.5.1.3 Biomecânica

Tanto no nível de escala microscópica quanto macroscópica do corpo humano, pode se encontrar exemplos do princípio que estabiliza as estruturas *Tensegrity* (INGBER, 1998). Segundo ele, o equilíbrio entre o esqueleto (submetido a forças de compressão) e os músculos, tendões e ligamentos (submetidos a forças de tração) garantem a forma do corpo. Por outro lado, as proteínas e outras moléculas também se estabilizam pelo mesmo princípio (DEIFELD, 2005).

Outras suposições que relacionam comportamentos de células ao princípio *Tensegrity* também são apresentadas por INGBER (1993), *apud* DEIFELD (2005), onde este mesmo princípio é aplicado ao modelo mecânico que trata do citoesqueleto (uma rede complexa de filamentos de proteínas que se estendem por todo o citoplasma e capacitam as células eucarióticas a adotarem formas variadas e executarem movimentos coordenados e direcionados, sendo uma estrutura altamente dinâmica e auto-ordenável de acordo com divisões e alterações da forma das células - DEIFELD, 2005).

INGBER (1997) completa esta suposição afirmando que o mesmo modelo pode servir de base para se explicar como células convertem sinais mecânicos em uma resposta química.

2.5.1.4 Anatomia

Como mencionado anteriormente, foi utilizado o conceito *Tensegrity* para explicar o equilíbrio entre a estrutura óssea e os músculos e tendões dos animais e do ser humano. LEVIN (1982), *apud* JÁUREGUI (2004), afirma o corpo é uma estrutura *Tensegrity*, e é esta característica que permite poupar as partes vulneráveis de esforços intensos (choques, por exemplo), redistribuindo estes esforços para todo o corpo, entendendo este como uma malha estrutural.

2.5.1.5 Robótica

O uso do conceito de estruturas *Tensegrity* permitiu o desenvolvimento de uma nova tecnologia em relação aos projetos tradicionais de robôs. ALDRICH, SKELTON e KREUTZ-DELGADO (2003), *apud* DEIFELD (2005), apresentaram o primeiro trabalho a propor a utilização deste conceito na robótica, que serviu de base para outro estudo, onde PAUL, LIPSON e VALERO CUEVAS (2005), *apud* DEIFELD (2005), desenvolveram pernas para robôs formadas por módulos *Tensegrity*.

Estes afirmam que ao utilizar o conceito *Tensegrity* para locomoção de robôs se assemelha à arquitetura estrutural de sistemas biológicos que possuem esta habilidade. Esta semelhança pode permitir tolerância à falhas, isto porque organismos biológicos se adaptam a situações onde falhas, tais como problemas com membros responsáveis pela locomoção, não impendem que o mesmo continue andando.

Ou seja, a utilização do conceito de um campo contínuo de tração interconectado por um campo descontínuo de compressão, em substituição ao conceito vigente de locomoção robótica, caracterizado pelo conjunto de barras rígidas conectadas por peças articuladoras, representa uma otimização da mobilidade do robô, capacitando o mesmo a dar respostas positivas em situações de falha.

A FIG. 2.12 apresenta algumas formas de utilização de *Tensegrity* em robôs.

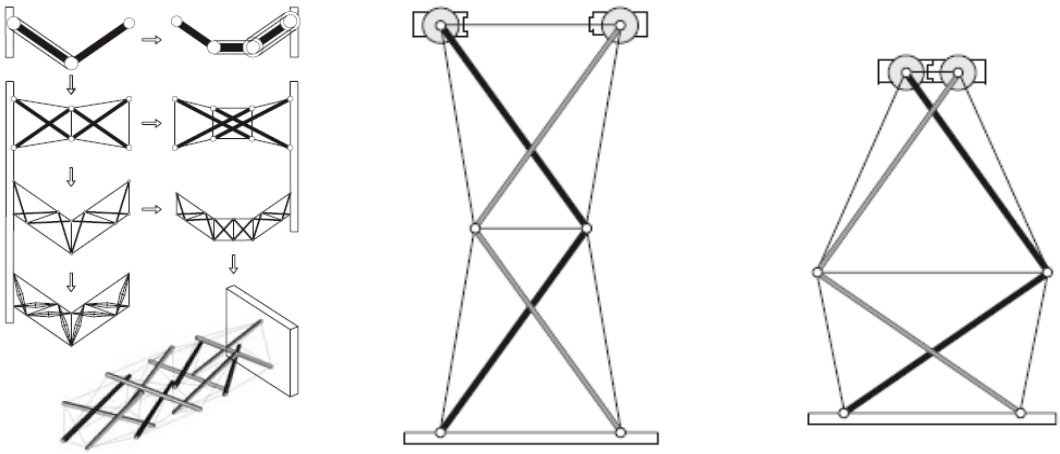


FIGURA 2.12 – Algumas formas de utilização de estruturas *Tensegrity* em robôs (ALDRICH, SKELTON e KREUTZ-DELGADO, 2003).

2.5.1.6 Engenharia aeroespacial

Alguns componentes de uma nave espacial têm de ser dobrados para serem alojados no compartimento de carga do lançador para que, quando estiver em órbita, serem desdobrados.

Assim, a união das características inerentes às estruturas *Tensegrity* às estruturas pantográficas vem despertando interesse da engenharia aeroespacial.

Os três principais componentes que podem ser montados no espaço são: mastros, antenas e painéis solares (DEIFELD, 2005).

Os mastros são utilizados principalmente para separar equipamentos eletrônicos, com o objetivo de reduzir interferências, ou ainda como base para outras estruturas. Podem ser divididos em quatro grupos: mastros tubulares de parede fina, telescópicos, helicoidais e treliçados (ALDRICH, SKELTON e KREUTZ-DELGADO, 2003), *apud* (DEIFELD, 2005).

A utilização do *Tensegrity* neste tipo de estrutura tem como principais vantagens a alta capacidade de compactação na desmontagem e uma relativa rigidez axial; entretanto, sua desvantagem está no fato de possuir flexibilidade relativamente alta. Uma forma de aumentar a rigidez estrutural seria conectando diretamente as barras, contudo, poderia se perder a vantagem da capacidade de compactação citada anteriormente.

A FIG. 2.13 apresenta a montagem de um modelo físico de um mastro (TIBERT e PELLEGRINO, 2003).

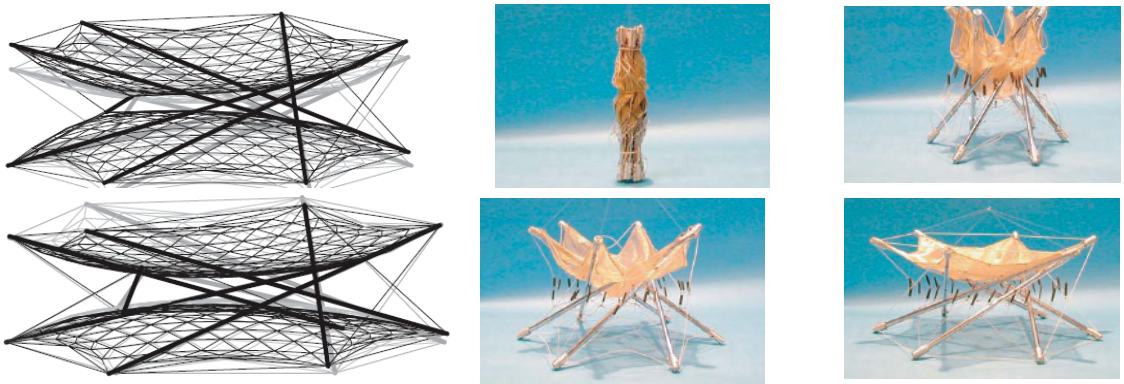


FIGURA 2.13 – Montagem, em oito estágios, de um modelo físico de um mastro (TIBERT e PELLEGRINO, 2003).

As antenas refletoras podem ser divididas em três categorias: malha, superfícies sólidas e infláveis (TIBERT, 2002), *apud* (DEIFELD, 2005).

Em 1990, a *Astro Aeroespacial Corporation* desenvolveu a AstroMesh™, antena refletora de malha baseada no conceito de treliça de cabos. A antena "é montada pelo encurtamento do cabo contínuo que forma as diagonais do anel treliçado" (DEIFELD, 2005, p. 16), cujo diâmetro é igual a 12,25 m e seu peso, 55 kg. Quando desmontada, a antena passa a ter 1,3 m de diâmetro e altura igual a 3,8 m.

Entretanto, TIBERT (2002) desenvolve uma antena semelhante à AstroMesh™ utilizando uma estrutura *Tensegrity* (FIG. 2.14), que possui como principais vantagens a simplicidade estrutural e a redução do número de elementos estruturais submetidos a cargas de compressão (DEIFELD, 2005).



(a) Modelo numérico. (b) Seqüência de montagem.

FIGURA 2.14 – Antena refletora *Tensegrity* (TIBERT, 2002).

2.5.1.7 Design

Se o conceito *Tensegrity* é encontrado em diversas áreas, dentro do design, ele abrange diversos campos. Tantas são as possibilidades e usos já existentes, que sua apresentação poderia ocupar um espaço muito grande dentro da pesquisa. Como não faz parte do escopo deste trabalho a pesquisa bibliográfica desta área de uso do *Tensegrity*, serão apresentados somente alguns exemplos, a título de ilustração.

As estruturas *Tensegrity* apresentam grande potencial na área do design de mobiliário, possibilitando a criação de inúmeras peças, tanto de mesas de centro e canto (FIG. 2.15a) e de jantar (FIG. 2.15b), quanto luminárias (FIG. 2.16a) e cadeiras (FIG. 2.16b).

O Laboratório de Investigação e Living Design (LILD) da Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro desenvolve, a mais de uma década, diversos usos dentro do design de produto, e abrangem desde novas possibilidades de coberturas até quiosque itinerante de bambu.

Até mesmo brinquedos que utilizam o conceito *Tensegrity* podem ser citados, tais como o *Tensegritoy* (FIG 2.17a), pipas e decoração em feiras (FIG 2.17a).



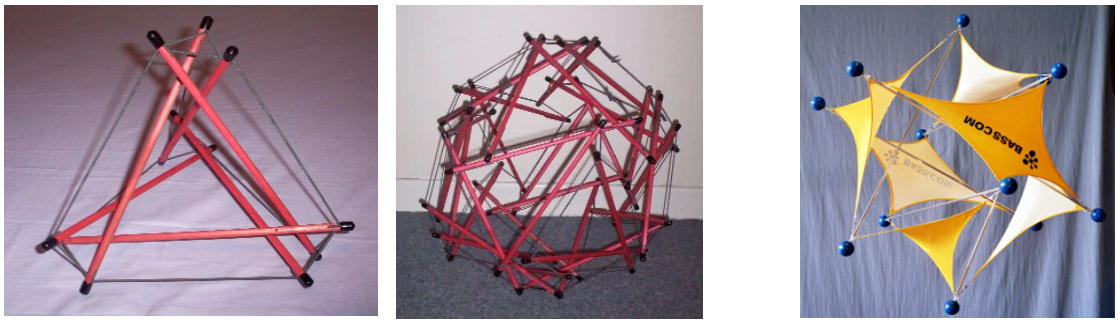
(a) Mesa de canto. (b) Mesa de jantar.

FIGURA 2.15 – Mobiliário *Tensegrity* desenvolvido pelo autor.



(a) Luminária. (b) Cadeiras.

FIGURA 2.16 – Mobiliário *Tensegrity* (JÁUREGUI, 2004).



(a) *Tensegritoy*. (b) Decoração.

FIGURA 2.17 – Brinquedos *Tensegrity* (JÁUREGUI, 2004; STELDI-AIR, 2005).

2.5.2 Tipologias das estruturas *Tensegrity*

MOTRO (2003) utilizou como critério de tipologias e codificação a topologia, a geometria e o equilíbrio / obtenção de forma.

A própria descrição do sistema *Tensegrity* como sendo uma estrutura composta por um campo contínuo de tração e um campo descontínuo de compressão já caracteriza o objeto quanto à sua topologia.

A geometria do *Tensegrity* é caracterizada pelas coordenadas cartesianas x, y e z dos nós do sistema, sendo que os comprimentos dos cabos e barras, suas derivações.

O equilíbrio e a busca de forma serão descritos no item 2.5.4.

Da mesma forma, MOTRO (2003) cria uma codificação para caracterizar os diversos tipos de estrutura *Tensegrity* de acordo com: número de nós *n*; número de componentes comprimidos *S*; número de componentes tracionados (ou cabos) *C*; se o sistema é regular *R* ou irregular *I* (de acordo com o comprimento dos elementos) e *SS* para o sistema esférico, por exemplo.

MOTRO (2003) ainda utiliza o conceito de células elementares ou esféricas, que pode ser melhor descrito na FIG. 2.18. A célula esférica pode ser entendida como uma unidade indivisível, da mesma forma que o átomo.

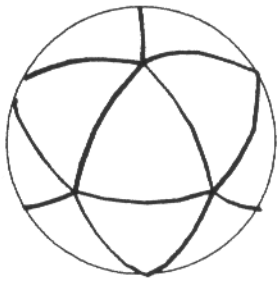


FIGURA 2.18 – Rede de cabos mapeado em uma esfera (MOTRO, 2003).

Pode ser definido conforme a propriedade topológica associada aos cabos: a rede de cabos é sempre homeomórfica à esfera. Quando todos os cabos são mapeados em uma esfera sem interseção entre eles, separados dos nós do sistema, então a rede de cabos é homeomórfica à esfera. Todos os elementos comprimidos estão dentro desta rede de cabos e o sistema *Tensegrity* correspondente é denominado de células esféricas (MOTRO, 2003).

Por sua vez, PUGH (1976) classifica os sistemas *Tensegrity* dentro de três padrões básicos: figuras simples, diamante e circuito. A partir destes, outros dois padrões podem ser obtidos: o padrão *zig-zag* e demais sistemas *Tensegrity* (que utiliza todos os padrões).

A seguir, é detalhada a classificação proposta por PUGH (1976):

2.5.2.1 Figuras simples

PUGH (1976) descreve algumas das diversas possibilidades deste padrão: figuras bidimensionais (FIG. 2.19); figuras cujas barras passam por seus centros geométricos

(FIG. 2.20); triângulos de barras; figuras de camada única (FIG. 2.21); o octaedro expandido (FIG. 2.24) e as suas variações.

Nessas figuras, pode-se ainda mencionar o sistema composto por três barras, obtido ao se retirar três tendões (que são cordoalhas, cabos, cordões etc) do sistema cujas barras passam por seus centros geométricos (FIG. 2.20). A forma obtida (FIG. 2.21) é a figura de camada única, conforme PUGH (1976). Esta denominação é porque este sistema pode ser obtido por meio da montagem apresentada na FIG. 2.22, ou seja, uma única camada composta por barras e tendões que, quando corretamente dispostas, formam um sistema *Tensegrity*.

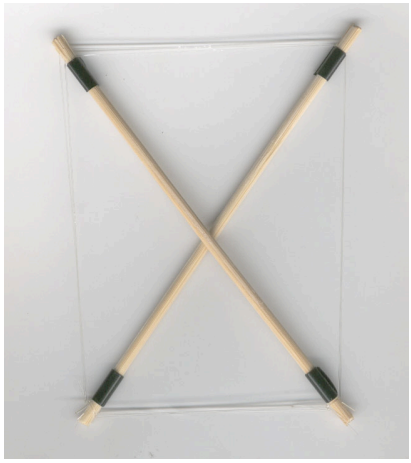


FIGURA 2.19 – Figura bidimensional formada por duas barras.

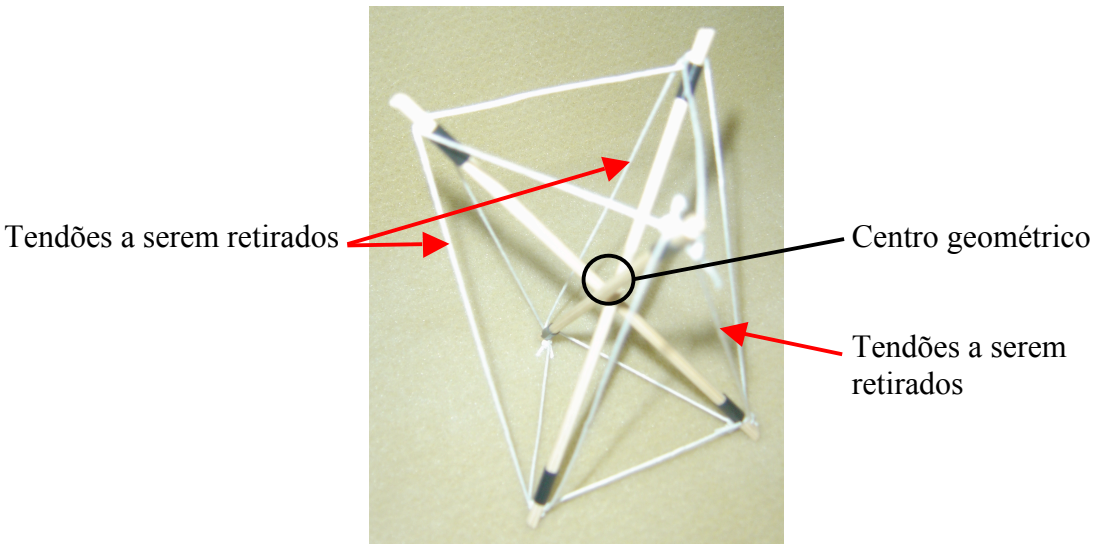
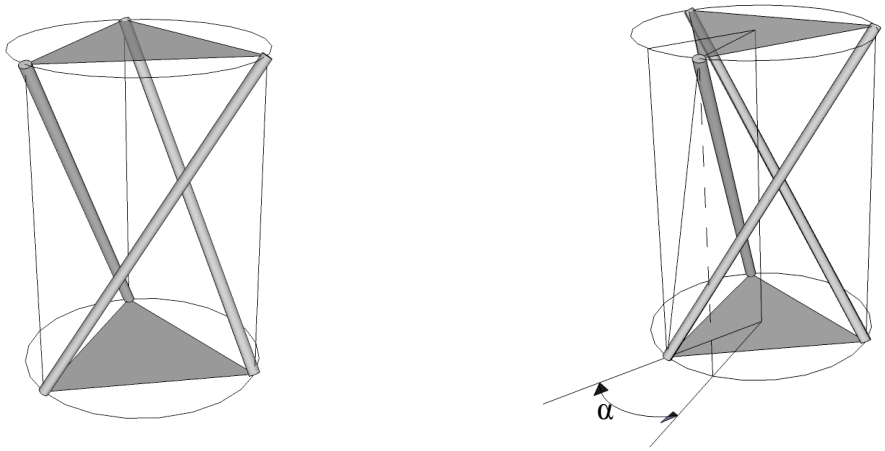


FIGURA 2.20 – Figura cujas barras passam por seu centro geométrico.

O sistema apresentado na FIG. 2.21 também é denominado por MOTRO (2003) como *simplex* (ou equilíbrio elementar) e é obtido rotacionando o triângulo do topo do prisma triangular em relação ao triângulo da base.



(a) Prisma triangular. (b) *Simplex*.

FIGURA 2.21 – Figura de camada única ou sistema *simplex*.

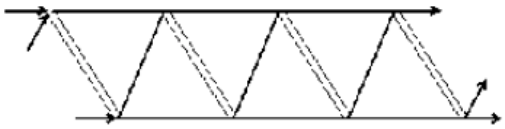


FIGURA 2.22 – Configuração das barras e tendões de uma figura de camada única (JÁUREGUI, 2004).

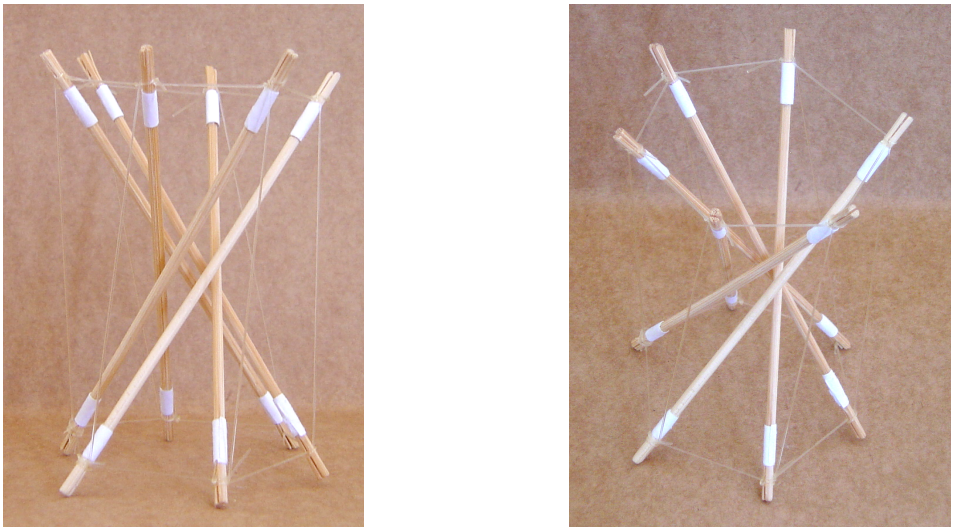


FIGURA 2.23 – Sistema prismático com base hexagonal.

O princípio do *simplex* pode ser estendido para outros prismas com bases quadradas, pentagonais, hexagonais etc (FIG. 2.23), tendo como característica a rotação do polígono do topo em relação ao da base. Este sistema é denominado por MOTRO (2003) como prismático e pode ser considerado como gerador de hiperbolóides de revolução.

O ângulo de rotação α apresentado na FIG. 2.21 é dado por meio da fórmula $\alpha = 90^o - 180^o/n$ (PUGH, 1975), onde *n* é o número de lados da base.

PUGH (1976) cita ainda o octaedro expandido (FIG. 2.24) e suas variações, obtidas pela manipulação e alteração para se obter outras figuras.

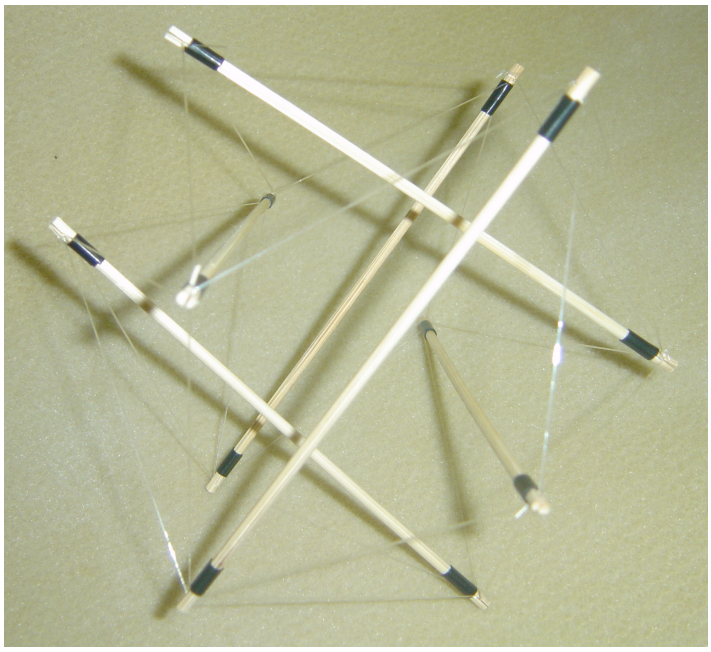
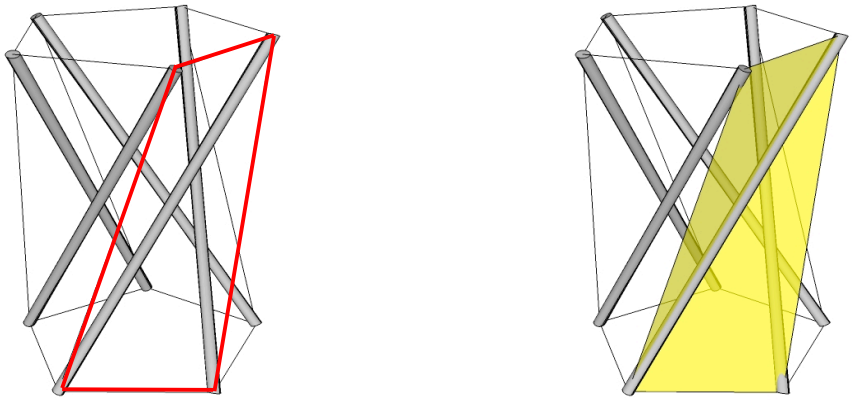


FIGURA 2.24 – Octaedro expandido.

2.5.2.2 Padrão diamante

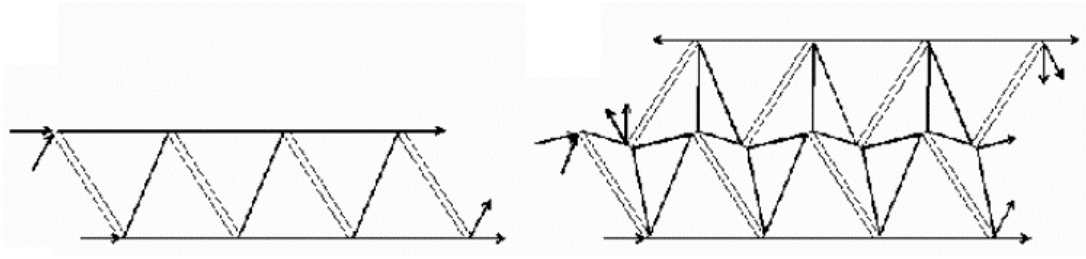
Ao se analisar as figuras de camada única apresentada no item anterior, verifica-se que são criados polígonos similares definidos pelos tendões do sistema (FIG. 2.25a). A aresta formada por estes polígonos é caracterizada por um plano (FIG. 2.25b) que PUGH (1976) define como diamante. A partir deste sistema, é possível acrescentar novas camadas (FIG. 2.26), o que permite a montagem de diversas figuras.

Este padrão é denominado por MOTRO (2003) como sendo o sistema romboédrico.



(a) Polígonos definidos pelos tendões. (b) Plano denominado diamante.

FIGURA 2.25 – Padrão diamante.



(a) Camada única. (b) Camada dupla.

FIGURA 2.26 – Padrão diamante (JÁUREGUI, 2004).

2.5.2.3 Padrão circuito

No padrão circuito, as extremidades dos componentes submetidos à compressão são unidas, fechando o espaço formado pelos cabos e barras do padrão diamante, como mostra a FIG. 2.27 (PUGH, 1976).



FIGURA 2.27 – Princípio do padrão circuito (JÁUREGUI, 2004).

2.5.2.4 Padrão *zig-zag*

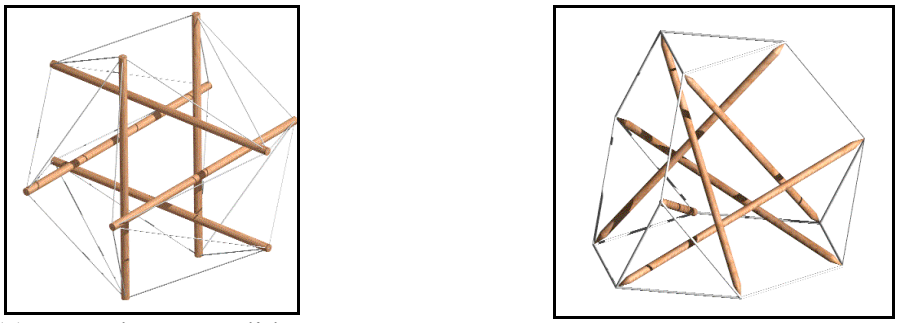
Tendo como base o padrão diamante, altera-se a posição dos tendões dispondo-os de forma similar ao *z*, composto por três tendões não alinhados (COSTA, 2005), como mostra a FIG. 2.28. Como exemplo, se alterar a fixação dos tendões de um octaedro expandido para o padrão *zig-zag*, o resultado será um tetraedro truncado (FIG. 2.29).

A Cúpula Geodésica *Tensegrity* objeto de estudo deste trabalho está classificada dentro deste padrão.



(a) Padrão diamante. (b) Padrão *zig-zag*.

FIGURA 2.28 – Alteração da fixação dos tendões (JÁUREGUI, 2004).



(a) Octaedro expandido. (b) Tetraedro truncado.

FIGURA 2.29 – Alteração da fixação dos cabos (JÁUREGUI, 2004).

2.5.2.5 Demais sistemas *Tensegrity*

PUGH (1976) acrescenta este padrão para englobar todos os outros sistemas que não foram mencionados (ou podem ser classificados) nos padrões anteriormente descritos. São apresentados quatro possíveis métodos para se desenvolver novos sistemas *Tensegrity*:

- Postular uma nova concepção de *Tensegrity*, ou modificando o já existente, como, por exemplo, encontrar uma interpretação diferente para a analogia entre o sistema *Tensegrity* e um balão (que será descrita com mais detalhes no item 2.5.4);

- Descobrir novas maneiras de conectar barras e tendões;

- Descobrir ou desenvolver novos poliedros que possam servir como base para outros sistemas *Tensegrity* e

- Estender (ampliar) uma figura *Tensegrity*, tal como apresentado no item 2.5.2.2, onde o padrão diamante permite acrescentar novas camadas.

2.5.3 Processos de montagem

O processo de montagem mais natural a ser pensado é a construção de sistemas *Tensegrity* mais complexos por meio da junção de células elementares. Entretanto, outros processos podem ser utilizados.

Geralmente, quando se imagina uma célula elementar, presume-se que a mesma seja regular: os cabos possuem comprimentos iguais entre si, da mesma forma que as barras. Contudo, em alguns casos, pode-se construir sistemas *Tensegrity* irregulares, ou seja, diversos comprimentos de barras e cabos.

Assim, a descrição dos processos de montagem torna-se bastante vasta. Desta forma, este trabalho irá apresentar alguns exemplos mais significativos, baseado nas observações e experiências de MOTRO (2003).

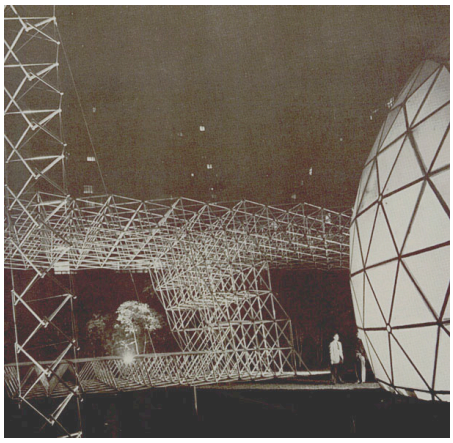
MOTRO (2003) os processos de montagem em três tipos: unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais.

2.5.3.1 Sistemas unidimensionais

São, basicamente, os mastros e torres. De acordo com a cronologia de eventos, Snelson (FIG. 2.30a) e Fuller (FIG. 2.30b) apresentaram uma proposta de mastro simultaneamente.



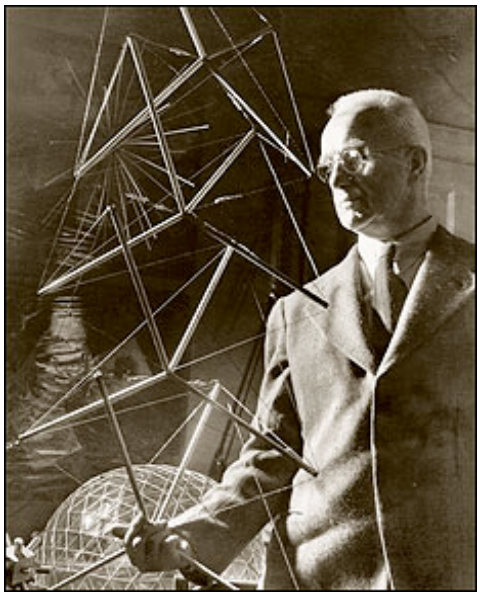
(a) Universidade de Oregon, 1953.



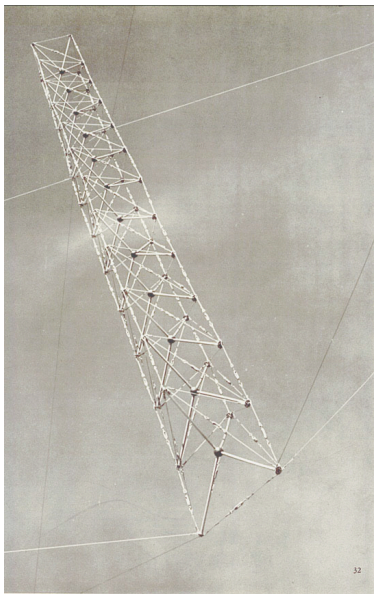
(b) Museu de Arte Moderna de *New York* – primeira exposição.

FIGURA 2.30 – Mastro *Tensegrity* (SNELSON, 2005).

Uma disputa foi criada entre estes dois protagonistas: em seu livro *The Dymaxion World of Bucminster Fuller* (FULLER e MARKS, 1973, *apud* MOTRO, 2003), o autor apresenta uma figura com o mastro *Tensegrity* feito por Snelson em 1949 (FIG. 2.31a). Entretanto, na mesma página, outra figura apresenta um mastro *Tensegrity*, presumivelmente projetado por Fuller, cuja legenda descreve como sendo construído na *North Carolina State College*, 1950 (FIG. 2.31b).



(a) Fuller com o mastro criado por Snelson.



(b) Mastro *Tensegrity* construído na *North Carolina State College.*

FIGURA 2.31 – Mastro *Tensegrity* (FULLER e MARKS, 1973, *apud* MOTRO, 2003).

Um dos mastros projetados por Snelson mais famoso é a *Needle Tower*. Na verdade, ele construiu dois, sendo um em Washington, EUA, em 1968, com altura 18,20 m de altura (FIG. 2.32a), e outro em Otterlo, Holanda, com 30 m de altura (FIG. 2.32b).



(a) *Needle Tower I.*



(b) *Needle Tower II.*

FIGURA 2.32 – Mastro *Tensegrity* (SNELSON, 2005).

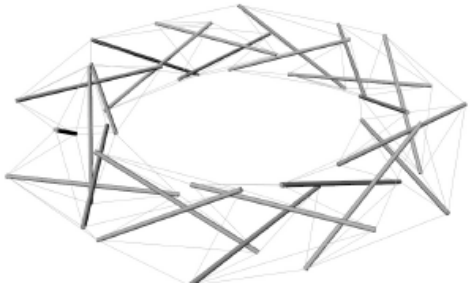
Além destas, Snelson projetou diversas outras, como a *Way Tower* (1963), *E. C. Column* (1968-81), *Tetra Tower* (1963-2001), *Zig-Zag Tower* (1997) e a *Penta Tower* (2001-03). Todas estas, entretanto, são classificadas como esculturas por SNELSON (2005).

Dois outros tipos de torres foram criados por alunos sob a tutela de Emmerich, e são denominados *Mât Chinoise* (BOULET, 1970, *apud* MOTRO, 2003) e *Mât Autotentant* (CHASSAGNOUX, 1970, *apud* MOTRO, 2003), FIG. 2.33.

Podem também ser classificados como sistemas de montagem unidimensionais o toro (FIG 2.34a) e o arco *Tensegrity* (FIG. 2.34b).



FIGURA 2.33 – *Mât Autotentant* (CHASSAGNOUX, 1970, *apud* MOTRO, 2003).



(a) Toro.

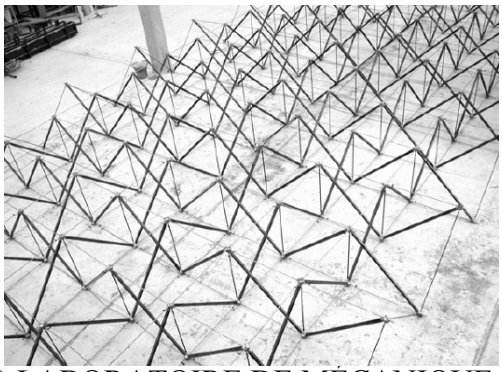


(b) Arco.

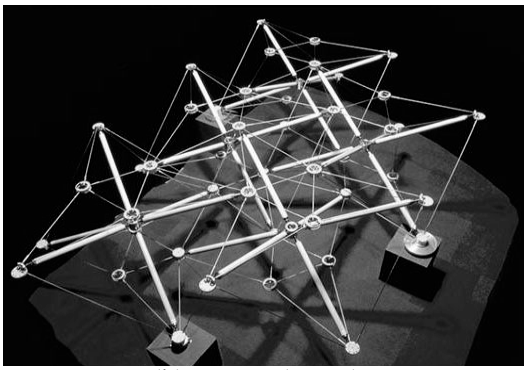
FIGURA 2.34 – Outros sistemas de montagem unidimensionais (MAKE ARCHITECTS, 2007; JÁUREGUI, 2007).

2.5.3.2 Montagens bidimensionais

O primeiro exemplo deste sistema de montagem é a rede dupla de camada plana *Tensegrity*, que pode ser entendida como uma treliça espacial *Tensegrity*. Duas soluções deste tipo de montagem podem ser vistas na FIG. 2.35.



(a) LABORATOIRE DE MÉCANIQUE ET GÉNIE CIVIL (1999-2002).

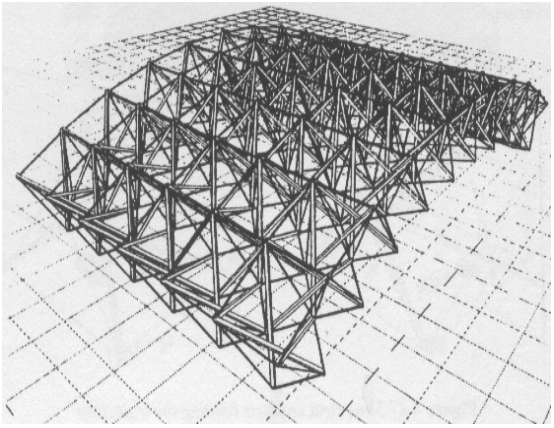


(b) FEST (2003).

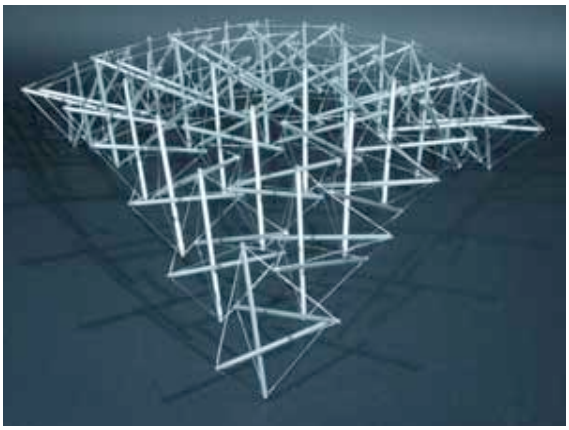
FIGURA 2.35 – Sistema de montagem bidimensional.

Um dos objetivos a ser alcançado é a criação de sistemas de curvatura simples e de dupla curvatura utilizando o princípio *Tensegrity*, onde poderia se dispensar o uso de dispositivos complementares, tais como mastros e / ou cabos de estabilização utilizados em estruturas de membranas (MOTRO, 2003).

As FIG. 3.36a e 3.36b apresentam, respectivamente, o exemplo de um sistema de curvatura simples e de dupla curvatura.



(a) Curvatura simples.



(b) Dupla curvatura.

FIGURA 2.36 – Sistemas de montagem bidimensionais (MOTRO, 2003; NOSEK, 2005).

2.5.3.3 Montagens tridimensionais

MOTRO (2003) não apresenta nenhum exemplo deste tipo de montagem; entretanto, presume-se que se utilizem as células esféricas dispostas tridimensionalmente. A FIG. 2.37 apresenta a vista e a perspectiva humanizada do Sherwood Forest Visitor Complex, em Nottinghamshire, Reino Unido: edifício projetado pelo escritório de arquitetura Make, com sede em Londres. É uma estrutura que representa uma árvore, e a folhagem desta é uma estrutura *Tensegrity* que pode ser classificado como sistema irregular (item 2.5.2.4) e cuja montagem é tridimensional.

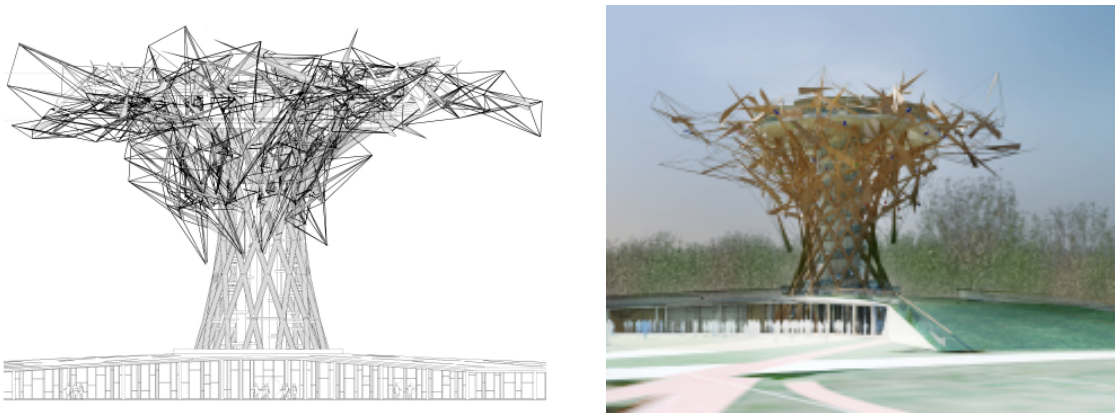


FIGURA 2.37 – Sherwood Forest Visitor Complex (MAKE ARCHITECTS, 2007).

2.5.4 Equilíbrio, estabilidade e busca de forma

Se as características topológicas, mencionadas no item 2.5.2, são importantes, deve-se ter uma atenção especial à característica de um determinado sistema *Tensegrity* de ser auto-tensionado. Ou seja, todos os elementos estruturais (cabos e barras) estão submetidos a esforços de tração ou compressão, onde todo o sistema está em equilíbrio estático sem nenhuma ação externa, desconsiderando o peso-próprio (MOTRO, 2003).

Segundo MOTRO (2003), a estabilidade do sistema *Tensegrity* pode ser obtida somente por meio da geometria da estrutura, onde uma situação autoportante estática estável pode ser estabelecida; ou seja, o sistema *Tensegrity* necessita de um processo de busca de forma que permita alcançar tal equilíbrio geométrico.

PUGH (1975), para explicar o comportamento de um sistema *Tensegrity*, apresenta um esquema (FIG. 2.38) em forma de parábola, cujo eixo das ordenadas representa a distância entre barras (que podem se aproximar ou se afastar) e o eixo das abcissas (ou eixo de simetria) representa o estado de equilíbrio do sistema. Ou seja, o sistema estará em equilíbrio estático (ou numa condição ideal de repouso) quando estiver no vértice da parábola.

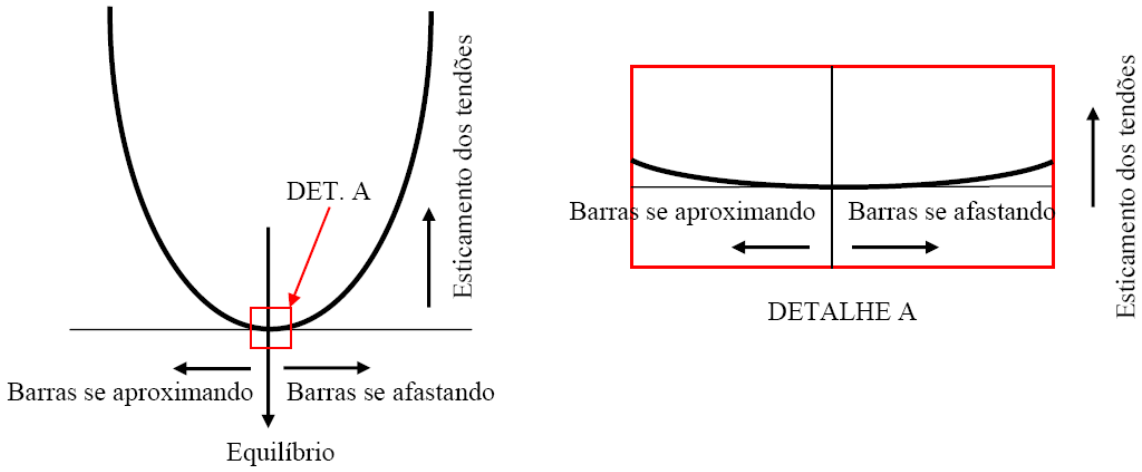


FIGURA 2.38 – Parábola que representa o comportamento de um sistema *Tensegrity* (PUGH, 1975).

MOTRO (2003) descreve uma analogia que facilita explicar o comportamento de um sistema *Tensegrity* e a relação entre geometria e estabilidade: o balão.

O balão consiste em uma membrana como invólucro, que é capaz de conter um determinado volume de ar igual ao volume por ele delimitado. Este balão poderá ser considerado como um sistema *Tensegrity* ao se fazer analogia entre o ar e os componentes sob compressão, e a membrana e os componentes submetidos à tração.

Ainda dentro desta analogia, três situações podem ser descritas: o volume de ar menor que o volume compreendido dentro da membrana, o mesmo volume de ar e o invólucro e o volume de ar maior que o da membrana.

No primeiro caso, o balão não possui forma definida, ou seja, é denominado de forma indeterminada, pois permite deformações quando da aplicação de cargas externas (pressão do dedo sobre a membrana, por exemplo).

No segundo caso, o balão passa a ter equilíbrio geométrico, ou seja, possui forma definida. Entretanto, ainda está inapropriado para uso, pois não possui rigidez adequada.

Já no terceiro caso, há o aumento da pressão interna e, desta forma, obtém-se um objeto rígido. Neste estado, o ar está sob pressão (que confere rigidez ao mesmo) e a membrana, que constitui o invólucro, está sob tração. Caso haja tensões aplicadas na

superfície da membrana, ocorrerão pequenas deformações, mas a forma inicial do invólucro se manterá. Este é o equilíbrio entre a pressão e a tração da membrana.

Entendido o conceito de equilíbrio e estabilidade de um sistema *Tensegrity*, observa-se que a forma e a distribuição de tensões, em estruturas retesadas, são intrinsecamente relacionadas. Ou seja, a determinação da configuração geométrica em seu estado de equilíbrio é de fundamental importância dentro das diversas fases do projeto deste tipo de estrutura. Esta fase de projeto é conhecida como busca de forma (DEIFELD, 2005).

A utilização de poliedros convexos regulares para a confecção de sistemas *Tensegrity* foi e ainda é largamente empregada, desde autores consagrados como MOTRO (2003) e PUGH (1976), *apud* (DEIFELD, 2005), até como parte do processo de aprendizado e entendimento deste tipo de sistema.

Entretanto, DEIFELD (2005, p. 32) afirma que "modelos físicos e numéricos mostraram que a forma retesada de um *Tensegrity* pode não ser idêntica àquela do poliedro regular". Assim, é necessário o desenvolvimento de métodos apropriados para se encontrar a configuração de equilíbrio mais simples de uma determinada estrutura *Tensegrity*.

Deste modo, diversos métodos de busca de forma para este tipo de estrutura foram estudados por muitos autores. MOTRO, BELKACEM e VASSART (1994), *apud* (DEIFELD, 2005) classificaram estes métodos em geométricos, analíticos e numéricos. Já TIBERT e PELLEGRINO (2003), *apud* (DEIFELD, 2005) classificaram os métodos em dois grupos: estáticos e cinemáticos.

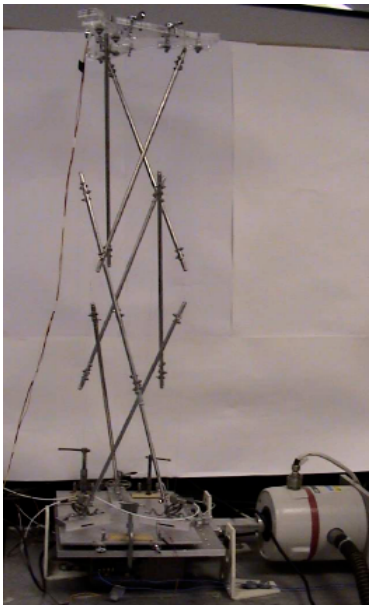
Os métodos estáticos buscam uma relação entre as configurações de equilíbrio de uma determinada estrutura, e sua topologia, e as forças atuantes em seus elementos estruturais. Quanto aos métodos cinemáticos, os mesmos se caracterizam por determinar a geometria de uma estrutura *Tensegrity* mantendo os comprimentos dos cabos constantes e aumentando-se o comprimento das barras, ou ainda, os comprimentos das barras podem ser mantidos constantes enquanto os comprimentos dos cabos são diminuídos até o seu limite mínimo (DEIFELD, 2005).

2.5.5 Análise experimental

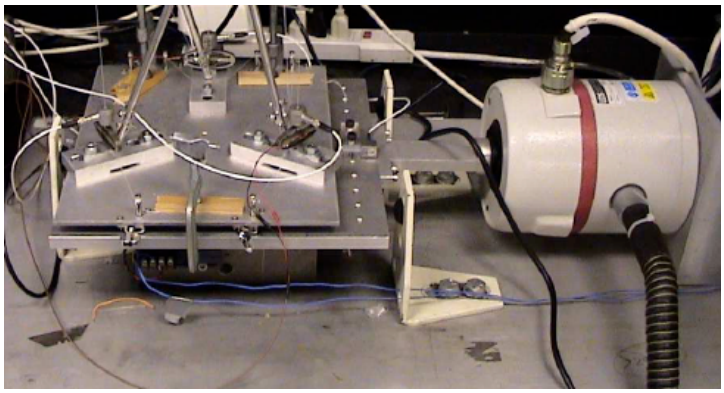
Pode-se destacar alguns trabalhos relativos a análises experimentais de estruturas *Tensegrity*. Entretanto, estes trabalhos referem-se a estudos sobre o comportamento dinâmico de torres *Tensegrity* ou ainda estudos abrangentes sobre o comportamento de treliças espaciais.

CHAN *et al.* (2004) apresentam um trabalho focado no controle de vibração em uma torre *Tensegrity*. A referida estrutura foi montada sobre uma mesa vibratória que fornece vibração à base da estrutura. O objetivo do estudo é reduzir a vibração do topo da estrutura utilizando métodos de amortecimento ativo.

A mesa vibratória gera vibração em uma única direção e está fixada em uma placa e acelerômetros foram colocados no topo e na base da torre. A FIG. 2.39 apresenta o modelo reduzido ensaiado, constituído por nove tubos de aço inoxidável, cada um com 45,72 cm de comprimento e 8 mm de diâmetro, e sua altura final é igual a 91,44 cm, sendo que o mesmo está compreendido em um cilindro imaginário de 19,3 cm de diâmetro.



(a) O sistema completo.



(b) A mesa vibratória.

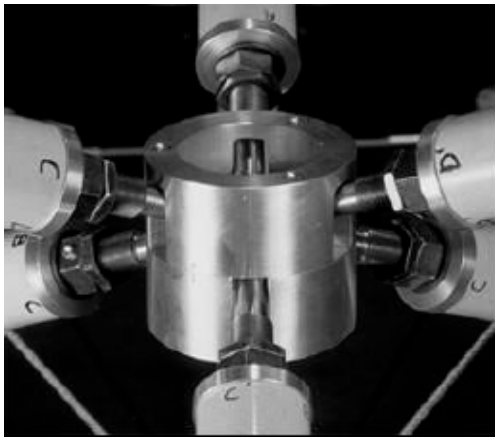
FIGURA 2.39 – Ensaio de uma torre *Tensegrity* (CHAN *et al.*, 2004).

Uma possível utilização deste tipo de estrutura seria em grandes telescópios espaciais, como apresentado no item 2.5.1.6.

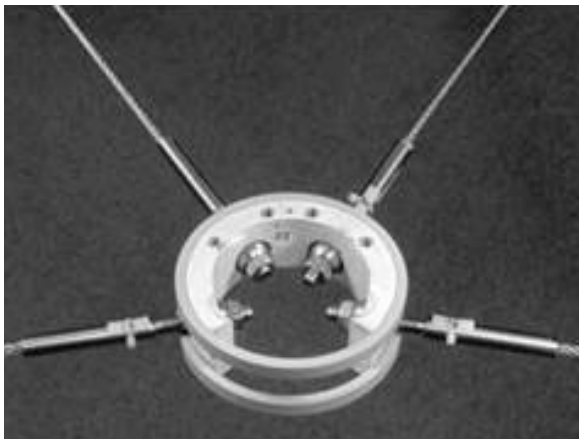
FEST (2003) construiu uma treliça espacial *Tensegrity* (FIG. 2.35b), em escala reduzida, para identificar possíveis problemas de montagem, aprofundar o conhecimento do comportamento desta estrutura e propor soluções e sistemas de controle para os problemas encontrados.

FEST (2003) define a geometria da estrutura, a topologia do módulo, composta por seis barras e vinte e quatro cabos, conectados em treze nós, sendo o modelo ensaiado composto por três e cinco destes módulos. Foram feitos ensaios estáticos e controle ativo de modos quase-estáticos, além das respectivas simulações numéricas.

O mesmo também apresenta diversas soluções para reforço dos nós (FIG. 2.40), por exemplo, além da instrumentação do ensaio (FIG. 2.41).



(a) Cilindro de reforço do nó central.



(b) Anel de reforço dos nós de cabos.

FIGURA 2.40 – Reforço estrutural dos nós (FEST, 2003).

Outro ensaio também executado em um modelo reduzido é apresentado por LAZZARI *et al.* (2003). Os autores apresentam uma possível linha de pesquisa para domos de cabos (que alguns especialistas consideram uma extensão do conceito *Tensegrity*, e será melhor explicado no item 2.7) submetidos a carregamentos de vento.

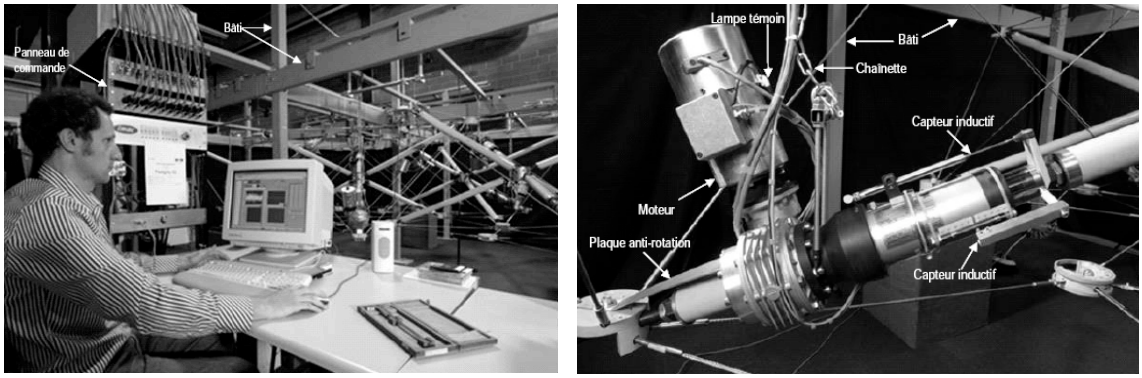
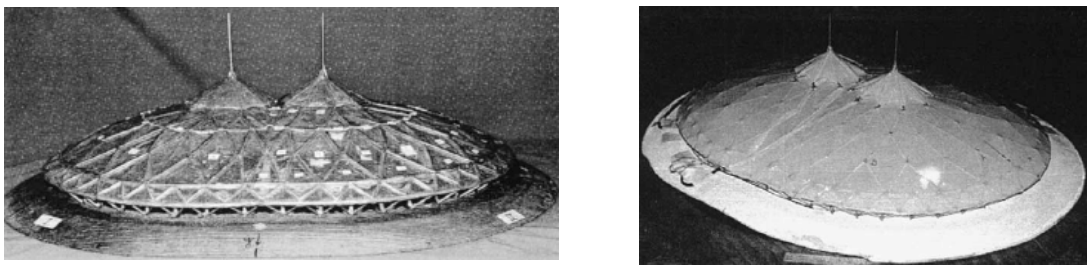


FIGURA 2.41 – Instrumentação do modelo para análise experimental (FEST, 2003).

LAZZARI *et al.* (2003) utiliza os dados obtidos em ensaios de modelos (um rígido e outro aero-elástico) no túnel de vento do Laboratório de Dinâmica Estrutural e Confiabilidade (LDEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em 1997, e faz uma comparação qualitativa com os resultados obtidos pela análise proposta pelos autores.

O modelo representa a cobertura do estádio La Plata, na Argentina (FIG. 2.42), e foi feita a análise estática e dinâmica da ação do vento sobre a estrutura.

Foram feitas as análises de freqüências naturais e obtidos os modos de vibração da estrutura. Verificou-se que a cobertura do estádio La Plata é mais rígida que a do Domo da Geórgia (outro exemplo de domo de cabos, que também é apresentado no item 2.7). Isto se deve, provavelmente, à diferença do estado de protensão dos cabos, a forma da cobertura e a presença de cabos na calota do estádio *La Plata*.



(a) Modelo rígido. (b) Modelo aero-elástico.

FIGURA 2.42 – Modelo reduzido da cobertura do estádio La Plata no túnel de vento (LAZZARI *et al.*, 2003, *apud* LDEC, 1997).

2.6 A Geodésica *Tensegrity*

2.6.1 Definições geométricas em modelos físicos reduzidos

A superfície geométrica adotada para o Domo *Tensegrity* Metálico é o icosaedro (FIG. 2.43). O icosaedro é um poliedro regular formado somente por triângulos, possuindo 20 faces, 12 vértices e 30 arestas. Entretanto, determinados poliedros podem ser subdivididos, formando diversas freqüências.



FIGURA 2.43 – Icosaedro.

Na geodésica, freqüência é o número de segmentos no qual as arestas são subdivididas (LOTUFO e LOPES, 1981). Assim, pode-se construir icosaedros de freqüências diversas (FIG. 2.44), variando em função da dimensão do poliedro ou da imagem que se queira obter (maior proximidade com uma cúpula esférica, por exemplo). O icosaedro de freqüência um é denominado de poliedro principal, e é a partir dele que se determinam as diversas geodésicas.

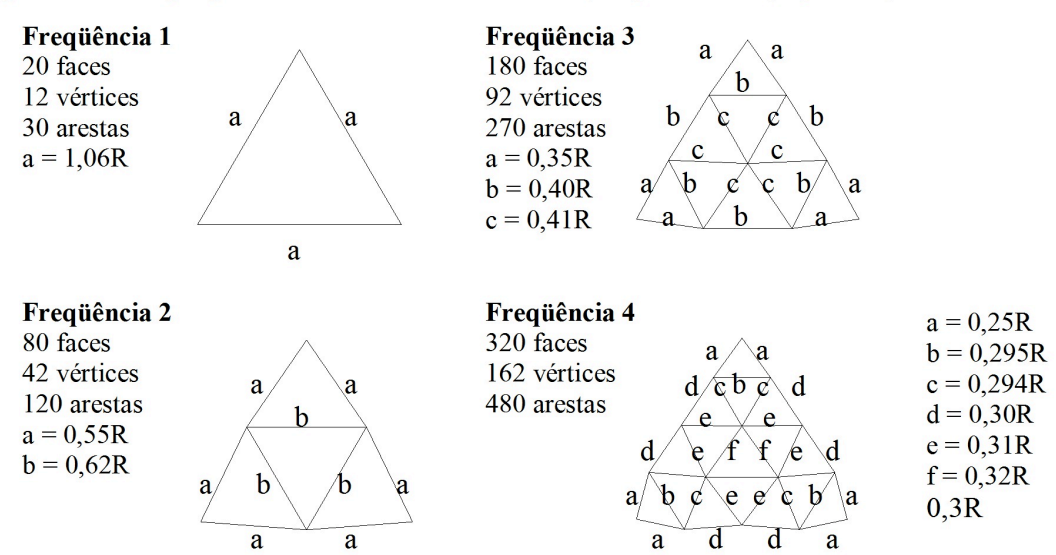


FIGURA 2.44 – Icosaedro de freqüências de 1 a 4 (LOTUFO e LOPES, 1981).

O icosaedro foi escolhido por Buckminster Fuller como base para seus estudos sobre a geodésica e é o poliedro regular que mais se aproxima de uma esfera (LOTUFO e LOPES, 1981).

A geodésica proposta por Buckminster Fuller possui barras que convergem em um ponto ou nó, que podem ser denominados de treliças geodésicas (FIG. 2.45).

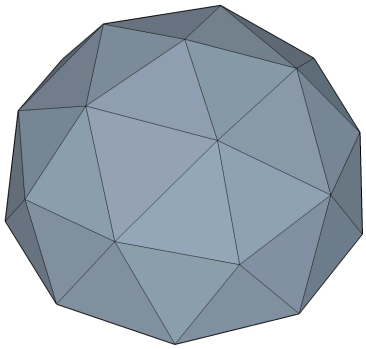


FIGURA 2.45 – Treliça geodésica.

A FIG. 2.45 representa um icosaedro de freqüência 2, cujos fatores de corda são a = 0,55R e b = 0,62R. Ou seja, se multiplicar o raio pelo valor de 0,55, irá encontrar o valor da aresta a e, ao se multiplicar o raio da geodésica por 0,62, será encontrado a aresta b (FIG. 2.46). Caso fosse o icosaedro principal, existiria apenas a aresta a.

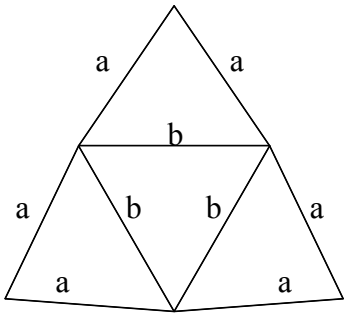


FIGURA 2.46 – Dimensionamento das barras a e b do icosaedro de freqüência dois.

A Cúpula Geodésica *Tensegrity* objeto de estudo deste trabalho (FIG. 2.47) é uma derivação deste icosaedro. No icosaedro de freqüência dois, cinco ou seis barras convergem para um único ponto (ou nó), enquanto na Cúpula *Tensegrity* este mesmo nó torna-se uma estrutura nodal, como mostrado na FIG. 2.48. Na verdade, estas estruturas nodais formam planos que são as faces de um icosaedro de freqüência dois truncado. Doravante, no presente trabalho, a estrutura nodal será denominada de nó.

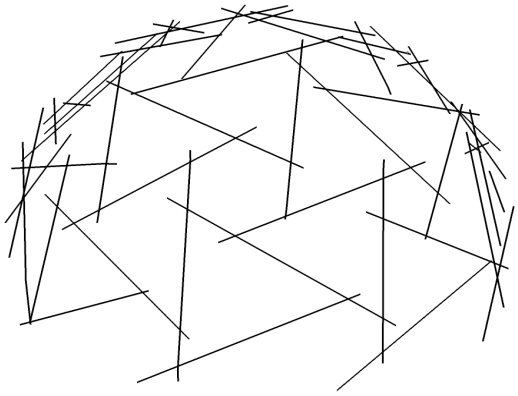


FIGURA 2.47 – Organização do Domo *Tensegrity*.

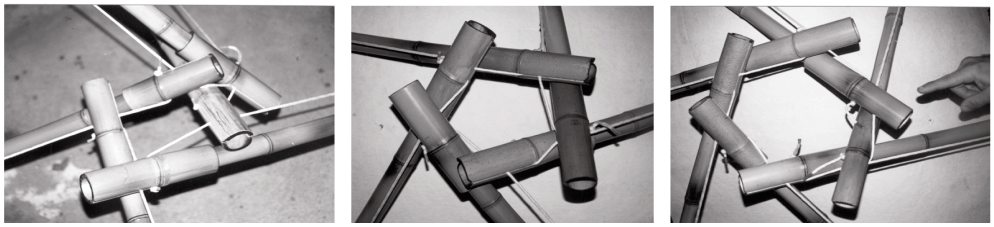


FIGURA 2.48 – Nós do Domo *Tensegrity* (RIPPER *et al*., 2004).

2.6.2 Sobre os modelos físicos em escala reduzida

Os modelos físicos experimentais auxiliam na geração de novas categorias estruturais, facilitando o desenvolvimento e evitando desperdícios que acontecem quando se vai diretamente ao protótipo e não é bem sucedido.

A opção em gerar objetos através de modelos experimentais permite correções no curso de seu desenvolvimento. Ao adotar o procedimento de experimentar o objeto físico durante sua própria concepção, procura-se conjugar os diversos parâmetros que o caracterizam, buscando otimizá-los no que diz respeito às suas interações internas e suas interações com o meio ambiente e usuário.

Estas relações interativas no fazer o objeto, como uma forma dinâmica de transformação do modelo experimental, permitem que se verifique suas eficiências e conseqüente avaliação; ou suas deficiências, para posteriores alterações, tudo isto para que o objeto atinja, de forma satisfatória, a função a que se destina.

Entretanto, mesmo que as soluções complementares ocorridas neste processo sejam inaptas aos objetivos traçados, podem ser úteis para a concretização de outros objetos.

Reconhecer as características e propriedades dos materiais e componentes do objeto é fundamental para a formatação do objeto em si, e o modelo experimental contribui para tal, concretizando ainda as diversas etapas concebidas para a composição do objeto de estudo (MOREIRA, RIPPER e SILVA, s.d.).

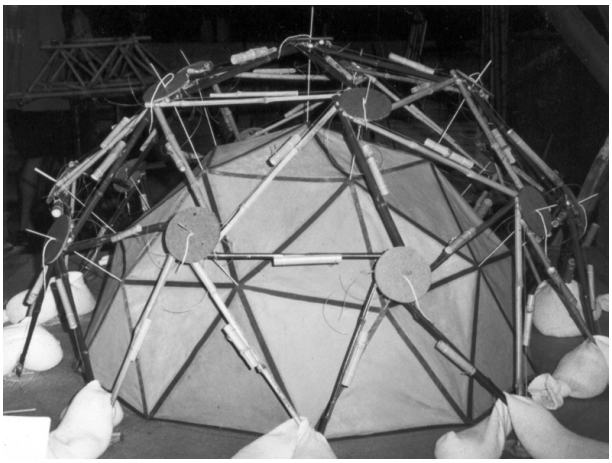


FIGURA 2.49 – Modelo conceptivo com membrana estrutural (MOREIRA, RIPPER e SILVA, s.d.).

Como conseqüência do uso de modelos estruturais, o Domo *Tensegrity* de Bambu, desenvolvido pelo Laboratório de Investigação em Living Design (LILD) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e introduzida no Laboratório de Sistemas Estruturais (LASE) do departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais (RIPPER *et al.*, 2004), possui como solução para o nó a utilização de um adaptador colocado na extremidade para evitar transmitir torção ao bambu.

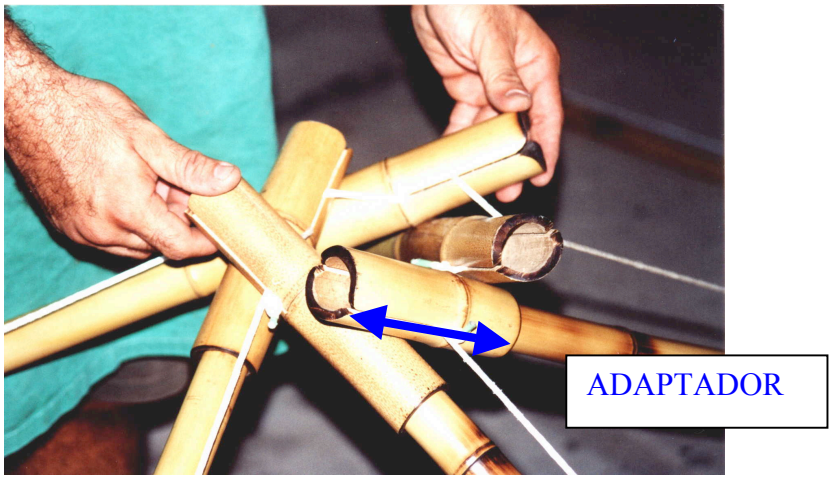


FIGURA 2.50 – Adaptador existente nas extremidades das barras (RIPPER *et al*., 2004).

2.7 Exemplos de arquitetura *Tensegrity*

Desde o início do desenvolvimento das estruturas *Tensegrity*, Richard Buckminster Fuller vislumbrou o potencial deste tipo de estrutura para o uso na construção civil. Montou diversos modelos e protótipos (FIG. 2.51).

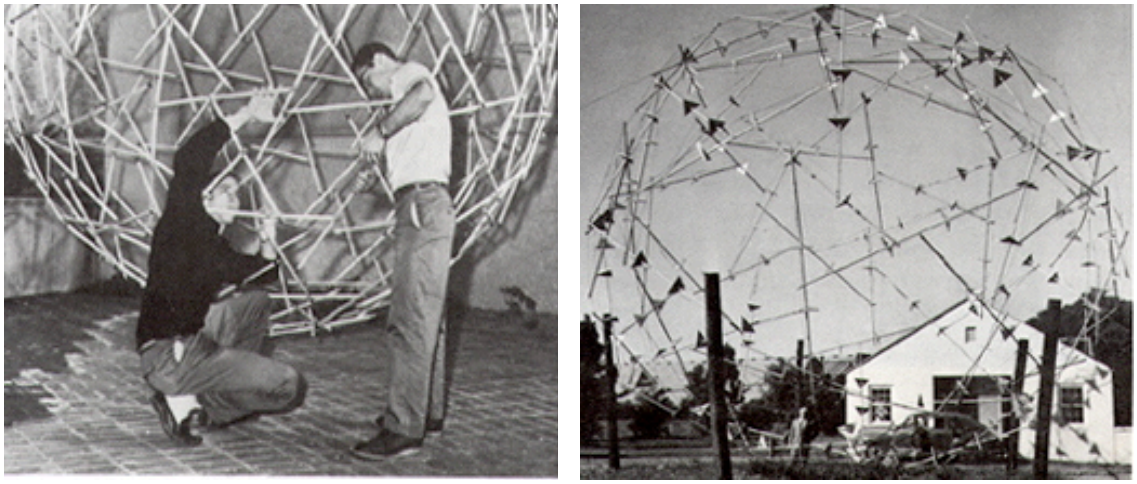


FIGURA 2.51 – *Tensegrity* montado por Fuller (WILKEN, 2001).

Entretanto, o maior uso deste tipo de sistema ainda é para esculturas. Kenneth Snelson tornou-se mundialmente conhecido por suas esculturas *Tensegrity*, que vão desde torres até objetos sem forma definida, de objetos de pequena dimensão até esculturas em escala monumental.

Assim, ao se pesquisar a arquitetura que utiliza o conceito *Tensegrity*, poucos são os exemplos deste tipo de sistema, ficando mais no campo das idéias ou projetos em fase de concepção (FIG. 2.37).

De fato, a maior quantidade de exemplos de arquitetura *Tensegrity* é o domo de cabos. Entretanto, alguns autores, como René Motro, não consideram como *Tensegrity* estruturas que não sejam auto-equilibradas e que transferem forças diretamente entre elementos comprimidos (DEIFELD, 2005); o que é o caso do domo de cabos, pois necessita de um anel de compressão como ancoragem.

Contudo, não faz parte do escopo deste trabalho discutir se determinado sistema é ou não *Tensegrity*, mesmo porque é incontestável que a cúpula objeto de estudo desta

pesquisa seja *Tensegrity*. Desta forma, serão enumerados, a seguir, alguns exemplos de projetos que utilizaram este tipo de estrutura na arquitetura, incluindo o domo de cabos.

2.7.1 Domos de cabos

Como mencionado, não há consenso em definir o domo de cabos como um sistema *Tensegrity*, isto porque esta estrutura necessita ser ancorada em um anel de compressão. Este anel, entretanto, pode ser constituído por um toro *Tensegrity* (item 2.5.3.1).

Contudo é certo afirmar que o domo de cabos é a aplicação mais próspera (ou pelo menos a que tem o maior número de exemplos construídos) das estruturas *Tensegrity*.

Os exemplos mais relevantes deste tipo de estrutura são: Olympic Gymnastics Arena e Olympic Fencing Arena, em Seoul, Korea do Sul – 1986 (FIG. 2.52a); Redbird Arena, em Normal, Illinois, Estados Unidos –1988; Tropicana Field, em Saint Petersburg, Flórida, Estados Unidos – 1989; Amagi Dome, em Shizuoka, Japão – 1991 (FIG. 2.52b); Georgia Dome, em Atlanta, Georgia, Estados Unidos – 1992 (FIG. 2.52c); Tao Yuan Sports Arena, em Taoyuan, Taiwan – 1993 (FIG. 2.52d); Crown Coliseum, em Fayetteville, Carolina do Norte, Estados Unidos – 1997; e o Estádio La Plata, em Buenos Aires, Argentina – 2000.

O Olympic Gymnastics Arena e o Olympic Fencing Arena foram projetados, respectivamente, pelos escritórios de arquitetura Space Group of Korea e Dong Myeong Architects and Partnners. O projeto e a execução do domo ficaram a cargo de David Geiger, possuindo diâmetros de 119,8 m e 89,9 m, respectivamente. Possuem cada um anéis de compressão periféricos e um anel central de tração, além de anéis intermediários concêntricos, de tração (DEIFELD, 2005).

O Redbird Arena foi projetado pelo arquiteto Paul Kennon, sendo o domo projetado por David Geiger e David Campbell. Foi o primeiro domo elíptico, medindo 92,6 m de comprimento, 78 m de largura e 24,3 m de altura total (DEIFELD, 2005).

Já o Tropicana Field, também projetado e construído por Geiger, possui forma circular com diâmetro igual a 207,3 m (DEIFELD, 2005).



(a) Olympic Gymnastics Arena e Olympic Fencing Arena.



(b) Amagi Dome.



(c) Georgia Dome.



(d) Tao Yuan Sports Arena.

FIGURA 2.52 – Exemplos mais relevantes de domos de cabos (a - GEIGER ENGINEERS, s.d.; b - ROBBIN, 2005; c - WGBH EDUCATIONAL FOUNDATION, 2000-2001; d - GEIGER ENGINEERS, s.d.).

Projetado pelo arquiteto Fumitaka Hashimoto, o Amagi Dome teve seu projeto estrutura executado pelo Structural Design Group (SDG) e pelo Tension Strud Dome Structure & Membrane. De formato circular, possui diâmetro de, aproximadamente, 60,6 m (DEIFELD, 2005).

Construído para os Jogos Olímpicos de Atlanta de 1996, o Georgia Dome é o maior domo já construído. Projetado por Matthys Levy e Weidlinger Associates, e construído por Wesley Terry, possui planta elíptica, cujas dimensões são: 240 m de comprimento e 56 m de largura e 82,5 m de altura total (DEIFELD, 2005).

Também idealizado por Geiger, o Tao Yuan Sports Arena foi projetado pelo arquiteto H. Chen, possui 136,2 m de diâmetro e 29,6 m de altura. Já o Crown Coliseum, com 99,7 m de vão livre, tem como diferencial o fato de possuir cobertura metálica em substituição à membrana (DEIFELD, 2005).

Em fase de desenvolvimento de projeto, a cobertura do Estádio La Plata possui forma elíptica, com 238,1 m de comprimento e 187,5 m de largura. Projetado pelo escritório de arquitetura Roberto Ferreira y Arquitectos Associados (sendo o projeto estrutural de Weidlinger Associates), é formado pela interseção de dois círculos de 85,6 m de raio, cujos centros distam 48 m (DEIFELD, 2005). O item 2.5.5 apresenta, de forma resumida, o estudo de cargas de vento nesta estrutura.

2.7.2 Sony Center

Mesmo não sendo classificado por nenhuma referência bibliográfica como sendo uma estrutura *Tensegrity*, a cobertura do Sony Center, localizada em Berlim, possui características similares aos domos de cabos.

Esta estrutura é responsável por cobrir a arena central onde se localizam quatro dos sete edifícios que compõem o complexo (FIG. 2.53a), que abriga o escritório central da Sony na Europa, além de outras empresas e até apartamentos residenciais (SILVA, 2000b).

O projeto arquitetônico do complexo é assinado por Helmut Jahn e a engenharia estrutural foi desenvolvida pelos escritórios Ove Arup de Nova York e Berlim.

A cobertura possui a forma de um cone assimétrico inclinado oito graus (FIG. 2.53b), com seu eixo descentralizado e com formas curvas e comprimentos variados, cobrindo uma área de quatro mil metros quadrados (SILVA e FAKRI, 2000).

A estrutura é composta por um anel de compressão (FIG. 2.53c), onde as diagonais desta treliça variam de 4,5 a 7 m de comprimento, além de um eixo central (FIG. 2.53d), denominado *flying mast*, que é sustentado por dezesseis cabos que, em suas extremidades, dividem-se em mais três, formando um tetraedro que descarrega os esforços de tração em três pontos da treliça que compõe o anel. Todos os cabos convergem para um único nó localizado na base do mastro, o que garante seu posicionamento e a aparente flutuação (SILVA e FAKRI, 2000).

Para a vedação da cobertura, foi utilizado vidro (FIG. 2.53e) e tecido de fibra de vidro, coberto por Teflon Polivinílico Tetrafluoretileno (PTFE), FIG. 2.53f, sendo que as

placas de vidro não foram apoiadas na membrana, e sim fixadas em uma estrutura auxiliar composta por cabos que passa sobre o tecido (SILVA e FAKRI, 2000).



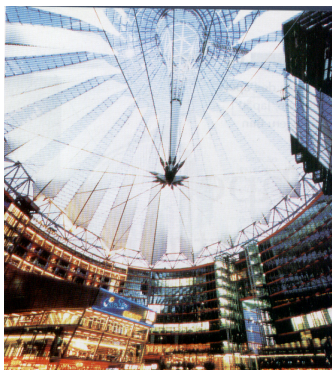
(a) Vista geral do complexo.



(b) Cobertura em forma de cone assimétrico.



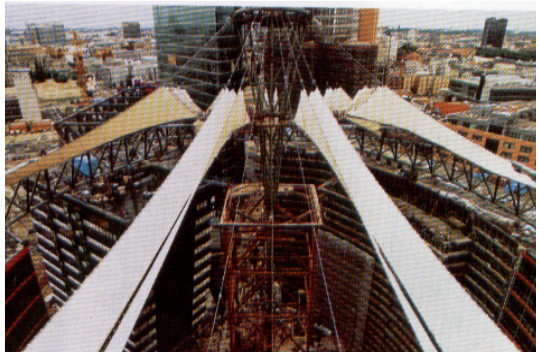
(c) Anel de compressão.



(d) *Flying mast.*



(e) Vidro da cobertura.



(f) Membrana.

FIGURA 2.53 – Sony Center (SILVA e FAKRI, 2000).

2.7.3 Blur Building

Projetado pelo escritório americano Diller+Scofidio, em parceria com o Ear Studio, o Blur Building é uma instalação temporária para a Swiss National Expo 2002, sendo construída no lago Neuchâtel, em Yverdon-les-Bains (SILVA, 2000a).

Blur significa embaçado, nebuloso e, para apresentar este conceito de forma literal, foi utilizada uma nuvem artificial (FIG. 2.54) como fechamento da instalação. Esta nuvem é obtida por doze mil e quinhentos jatos de alta pressão, comandados por computador, sendo que a água que propicia o vapor que escoa pelos jatos é a do próprio lago (SILVA, 2000a).

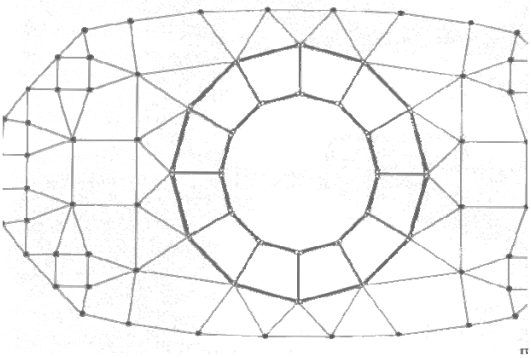
Para se obter o efeito de leveza necessário ao conceito de nuvem, foi utilizado uma estrutura *Tensegrity*, que consiste em um núcleo de sustentação básico da instalação, composto por um anel de doze pórticos (FIG. 2.55a), com 44 m de diâmetro, apoiados em blocos sobre estacas cravadas no fundo do lago (SILVA e FRANÇA, 2000), FIG. 2.55b e FIG. 2.55c.

Este núcleo serve de apoio a uma treliça espacial *Tensegrity* em balanço de até 30 m, que é responsável pela sustentação dos bicos que produzem a neblina (SILVA e FRANÇA, 2000).

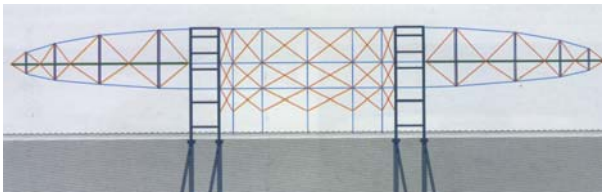
A FIG. 2.56 apresenta a comparação do caminhamento dos esforços em uma treliça convencional e uma *Tensegrity*.



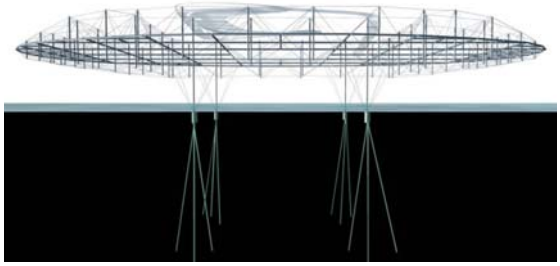
FIGURA 2.54 – Vista do Blur Building (ZOLI, 2007).



(a) Anel de sustentação e malha estrutural.



(b) Corte esquemático da estrutura.



(c) Elevação lateral da instalação.

FIGURA 2.55 – A estrutura *Tensegrity* do Blur Building (SILVA e FRANÇA, 2000; ZOLI, 2007).

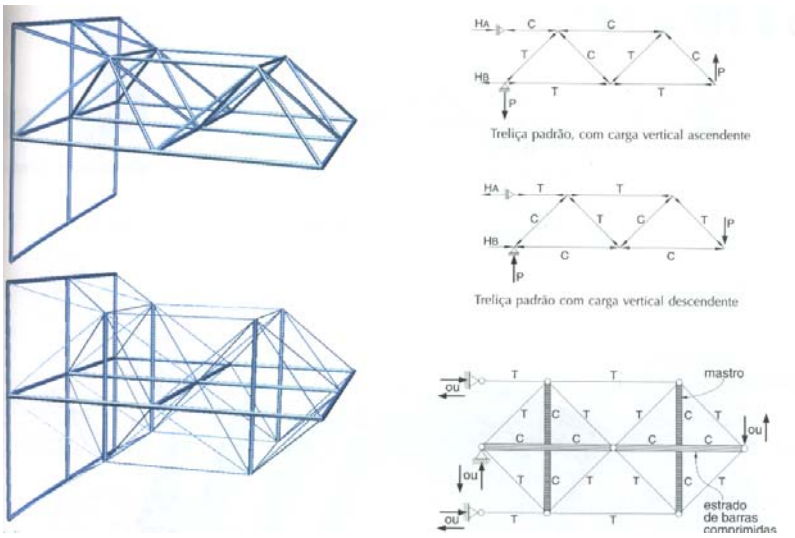


FIGURA 2.56 – Comparação do caminhamento dos esforços em uma treliça convencional e uma *Tensegrity* (SILVA e FRANÇA, 2000).

2.7.4 Torre de *Rostock*

Construída em Rostock, na Alemanha, a torre possui 62,3 m de altura e foi erigida como novo símbolo da feira desta cidade (FIG. 2.57). Projetada pelo escritório *von Gerkan, Marg und partner*, teve como responsável pelo projeto estrutural o escritório *Schlaich Bergermann und partner* (ZOLI, 2007).



FIGURA 2.57 – Torre de Rostock (ZOLI, 2007).

Finalizada em 2003, trata-se de uma torre *Tensegrity* de classe 2, formada pela sobreposição vertical de seis simplex (módulo *Tensegrity* mais simples), sendo que cada um destes módulos possui 8,3 m de altura (ZOLI, 2007).

O força de pré-tensionamento (protensão) dos cabos diagonais é de 1.200 kN e, para as barras comprimidas, 1.500 kN (ZOLI, 2007), sendo o peso total da estrutura igual a 50 t (ZOLI, 2007).

Mesmo não sendo uma estrutura para uso arquitetônico, e sim como monumento, é um exemplo de como a torre *Tensegrity* tem potencial para uso na construção civil, tal como coluna para uma estrutura mais complexa, como é o caso do próximo exemplo.

2.7.5 Sherwood Forest Visitor Complex

Mesmo já tendo sido apresentado como exemplo de sistemas de montagens tridimensionais (item 2.5.3.3, FIG. 2.37), este projeto também é um exemplo de arquitetura fora dos parâmetros convencionais, onde o sistema *Tensegrity* propiciou uma concepção de projeto dentro do conceito desejado pelos arquitetos.

O escritório Make, vencedor do concurso de anteprojeto para o Sherwood Forest Visitor Complex (localizado no município de Nottinghamshire, United Kingdom), FIG. 2.58, investigou diversas opções de sistemas estruturais e concluiu que a solução mais apropriada seria uma estrutura *Tensegrity* para diversos elementos arquitetônicos que compõem o projeto.



FIGURA 2.58 – Vistas do Sherwood Forest Visitor Complex
(MAKE ARCHITECTS, 2007).

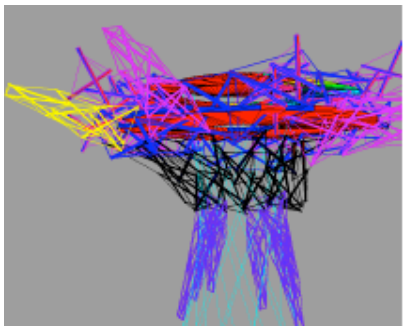
As características do *Tensegrity* propiciam a sensação de barras flutuantes ao redor do mirante localizado no topo da coluna. Esta coluna, que representa o tronco da árvore, é composta por peças de madeira (utilizados em seu estado natural), que formam um parabolóide (MAKE ARCHITECTS, 2007).

O projeto irá transformar o local a ser implantado em uma opção para lazer, preservação da memória local, educação, conservação da natureza e sustentabilidade, enquanto promove o município e a comunidade local.

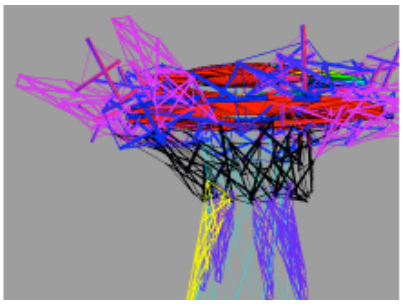
A proposta foi inspirada no desejo de capturar as qualidades únicas de uma casa da árvore. O partido arquitetônico consiste em um tronco que emerge de uma base estrutural que aparenta ser um reticulado de raízes radiais na base (FIG. 2.59), e eleva-se 20 m acima dos galhos até uma cobertura (dossel) no topo.



(a) Modelo em escala reduzida.



(b) Módulo como galho (em amarelo).



(c) Módulo como raiz (em amarelo).

FIGURA 2.59 – Módulo *Tensegrity* (MAKE ARCHITECTS, 2007).

As principais instalações para visitantes estão localizadas no nível térreo, onde o tronco possui uma escada que direciona o turista a um restaurante e um mirante disposto dentro da copa (dossel) da construção, que propicia um vista para a antiga floresta.

Ao redor do local, novos ambientes, como pradaria, grama, pântano e bosque, serão criados para servir como um recurso educacional.

Uma disposição de turbinas de vento, localizada nas proximidades do bosque de arbustos, irá gerar eletricidade para o complexo, enquanto o próprio bosque irá fornecer combustível para um sistema de aquecimento, por meio de biomassa. Outras medidas de sustentabilidade, incluindo coleta de água da chuva e sistemas de reciclagem de resíduos, serão implantados (MAKE ARCHITECTS, 2007).

2.7.6 Projetos e propostas

No campo da construção civil em geral, e na arquitetura em particular, poucos exemplos de sistemas *Tensegrity* construídos podem ser listados. Entretanto, no campo das idéias, diversos esboços e anteprojetos podem ser apresentados, o que mostra o grande potencial que representa este tipo de estrutura.

A seguir, serão apresentadas imagens de algumas idéias que se encontram nas pranchas de arquitetos e designers, ou em fase de pesquisa para aplicação futura.

2.7.6.1 Treliça espacial *Tensegrity*

Dentre alguns tipos, a treliça da FIG. 2.60 (que já foi apresentada neste trabalho), está em fase avançada de pesquisa, sendo objeto de estudo de tese de doutorado na Suiça por FEST (2003).

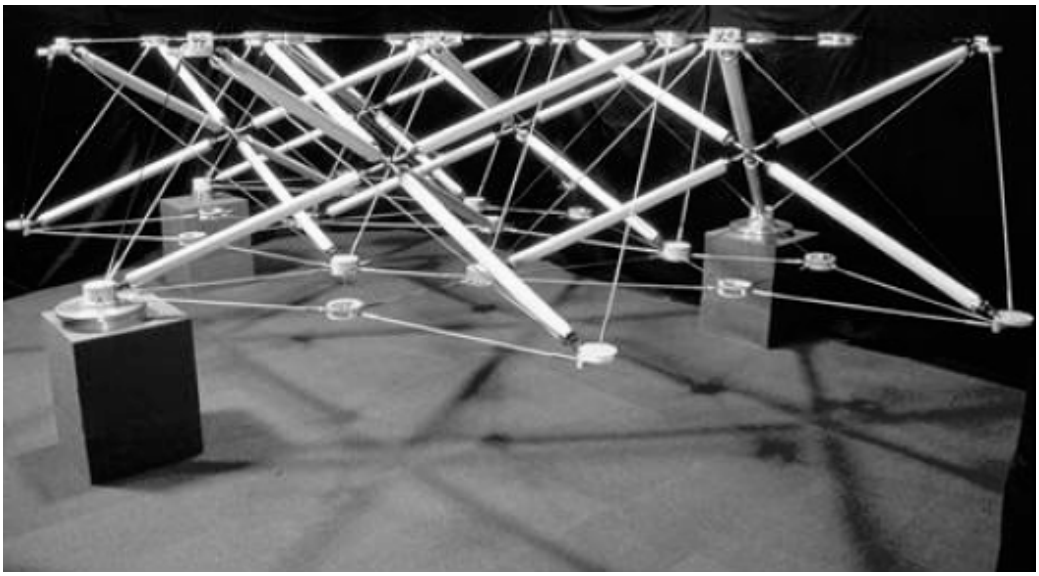
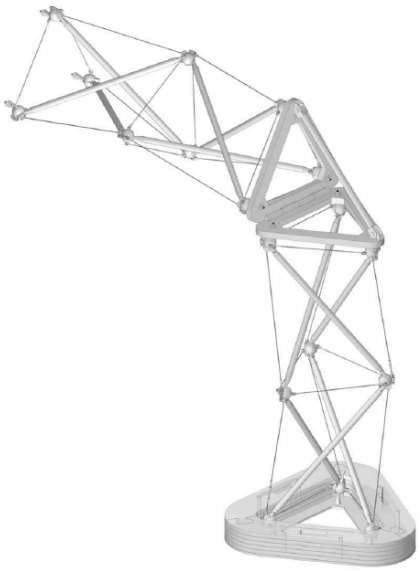


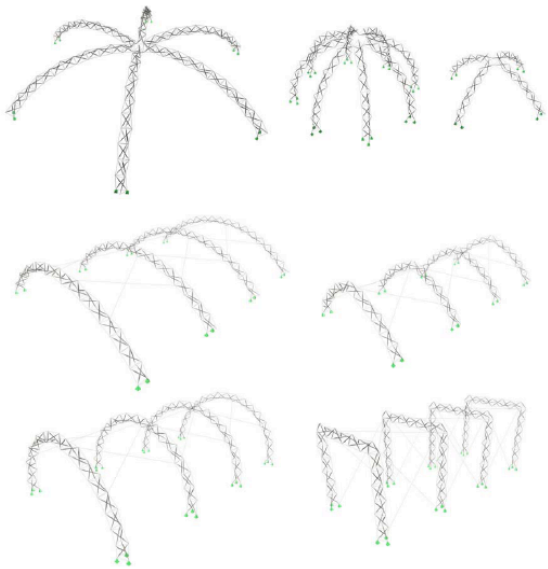
FIGURA 2.60 – Treliça espacial *Tensegrity* (FEST, 2003).

2.7.6.2 Mastro *Tensegrity*

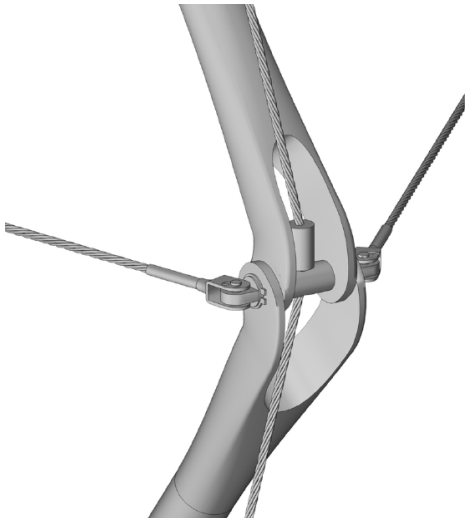
ZOLI (2007), em sua tese de doutorado intitulada Tecnologie Innovative Leggere Applicate all'Architettura Transitória: l'Ipotesi delle Strutture Tensegrali, propõe um sistema de mastro de *Tensegrity* desmontável (pelo sistema pantográfico), em forma de arco, que serve como estrutura para abrigos temporários (FIG. 2.61).



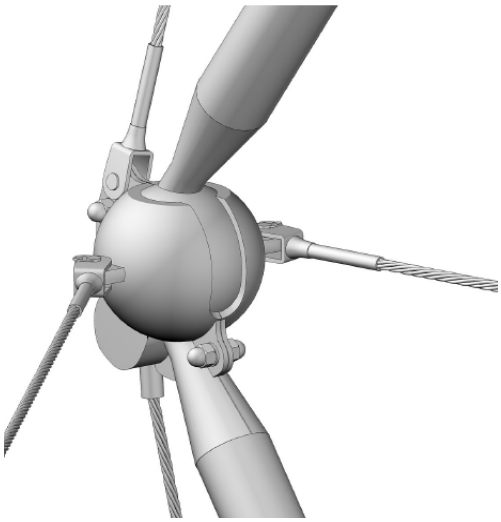
(a) O módulo básico.



(b) Possibilidades de uso.



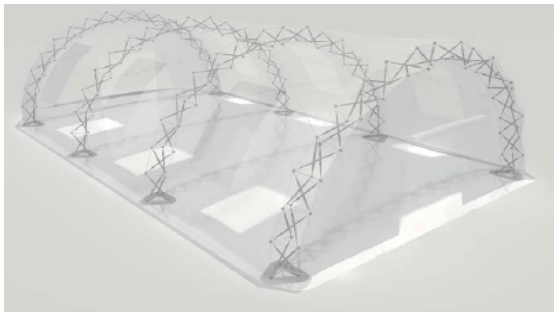
(c) Detalhe do nó.



(d) Detalhe do nó.



(e) Perspectiva humanizada do abrigo.

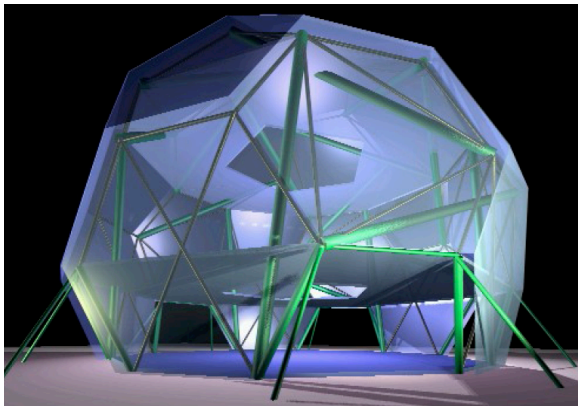


(f) Perspectiva da estrutura.

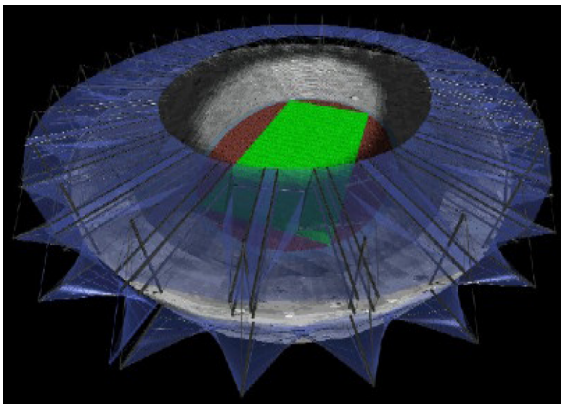
FIGURA 2.61 – Mastro *Tensegrity* (ZOLI, 2007).

2.7.6.3 Outros projetos

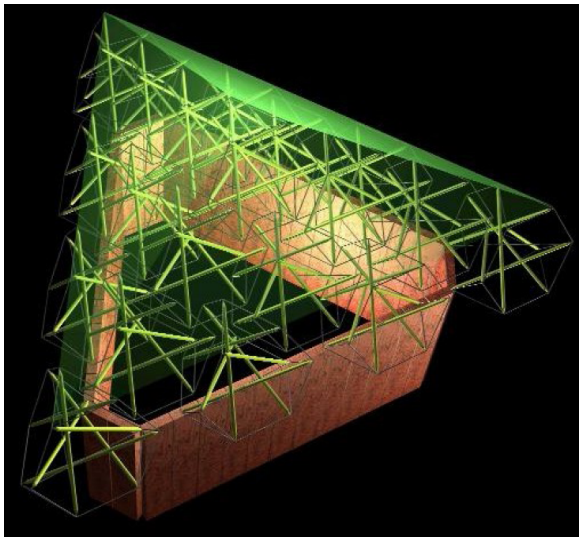
Intitulada Tensegrity structures and their Application to Architecture, a dissertação de mestrado de JÁUREGUI (2004) apresenta algumas possibilidades de uso das estruturas *Tensegrity* na arquitetura. Dentre elas tem-se: domo *Tensegrity* formado por um icosaedro truncado (FIG. 2.62a), cobertura para estádios (FIG. 2.62b), cobertura piramidal (FIG. 2.62c) e passarela (FIG. 2.62d).



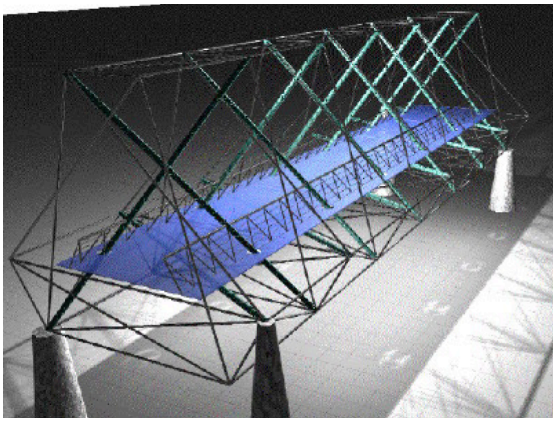
(a) Domo.



(b) Cobertura para estádios.



(c) Cobertura piramidal.



(d) Passarela.

FIGURA 2.62 – Outras propostas para estruturas *Tensegrity* (JÁUREGUI, 2004).

3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

A implementação física dos sistemas estruturais *Tensegrities* exige que se façam uma série de ajustes dos componentes entre si, o que leva em conta as geometrias e propriedades constitutivas das diferentes unidades, incluindo-se aí as conexões. Normalmente, essa riqueza sintática dos objetos é abstraída das soluções numéricas e analíticas.

Por essa razão, a implementação de novos sistemas estruturais exige que se façam modelos físicos reduzidos, denominados de modelos conceptivo-processuais. O desenvolvimento desses modelos é o que denominamos experimento de design.

3.1 Experimento de design

O conceito de experimento de design vem sendo desenvolvido pelo professor Luís Eustáquio Moreira, co-orientador deste trabalho, em seu pós-doutorado. Tanto a

montagem do modelo conceptivo-processual de bambu quanto a do metálico são instrumentos deste conceito de experimento.

O modelo conceptivo-processual auxilia a conformação da estrutura à organização proposta por meio de:

- Confirmação da exeqüibilidade do protótipo
- Manifestação dos pontos críticos
- Manifestação das insuficiências sintáticas
- Exposição das escalas e princípios de funcionamento
- Orientação da montagem do protótipo
- Orientação dos passos de desenvolvimento da pesquisa
- Ajuste dos componentes à organização

3.1.1 Desenvolvimento e implementação da estrutura *Tensegrity*

A primeira questão de design que surge a partir do sistema estrutural, é definir os novos comprimentos das barras que não convergem para um único ponto, bem como o comprimento dos rasgos (ou fendas) nas extremidades das barras, que irão receber os tendões dos elementos vizinhos, de forma a manter o funcionamento *Tensegrity*, ou seja, que as barras não se toquem entre si.

Pela própria filosofia do experimento de design, o modelo conceptivo-processual não necessita ser feito com os mesmos materiais do protótipo. Por uma questão de economia e facilidade de manuseio, o primeiro modelo, que orientou a implementação do *Tensegrity*, utilizou tubos de bambu e cordões de algodão.

Desse estudo resultou que, para o adequado funcionamento da Geodésica *Tensegrity*, as barras deveriam ter um comprimento de: a = 44,5 cm e b = 50,2 cm; ou seja, a = 0,74R e b = 0,84R; ao invés de a = 0,55R e b = 0,62R (que correspondem aos fatores de corda para as barras que convergem para um único ponto, FIG. 2.44 e FIG. 2.45). Do mesmo modo, o experimento apontou rasgos com comprimentos iguais a 2 cm para as barras de 44,5 cm e iguais a 2,2 cm para as barras de 50,2 cm como solução adequada ao problema de design colocado. A FIG. 3.1 apresenta o comprimento inicial da barra e o respectivo acréscimo, que equivale a 35% do valor obtido com o novo fator de corda.

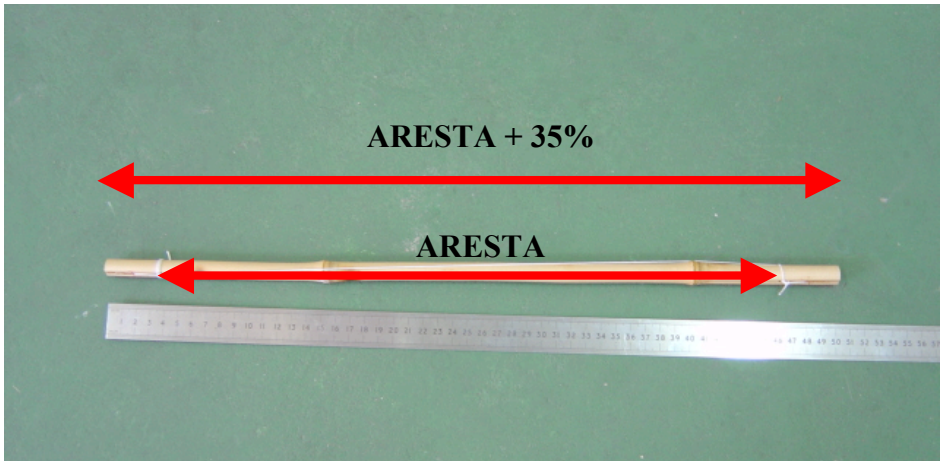


FIGURA 3.1 – Dimensão das barras.

A montagem do modelo foi realizada no LASE e procedeu-se de acordo com as seguintes etapas:

3.1.1.1 Preparação dos materiais componentes do modelo

- Cortes das barras

Foram cortadas as peças de bambu e os rasgos por onde passam os cordões de algodão, nas dimensões já descritas, e executados os furos para fixação destes cordões às barras (FIG. 3.2).

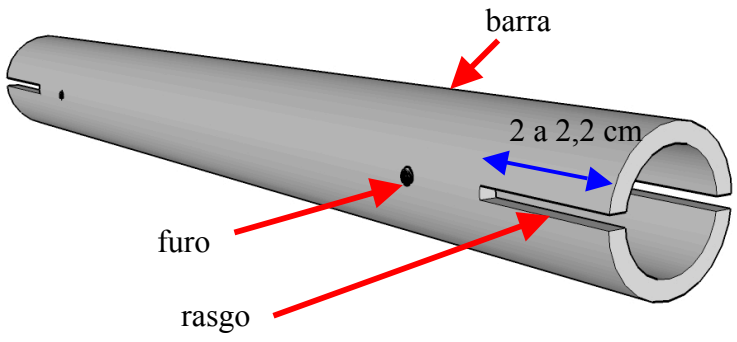


FIGURA 3.2 – Rasgo e furo de fixação do cordão de algodão à barra.

- Amarração dos cordões nas barras

Os cordões, uma vez fixados às barras, passaram pelos rasgos e foram presos na outra extremidade das barras. De acordo com a técnica de montagem de uma estrutura *Tensegrity*, cada barra possui um lado da frente e um posterior (FIG. 3.3). Assim, o cordão foi fixado diagonalmente em relação ao comprimento da barra e, posteriormente, tracionado.

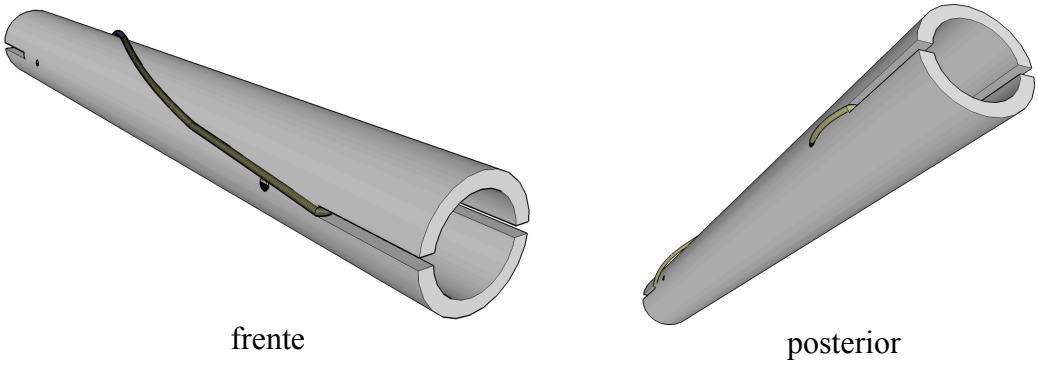


FIGURA 3.3 – Esquema de fixação do cordão à barra.

3.1.1.2 Montagem da primeira etapa do poliedro

Com o cordão de algodão voltado para cima, foram colocadas cinco barras dispostas de acordo com a FIG. 3.4, formando um vértice em forma de pentágono. É importante salientar que houve a necessidade de uso de fita adesiva nas pontas das barras para evitar que, durante a montagem das outras etapas, o cordão não se soltasse do rasgo e o modelo se desmontasse.

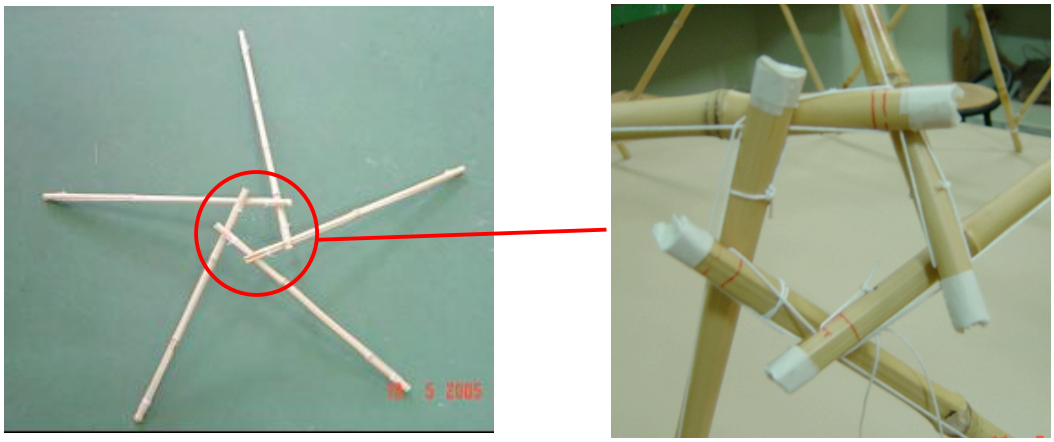


FIGURA 3.4 – Disposição das cinco primeiras barras.

Após o encaixe das cinco primeiras barras (com 44,5 cm de comprimento), foram fixadas nas bases de cada uma destas uma barra com 50,2 cm de comprimento e que foram, posteriormente, fixadas às barras adjacentes (FIG. 3.5).

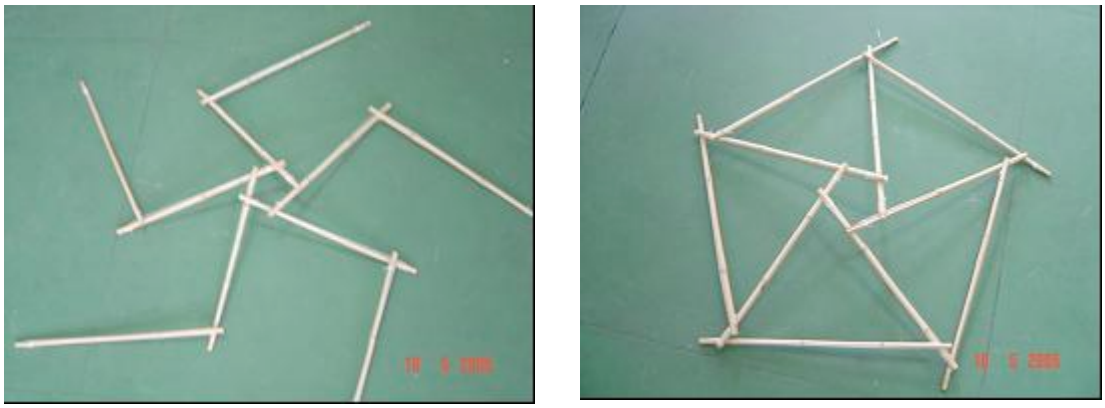


FIGURA 3.5 – Conclusão da primeira etapa da montagem do poliedro.

3.1.1.3 Montagem da segunda etapa do poliedro

Foram fixadas, então, duas barras, como apresentado na FIG. 3.6, sendo uma com dimensão de 44,5 cm e outra de 50,2 cm. Procedeu-se da mesma forma para os outros vértices até formar uma estrela de cinco pontas (FIG. 3.7).

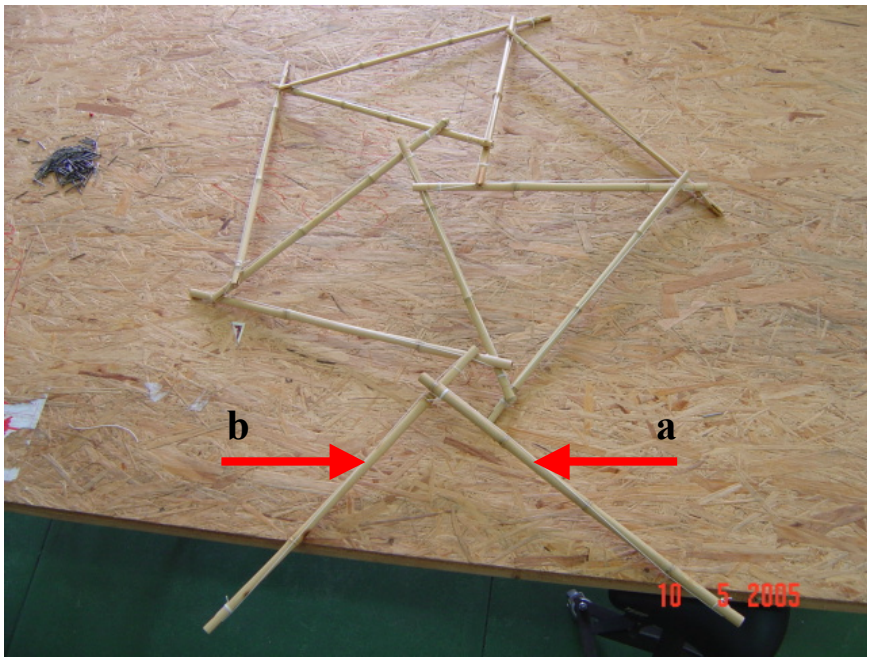


FIGURA 3.6 – Fixação das duas primeiras barras.

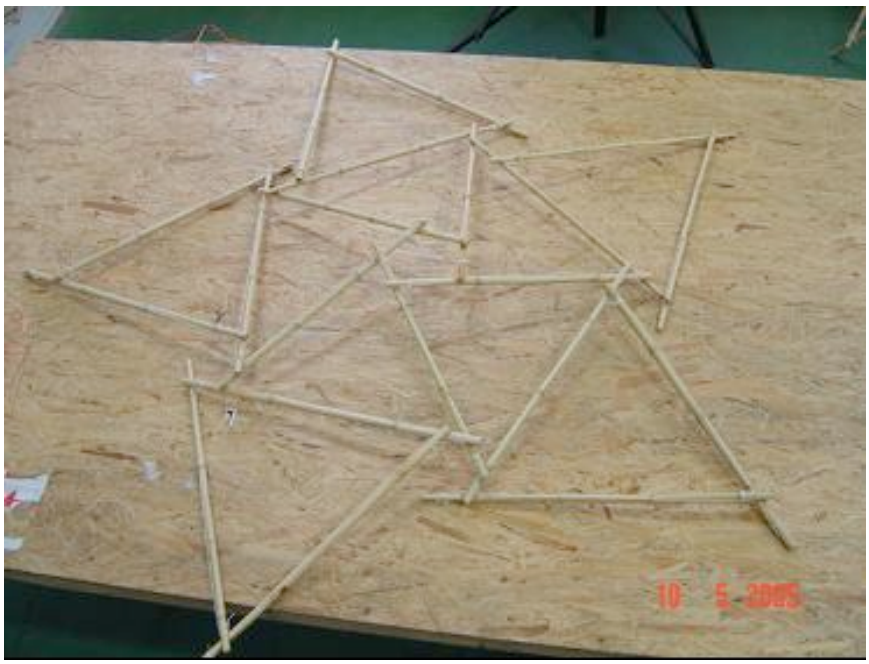


FIGURA 3.7 – Formação da estrela de cinco pontas.

Posteriormente, estas pontas foram unidas por barras cuja dimensão era de 44,5 cm (FIG. 3.8), completando assim a montagem da segunda etapa.

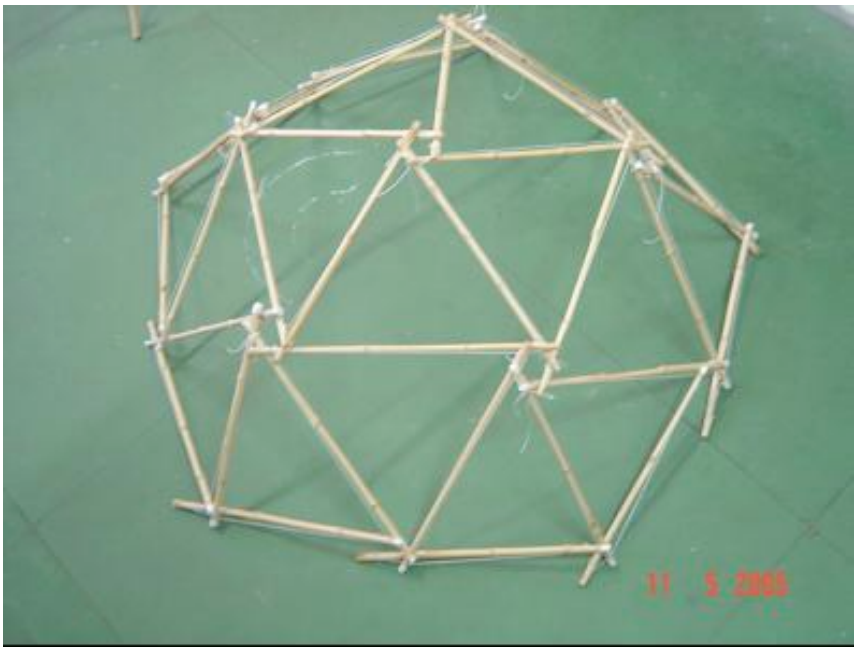


FIGURA 3.8 – Finalização da segunda etapa.

3.1.1.4 Montagem da etapa final do poliedro

Finalizando a montagem, foram fixadas as duas últimas barras (uma de 44,5 cm e outra de 50,2 cm) para cada vértice, sendo que, posteriormente, a estrutura foi erguida, atingindo assim sua forma final (FIG. 3.9).

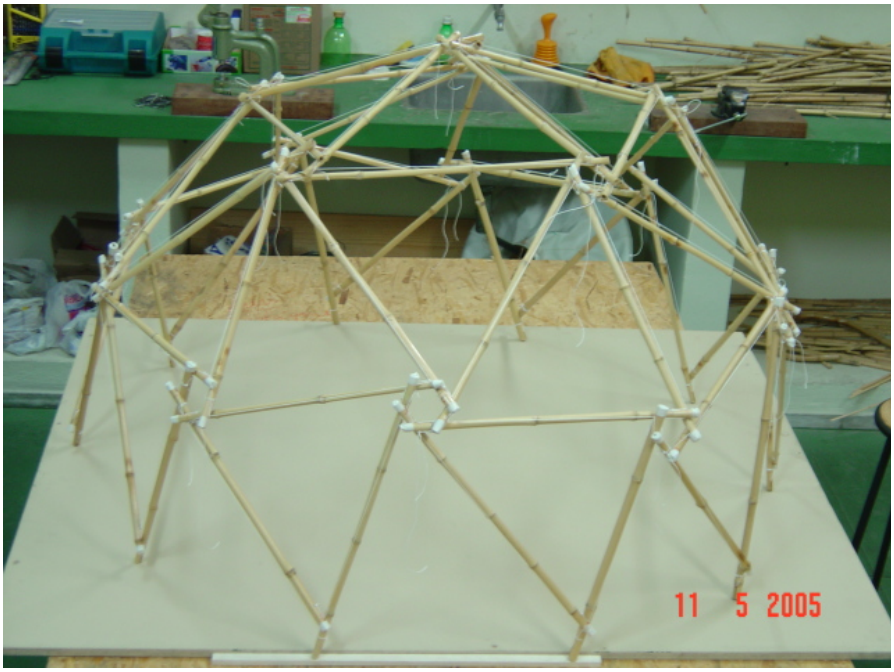


FIGURA 3.9 – Finalização do modelo da geodésica *Tensegrity*.

3.1.2 Modelo conceptivo-processual metálico

Uma vez tendo-se as definições dos comprimentos das barras e dos rasgos em suas extremidades, iniciou-se a construção de um segundo modelo, com materiais correspondentes ao futuro protótipo: tubos de alumínio e cordoalhas de aço inoxidável (FIG. 3.10).

A precisão dimensional e confirmação da exeqüibilidade, estados limites, detalhes e proporções corretas, possibilitaram que esse modelo fosse instrumentado, com a colocação de extensômetros elétricos de resistência (EER) (FIG. 3.11), sem, contudo, ser considerado como modelo reduzido oriundo da Análise Dimensional e Teoria da Semelhança.

Foram escolhidos, para o modelo conceptivo-processual, os seguintes materiais: para as barras comprimidas, perfis tubulares de alumínio de 9,6 mm de diâmetro e espessura de parede de 1,8 mm; e para os elementos tracionados, cordoalhas de aço inoxidável com proteção de *nylon*, com diâmetro nominal (que será melhor explicado no item 3.2) de 0,65 mm.

Os comprimentos das barras foram mantidos (a = 44,5 cm; b = 50,2 cm), aumentando os comprimentos dos rasgos, que passaram de 2 cm para 4,5 cm para as barras **a**, e de 2,2 cm para 5 cm para as barras **b**, ou seja, cerca de 10% do comprimento da barra. Estas alterações nos comprimentos dos rasgos permitiram maior facilidade durante a montagem do modelo conceptivo-processual, uma vez que havia um comprimento maior a ser percorrido pela cordoalha antes que a mesma pudesse se soltar da barra.

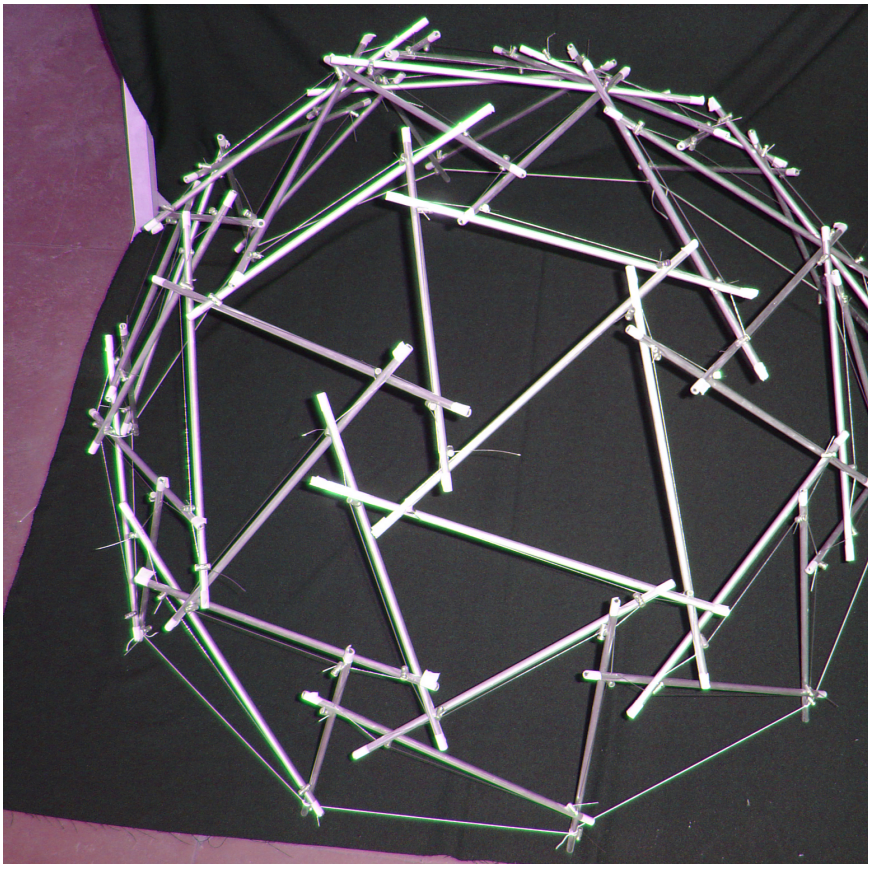


FIGURA 3.10 – Modelo conceptivo-processual composto por barras de alumínio e cordoalhas de aço.



FIGURA 3.11 – Modelo conceptivo-processual instrumentado.

O uso do modelo conceptivo-processual, entretanto, permite transcender ao primeiro uso a que se destina: auxiliar no desenvolvimento de novas propostas de sistemas estruturais. Uma outra utilidade para este pode ser visto como conseqüência do processo em si, que é a possibilidade de nova metodologia de aprendizado. O modelo conceptivo-processual permite reestruturar o objeto de estudo, sendo este o próprio veículo que mostrará (e, por sua vez, ensinará) o melhor caminho a ser seguido na continuação do desenvolvimento do sistema estudado (RIPPER e MOREIRA, 2004). Ou seja, o próprio

objeto retro-alimenta o processo. Foi este o caminho seguido ao longo da pesquisa da cúpula: a sua montagem, em escala reduzida, trouxe questionamentos e respostas aos mesmos antes da necessidade da montagem de um modelo reduzido, sem contudo ser um fator limitante no processo de criação inerentes a este tipo de modelo (precisão e rigor de detalhes, por exemplo).

Novamente, surgiu outro problema de design, para o funcionamento ótimo da estrutura: - como ancorar as cordoalhas ao tubo?

Para solucionar este problema, optou-se pela utilização de prensa-cabos GB-20 de latão (FIG. 3.12a), pois não existem grampos (FIG. 3.12b) capazes de fixar cordoalhas de seção tão reduzida quanto à especificada.



(a) Prensa-cabo.



(b) Grampo.

FIGURA 3.12 – Fixação das cordoalhas (CARL STAHL, 2001-2002).

O prensa-cabo GB-20 é utilizado como solução paliativa para fixação de sistemas de freios de modelos de automóveis antigos mas que, neste caso, teve seu uso adaptado para a montagem do modelo conceptivo-processual.

Salienta-se que nem todas as condições para o bom funcionamento de uma estrutura, ao ser implementada fisicamente, podem ser prescritas, pois advêm das singularidades dos componentes, quando as unidades perdem seus contornos fixos para fazerem parte de uma totalidade, um sistema integrado.

Surge, por exemplo, a necessidade de proteção dos cabos para evitar cisalhamentos junto aos rasgos, feitas no tubo para a passagem destes.

3.2 Projetos dos Experimentos Estáticos

3.2.1 O modelo

Os ensaios mecânicos estáticos deste trabalho não têm como objetivo levar a estrutura ao colapso, e sim verificar quantitativa e qualitativamente o comportamento da mesma à aplicação de cargas devido a ações diversas.

Para estes ensaios, foram definidas as seguintes aplicações de cargas:

- Aplicação de cargas em todos os nós.
- Aplicação de cargas nos cinco nós da parte superior da cúpula, que constituem os apoios do mezanino.
- Aplicação de cargas assimétricas, para simular ação de vento.

Em cada um destes ensaios, foram obtidas informações referentes às deformações dos elementos estruturais (cordoalhas e barras), deslocamentos nodais e simetria (ou não) do comportamento estrutural.

Para isto, foram colocados sensores em elementos estruturais previamente escolhidos, de forma a mais simétrica em relação ao eixo vertical da cúpula para se obter as seguintes medições: deformações uniaxiais e forças normais de tração e compressão e possíveis flexões nas barras. Desta forma, a cúpula foi dividida em dois setores e foram escolhidas três barras e cordoalhas por cada um destes setores, sendo que estes elementos estruturais são diametralmente opostos e possuem as mesmas dimensões e o mesmo posicionamento no sistema estrutural (FIG. 3.18).

Com base nos valores das deformações, obtidos por meio destes EER, e utilizando estes valores na equação de Hooke, obteve-se os valores das forças nos elementos estruturais instrumentados.

Foram utilizados EER da Kyowa (KFG-5-120-C1-11) para todos os elementos estruturais instrumentados.

3.2.1.1 Medições nas cordoalhas

Para todas as cordoalhas instrumentadas (num total de seis - FIG. 3.18), foram instalados um elemento constituído por chapa de aço inoxidável, cujas dimensões são apresentadas na FIG. 3.13. Nelas, foram fixados EER visando a medição das deformações e forças nas cordoalhas. Estas chapas possuem dois furos cada, por onde passa a cordoalha característica da estrutura da cúpula (FIG. 3.13).

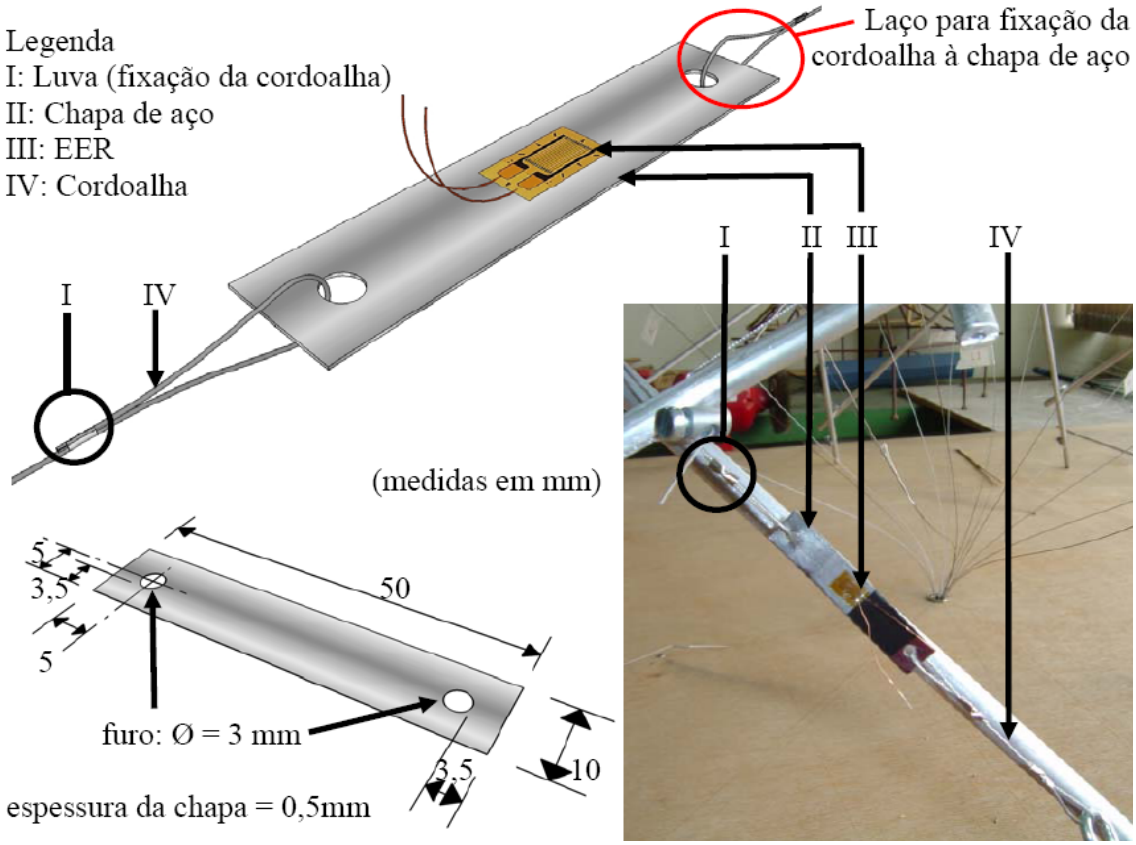


FIGURA 3.13 – Detalhe e foto da chapa de aço inoxidável.

Junto à chapa de aço inoxidável, foi colocado um esticador com gancho e olhal em aço galvanizado com 50 mm de comprimento (FIG. 3.14), que permitiu o tensionamento da cordoalha após a fixação do EER à chapa, sem que pudesse danificar o equipamento durante o seu manuseio.



FIGURA 3.14 – Esticador gancho / olhal em aço galvanizado com 50 mm de comprimento.

3.2.1.2 Medições nas barras: uso de EER ligados em ¼ de ponte

Em um dos dois setores da cúpula, foram fixados seis EER em três barras, ligados em ¼ de ponte (FIG. 3.15). Foram fixados dois EER em cada barra escolhida, em sua seção transversal central e diametralmente opostos (FIG. 3.16) para, como mencionado anteriormente, a medição das deformações uniaxiais e forças normais solicitantes e verificação de possíveis flexões nas barras.

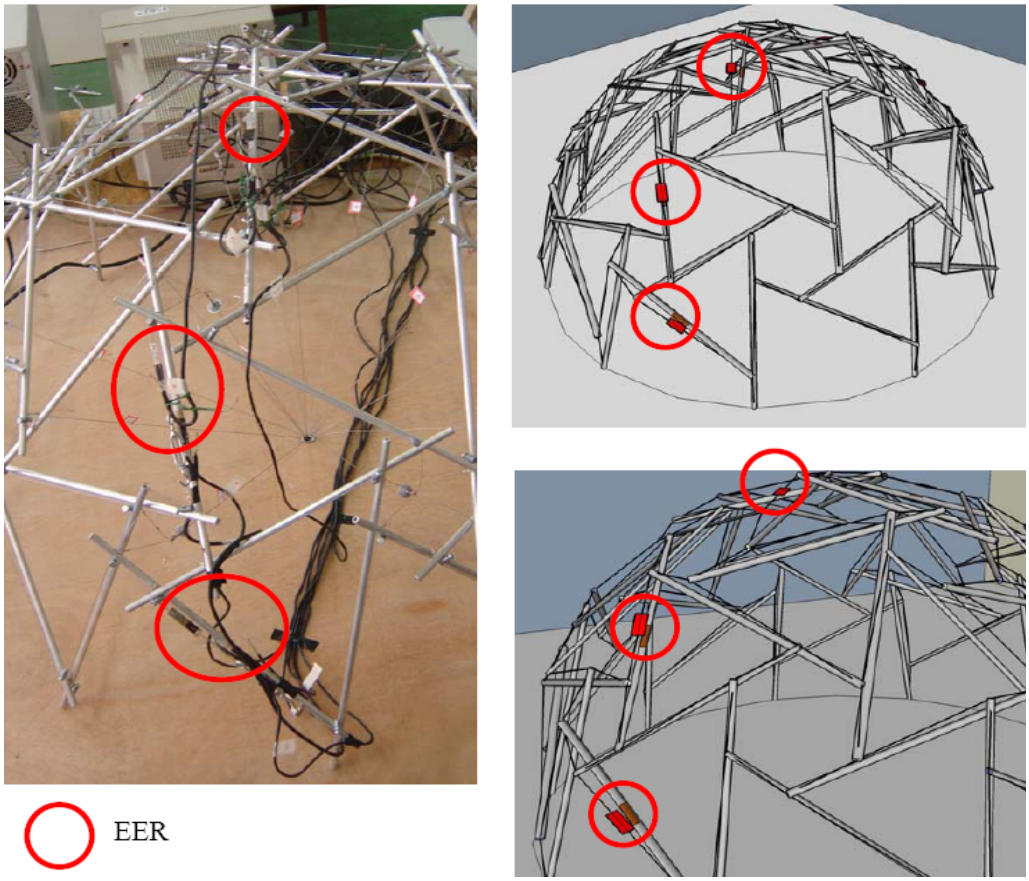
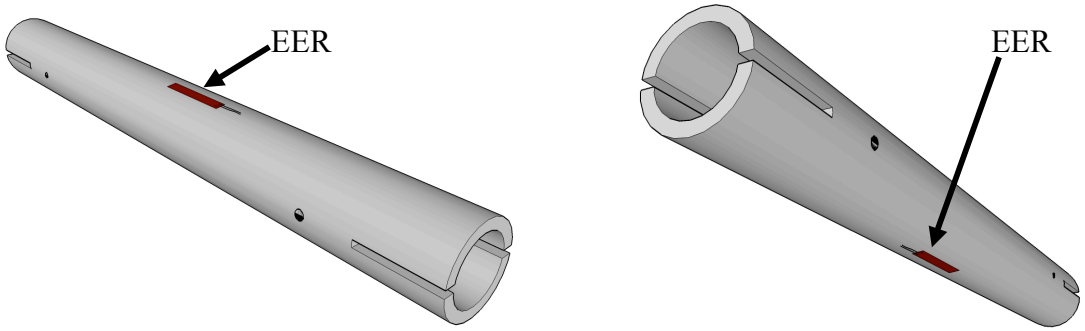


FIGURA 3.15 – Posicionamento dos EER nas barras e cordoalhas.



(a) EER na parte superior das barras.

(b) EER na parte inferior das barras.

FIGURA 3.16 – Posicionamento dos EER nas barras.

3.2.1.3 Medições nas barras: uso de EER ligados em ponte completa

Foram fixados, em três barras tubulares simetricamente opostas às citadas no item anterior, quatro EER ligados em ponte completa (FIG. 3.17), para cada uma destas barras, num total de doze EER.

Optou-se em utilizar quatro EER ligados em ponte completa para a medição das cargas de compressão nas barras do modelo, visando eliminar, nas medidas, o efeito das pequenas excentricidades que podem ocorrer na montagem das barras e de ligeiras imperfeições geométricas iniciais deste. Com isto, foi possível comparar as leituras obtidas nestas e nas barras instrumentadas com apenas dois EER.

Esta montagem consiste em dispor os EER ativos (1 e 3 da FIG. 3.17) em posições diametralmente opostas e na direção longitudinal das barras. Os EER compensadores (2 e 4 da FIG. 3.17) também são dispostos diametralmente opostos, mas na direção perpendicular às barras. Esta montagem não só elimina o efeito já mencionado anteriormente como também amplia a sensibilidade de deformação da barra (FILHO, OLIVEIRA e SILVEIRA, 1980).

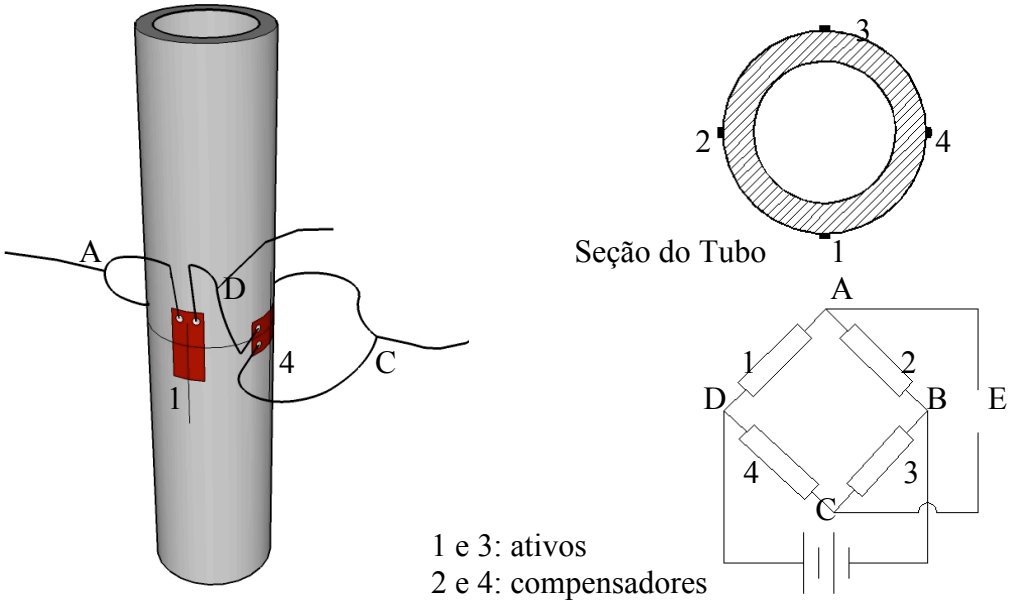


FIGURA 3.17 – Posicionamento dos EER ligados em ponte completa.

Operando em ponte de compensação, obtém-se a deformação por meio da equação $\varepsilon = \frac{L}{2 \times (1 + \mu)}$, onde L é a leitura no sistema de aquisição de dados e μ o coeficiente de Poisson do alumínio que, segundo Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2004), é igual a 0,33.

Esta disposição de EER é normalmente utilizada em certos tipos de células de carga, cujo alinhamento de seu eixo com a resultante das forças de compressão nem sempre é garantido (FILHO, OLIVEIRA e SILVEIRA, 1980). Ao se orientar os EER 2 e 4 (denominados de compensadores) na direção transversal à barra, "as saídas dos sinais de carga axial destes extensômetros serão de pequena magnitude, mas de sinais opostos às saídas dos sinais de carga axial dos extensômetros alinhados axialmente e suas saídas" não serão sensíveis a possíveis flexões (CARRASCO, 2003, p. 6.92).

Ao se comparar os resultados de células de carga com EER dispostos desta forma e as células de carga com um único extensômetro, verifica-se que há um ganho de sensibilidade de 2x(1+μ) (CARRASCO, 2003) presente na equação anteriormente citada.

Existem variações quanto ao número de EER, em ponte completa, utilizados em uma célula de carga solicitada à tração ou compressão. Entretanto, o aumento do número de EER não tem por objetivo aumentar a sensibilidade da ponte, e sim minimizar efeitos tais como excentricidades de cargas aplicadas, EER mal alinhados, defeitos de material, entre outros (CARRASCO, 2003).

3.2.1.4 Disposição e nomenclatura adotada para os EER fixados à estrutura

Todos os EER foram ligados a quinze canais do Sistema de Aquisição de Dados (SAD) e sua nomenclatura é apresentada nas FIG. 3.18 e 3.19.

Nessas figuras, as barras são denominadas em função dos respectivos EER, com a seguinte nomenclatura: barra EER N-O; barra EER K-L e barra EER H-I para EER colocados em 1/4 de ponte, e barra PC A, barra PC C e barra PC E para EER colocados em ponte completa (PC), conforme FIG. 3.17.

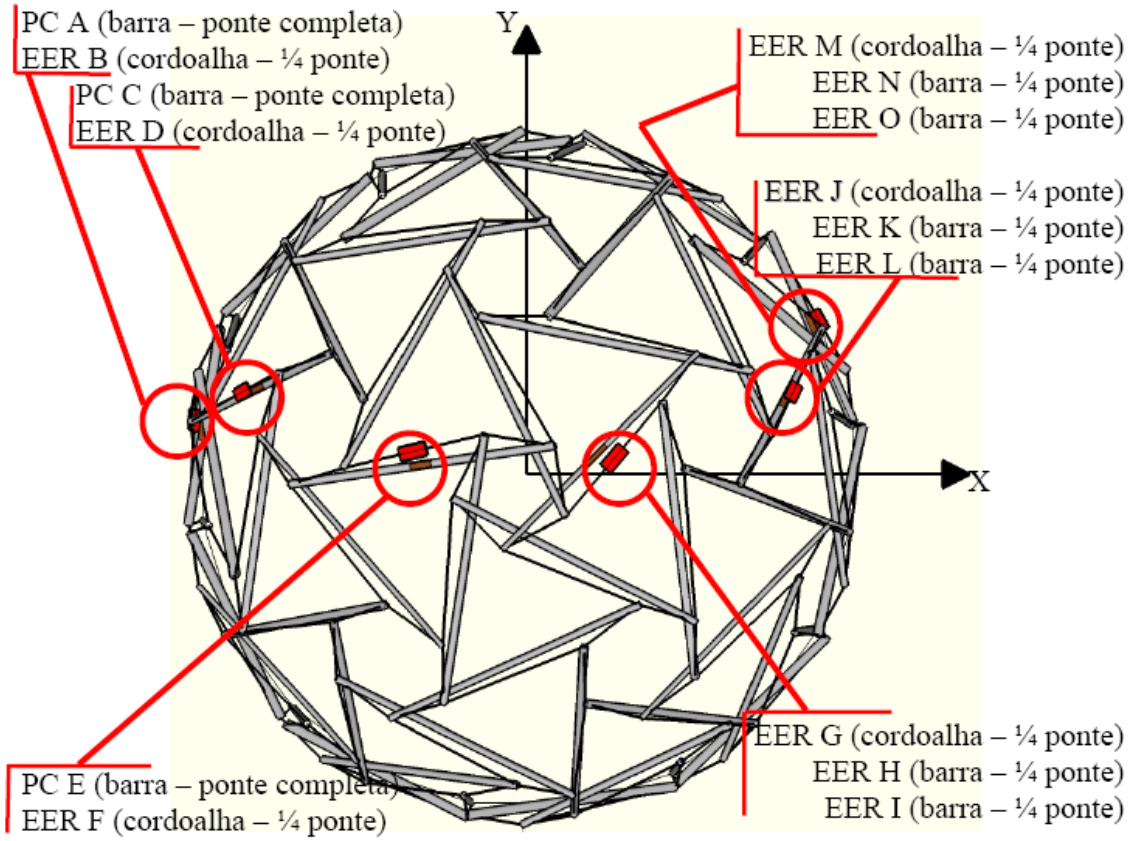


FIGURA 3.18 – Vista superior do modelo com a nomenclatura dos EER.

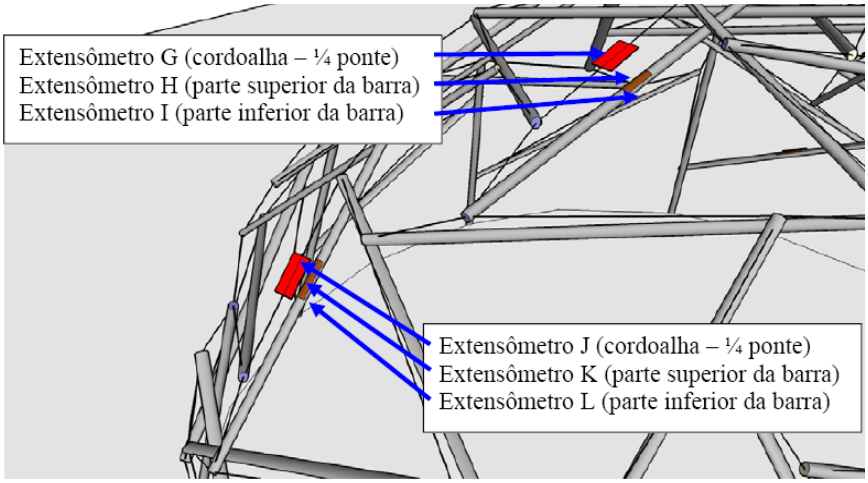


FIGURA 3.19 – Detalhe com a nomenclatura dos EER.

Para maior facilidade e organização dos dados obtidos nos ensaios, foi criada uma numeração para o conjunto de barras que caracterizam um nó.

Também foi criada uma numeração, em algarismo romano, para os dez apoios da estrutura. A configuração final e a numeração adotada são apresentadas na FIG. 3.20.

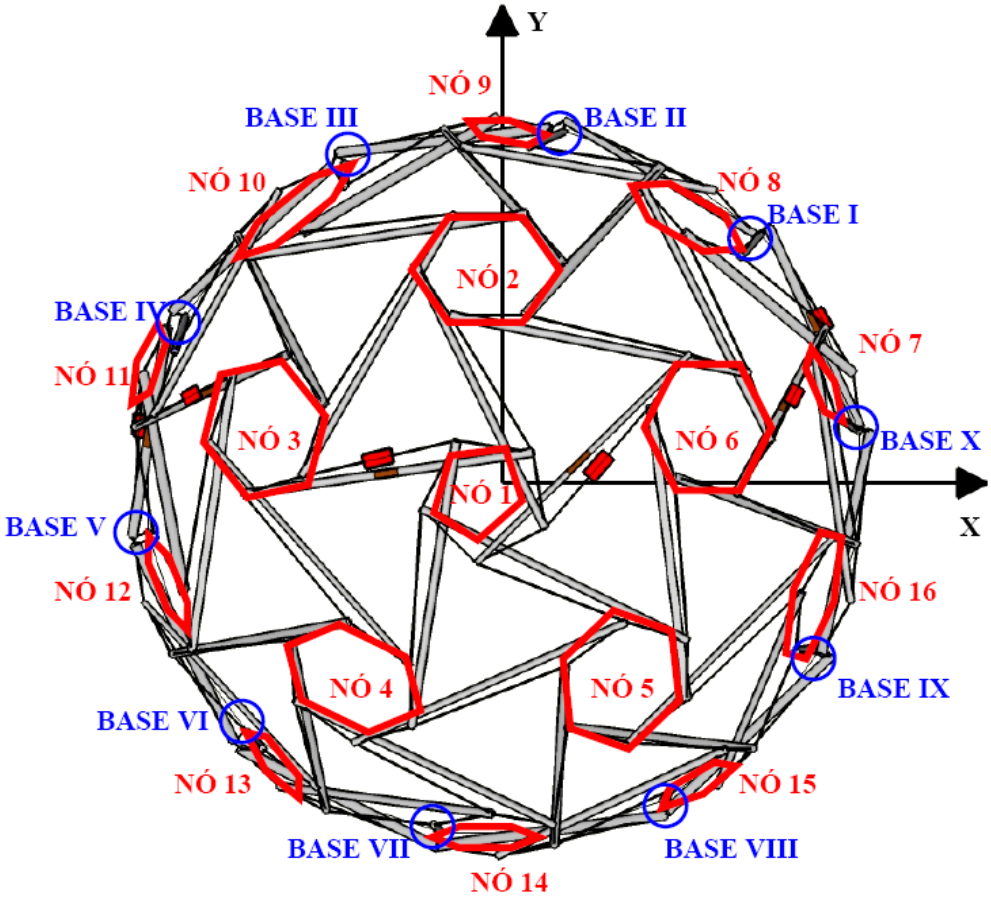


FIGURA 3.20 – Numeração dos apoios da cúpula (BASES).

3.2.1.5 Sistema de aplicação de carga

A Cúpula Geodésica *Tensegrity* foi colocada sobre uma base de aglomerado de madeira que, por sua vez, era apoiada em quatro colunetas constituídas por perfis de aço formado a frio.

No centro dessa base, foi feito um furo para a passagem do cabo de aço, elemento este ligado às cordoalhas fixadas a um sistema de tração dos nós (FIG. 3.21), compondo assim o sistema de aplicação de carga.

Para garantir a máxima uniformidade e simultaneidade na distribuição de cargas aplicadas, foram utilizadas cordoalhas de mesmo comprimento, tanto as que são fixadas aos nós (conjunto de cinco a seis cordoalhas, unidas em um único ponto), quando àquelas que ligam estas ao cabo de aço, fazendo pequenos ajustes para adaptar o sistema de transmissão de cargas a imperfeições geométricas existentes no modelo.

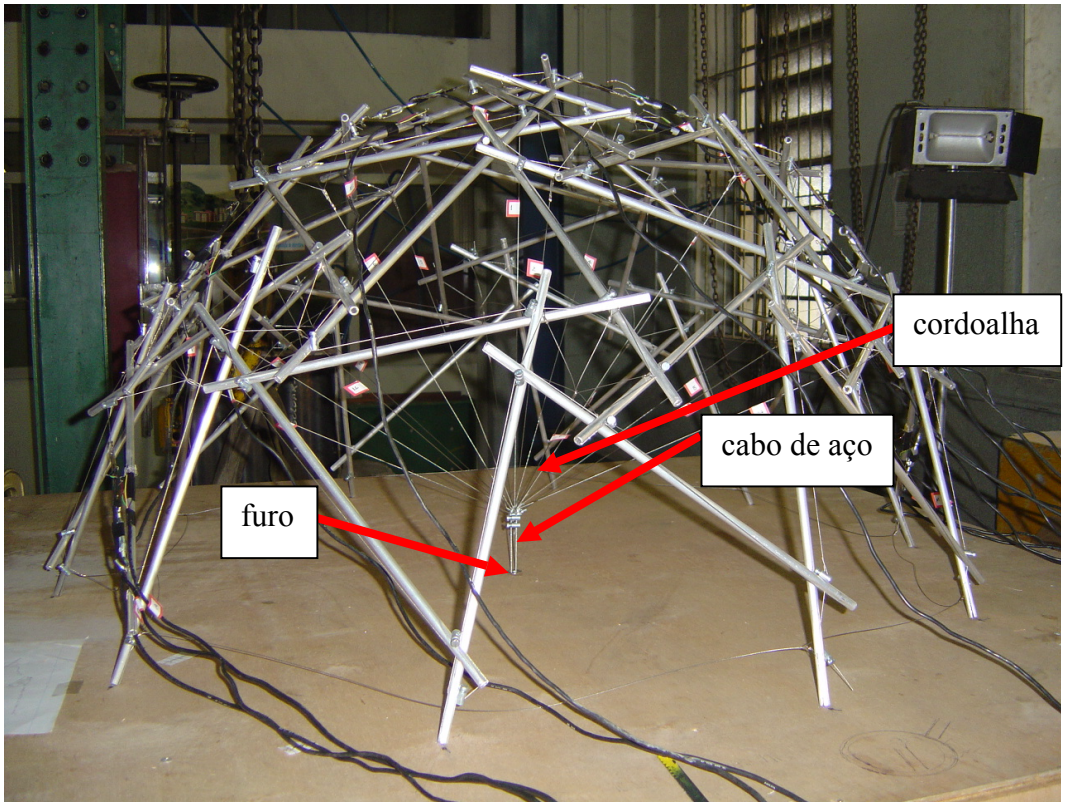


FIGURA 3.21 – Sistema de tração dos nós (continua).

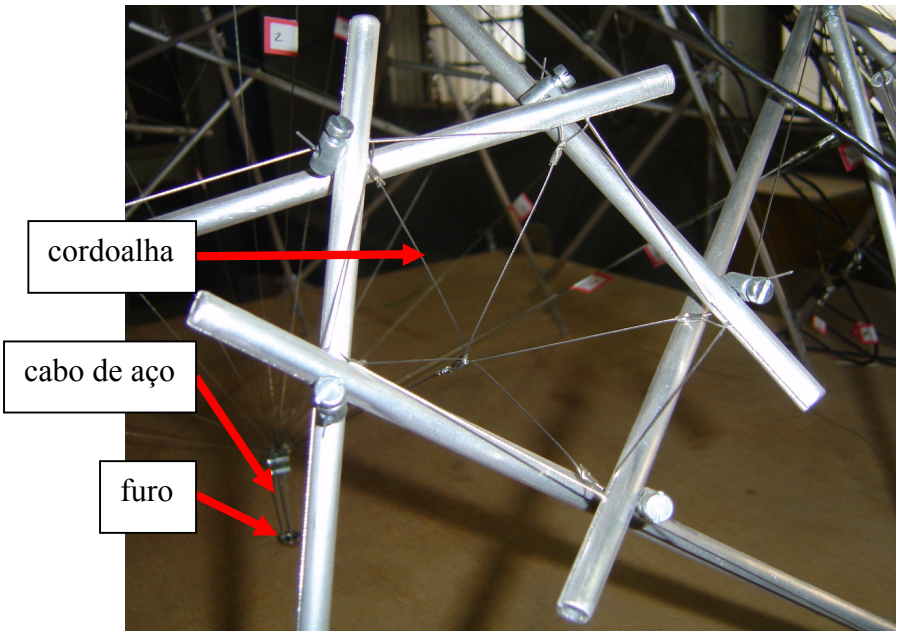


FIGURA 3.21 – Sistema de tração dos nós (conclusão).

Entretanto, imperfeições quanto à aplicação de cargas em função das dificuldades de se puxar os nós, por meio de cordoalhas, de forma igualitária, foram verificadas. Verificou-se a necessidade do uso de artifícios para controle e uniformização da tração das referidas cordoalhas (que será discutido no Capítulo 4), não sendo, contudo, viável para um modelo em escala reduzida em função de sua miniaturização.

Abaixo da base de compensado, foi acoplada, por meio de um mosquetão, uma célula de carga (CS 200) com capacidade para cargas de até 2 kN e sensibilidade de 2mV/V ± 0,1%, podendo trabalhar tanto à tração quanto à compressão. Esta célula de carga tem por objetivo medir a carga aplicada no sistema, nas diversas situações de ensaio.

À esta célula de carga foi acoplado, também por meio de um mosquetão, um cabo fixado a um macaco pantográfico acionado manualmente e com parafuso de força em rosca trapezoidal. Este macaco, soldado a uma barra metálica fixa à laje de reação do Laboratório de Análise Experimental de Estruturas da UFMG (LAEES), permitia que o sistema fosse puxado ou liberado, à medida que o mesmo era recolhido ou expandido, respectivamente. Todo o sistema é apresentado na FIG. 3.22.

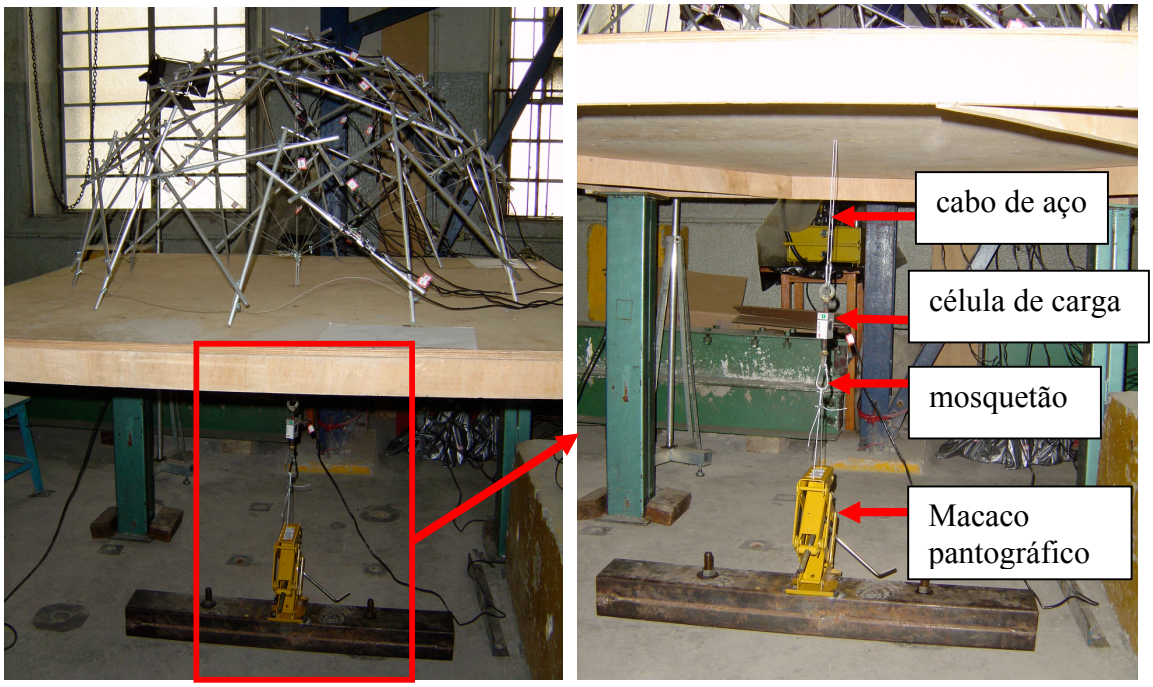


FIGURA 3.22 – Sistema completo de aplicação de carga.

3.2.1.6 Verificações quanto às resistências dos elementos estruturais

Antes do início dos ensaios, foram feitas algumas verificações quanto às resistências dos elementos estruturais envolvidos, especificamente: escoamento da cordoalha adotada; força normal de tração resistente de cálculo da chapa de aço inoxidável e força normal de compressão resistente de cálculo das barras de alumínio.

Segundo especificações do fabricante da cordoalha, o mesmo resiste a cargas de 355,84 N (CARL STAHL, 2006).

A título de verificação, mediu-se o diâmetro da cordoalha com paquímetro, obtendo-se o valor de 0,65mm. Esta medida foi obtida a partir da média de quatro valores de medições, em dois pontos da cordoalha, distantes no mínimo 30 vezes o diâmetro nominal e em dois planos distintos, conforme recomendações da CIMAF (2004), FIG. 3.23.

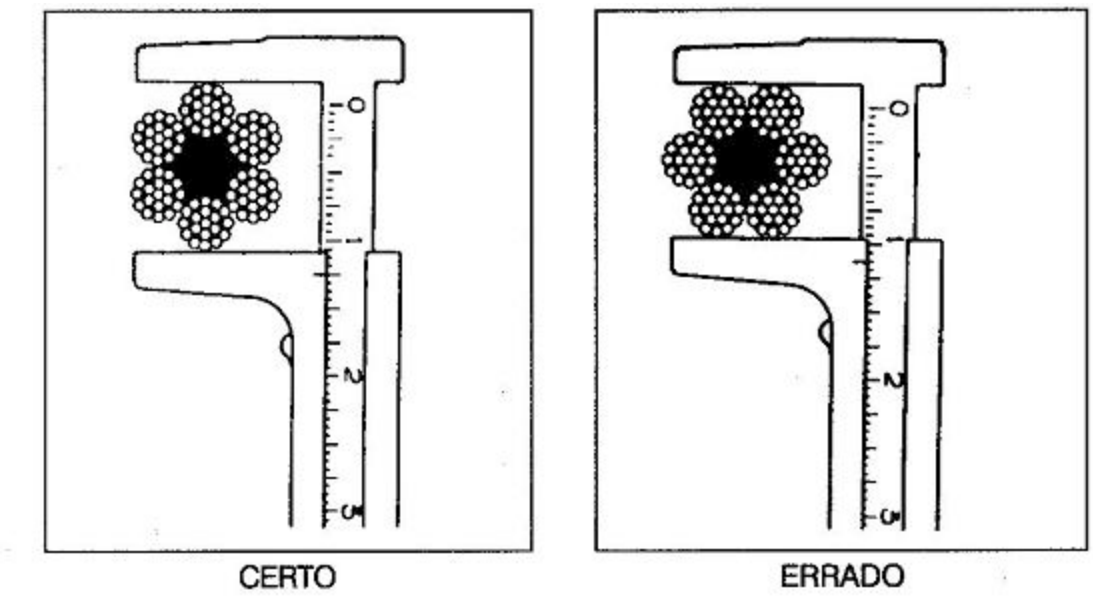


FIGURA 3.23 – Medição do diâmetro da cordoalha (CIMAF, 2004).

Para a força normal de tração da cordoalha de aço inoxidável, adotou-se a Eq. (3.1) (ANSI / ASCE-8-90, 1991):

$$\phi_t \, . \, T_n = 0{,}85 \, . \, A_n \, . \, F_y \tag{3.1}$$

Onde ϕ_t = 0,85, F_y = 758,5 MPa (para aço inoxidável temperado tipo 301) e A_n = 0,33 mm^2; sendo ϕ_t o fator de resistência para tração, T_n a resistência nominal para barras quando solicitadas à tração, A_n a área líquida da seção transversal e F_y a resistência ao escoamento do aço inoxidável.

O resultado obtido para a força normal de tração resistente de cálculo da cordoalha de aço inoxidável é igual a 212,76 N. Como foram aplicadas cargas de até 600 N distribuídas em 16 nós, o que teoricamente seria equivalente a aplicar 37,5 N por nó, sendo que cada nó é composto pelo conjunto de cinco ou seis elementos estruturais (cordoalhas e barras), não houve risco de ruptura das cordoalhas, permitindo a análise das deformações no modelo.

Para a força normal de tração das chapas de aço inoxidável, também adotou-se a Eq.(3.1), onde ϕ_t = 0,85 e F_y = 275,8 MPa (para aço inoxidável tipo 201). A área líquida da seção transversal A_n é obtida subtraindo da área da seção transversal da chapa, o

respectivo diâmetro do furo (as medidas da chapa foram apresentadas na FIG. 3.5), e seu valor é: 3,5 mm^2.

O resultado é que a força normal de tração resistente de cálculo da chapa de aço inoxidável é igual a 820,51 N, que é superior às cargas aplicadas nos ensaios.

Quanto à resistência à compressão das barras de alumínio, adotaram-se as Eq.(3.2) a Eq.(3.4) (ALUMINUM DESIGN MANUAL, 2005):

$$\phi F_L = \phi_{cc} \, . \, F_{cy} \tag{3.2}$$

para $\lambda \leq S_1$

$$\phi F_L = \phi_{cc} \, . \, (B_c - D_c * \lambda) \tag{3.3}$$

para $S_1 * < \lambda < S_2 *$

$$\phi F_L = \phi_{cc} \, . \, F_{cy} \, / \, \lambda^2 \tag{3.4}$$

para $\lambda \geq S_2$

onde:

$$\lambda = \left(\frac{kl}{r} \right) \left(\frac{1}{\pi} \right) \sqrt{F_{cy} / E} \tag{3.5}$$

$$D_c * = \pi \, . \, D_c \, . \sqrt{E / F_{cy}} \tag{3.6}$$

$$S_1 * = B_c - F_{cy} / D_c * \tag{3.7}$$

$$S_2 * = \frac{C_c}{\pi} \, . \, \sqrt{F_{cy} / E} \tag{3.8}$$

$$\phi_{cc} = 1 - 0{,}21\lambda \leq 0{,}95 \text{ para } \lambda \leq 1{,}2 \tag{3.9}$$

$$\phi_{cc} = 0{,}14\lambda + 0{,}58 \leq 0{,}95 \text{ para } \lambda > 1{,}2 \tag{3.10}$$

sendo que k = 1,0 (duas extremidades articuladas)(ABAL, 2001), comprimento da barra l = 42 cm, raio de giração r = 0,28, obtido pela equação $\sqrt{I/A}$, onde o momento de inércia I = 0,034 cm^4 e a área da seção transversal da barra A = 0,44 cm^2 para o tubo de diâmetro = 0,96 cm e espessura = 0,18 cm. Com estes dados, foi possível obter o índice de esbeltez λ = 2,805.

Foi adotado o alumínio de Liga 6061, têmpera T6, cujo Módulo de Elasticidade E = 69.600 MPa e resistência ao escoamento à compressão F_{cy} = 240 MPa (ALUMINUM DESIGN MANUAL, 2005).

Foram obtidos os valores de S_1* = 0,76 e S_2* = 1,11 e adotou-se a Eq. (3.4) para a determinação do estado limite de compressão ϕF_L = 2.842,75 N.

Para se obter os de S_1* e S_2*, foi necessário utilizar as equações (ALUMINUM DESIGN MANUAL, 2005):

$$B_c = F_{cy} \cdot \left[1 + \left(\frac{F_{cy}}{15510}\right)^{1/2}\right] \tag{3.11}$$

$$C_c = 0{,}14\ \frac{B_c}{D_c} \tag{3.12}$$

$$D_c = \frac{B_c}{10}\left(\frac{B_c}{E}\right)^{1/2} \tag{3.13}$$

3.2.2 Aplicação de cargas em todos os nós do modelo

Para estes ensaios, foram fixadas cordoalhas em todos os nós, e aplicada carga máxima de 600 N. Este valor foi escolhido pelo fato de que cargas próximas ou acima de 1 kN poderiam provocar o deslizamento das cordoalhas em relação às luvas (anéis de aço que fixam as cordoalhas por meio de pressão exercida por alicate) ou que duas ou mais barras se encostassem, sendo esta situação considerada limite para os ensaios realizados neste trabalho (evitando possíveis momentos nas barras).

Isto realmente aconteceu em um dos testes feitos no modelo conceptivo-processual antes de sua total instrumentação. Assim, optou-se em utilizar 60% desta carga pois, como descrito anteriormente, o objetivo destes ensaios não é levar a estrutura ao colapso, e sim verificar, quantitativamente, seu comportamento quanto a determinada aplicação de cargas.

Na aplicação de carga foram obtidas, inicialmente, as deformações tanto das barras tubulares quanto das cordoalhas instrumentadas. Posteriormente, foram colocadas quatro células de carga LM-100KA (capacidade de 1 kN, nº do lote: EN3620, classe G, da Kyowa) (FIG. 3.24), alternando sua colocação a cada quatro bases da estrutura, a fim de obter dados referentes às reações em todas as bases da cúpula para uma mesma carga. Para isto foram executados quatro ensaios.

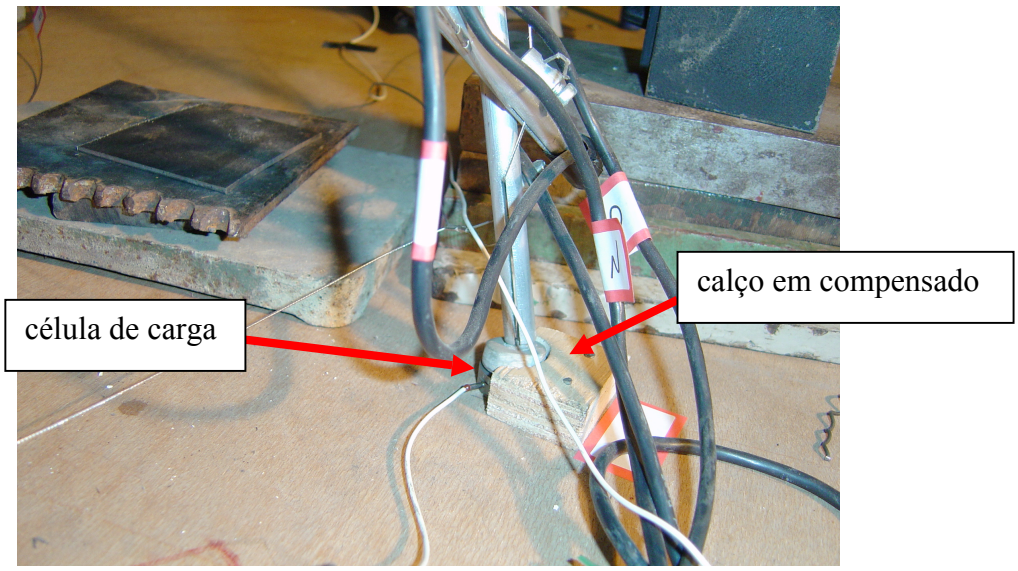


FIGURA 3.24 – Colocação das células de carga LM-100KA.

Também foram colocados relógios comparadores analógicos em treze dos dezesseis nós da estrutura com o objetivo de monitorar os deslocamentos nodais da cúpula.

3.2.3 Aplicação de cargas nos cinco nós da parte superior da cúpula

Para esta aplicação de carga, foram fixadas cinco cordoalhas nos nós 2 a 5 do topo da cúpula (FIG. 3.25). Este ensaio teve como objetivo simular um mezanino apoiado somente nos nós já descritos. Isto potencializaria o uso deste tipo de estrutura, uma vez

que a mesma poderia abrigar ambientes distintos em pavimentos diferentes (este assunto será melhor discutido no item 6.3).

Este ensaio foi realizado utilizando o mesmo sistema de carga do ensaio anterior, reduzindo a carga para 400 N por segurança. Isto se deve ao fato de que este valor provoca o encontro das barras que caracterizam o nó e, como já mencionado anteriormente, considerou-se esta situação como limite para os ensaios aqui apresentados.

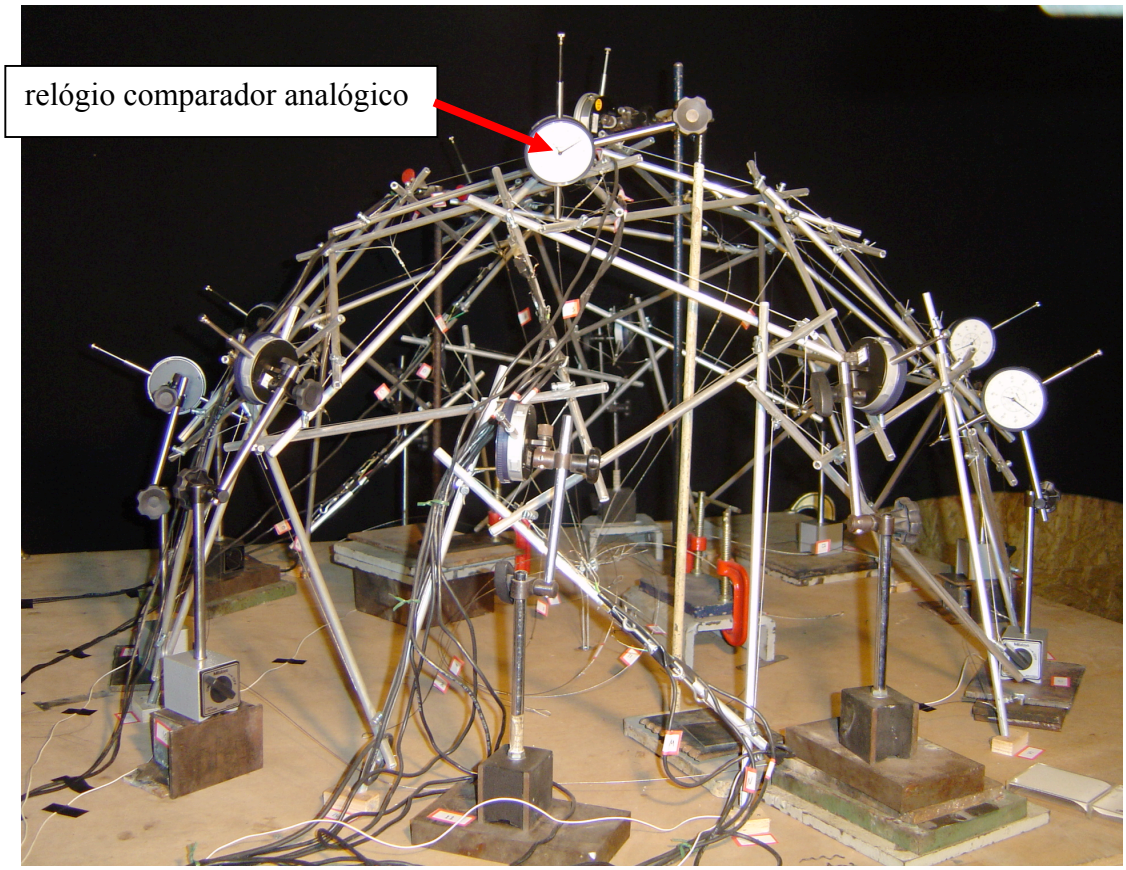


FIGURA 3.25 – Simulação de mezanino, mostrando os relógios comparadores para a medição dos deslocamentos radiais.

Foram também colocadas as quatro células de carga já mencionadas nas bases da cúpula, além da utilização de relógios comparadores analógicos, onde ambos os equipamentos foram utilizados da mesma forma que nos ensaios de cargas aplicadas em todos os nós.

3.2.4 Aplicação de cargas assimétricas

Este ensaio teve como objetivo a obtenção de informações quanto ao comportamento da cúpula em situações de aplicação de cargas assimétricas na estrutura.

Um possível carregamento assimétrico seria o efeito de vento. Entretanto, para verificação deste tipo de carga, haveria necessidade de uma investigação mais aprofundada, com utilização de modelos reduzidos em túneis de vento, ou ainda uma análise numérica via Método dos Elementos Finitos (LAZZARI *et al*., 2003).

Ambas as abordagens fogem ao escopo deste trabalho, uma vez que todos os ensaios são simulações de determinadas situações com base em um modelo conceptivo-processual para verificação do comportamento desta estrutura.

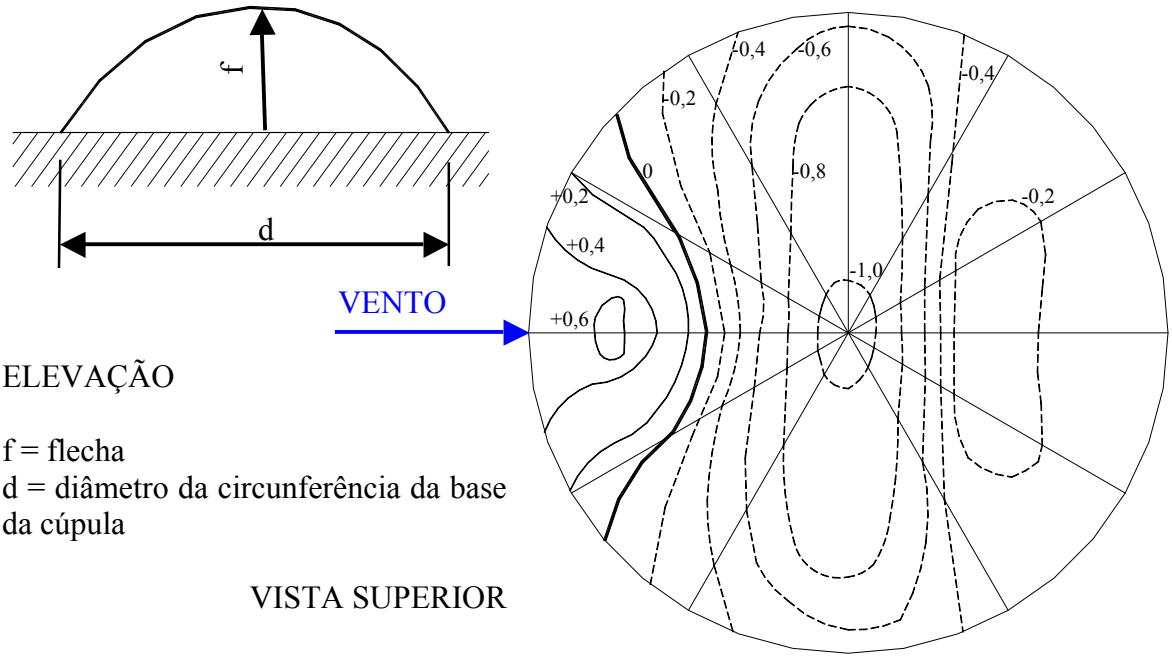
Assim, com o objetivo de uma primeira verificação do comportamento desta cúpula para cargas assimétricas, desenvolveu-se, de modo aproximado e simplificado, um ensaio com base nos coeficientes de pressão externa das linhas isobáricas de cúpulas cuja altura seja igual ao raio de sua base (FIG. 3.26).

Pode-se verificar que, ao sobrepor a planta da cúpula geodésica *Tensegrity* com a vista superior da cúpula com as linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa (FIG. 3.27), ocorreu uma coincidência entre um nó e a linha isobárica de sobrepressão de maior valor ($C_e = +0,6$).

Da mesma forma, o nó do topo da cúpula coincide com a linha isobárica de maior valor para o efeito de sucção, que equivale a –1,0.

Assim, para um ensaio simplificado, torna-se válido utilizar o sistema de tração das cordoalhas (utilizados nos demais ensaios) para puxar um determinado nó para a aquisição de dados referentes às possíveis deformações e deslocamentos da estrutura objeto de pesquisa.

Contudo, com apenas um passo de carga (equivalente a 49,03 N), as barras que compõem o nó se tocaram, não permitindo uma análise conclusiva quanto a este tipo de carregamento (este ensaio será analisado de forma mais aprofundada no Capítulo 4). Desta forma, sequer a carga que simula sucção foi aplicada.



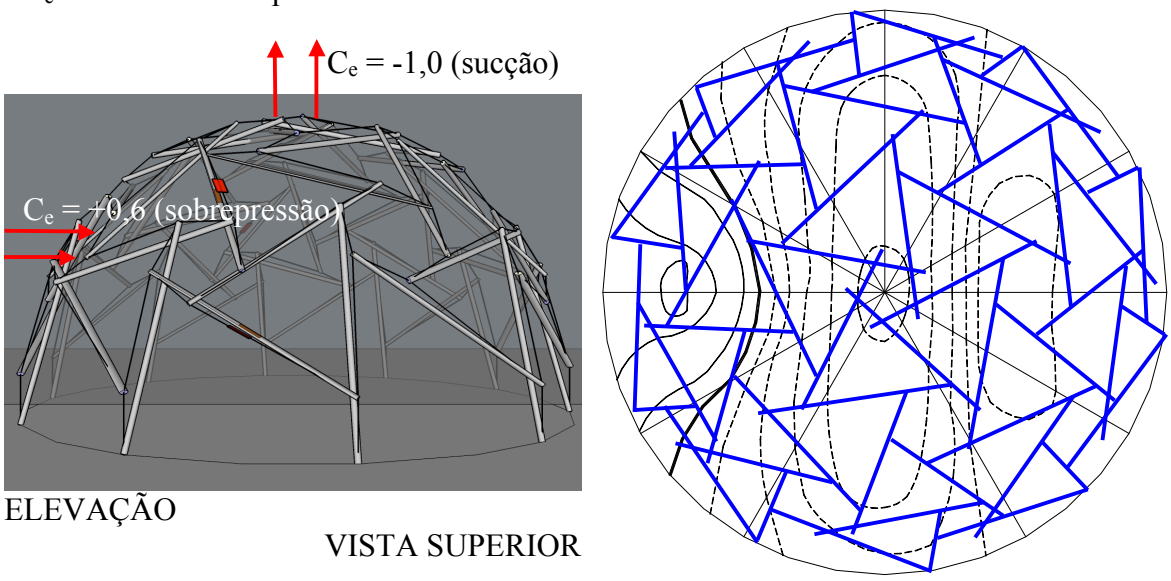
ELEVAÇÃO

f = flecha
d = diâmetro da circunferência da base da cúpula

VISTA SUPERIOR

FIGURA 3.26 – Linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para $f / d = 1 / 2$ (ABNT NBR 6123: 1988).

C_e = coeficiente de pressão externa



ELEVAÇÃO

VISTA SUPERIOR

FIGURA 3.27 – Comparação das linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa e a estrutura de uma cúpula geodésica (ABNT NBR 6123:1988).

4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios e sua conseqüente análise.

4.1 Resultados dos ensaios estáticos

Foram feitos diversos ensaios que permitiram uma visualização abrangente do comportamento deste tipo de estrutura quando solicitada a carregamentos diversos.

Após alguns testes, verificou-se que, em algumas respostas em termos de deformação nas barras e cordoalhas, ocorreram saltos (marcados com circunferências no exemplo representado pelos gráficos da FIG. 4.1) ao longo dos ensaios. Estes saltos são devidos à acomodação da estrutura quando da aplicação das cargas. Ou seja, à medida que se

aplicavam cargas, algumas barras deslizaram nas cordoalhas, provocando estas alterações bruscas no decorrer da curva de ensaio.

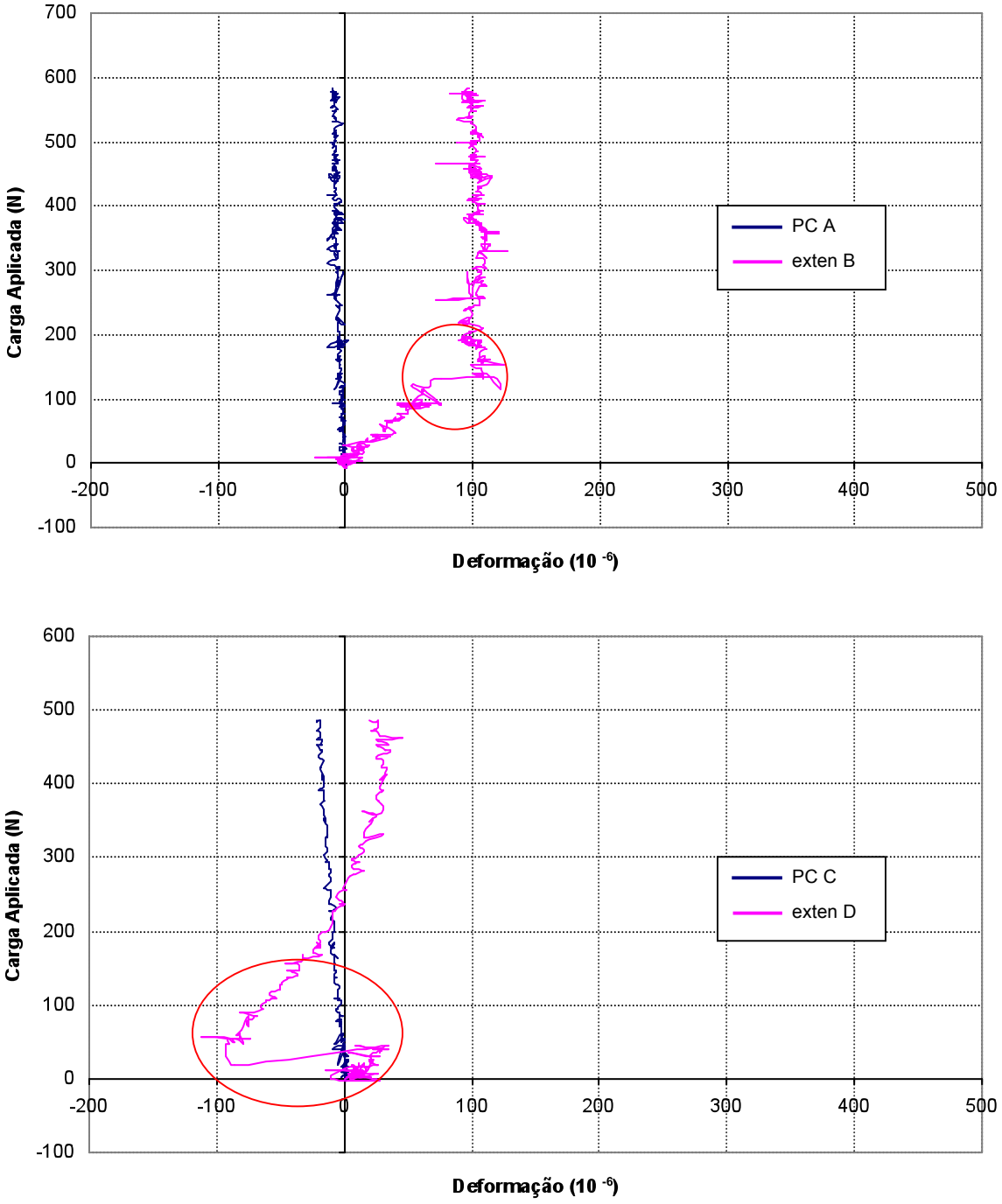


FIGURA 4.1 – Deformações nas barras e cordoalhas, notando-se alterações bruscas nas respostas dos ensaios.

Este problema foi resolvido ao se fixar as barras, por meio de grampos, nas cordoalhas (FIG. 4.2 e 4.3), evitando o escorregamento dos mesmos.

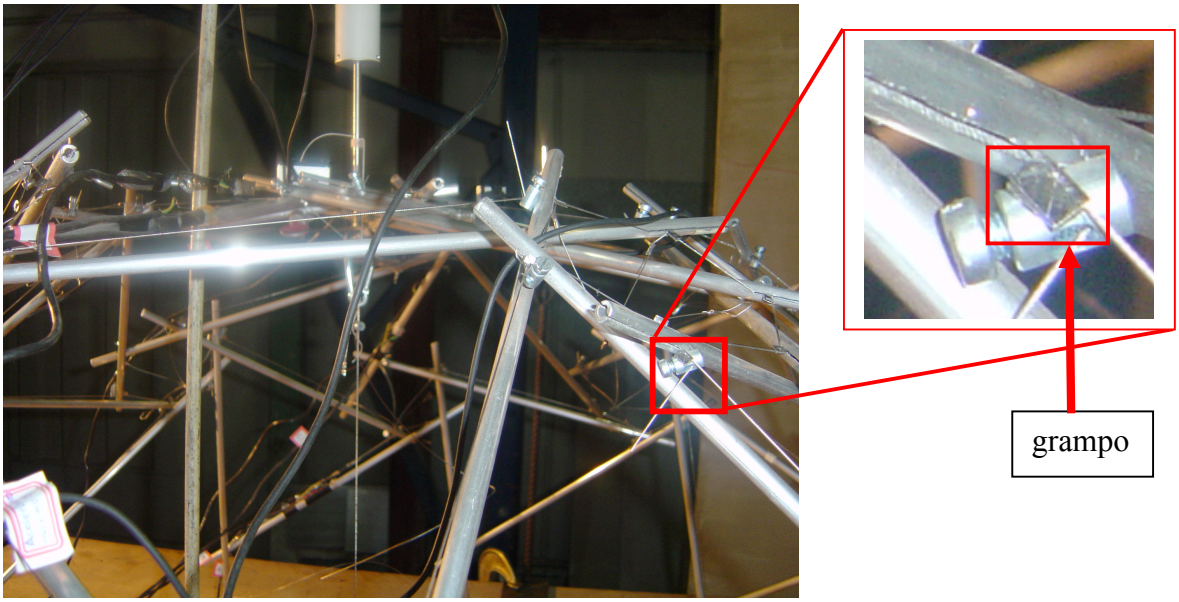


FIGURA 4.2 – Fixação das barras às cordoalhas, por meio de grampos.

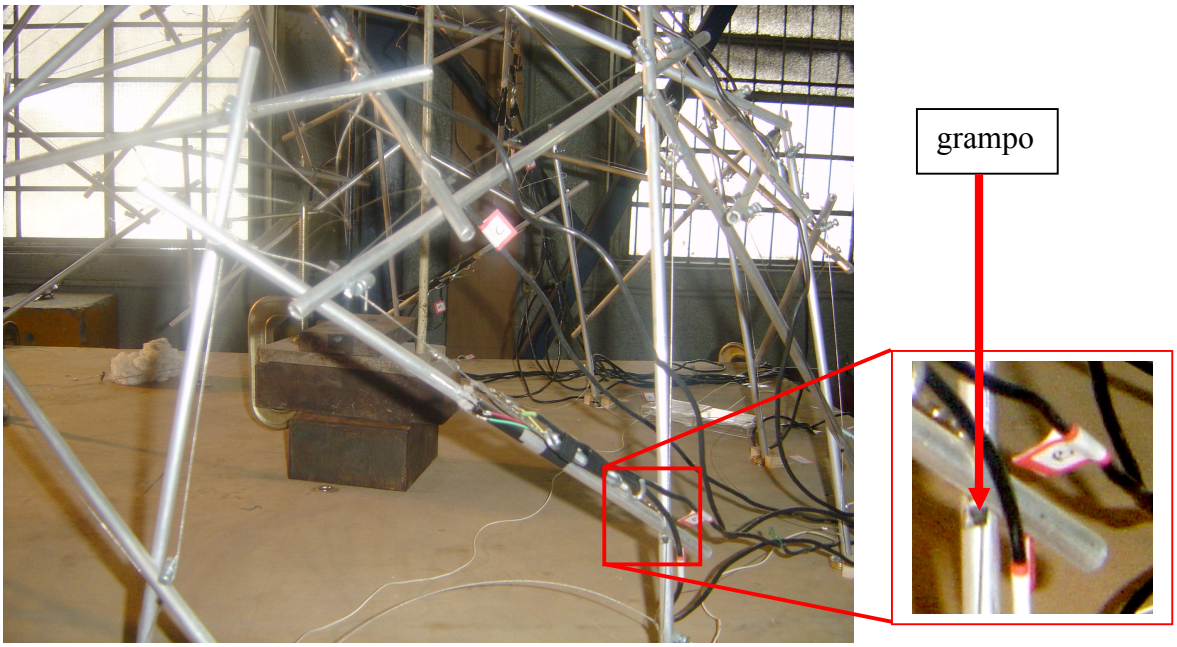


FIGURA 4.3 – Fixação das barras da base às cordoalhas, por meio de grampos.

4.1.1 Aplicação de cargas em todos os nós

A seguir, são apresentados os gráficos referentes às deformações e deslocamentos dos elementos estruturais para cargas em todos os nós.

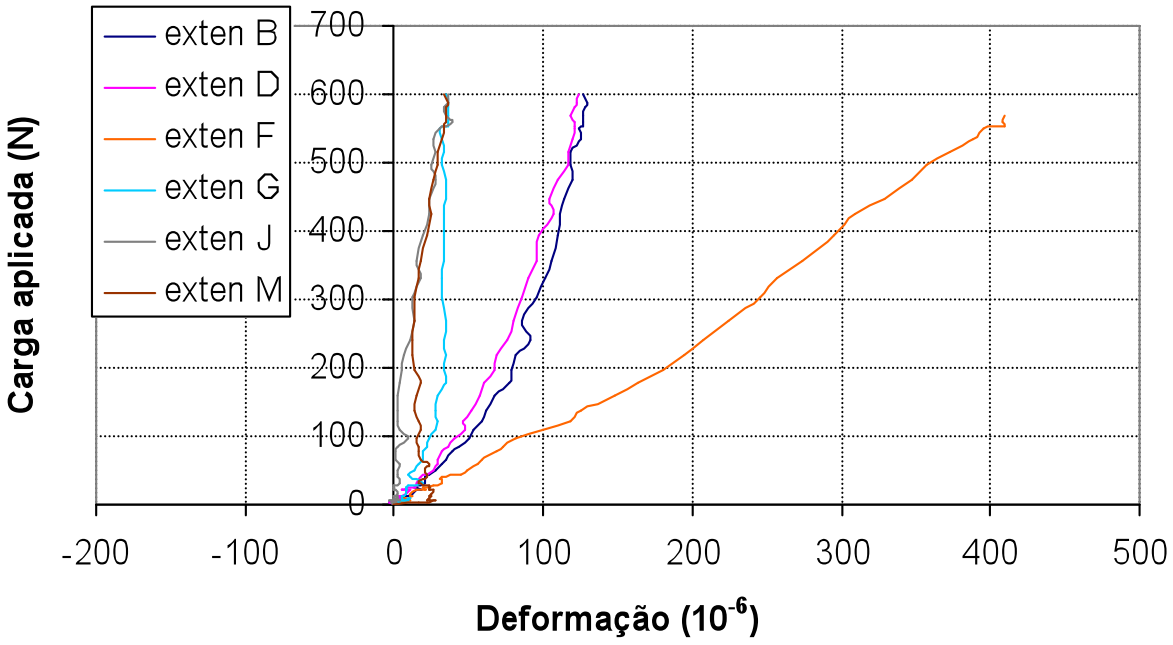
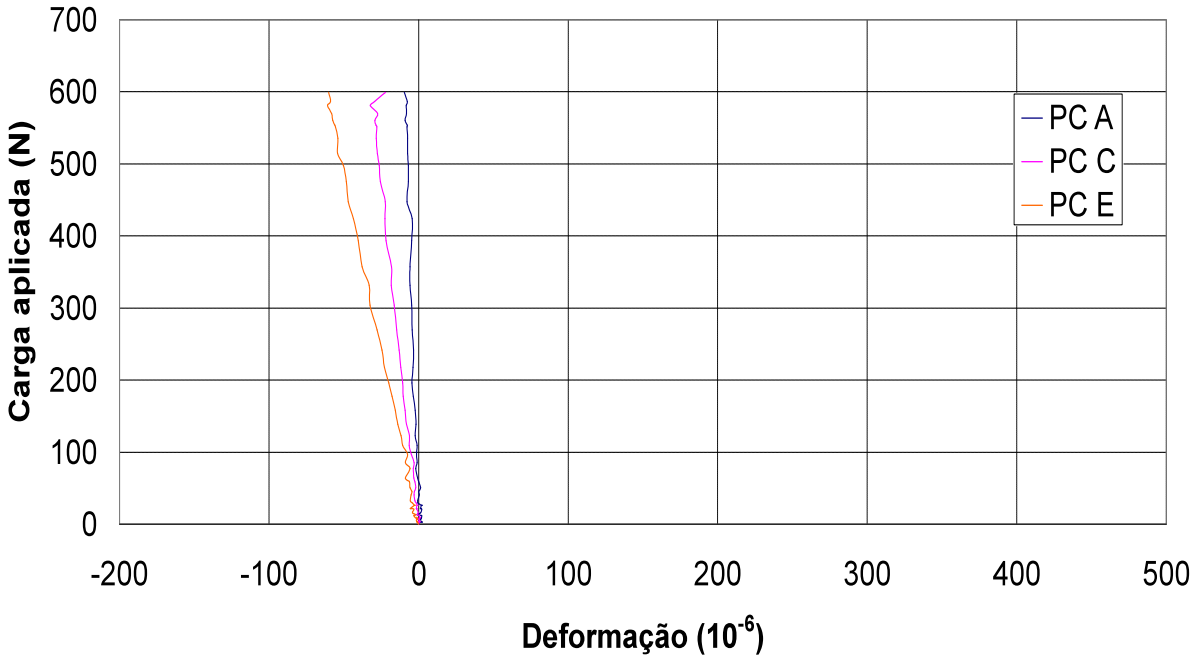


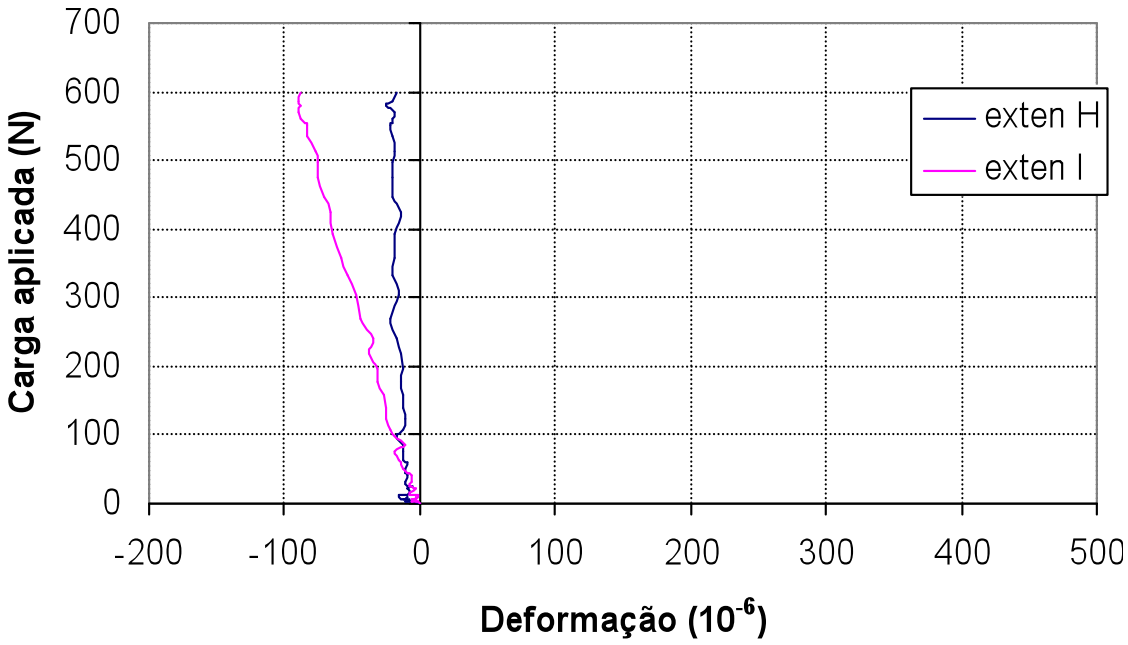
FIGURA 4.4 – Deformação das cordoalhas para aplicação de cargas em todos os nós.

Ao observar os gráficos da FIG. 4.4, verifica-se que as respostas das cordoalhas com EER B e D resultaram não-lineares e há uma diferença sempre crescente entre os resultados apresentados pelos EER B, D e F em relação aos EER G, J e M. Entretanto, à exceção do EER F (que apresentou deformação bem maior que os demais), as cordoalhas apresentaram deformações similares para cada lado da cúpula. Ou seja, as cordoalhas relativas aos EER B e D apresentaram deformações muito próximas entre si, o que também ocorreu com as cordoalhas diametralmente opostas relativas aos EER G, J e M.

No início do carregamento, verifica-se uma pequena diferença no comportamento da cordoalha relativa ao EER G em relação aos EER J e M. Estes dois últimos apresentam curvas praticamente coincidentes ao final do ensaio, o mesmo ocorrendo com a cordoalha relativa ao EER G após carga aplicada de aproximadamente 500 N.

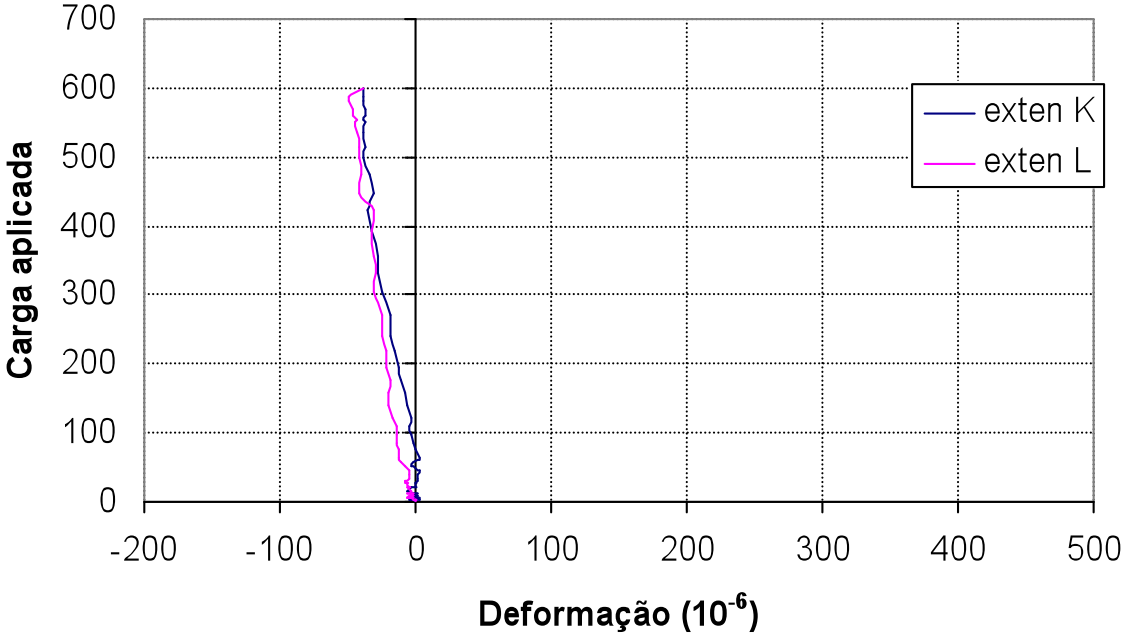


(a) PC A, PC C e PC E.

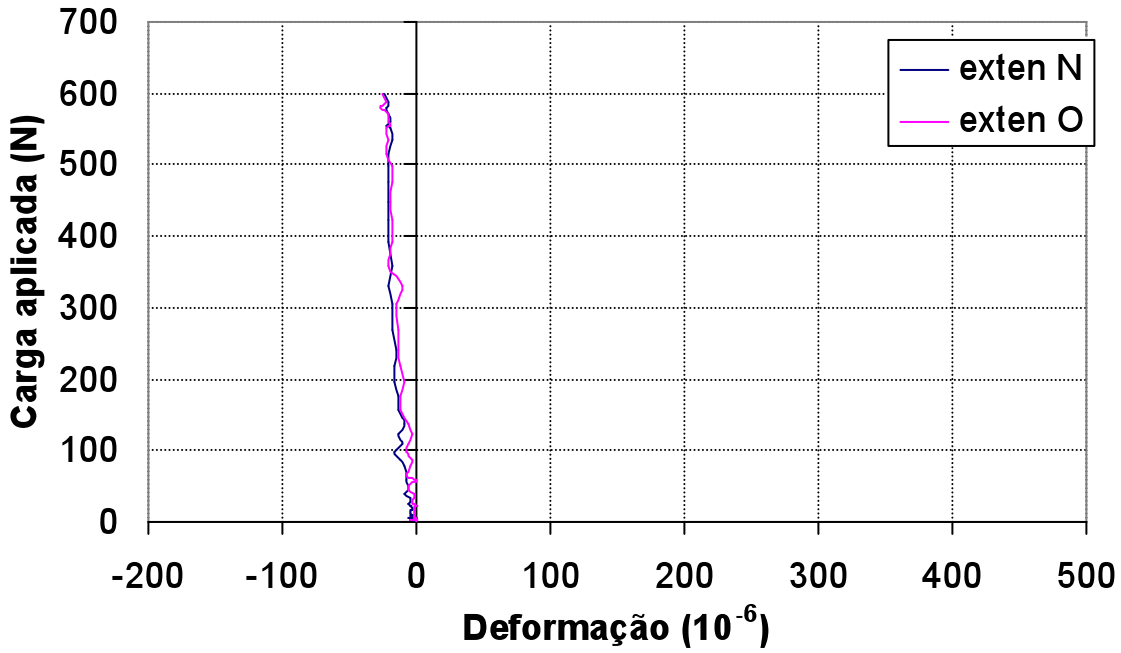


(b) EER H-I.

FIGURA 4.5 – Deformação das barras para aplicação de cargas em todos os nós (continua).



(c) EER K-L.



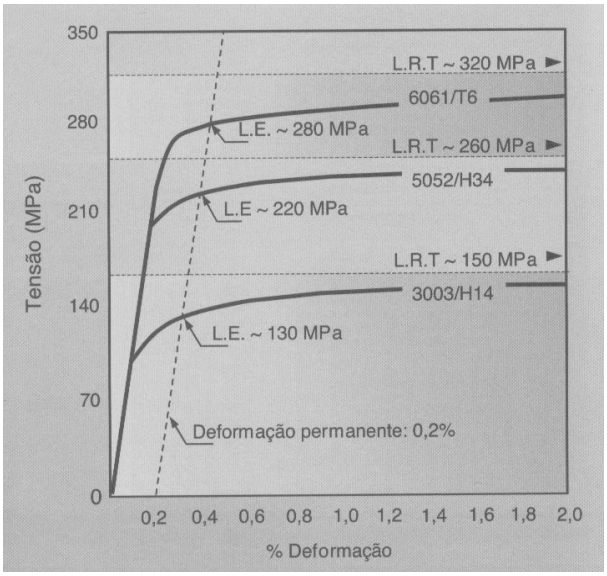
(d) EER N-O.

FIGURA 4.5 – Deformação das barras para aplicação de cargas em todos os nós (conclusão).

Pode-se verificar que, de acordo com os gráficos da FIG. 4.5, as barras apresentaram um comportamento linear, ocorrendo força axial de compressão que aumenta gradativamente das barras da base para as barras do topo. Ou seja, as barras da base da cúpula (PC A e EER N-O) apresentam menor compressão em relação às barras PC E e EER H-I (do topo da cúpula).

A linearidade dessas respostas se deve ao fato de que as cargas de baixo valor resultam em deformações muito menores que as correspondentes ao limite de escoamento do alumínio.

O gráfico da FIG. 4.6 apresenta as curvas típicas de deformação das ligas de alumínio.



Onde:

L.R.T. é o limite de resistência à tração

L.E. é o limite de escoamento

FIGURA 4.6 – Curvas típicas de deformação das ligas de alumínio (ABAL, 2004).

Adotando a resistência ao escoamento do alumínio F_{cy} = 240 MPa e módulo de elasticidade E = 69.600 MPa (ALUMINUM DESIGN MANUAL, 2005) obtém-se, da Lei de Hooke , a deformação correspondente ao início do escoamento, ε_y = 3.448,28 . 10^{-6}, valor bem superior aos obtidos nos ensaio da presente pesquisa.

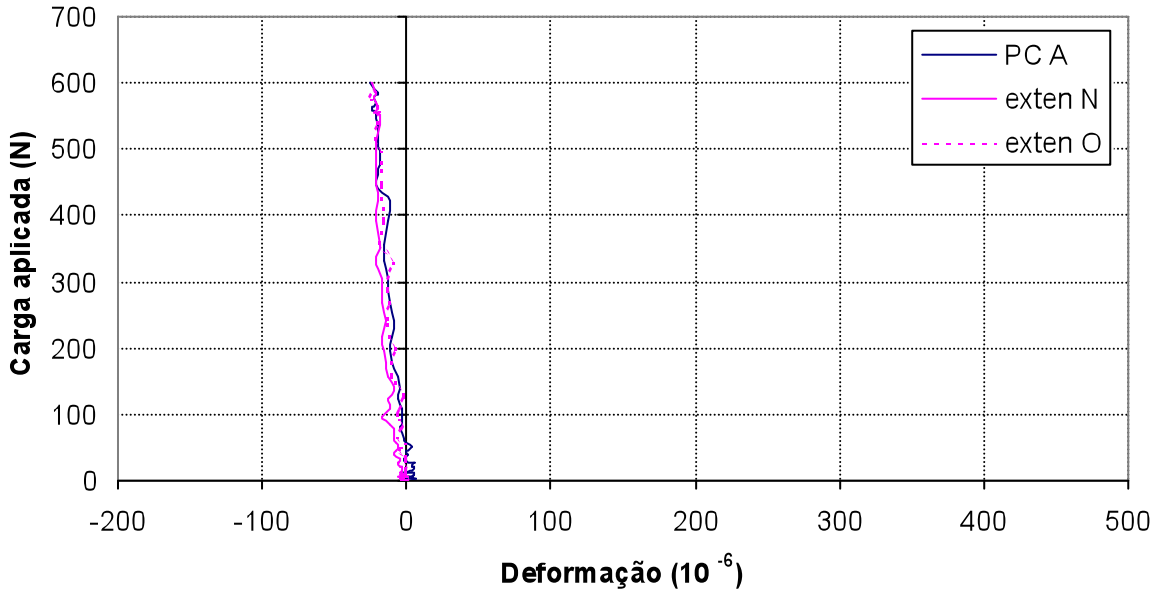
O limite de escoamento do alumínio é aquele que corresponde a uma deformação residual de $2‰$.

No Anexo C são apresentados os valores experimentais para o módulo de elasticidade das barras de alumínio utilizadas no modelo conceptivo-processual. Esses valores foram determinados a partir dos ensaios de tração realizados no LAEES.

Para os EER ligados em ¼ de ponte (K-L e N-O), observa-se que não houve praticamente nenhuma diferença de deformação da parte superior da barra em relação ao EER diametralmente oposto. Entretanto, para o EER H-I, verifica-se que houve ligeira flexão na barra que se situa próxima ao topo da cúpula.

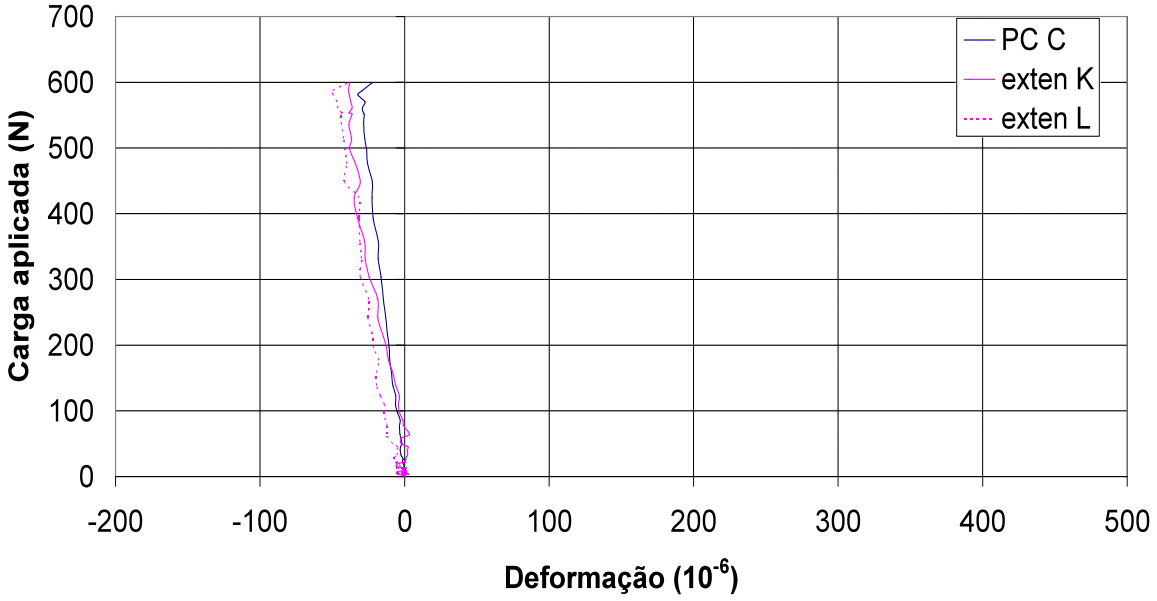
Nos gráficos da FIG. 4.7 são apresentadas as comparações entre os EER das barras diametralmente opostas, por nível; ou seja, são comparados: o PC A com o EER N-O; o PC C com o EER K-L e o PC E com o EER H-I.

Há simetria quanto ao comportamento das barras analisadas, exceto as curvas referentes aos PC C e EER K-L.

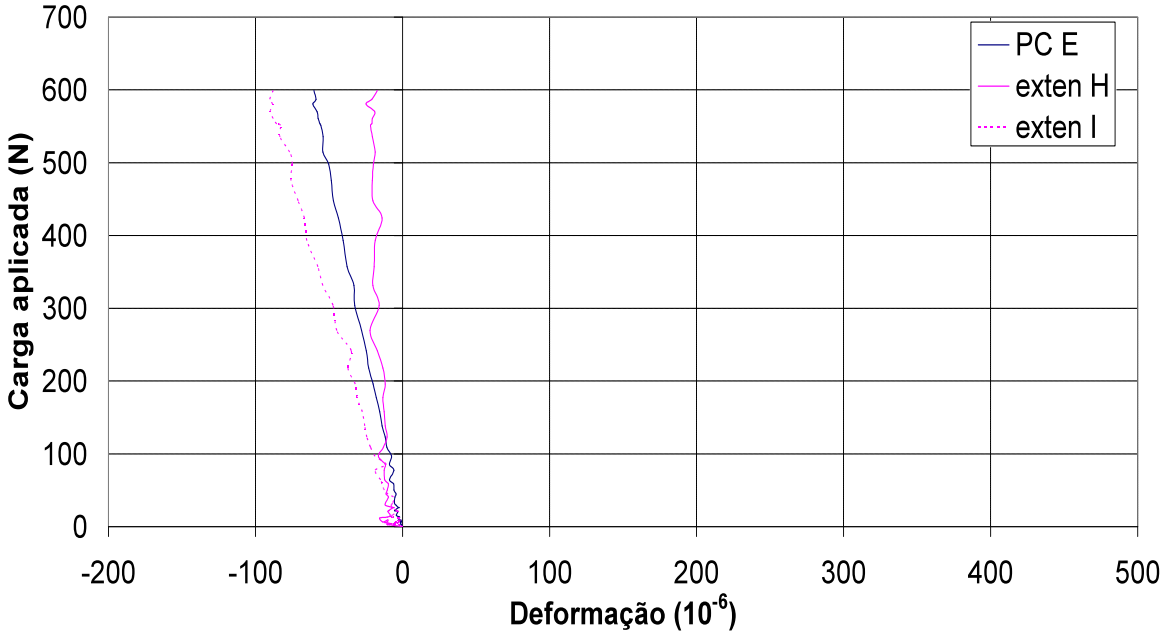


(a) PC A e EER N-O.

FIGURA 4.7 – Comparação das deformações das barras para aplicação de cargas em todos os nós (continua).



(b) PC C e EER K-L.



(c) PC E e EER H-I.

FIGURA 4.7 – Comparação das deformações das barras para aplicação de cargas em todos os nós (conclusão).

A não simetria do comportamento das barras (PC A, PC C e PC E em relação a N-O, K-L e H-I, respectivamente) verificada neste ensaio não permite uma avaliação conclusiva quanto a existência ou não de distribuição simétrica de cargas. Isto se deve ao fato de que o modelo instrumentado (modelo conceptivo-processual) apresenta imperfeições quanto à aplicação de cargas em função das dificuldades de se puxar os nós, por meio de cordoalhas, de forma igualitária. Haveria a necessidade de esticadores e *clip gages* para controle e uniformização da tração das referidas cordoalhas, o que não seria viável para um modelo em escala reduzida em função de sua miniaturização.

Em si tratando de deformações no modelo, não há simetria no comportamento das barras (compressão) em relação às cordoalhas (tração), em função do sistema estrutural e da diferença entre as áreas das seções (a barra possui 44 mm^2, enquanto a cordoalha possui 0,33 mm^2 e a chapa de aço, 3,5 mm^2), entre outros parâmetros envolvidos.

Como exemplo, as deformações da barra e cordoalha correspondentes à PC A e ao EER B, do ensaio apresentado nas FIG. 4.4 e 4.5, para carga máxima de 599 N, são: $-9{,}6994.10^{-6}$ para o PC A, e $126{,}179.10^{-6}$ para o EER B.

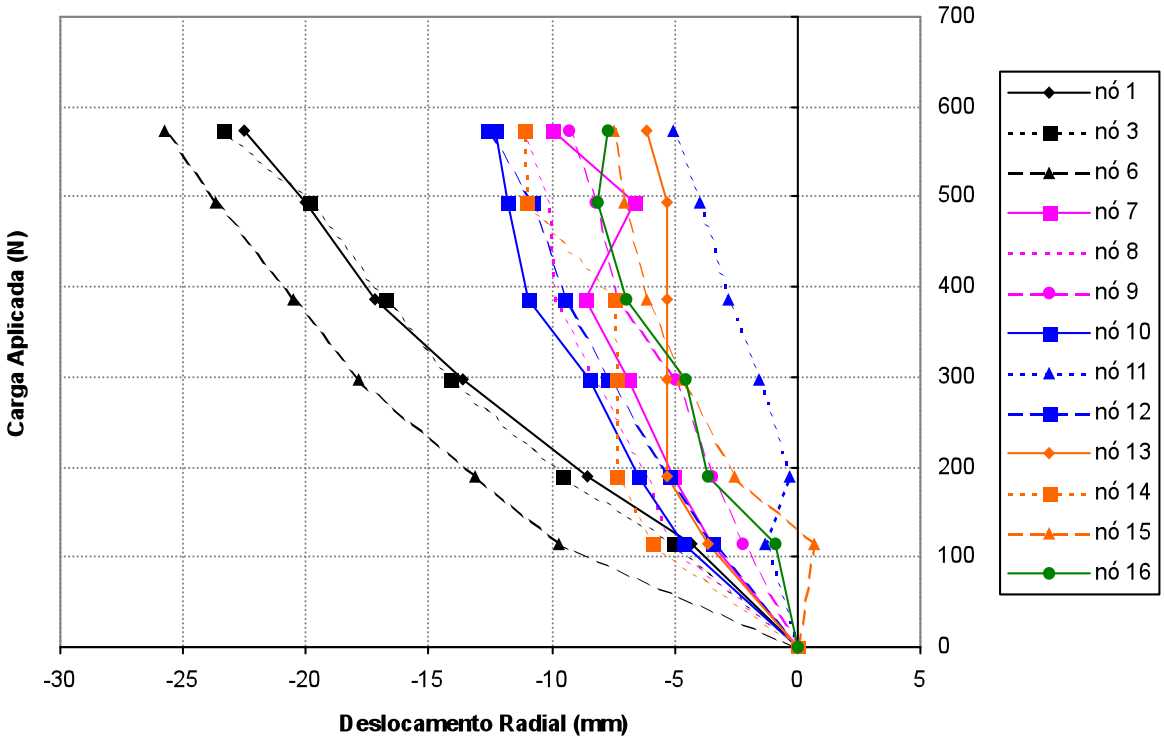
Utilizando a Lei de Hooke $\sigma = \varepsilon \, . \, E$, onde ε é a deformação e E, o módulo de elasticidade, substituindo σ por P / A, onde P é a carga aplicada e A a área da seção, obtém-se a fórmula $P = \varepsilon \, . \, E \, . \, A$.

Substituindo $\varepsilon = -9{,}6994.10^{-6}$; E = 69.600 MPa (módulo de elasticidade do alumínio) e A = 44 mm^2 obtém-se, para a PC A, a carga P = 29,70 N, compressão.

Por outro lado, utilizando $\varepsilon = 126{,}179.10^{-6}$, E = 193.100 MPa (módulo de elasticidade do aço inoxidável) e A = 3,5 mm^2 obtém-se, para o EER B, a carga P = 85,28 N, tração.

Este mesmo ensaio foi repetido com o objetivo de se medir os deslocamentos dos nós da cúpula e, posteriormente, foram acrescentadas quatro células de carga nas bases da estrutura.

Os gráficos referentes aos deslocamentos dos nós da estrutura são apresentados na FIG. 4.8.



[valores negativos: retração da cúpula (diminuição do diâmetro)].

FIGURA 4.8 – Deslocamentos dos nós.

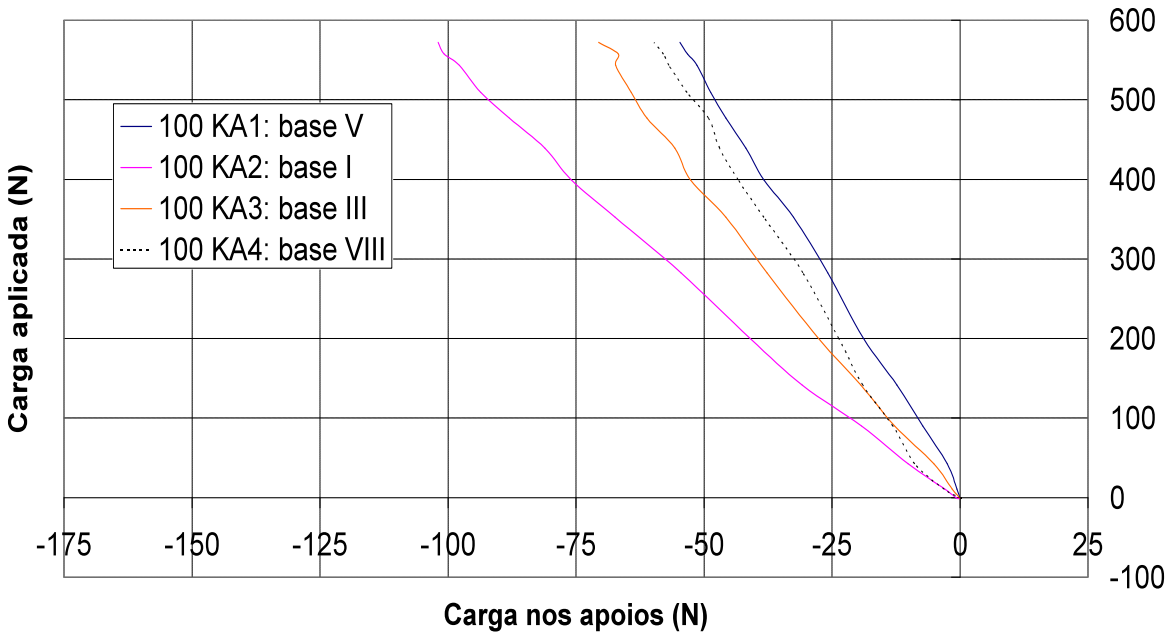
Ao se observar a FIG. 4.8, verifica-se que os nós deslocaram-se nas direções e sentidos esperados. À exceção do nó 15 (que apresenta um pequeno desvio até cerca de 120 N de carga aplicada, voltando a ter o mesmo comportamento em relação aos demais nós), todos os outros nós apresentaram deslocamento para o interior da cúpula, ou seja, toda a estrutura reduziu de tamanho em relação ao raio inicial.

Entretanto, estas mesmas curvas mostram que não há simetria de deslocamento, conseqüência da possível assimetria na intensidade em que as cordoalhas do sistema de tração dos nós são submetidas.

Outra observação a ser feita com relação a estas curvas é que os nós do topo da cúpula (1, 3 e 6) apresentam maiores deslocamentos que os demais.

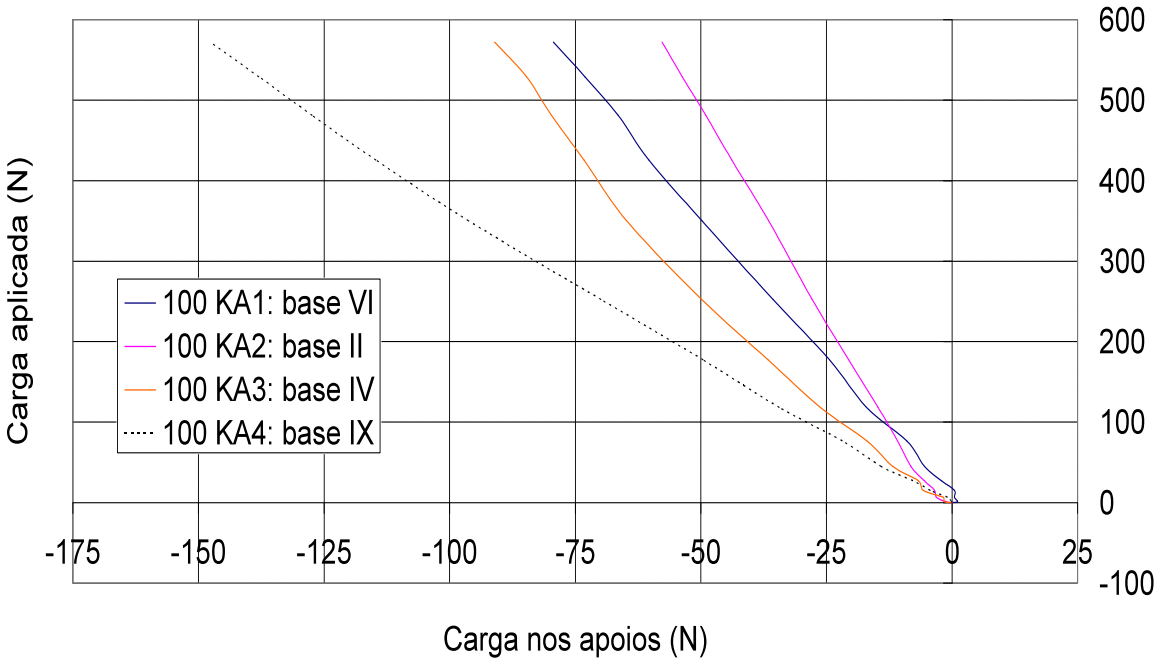
Quanto às medições das células de carga nas bases da estrutura, os gráficos apresentados pela FIG. 4.9 permitem verificar que as cargas aplicadas em todos os nós não são aplicadas uniformemente nas bases da estrutura.

No gráfico da FIG. 4.9a, a primeira célula de carga, denominada 100KA 1, foi colocada na base V, enquanto as demais, denominadas 100KA 2, 100KA 3 e 100KA 4 foram colocadas, respectivamente, nas bases I, III e VIII (a locação das bases é apresentada na FIG. 3.20).

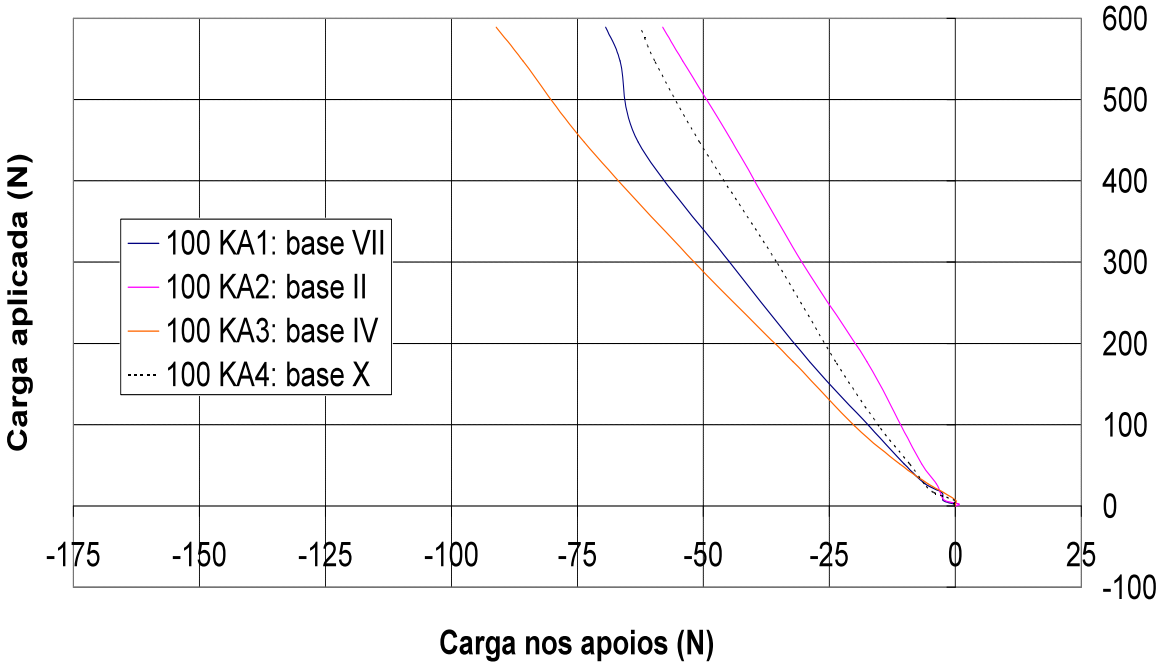


(a) Células de carga 100KA nas bases I, III, V e VIII.

FIGURA 4.9 – Distribuição das cargas nos apoios (continua).

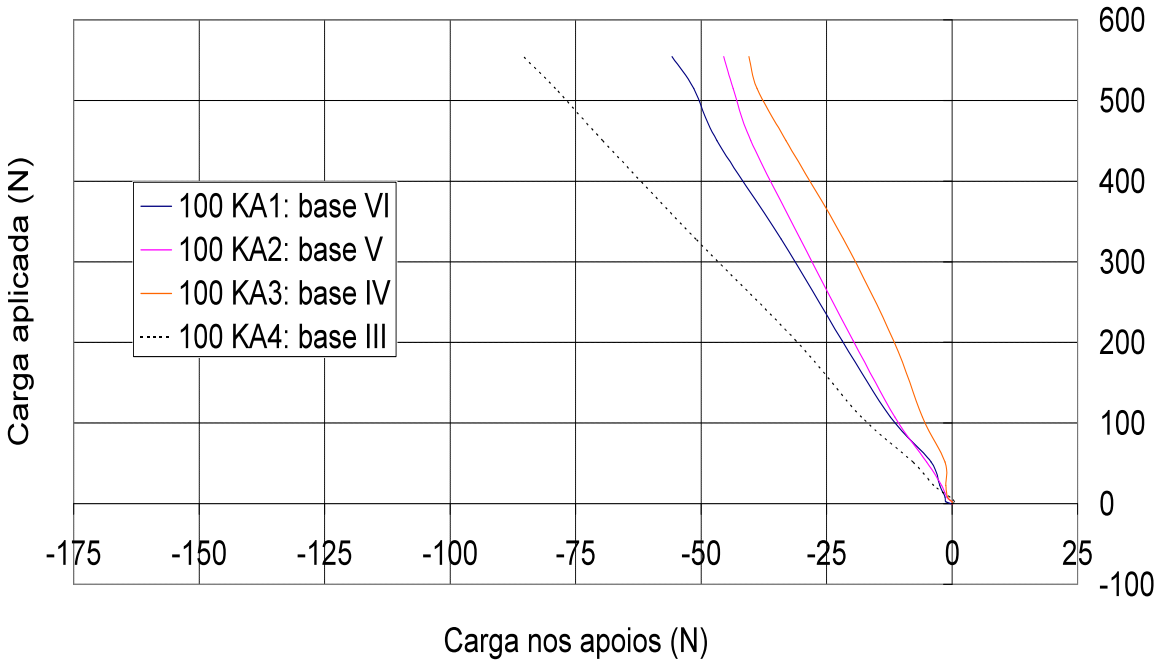


(b) Células de carga 100KA nas bases II, IV, VI e IX.



(c) Células de carga 100KA nas bases II, IV, VII e X.

FIGURA 4.9 – Distribuição das cargas nos apoios (continua).



(d) Células de carga 100KA nas bases III, IV, V e VI.

FIGURA 4.9 – Distribuição das cargas nos apoios (conclusão).

Para o ensaio correspondente à FIG. 4.9b, as células de carga 100KA 1, 100KA 2, 100KA 3 e 100KA 4 foram colocadas nas bases VI, II, IV e IX, respectivamente.

Para o ensaio da FIG. 4.9c, as células de carga 100KA 1, 100KA 2, 100KA 3 e 100KA 4 foram colocadas nas bases VII, II, IV e X, respectivamente, enquanto o ensaio correspondente à FIG. 4.9d, a mesma seqüência de células de carga ficou nas bases VI, V, IV e III.

As bases que receberam maior carga foram a I, IX e III, nos ensaios das FIG. 4.9a, 4.9b e 4.9d, respectivamente. Todas estas bases correspondem a barras adjacentes a nós constituídos por seis elementos estruturais, sendo estas as barras de maior comprimento.

4.1.2 Aplicação de cargas nos cinco nós da parte superior da cúpula

Para a simulação de mezanino apoiado nos cinco nós da parte superior da cúpula, as barras apresentaram, da mesma forma que os ensaios de aplicação de carga em todos os nós, um comportamento linear, experimentando compressão de pequena intensidade, sendo que a barra intermediária (equivalente ao PC C) apresenta maior deformação que a barra correspondente ao PC E que, por sua vez, deformou mais que a barra onde está fixado o PC A.

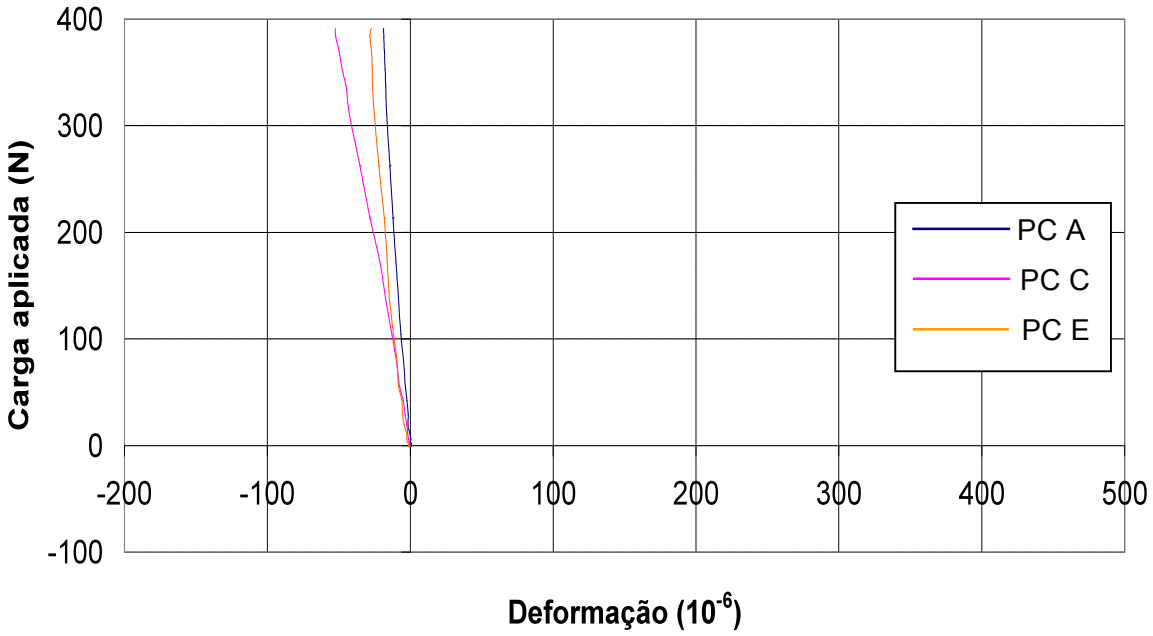
Da mesma forma que os ensaios anteriores, a linearidade dessas curvas se deve ao fato de que as cargas são de baixo valor, e as tensões solicitantes estão muito aquém da resistência ao escoamento do alumínio.

Os EER ligados em ¼ de ponte (H-I, K-L e N-O) mostraram que houve pouca diferença de deformação da parte superior da barra equivalente ao EER N em relação ao EER diametralmente oposto O.

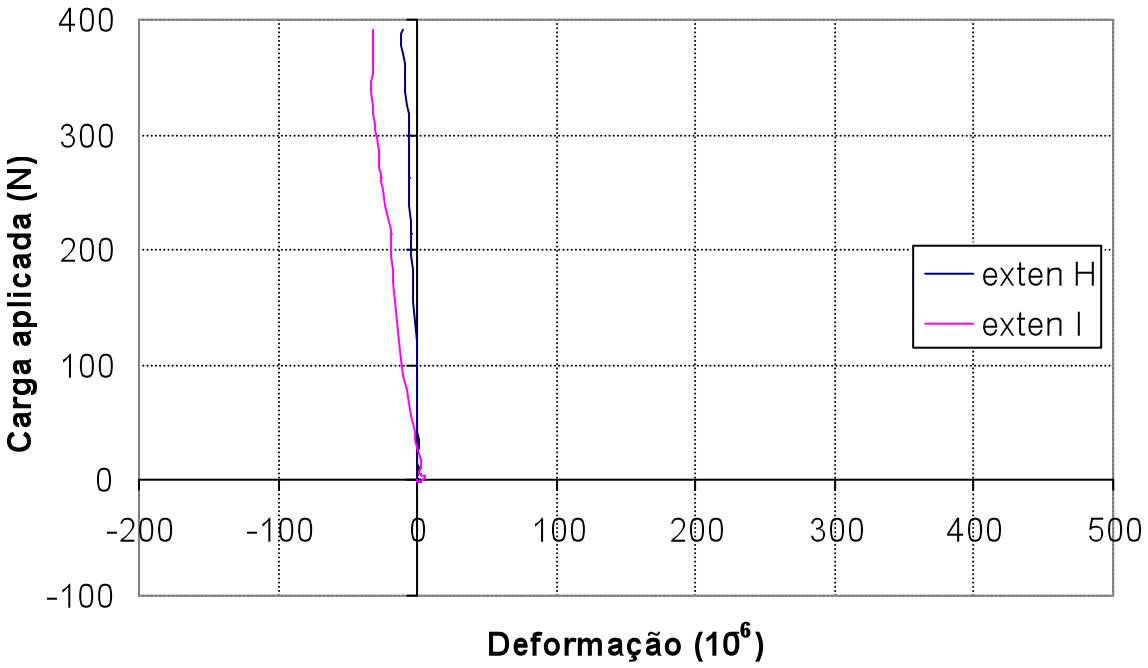
Os EER K-L (FIG. 4.10c) indicaram alívio na compressão inicial imposta pela montagem na barra até cerca de 150 N, quando passaram a indicar incrementos de compressão. Destaca-se que os EER K e L foram colocados em condição de estrutura montada, com a barra pré-tensionada à compressão.

Os resultados sugerem uma pequena flexão na barra EER H-I (FIG. 4.10b).

A suposta não simetria do comportamento das barras (PC A, PC C e PC E em relação a N-O, K-L e H-I) verificada neste ensaio também não permite uma avaliação conclusiva quanto a existência ou não de distribuição simétrica de cargas.

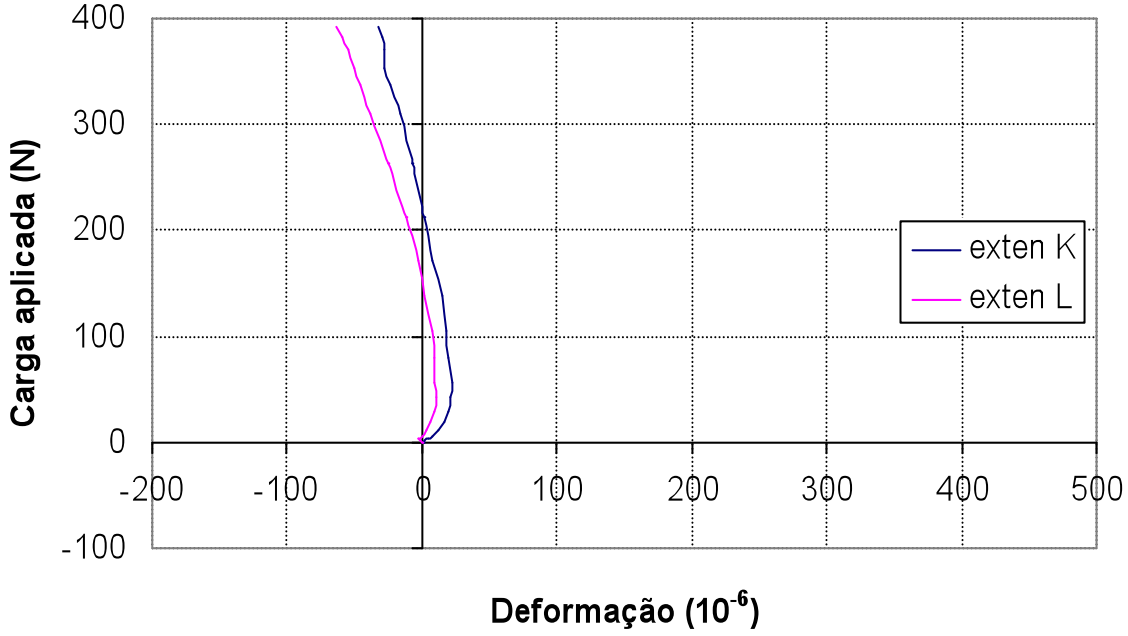


(a) PC A, PC C e PC E.

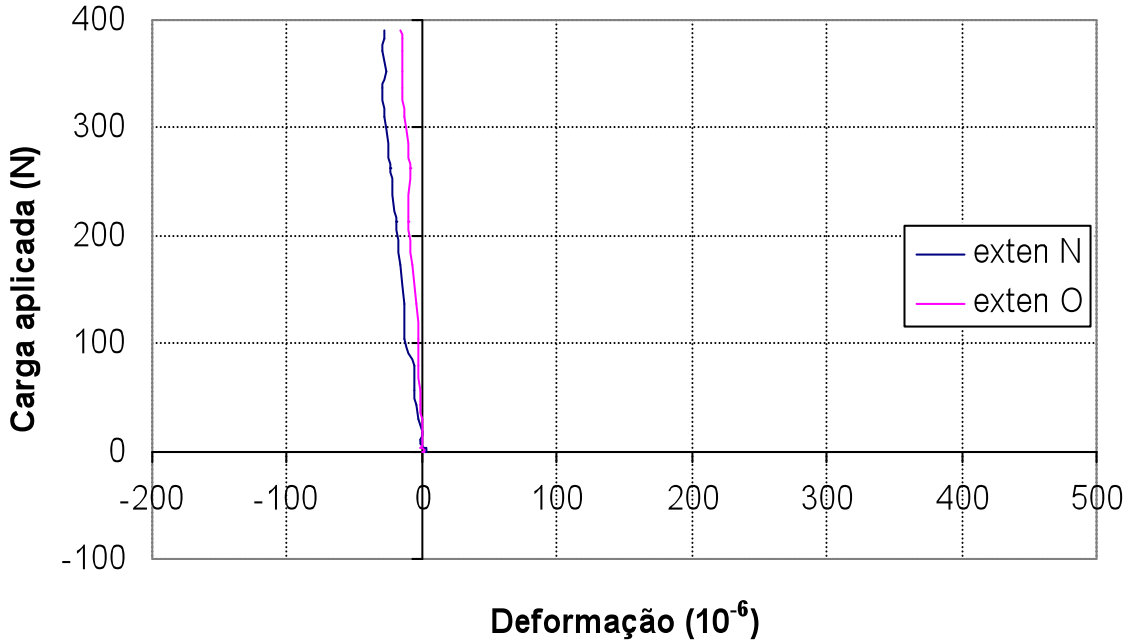


(b) EER H-I.

FIGURA 4.10 – Deformação das barras para aplicação de cargas que simulam mezanino apoiado nos cinco nós da parte superior da cúpula (continua).



(c) EER K-L.



(d) EER N-O.

FIGURA 4.10 – Deformação das barras para aplicação de cargas que simulam mezanino apoiado nos cinco nós da parte superior da cúpula (conclusão).

Quanto aos elementos de cordoalhas (referentes aos EER B, D, F, G, J e M), pode-se verificar que a resposta à tração é não-linear, tal como ocorreu com a estrutura totalmente carregada.

Não houve simetria na deformação entre as cordoalhas dos EER B, D e F em relação aos EER G, J e M, diametralmente opostos na cúpula. Entretanto, houve deformações similares entre os EER B, D e F e, à exceção do EER D, coincidência de comportamento quanto às deformações apresentadas pelos EER B e F, o mesmo acontecendo com os EER G, J, e M.

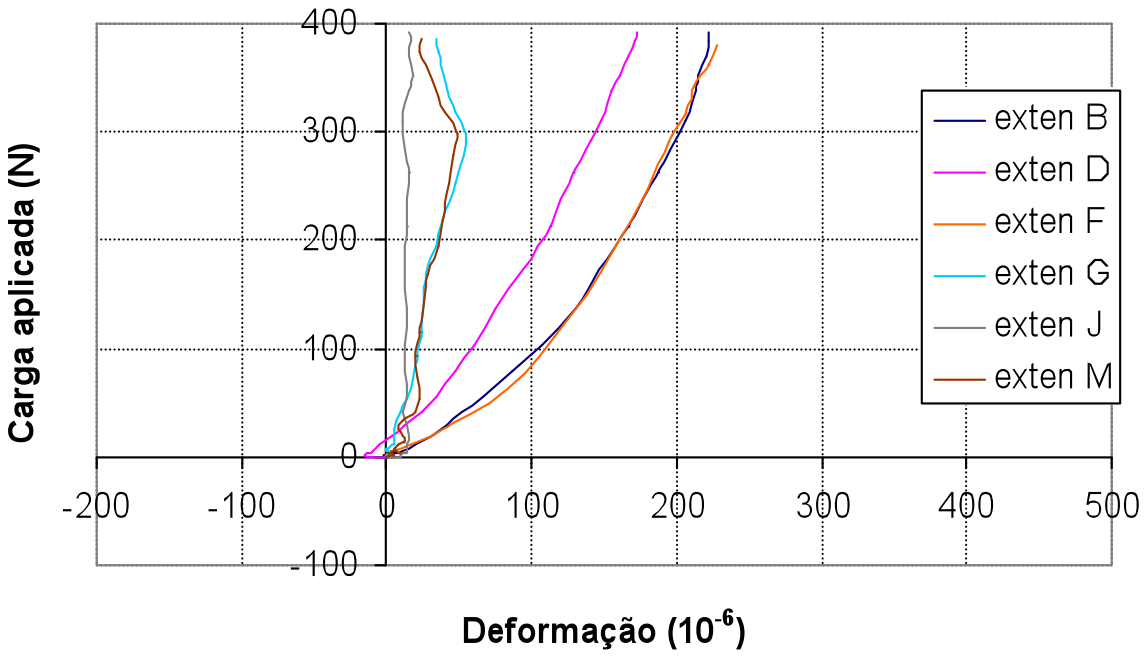
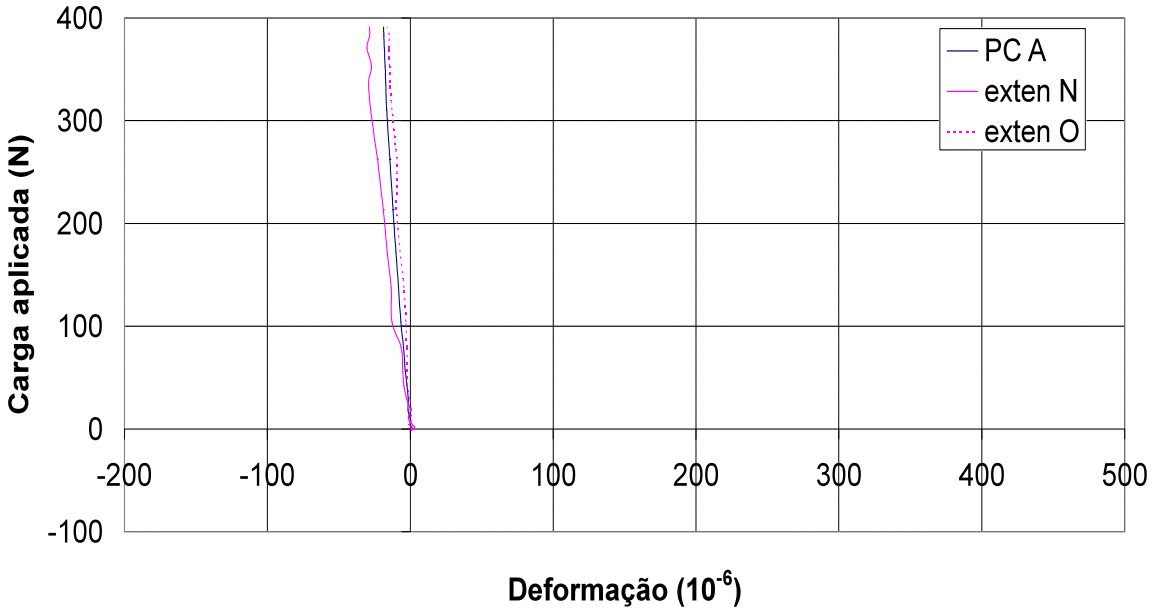


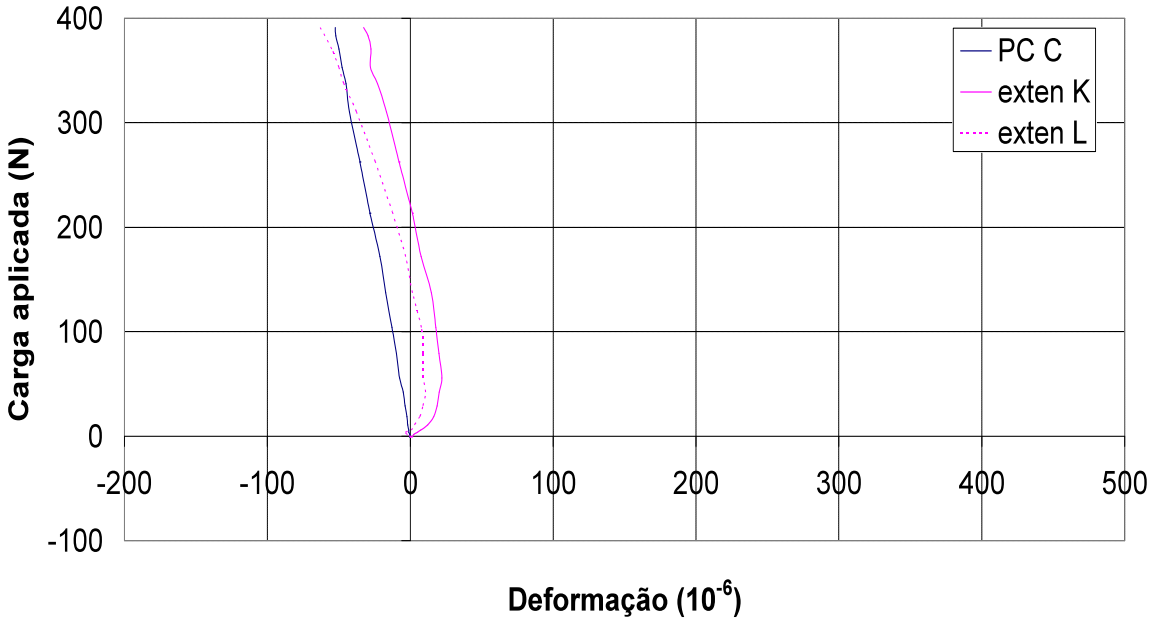
FIGURA 4.11 – Deformação das cordoalhas para aplicação de cargas na simulação de mezanino.

Nos gráficos da FIG. 4.12 são apresentadas as comparações entre os EER das barras equivalentes e diametralmente opostas, da mesma forma que a FIG. 4.7 do item anterior (a barra PC A em relação à barra N-O; a barra PC C em relação à barra K-L e a barra PC E em relação à barra H-I).

À exceção da comparação entre as barras PC C e EER K-L, verifica-se que há simetria quanto ao comportamento das barras analisadas.

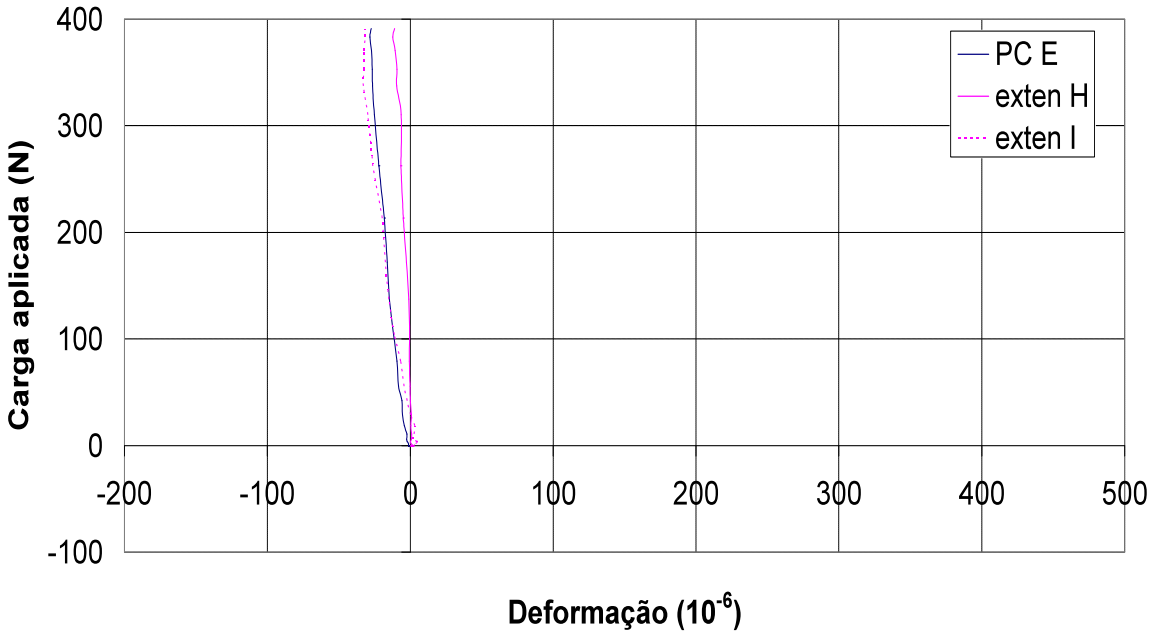


(a) PC A e EER N-O.



(b) PC C e EER K-L.

FIGURA 4.12 – Comparação das deformações das barras para aplicação de cargas que simulam mezanino apoiado nos cinco nós da parte superior da cúpula (continua).



(c) PC E e EER H-I.

FIGURA 4.12 – Comparação das deformações das barras para aplicação de cargas que simulam mezanino apoiado nos cinco nós da parte superior da cúpula (conclusão).

As respostas apresentadas pelas barras (PC A, PC C e PC E em relação às barras N-O, K-L e H-I) neste ensaio não permitem uma avaliação conclusiva quanto à existência ou não de distribuição simétrica de cargas, da mesma forma que o ensaio anterior. Dificuldades de se puxar os nós, por meio de cordoalhas, de forma igualitária e necessidade de esticadores e *clip gages* para controle e uniformização da tração das referidas cordoalhas (situação inviável para um modelo em escala reduzida) também se aplicam a este caso.

Também foram superpostos os gráficos das FIG. 4.4 e 4.11 na FIG. 4.13. Para facilitar a visualização, foram utilizadas as mesmas cores para as respostas referentes às deformações das mesmas cordoalhas, porém adotando-se a linha tracejada para a aplicação de até 400 N de carga a fim de diferenciar as curvas que caracterizam a aplicação de carga de até 600 N.

À exceção dos EER G e F (este último, até cerca de 170 N), os demais EER não apresentaram similaridade quanto às respostas referentes às deformações das cordoalhas.

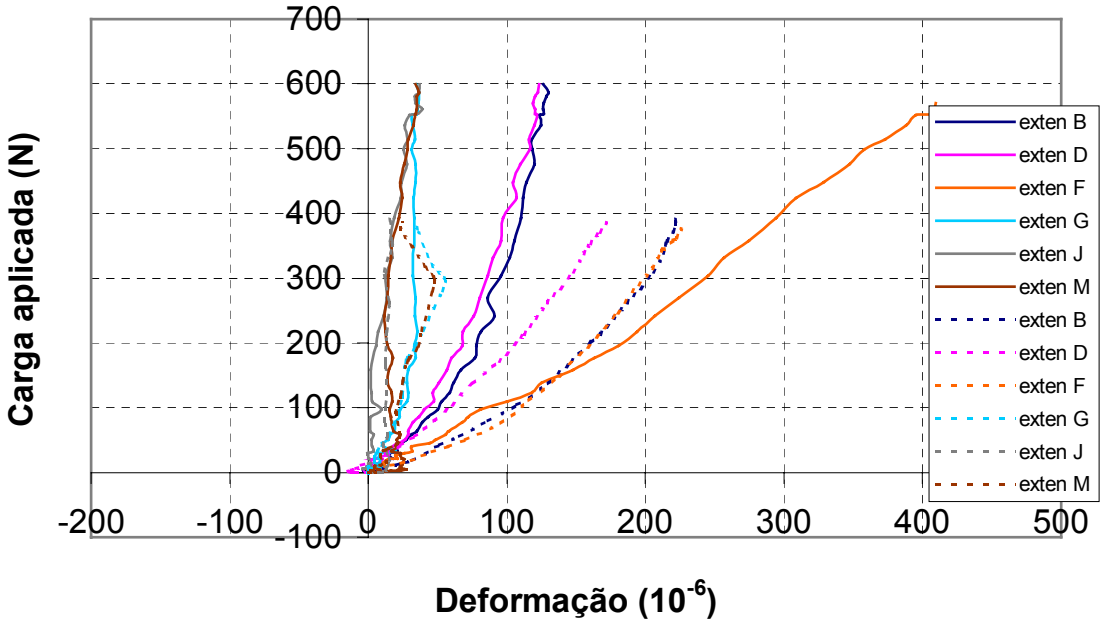


FIGURA 4.13 – Superposição dos gráficos de deformação das cordoalhas na simulação de cargas em todos os nós e de mezanino.

Foram também medidos os deslocamentos dos nós da cúpula, além da utilização de quatro células de carga nas bases da estrutura.

Os gráficos apresentados na FIG. 4.14 permitem verificar que as cargas aplicadas em todos os nós não são aplicadas uniformemente nas bases da estrutura, assim como os ensaios apresentados no item 4.1.1.

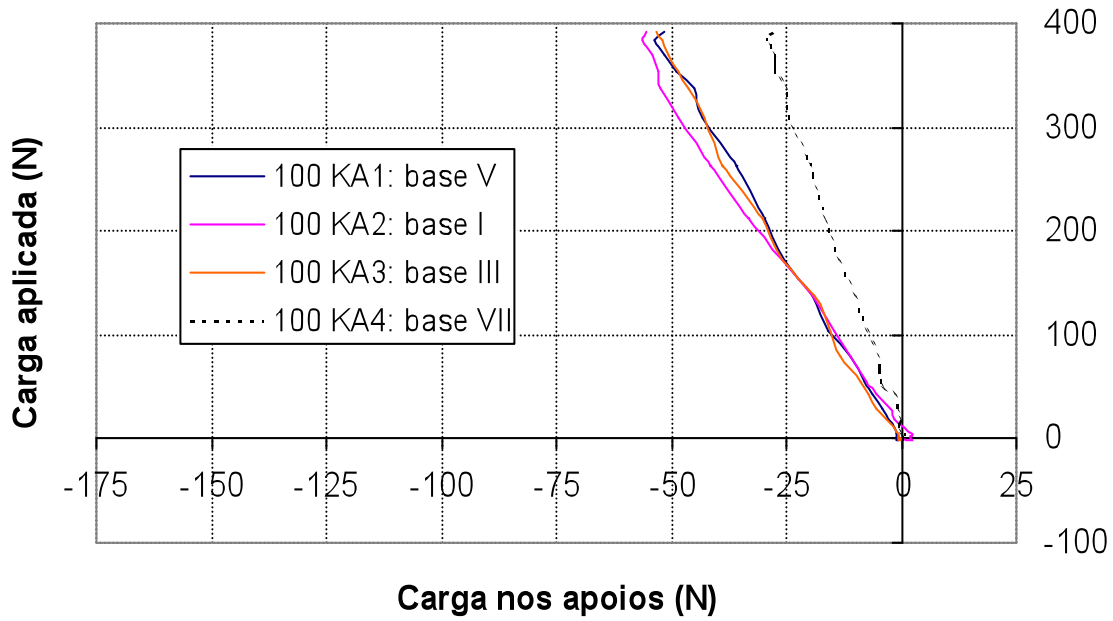
No ensaio correspondente à FIG. 4.14a, a primeira célula de carga, denominada 100KA 1 foi colocada na base V, enquanto as demais, denominadas 100KA 2, 100KA 3 e 100KA 4 foram colocadas, respectivamente, nas bases I, III e VIII.

Para o ensaio da FIG. 4.14b, as células de carga 100KA 1, 100KA 2, 100KA 3 e 100KA 4 foram colocadas nas bases VI, II, IV e IX, respectivamente, enquanto o ensaio da FIG. 4.14c, as células de carga 100KA 1, 100KA 2, 100KA 3 e 100KA 4 foram colocadas nas bases VII, II, IV e X, respectivamente.

À exceção das células de carga 100 KA1 do ensaio referente à FIG. 4.14b e 100 KA1 da FIG. 4.14c, o comportamento quanto à carga aplicada nos apoios é linear.

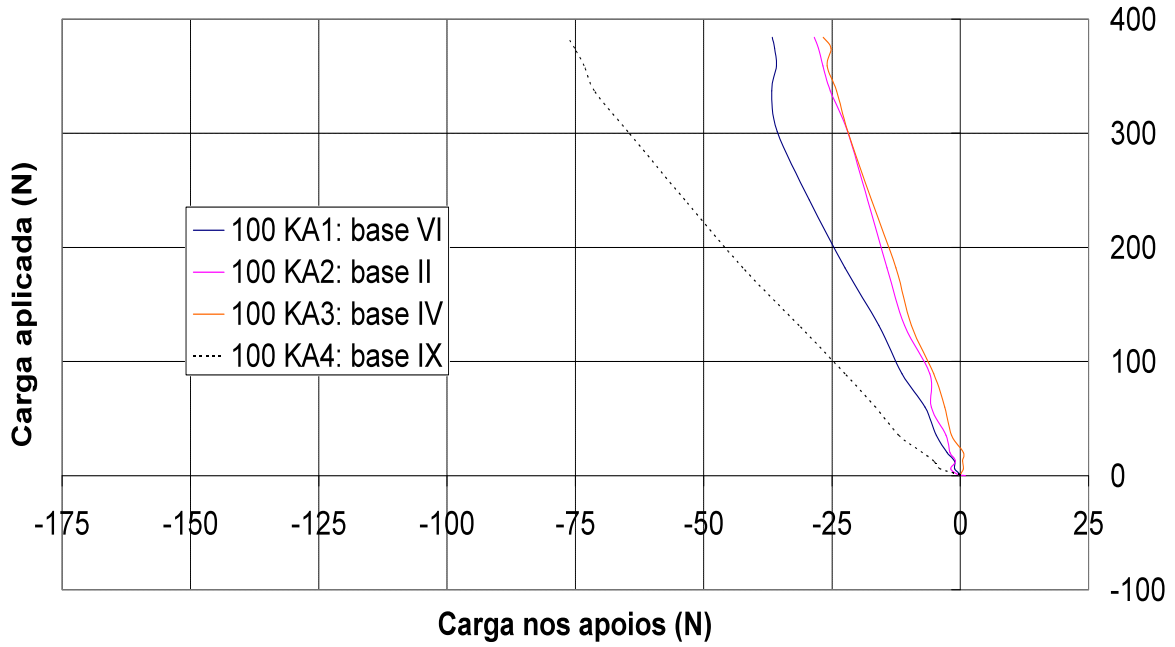
Pode-se verificar que houve uma distribuição de cargas igual em três das quatro células de carga 100KA nos ensaios da FIG. 4.14a e 4.14c. Somente uma das respostas (100 KA 4 para o ensaio da FIG. 4.11a e 100 KA 1 para o ensaio da FIG. 4.14c) apresentou carga aplicada com valor diferente dos demais (cargas menores na célula 100 KA 4, ensaio da FIG. 4.14a, e cargas maiores na 100 KA 1 do ensaio da FIG. 4.14c).

Já o ensaio referente à FIG. 4.14b, duas curvas (100 KA 2 e 100 KA 3) apresentaram praticamente os mesmos valores, diferindo apenas das outras duas células de carga. Entretanto, a célula de carga 100 KA 4 apresentou uma leitura relativa à carga aplicada maior que as demais, chegando a quase 100 N.

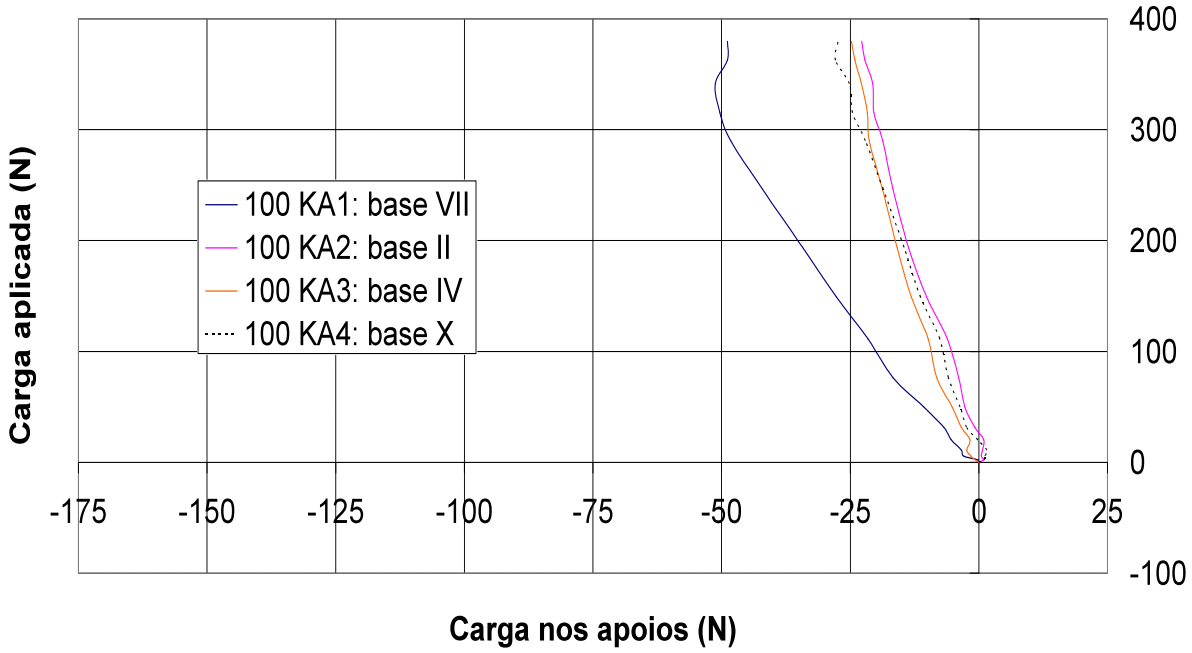


(a) Células de carga 100 KA nas bases I, III, V e VIII.

FIGURA 4.14 – Distribuição das cargas nos apoios (continua).



(b) Células de carga 100 KA nas bases II, IV, VI e IX.



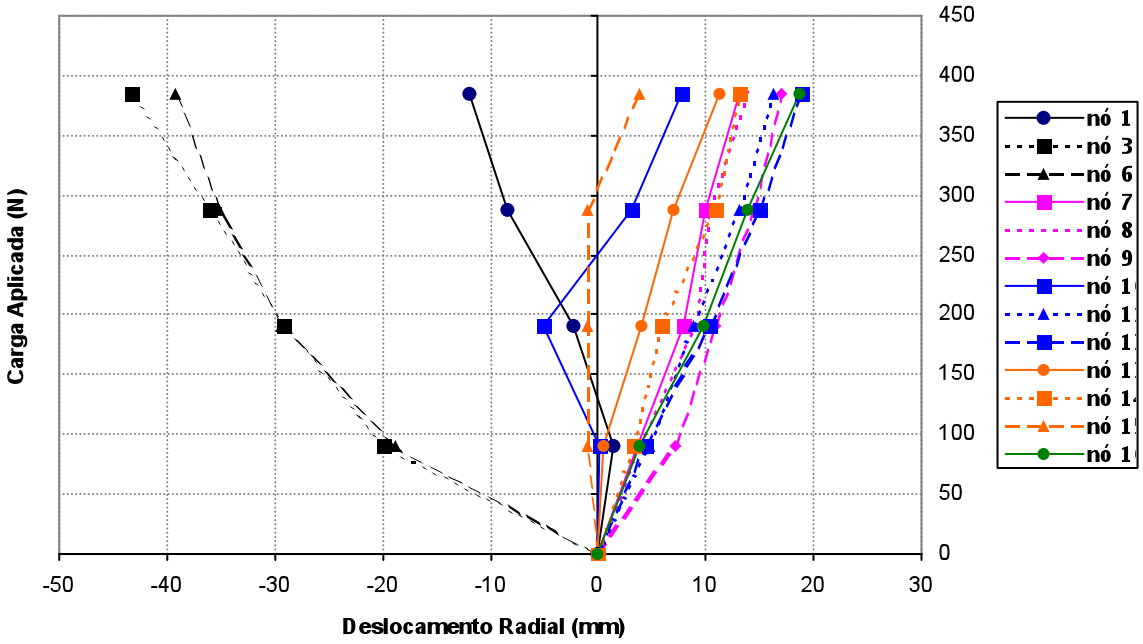
(c) Células de carga 100 KA nas bases II, IV, VII e X.

FIGURA 4.14 – Distribuição das cargas nos apoios (conclusão).

Ao se observar os gráficos das FIG. 4.14b e FIG. 4.14c, verifica-se que as bases que receberam maior carga foram a VII (FIG. 4.14c) e IX (FIG. 4.14b). Estas bases correspondem a barras adjacentes aos nós constituídos por seis elementos estruturais, sendo que estas são as barras de maior comprimento, repetindo assim o comportamento apresentado nos ensaios de carga aplicada em todas os nós.

Por outro lado, a curva relativa á célula de carga 100 KA 4 do ensaio da FIG. 4.14a apresentou uma carga menor em relação às demais. Esta célula de carga corresponde á base VIII, base esta adjacente ao nó constituído por cinco barras.

A FIG. 4.15 apresenta as curvas relativas aos deslocamentos dos nós da cúpula. Pode-se verificar que os nós 1, 3 e 6 (relativos ao topo da cúpula) apresentaram deslocamentos negativos, ou seja, deslocaram-se para fora do contorno inicial da estrutura (expansão). A curva correspondente ao nó 1, a princípio, deslocou-se para cima, no sentido contrário ao dos cinco nós do topo da cúpula.



[valores negativos: retração da cúpula (diminuição do diâmetro); valores positivos: expansão da cúpula (aumento do diâmetro)].

FIGURA 4.15 – Deslocamentos nos nós.

Entretanto, após 125 N de carga aplicada, a mesma começa a descer (movimento relativo para dentro do contorno inicial da estrutura - retração). Ou seja, a estrutura, a partir de certa carga, passa a apresentar o mesmo comportamento, deslocando-se para baixo (sentido negativo ou para dentro do contorno inicial da cúpula).

Esquemas da configuração deformada da estrutura deslocada nestas duas fases do ensaio são apresentados na FIG. 4.16.

A curva dos resultados do nó 10, apresenta um pequeno desvio entre 100 e 250 N de carga aplicada, voltando a ter o mesmo comportamento em relação aos demais nós (à exceção dos nós referentes ao topo da cúpula).

À exceção das curvas referentes aos nós 3 e 6, todas as outras respostas mostram que não há uniformidade dos deslocamentos, conseqüência da possível falta de simetria na intensidade em que as cordoalhas do sistema de tração dos nós são submetidas (como já mencionado anteriormente).

Outra observação a ser feita com base nas curvas da FIG. 4.15 é que os nós 3 e 6 apresentam maior deslocamento que as demais.

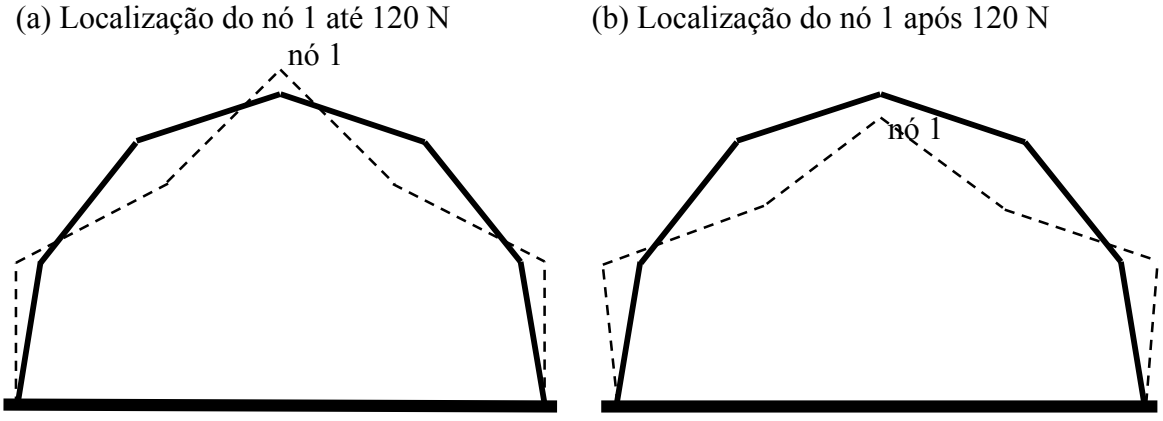


FIGURA 4.16 – esquemas das configurações deformadas da estrutura, destacando-se o nó 1.

4.1.3 Aplicação de cargas assimétricas

Este ensaio teve como objetivo obter informações quanto ao comportamento da cúpula em situações de aplicação de cargas assimétricas na estrutura. Assim, aplicou-se uma carga por meio de cordoalha fixada em um nó (que coincide com a linha isobárica de sobrepressão $C_e = +0,6$).

Entretanto, com apenas um passo de carga (equivalente a 49,03 N), as barras que compõem o nó se tocaram, sendo esta situação considerada limite para os ensaios realizados neste trabalho (como mencionado no Capítulo 3).

Desta forma, este tipo de estrutura, para carregamentos em um único nó, apresenta pouca deformação, mas grandes deslocamentos, não transferindo ou redistribuindo as cargas aplicadas.

Uma possível justificativa quanto a este comportamento é a analogia com o balão (MOTRO, 2003), descrita no item 2.5.4, que facilita explicar o comportamento de um sistema *Tensegrity* e a relação entre sua geometria e estabilidade.

Com base nessa analogia, pode-se supor que a Cúpula *Tensegrity* objeto de estudo deste trabalho apresenta equilíbrio geométrico, ou seja, possui forma definida; entretanto, carece de uma pré-tensão mais adequada (cordoalhas mais tracionadas) para aumentar sua rigidez.

O gráfico da FIG. 4.17 apresenta os deslocamentos dos nós quando da aplicação de carga assimétrica em um único nó, que no caso, é o nó 14.

Os deslocamentos excessivos e inesperados dos nós 3 e 11, o deslocamento praticamente nulo dos nós 10 e 12, além de mudança de direção do nó 14, não permitem avaliação conclusiva do ensaio. Ao se repetir este ensaio, a mesma indeterminação ocorreu.

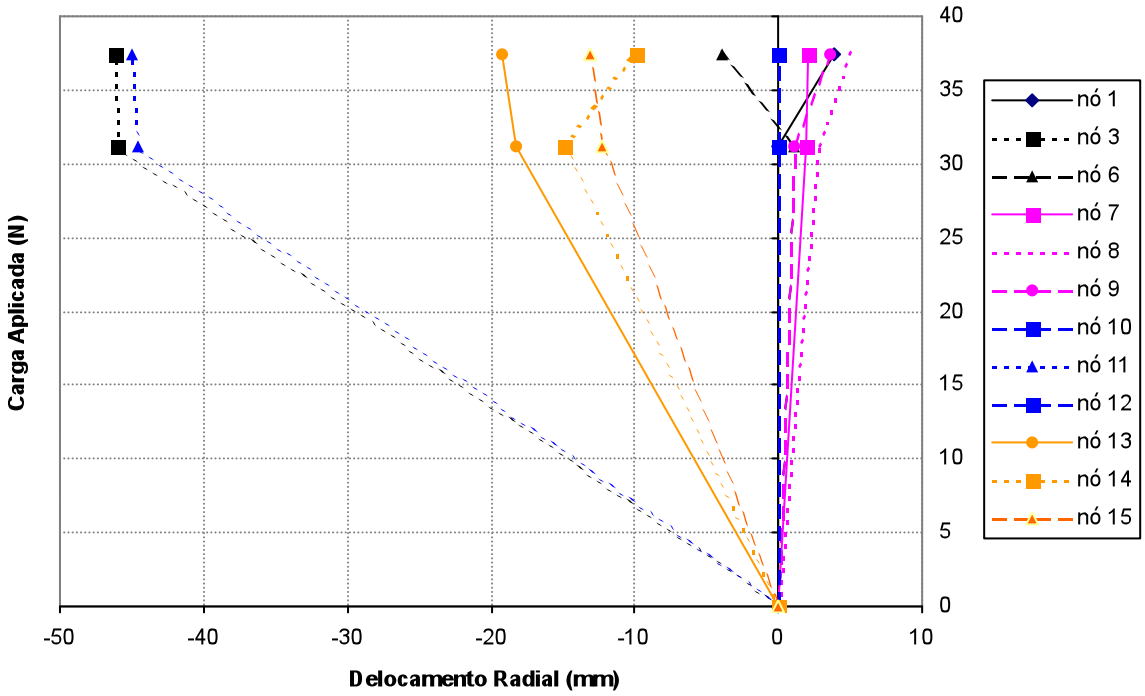


FIGURA 4.17 – Deslocamentos nos nós.

5

ANÁLISES NUMÉRICAS

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise numérica.

Com base na análise experimental, para a carga aplicada, o comportamento estrutural do modelo conceptivo-processual analisado ficou caracterizado pela não-linearidade geométrica.

Fundamentado nos gráficos de deformação apresentados no capítulo 4, pode-se também verificar que, quanto aos materiais componentes dos elementos estruturais (cordoalhas e barras), a estrutura apresentou comportamento com linearidade física. Por isto, na análise numérica, nenhuma não-linearidade física foi considerada.

Inicialmente, foi adotado o vínculo articulado fixo para as ligações dos apoios das barras correspondentes às bases da cúpula para a análise numérica via programa utilizado neste trabalho (GRECO *et al*., 2006 e GRECO e VENTURINI, 2006), diferindo das condições de contorno dos apoios do modelo conceptivo-processual, que permitem pequenos deslocamentos verticais.

Entretanto, para aproximar o modelo da análise numérica ao modelo conceptivo-processual, procurou-se substituir cinco vínculos articulados fixos por vínculos cujos deslocamentos eram livres na vertical.

Esse procedimento foi executado, inicialmente, para os apoios pares e, posteriormente, para os apoios ímpares. Não foram adotados para todos os dez apoios simultaneamente pois a estrutura se tornava hipostática (o que não ocorria no modelo processual, pois os pregos utilizados na base limitavam, por atrito, os deslocamentos verticais das barras correspondentes aos apoios).

Ao se liberar o deslocamento vertical dos apoios, os resultados apresentados não representaram alterações significativas.

5.2 Desenvolvimento das análises numéricas

A estrutura foi modelada utilizando o elemento de treliça espacial proposto por GRECO *et al*. (2006) e GRECO e VENTURINI (2006), que apresenta uma nova formulação não linear geométrica para problemas estáticos envolvendo treliças espaciais. Baseada no Método de Elementos Finitos, a formulação proposta utiliza posições nodais ao invés de deslocamentos nodais para descrever o problema. A deformação é determinada diretamente a partir do conceito de posição utilizando um sistema de coordenadas cartesianas fixo no espaço.

É utilizada uma linguagem simples de engenharia para apresentar uma formulação não-linear elastoplástica geométrica baseada numa descrição de posições nas treliças espaciais.

Desta forma, é necessário mapear a geometria do corpo estudado e conhecer sua relação com a deformação mensurada adotada.

Não há transformação de coordenadas porque a formulação não envolve transformações entre sistemas de coordenadas locais para coordenadas globais e vice-versa (GRECO *et al*., 2006).

A cúpula, para ser montada, necessita da imposição de esforços iniciais nas barras e, conseqüentemente, nas cordoalhas, mantendo-se em equilíbrio.

Assim, para se obter os esforços iniciais que foram aplicados durante a montagem da cúpula, procedeu-se à desmontagem do modelo, medindo-se, em três cordoalhas, as tensões liberadas gradativamente.

Foram efetuadas as leituras dos EER em três das seis cordoalhas instrumentadas, com a estrutura em equilíbrio solicitada apenas por seu peso próprio. Posteriormente, foi retirada a primeira barra e feita a leitura do respectivo EER (FIG. 5.1). Procedeu-se da mesma forma para os dois EER restantes (FIG. 5.2), comparando a leitura inicial em relação à final (FIG. 5.3).

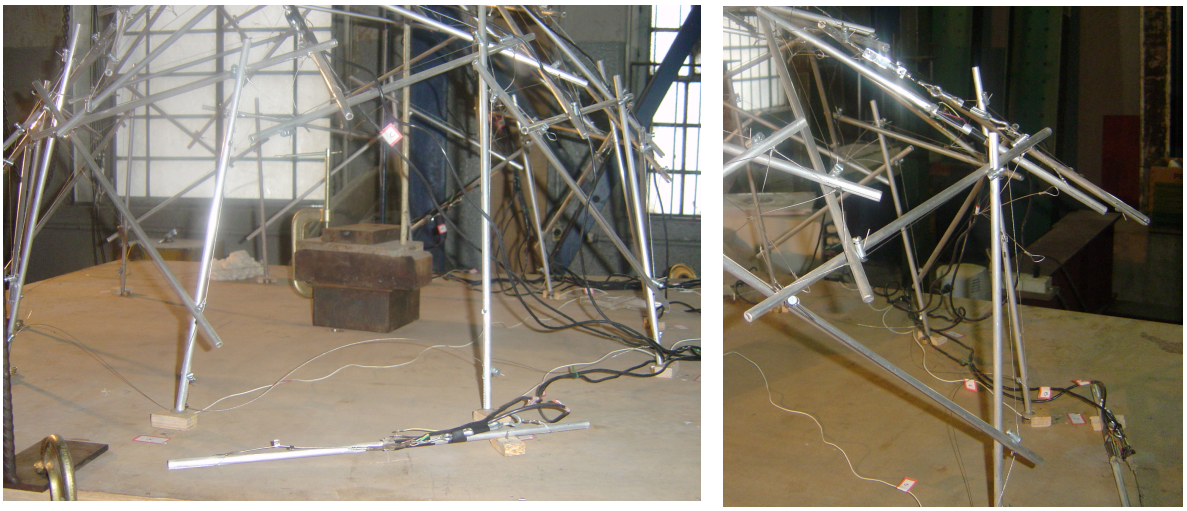


FIGURA 5.1 – Retirada da primeira barra.



FIGURA 5.2 – Retirada da segunda e terceira barras.

A diferença entre a deformação inicial e a final do EER B foi de 99,1972.10^{-6}, do EER D foi de 52,7982.10^{-6} e do EER F foi de 74,33.10^{-6}. A média das deformações destes três EER foi adotada como deformação inicial ε_{y0} = 75,4418.10^{-6}, no modelo numérico.

O gráfico da FIG. 5.3 demonstra que, ao se retirar a barra correspondente ao EER B, há um aumento de tração das cordoalhas referentes aos EER D e F. Ao se retirar a barra do EER D, há completo alívio de esforço na respectiva cordoalha e a continuação do aumento do esforço de tração da cordoalha do EER F. Obviamente, ao se retirar a barra correspondente ao EER F, a cordoalha correspondente apresenta descarregamento.

Pode-se observar que, em valores absolutos, o EER mais próximo da base da cúpula (EER B) apresentou a maior deformação, seguido do EER F. A menor deformação foi apresentada pela cordoalha correspondente ao EER D, posicionado entre o topo e a base da estrutura.

Seguindo a notação apresentada em GRECO *et al*., 2006, a deformação proposta ε é determinada pelos cálculos do comprimentos relativos referentes ao espaço adimensional representado pelo parâmetro ξ.

$$\varepsilon = \frac{ds - ds_0}{ds_0} = \frac{ds/d\xi - ds_0/d\xi}{ds_0/d\xi} = \frac{l}{l_0} - 1 = \frac{\sqrt{B}}{l_0} - 1 \qquad (5.1)$$

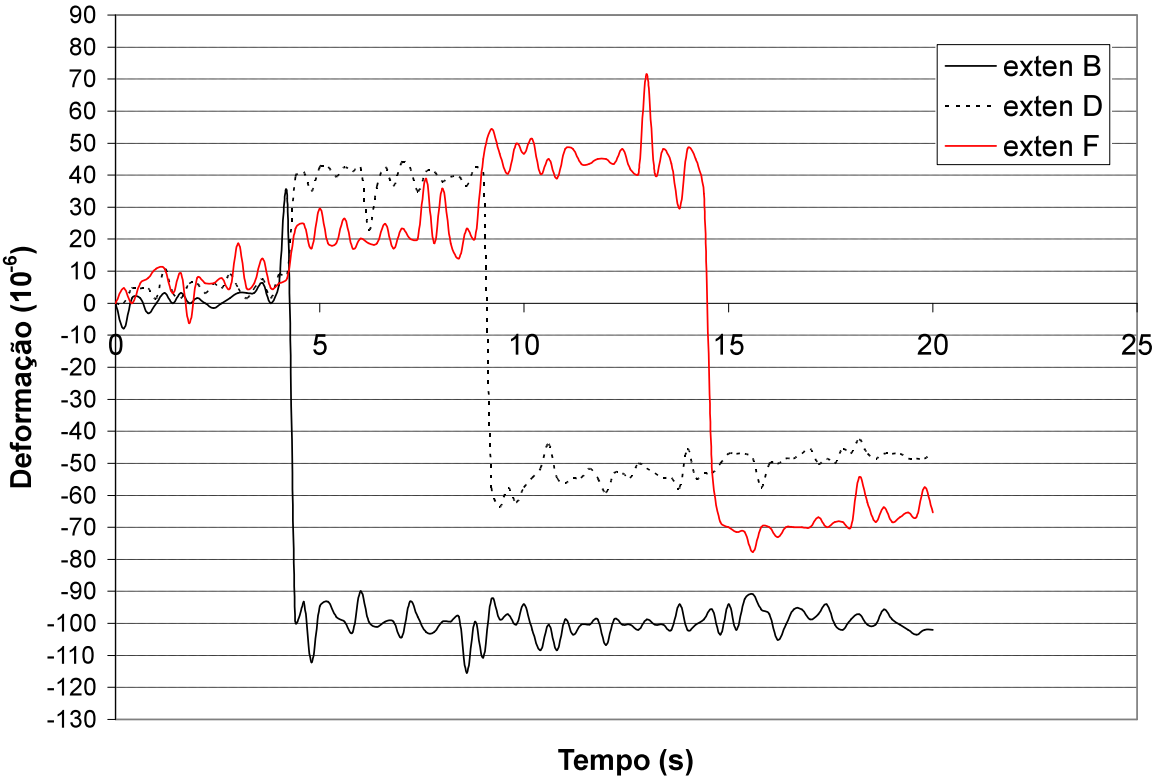


FIGURA 5.3 – Gráfico das deformações ao longo da desmontagem parcial da cúpula.

Os valores $ds_0/d\xi$ e $ds/d\xi$ são alongamentos calculados nos termos do espaço adimensional. Os comprimentos l e l_0 são relacionados com a configuração deformada e a configuração inicial, respectivamente. É importante observar a relação entre a variável auxiliar e o comprimento na configuração deformada:

$$B = l^2 \tag{5.2}$$

A Eq. 5.2 é válida para elementos de treliça sem deformação inicial. Para considerar a deformação inicial das cordoalhas, um comprimento adicional l_D é introduzido:

$$B = l^2 + \left(2ll_D + l_D^2\right) \tag{5.3}$$

O comprimento adicional é associado à deformação inicial ε_0 prescrita nos elementos:

$$l_D = \varepsilon_0 l_0 \tag{5.4}$$

Esta modelagem, ainda recente, não possui denominação comercial. Assim, será denominada, neste trabalho, de GRECO, com o intuito de diferencia-la das demais existentes.

Para a análise numérica, foram simuladas as mesmas situações de aplicação de cargas que a experimental (inclusive o sistema de tracionamento por meio de cordoalhas) e os dados de entrada estão relacionados no Anexo B.

Para melhor entendimento dos resultados apresentados a seguir, a FIG. 5.4 apresenta a numeração dos elementos estruturais (cordoalhas e barras) adotados na análise.

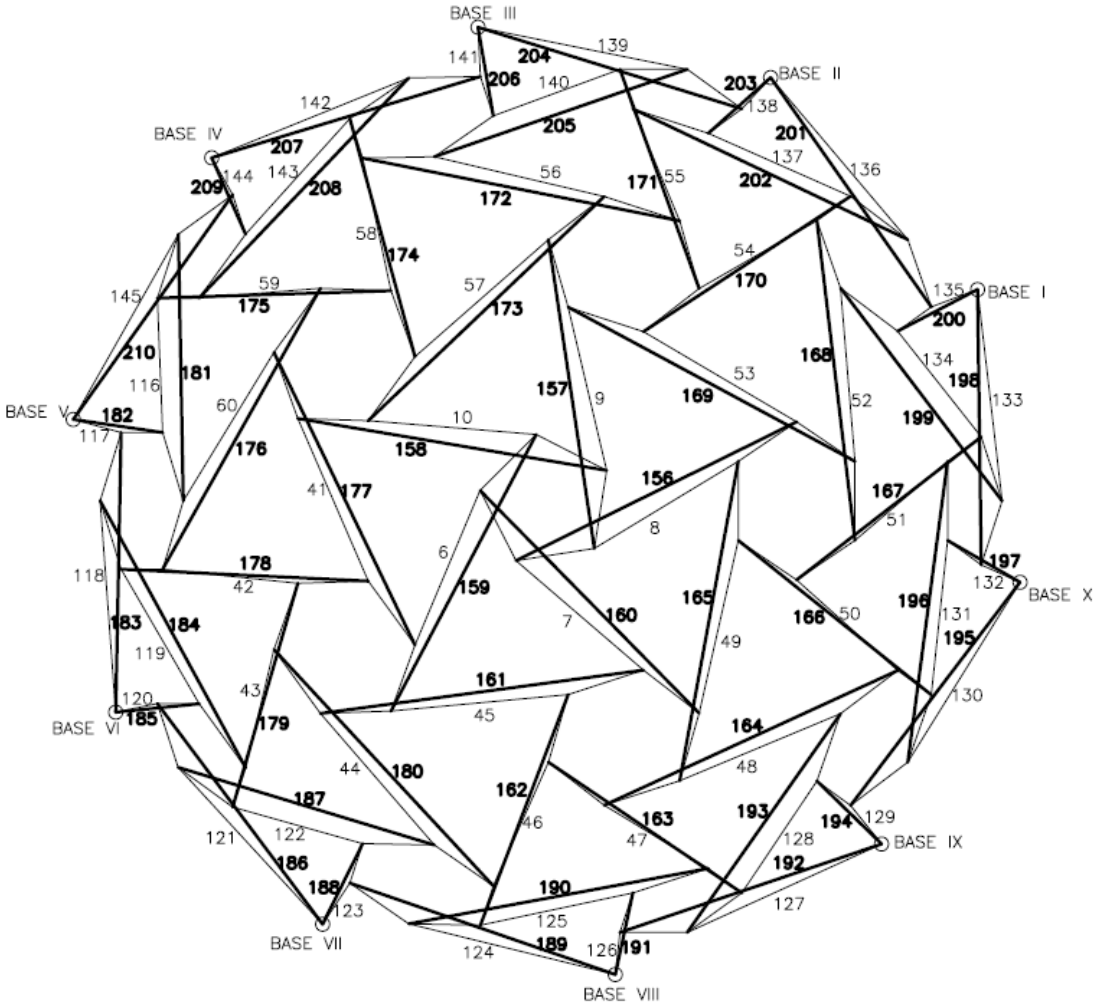
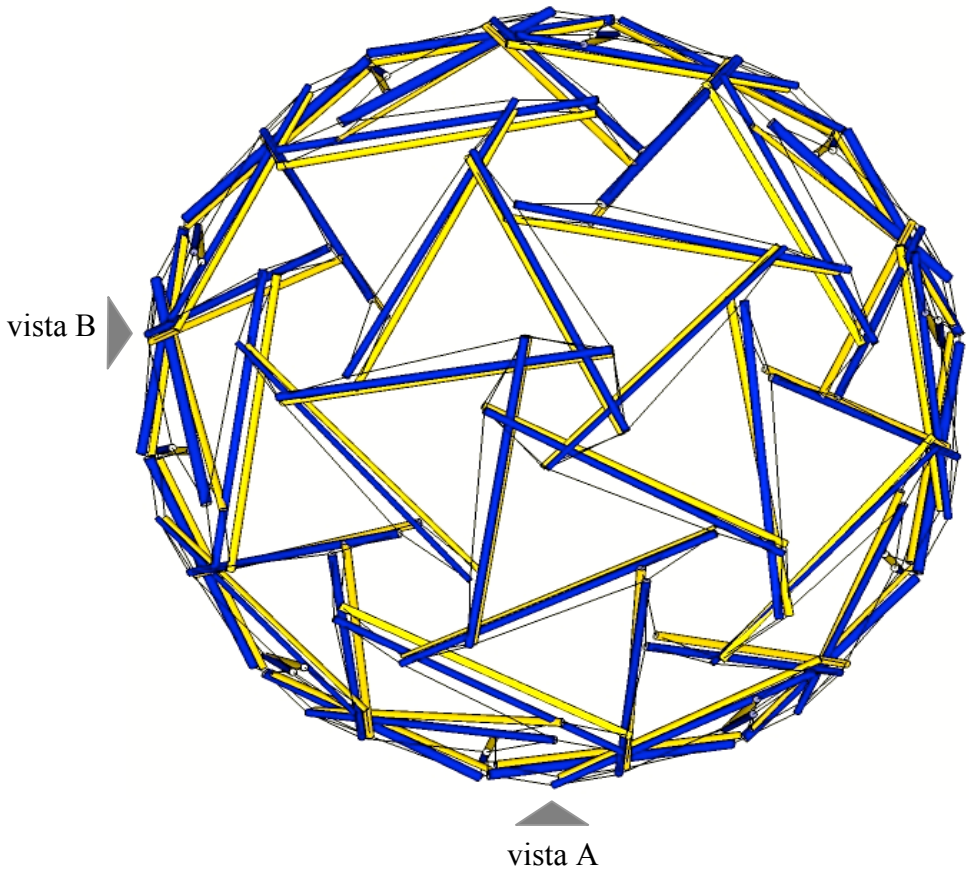


FIGURA 5.4 – Numeração das barras (compressão) e cordoalhas (tração) da cúpula.

5.2.1 Aplicação de cargas em todos os nós

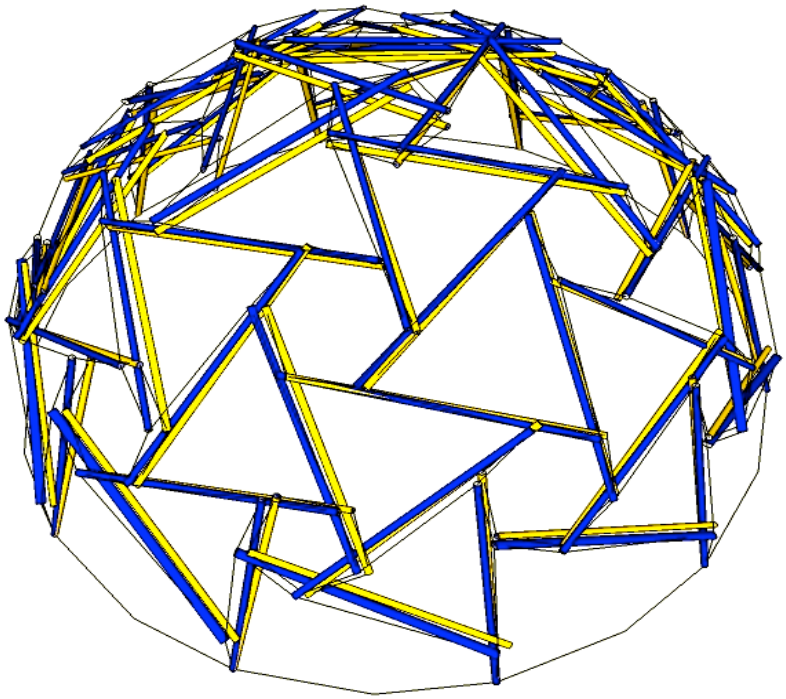
A FIG. 5.5 apresenta esquematicamente a perspectiva e vistas da cúpula geodésica antes e após a aplicação de cargas em todos os nós. Os elementos estruturais em azul apresentam a geodésica em sua configuração inicial, enquanto os elementos em amarelo apresentam a estrutura após aplicação de 600 N.

A FIG. 5.6 apresenta a vista superior da cúpula com a projeção ortogonal dos deslocamentos para cargas aplicadas em todos os nós. Pode-se verificar que todos os nós tendem a se deslocar no sentido anti-horário e para o centro da cúpula.

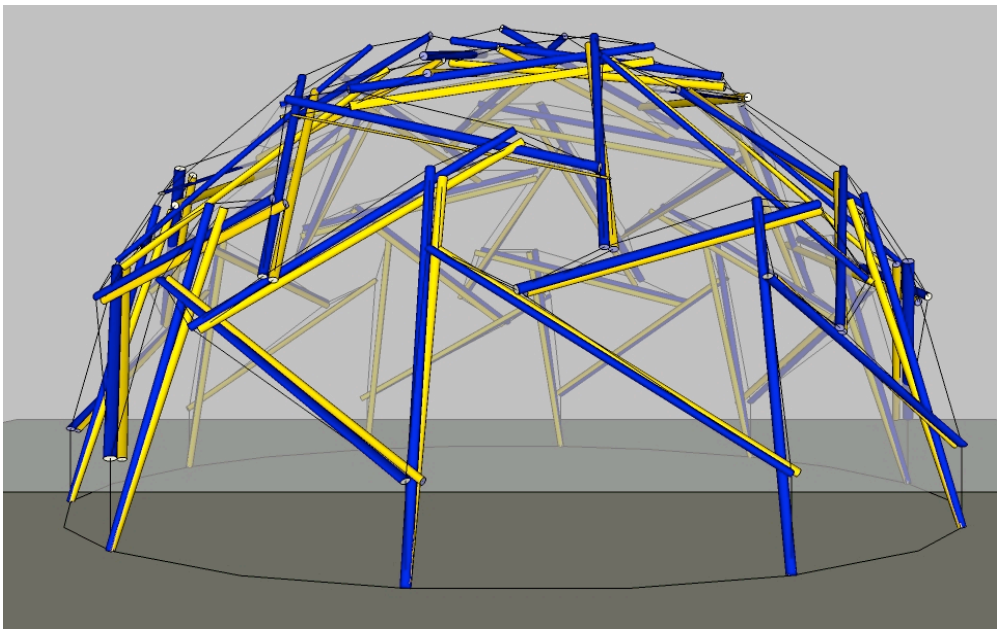


(a) Vista superior.

FIGURA 5.5 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas (continua).

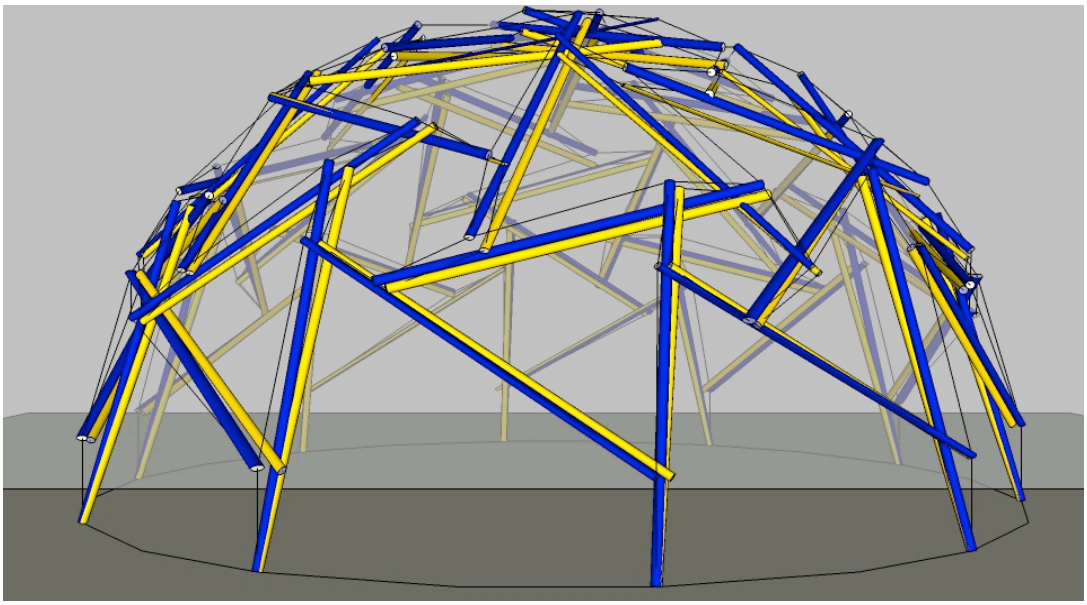


(b) Perspectiva.



(c) Vista A.

FIGURA 5.5 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas (continua).



(d) Vista B.

FIGURA 5.5 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas (conclusão).

Na FIG. 5.6 procurou-se enumerar os pontos de cada nó – isto é, estrutura nodal – iniciando pelo ponto mais próximo e do lado esquerdo da linha que une o centro geométrico do nó ao centro geométrico da projeção vertical da cúpula (linhas traço-ponto), partindo-se sempre do ponto mais próximo desse centro geométrico.

Desta forma, respeitando-se a seqüência de montagem, na FIG. 5.6, o ponto 6 equivale ao 12, ao 18, ao 24 e ao 30, sendo, portanto, compatíveis entre si em termos de deslocamentos radiais.

Da mesma forma, o ponto 7 equivale ao 13, ao 19, ao 25 e ao 31, o ponto 8 equivale ao 14, ao 20, ao 26 e ao 32, o ponto 9 ao 15, ao 21, ao 27 e ao 33, o ponto 10 corresponde aos pontos 16, 22, 28 e 34 e, finalmente, o ponto 11 equivale ao 17, ao 23, ao 29 e ao 35.

Quanto aos pontos 36 a 41, suas correspondências são: 36 corresponde a 47, 58, 69 e 80; 37 corresponde a 48, 59, 70 e 81; 38 corresponde a 49, 60, 71 e 82; 39 corresponde a 50, 61, 72 e 83; 40 corresponde a 51, 62, 73 e 84 e, finalmente, 41 corresponde a 52, 63, 74 e 85.

Estas seqüências estão assim organizadas em função da numeração dos pontos adotada para a análise numérica (FIG. 5.6).

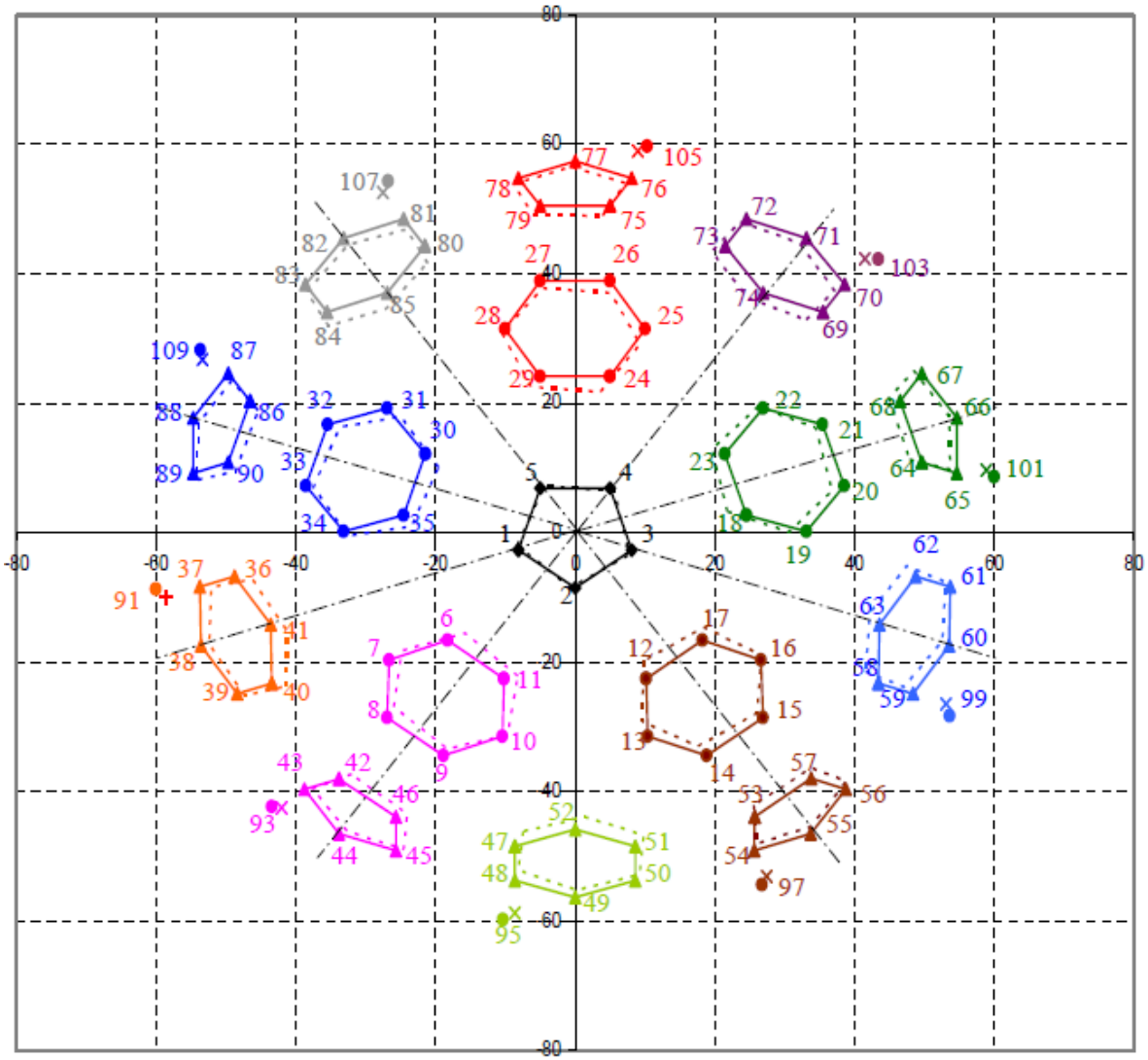
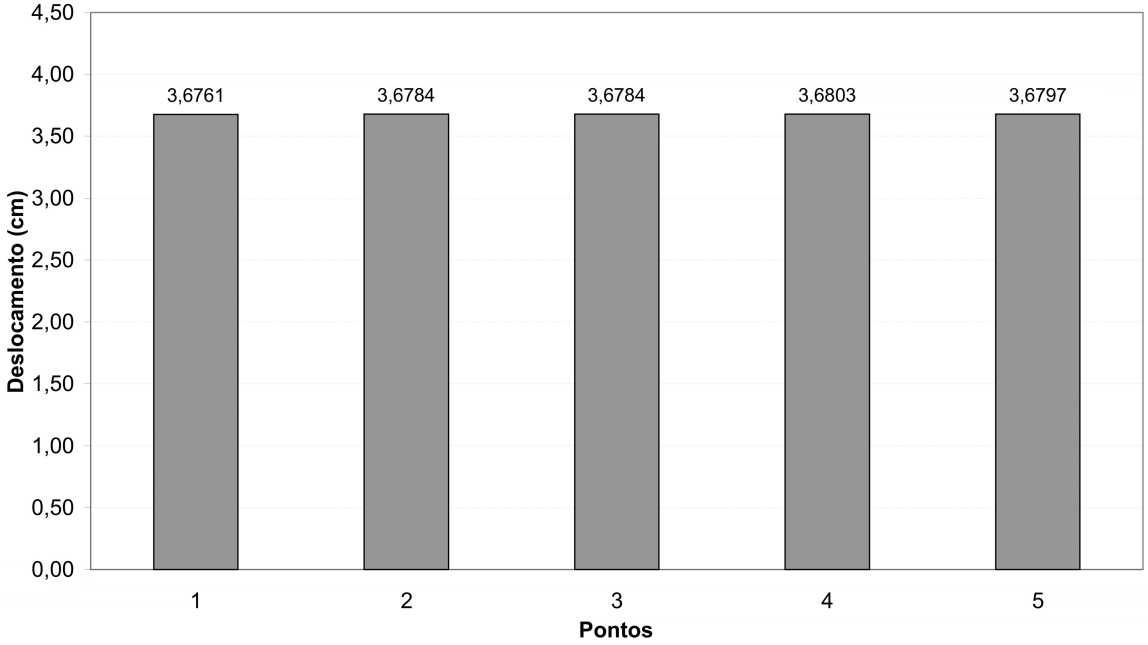
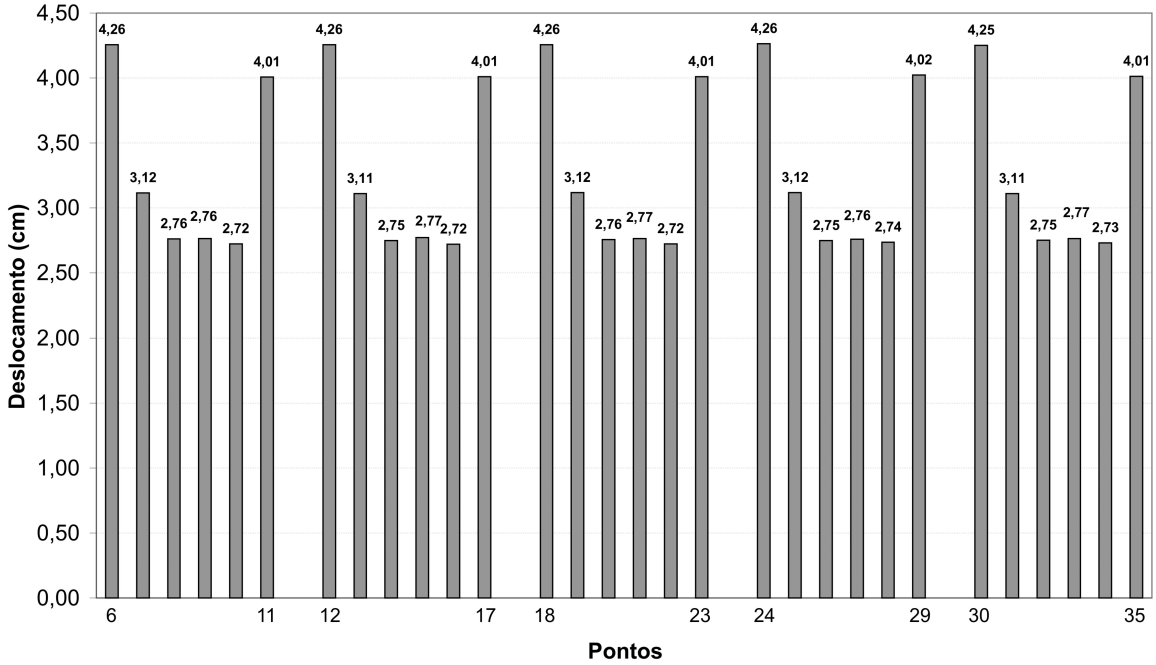


FIGURA 5.6 – Vista superior da cúpula com a numeração e os deslocamentos dos nós (numeração das ordenadas e abcissas em cm).

Os gráficos da FIG. 5.7 apresentam os valores dos deslocamentos resultantes dos pontos que representam as extremidades dos elementos estruturais (vide FIG. 5.6).

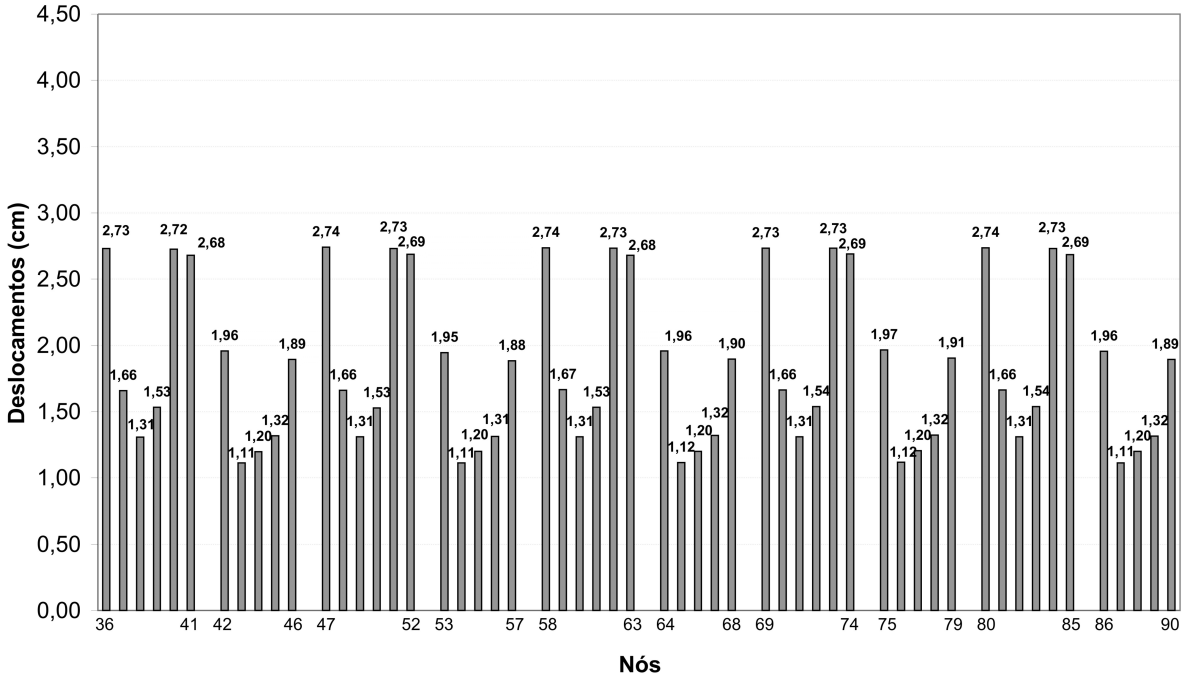


(a) Pontos 1 a 5.

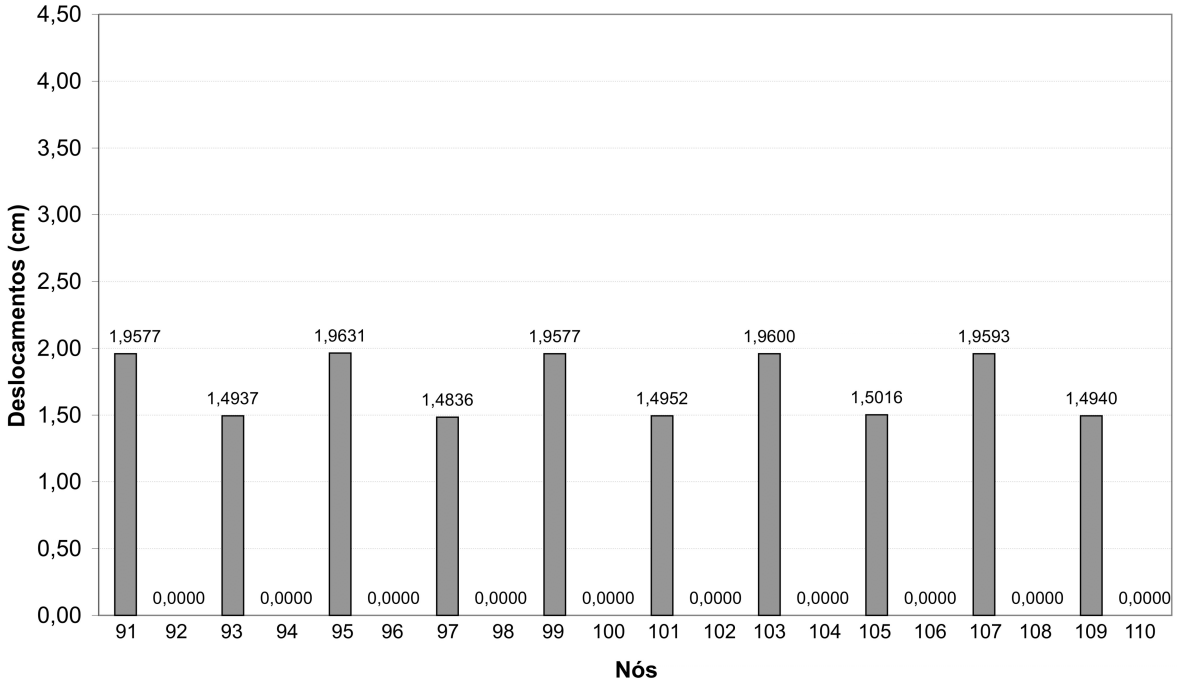


(b) Pontos 6 a 35.

FIGURA 5.7 – Deslocamentos radiais para aplicação de carga em todos os nós (continua).



(c) Pontos 36 a 90.



(d) Pontos 91 a 110.

FIGURA 5.7 – Deslocamentos radiais para aplicação de carga em todos os nós (conclusão).

Ao se observar a FIG. 5.7a, os deslocamentos dos pontos 1 a 5, correspondentes ao nó do topo da cúpula, apresentam valor médio igual a 3,6786 cm e desvio padrão de 0,0016 cm (0,0435% do valor da média).

Nos gráficos da FIG. 5.7b, pode-se verificar que os pontos 6, 12, 18, 24 e 30 apresentam deslocamentos com a mesma ordem de grandeza, quando comparados entre si, o que se repete ao se comparar os demais pontos.

Na FIG. 5.7c, observação análoga pode ser feita quando são comparados entre si os deslocamentos dos nós hexagonais (vide pontos 36 a 41, 47 a 52, 58 a 63, 69 a 74 e 80 a 85) e pentagonais (vide pontos 42 a 46, 53 a 57, 64 a 68, 75 a 79 e 86 a 90).

A título de exemplo (nós pentagonais), tem-se:

- Ponto 43: deslocamento igual a 1,11 cm;
- Ponto correspondente 54: deslocamento igual a 1,11 cm;
- Ponto correspondente 65: deslocamento igual a 1,12 cm;
- Ponto correspondente 76: deslocamento igual a 1,12 cm;
- Ponto correspondente 87: deslocamento igual a 1,11 cm.

Na FIG. 5.7d, os pontos 92, 94, 96, 98, 100, 102, 104, 106, 108 e 110, correspondentes aos apoios da estrutura (denominados de Bases I a X, FIG. 3.20) obviamente não se deslocam (adotando-se os vínculos dos apoios como articulados fixos).

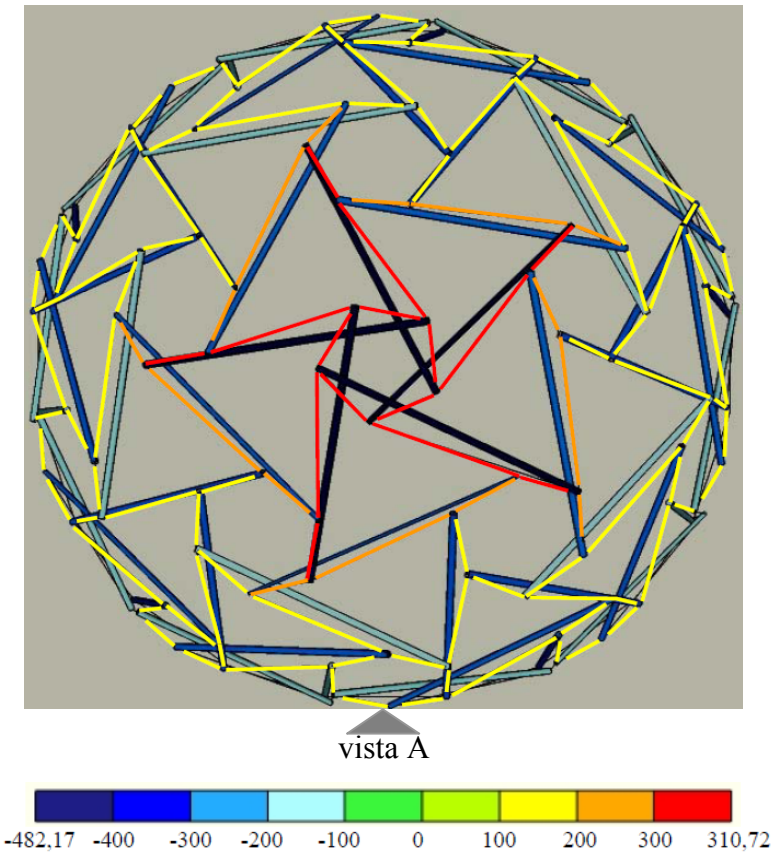
Contudo, ao se observar ainda a FIG. 5.7d, os deslocamentos dos pontos referentes às ligações entre as barras, isto é: pontos 91, 93, 95, 97, 99, 101, 103, 105, 107 e 109 (FIG. 5.6), tem-se:

- Os pontos 91, 95, 99, 103 e 107 (correspondentes às barras adjacentes às estruturas nodais hexagonais) apresentam valores similares para deslocamentos radiais, sendo

a média igual a 1,9596 cm e desvio padrão igual a 0,0022 cm (0,1123% do valor da média);

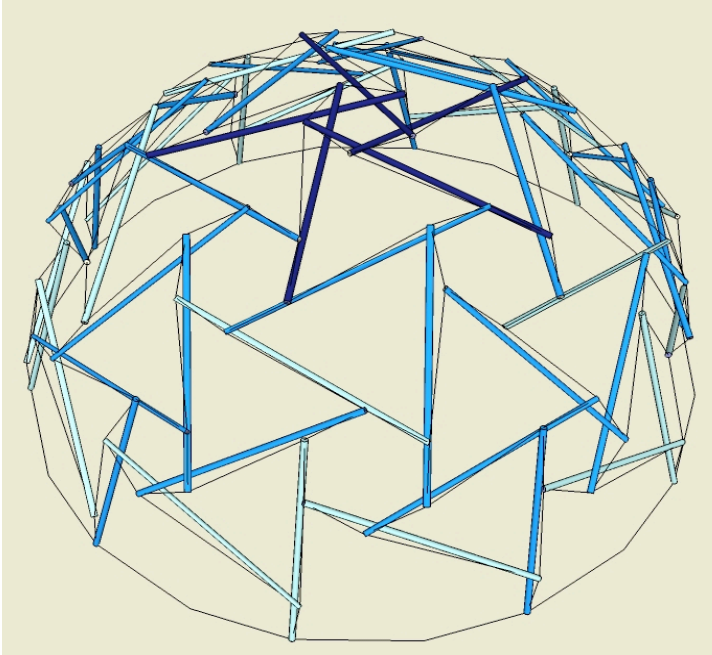
- Os pontos 93, 97, 101, 105 e 109 (correspondentes às barras adjacentes aos nós pentagonais) apresentam valores similares para deslocamentos radiais, sendo a média igual a 1,4936 cm e desvio padrão igual a 0,0064 cm (0,4285% do valor da média).

A FIG. 5.8 apresenta, em escala de cores, os valores dos esforços normais solicitantes de tração e de compressão nas cordoalhas e barras, respectivamente. Seus valores numéricos são apresentados nos gráficos da FIG. 5.9, em cada par de cordoalha-barra, isto é: cordoalha 8 com barra 156, e assim por diante.

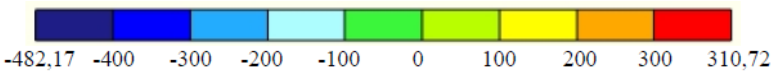


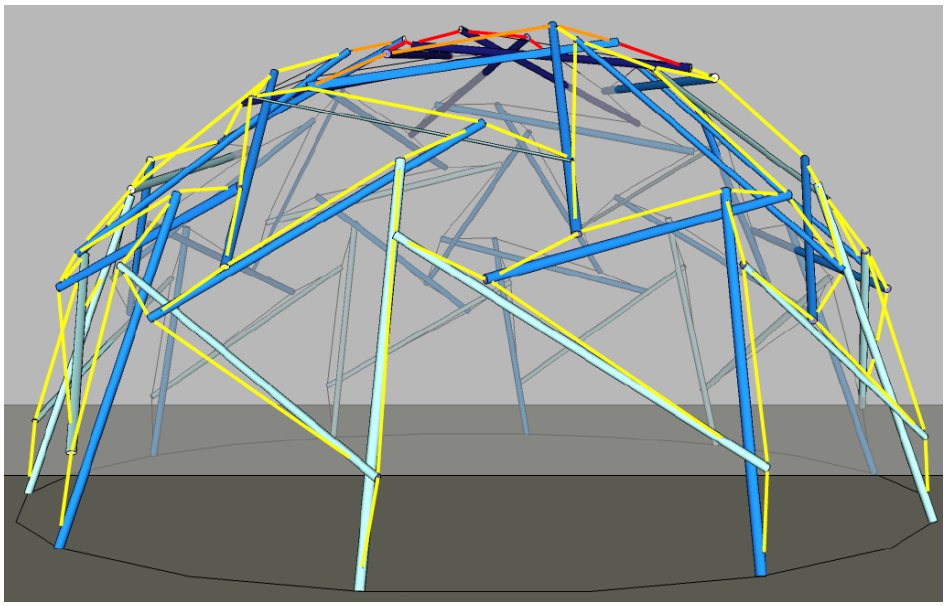
(a) Vista superior.

FIGURA 5.8 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (continua).



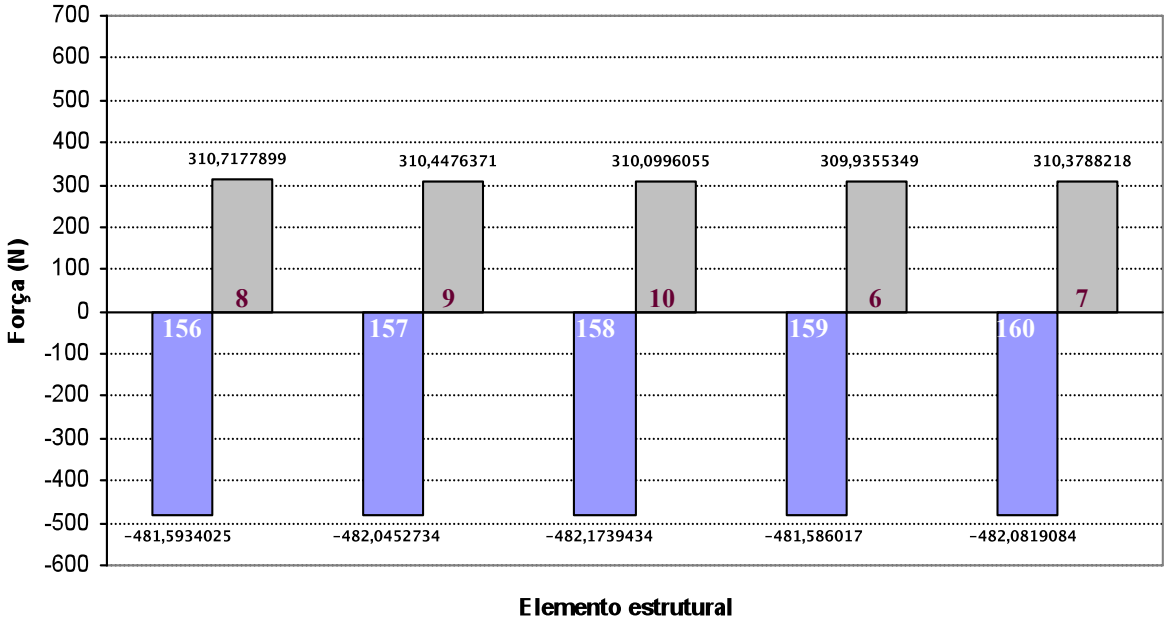
(b) Perspectiva.



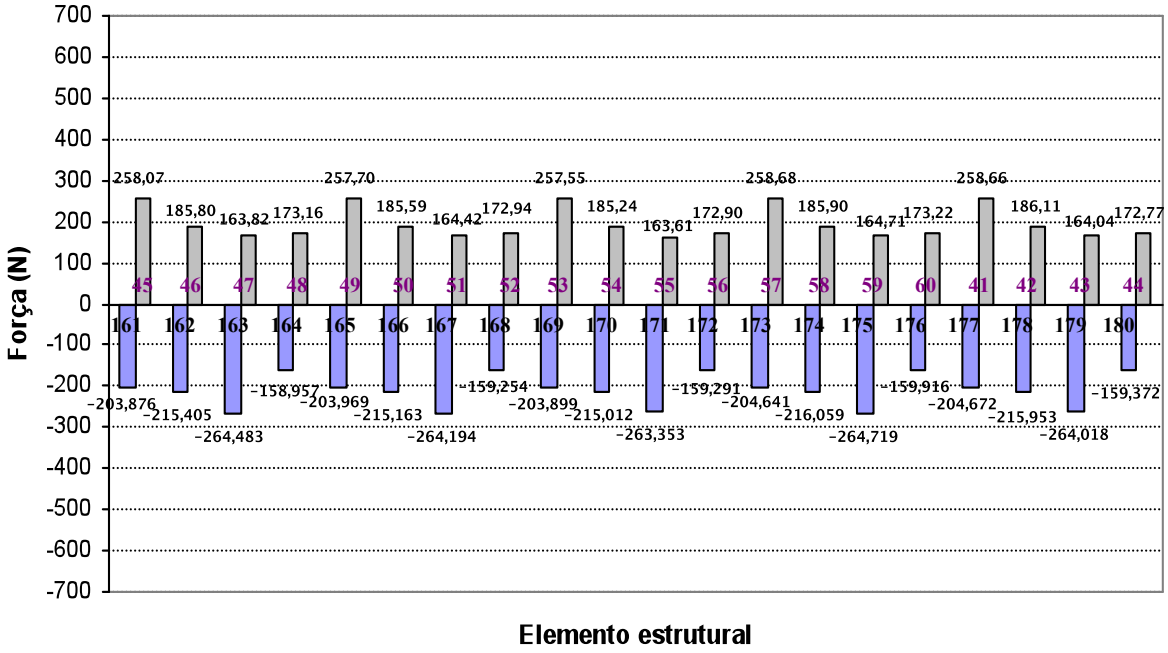


(c) Vista A.

FIGURA 5.8 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (conclusão).

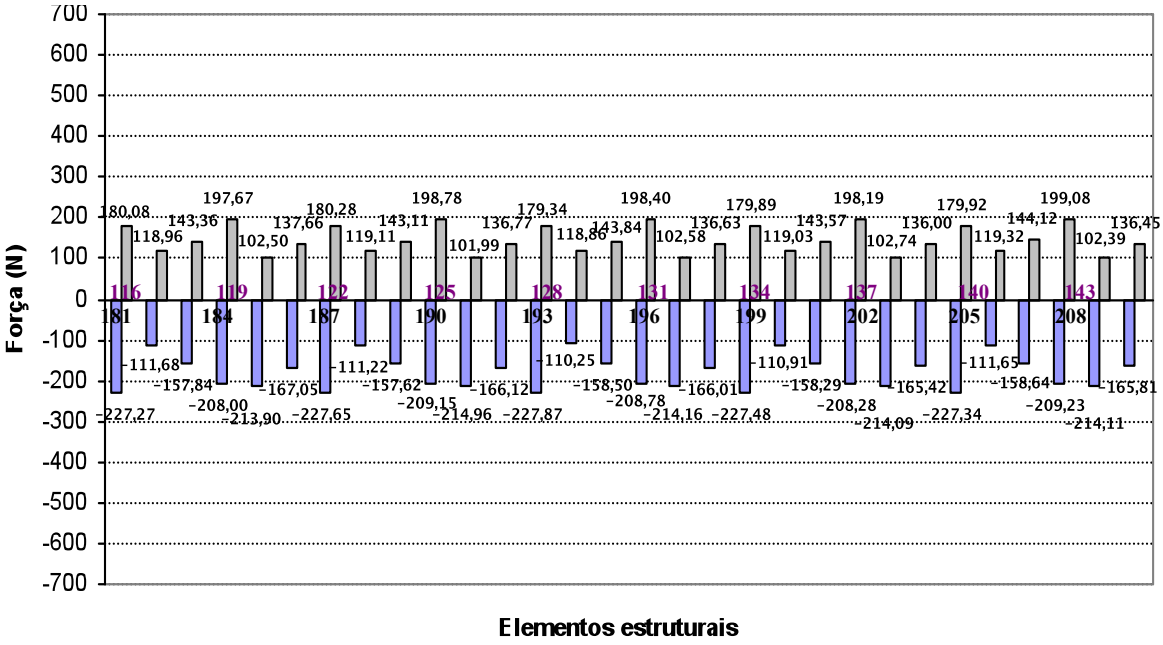


(a) Cordoalhas de 6 a 10 e barras de 156 a 160.



(b) Cordoalhas de 41 a 60 e barras de 161 a 180.

FIGURA 5.9 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (continua).



(c) Cordoalhas de 116 a 145 e barras de 181 a 210.

FIGURA 5.9 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (conclusão).

Ao se observar a FIG. 5.9a, verifica-se que as cordoalhas e as barras apresentam valores com a mesma ordem de grandeza. A média dos esforços nas barras é igual a 481,8961 N (compressão), com desvio padrão de 0,2836 N (0,0589% do valor da média). Nas cordoalhas, a média é de 310,3159 N (tração), e desvio padrão de 0,3059 N (0,0988% do valor da média).

Quanto à FIG. 5.9b, ocorre uma simetria no comportamento dos elementos estruturais. Quando se verificam grupos de quatro cordoalhas e / ou barras, observam-se comportamentos similares entre si, tais como os conjuntos das barras 164 a 167, 168 a 171, 172 a 175 e 176 a 179, ou ainda o conjunto de cordoalhas 41 a 44, 45 a 48, 49 a 52, 53 a 56 e 57 a 60.

A título de exemplo, tem-se:

- As barras 163, 167, 171, 175 e 179 apresentam a média dos valores igual a 264,1536 N (compressão) e o desvio padrão de 0,5217 N (0,1975% do valor da média);

- A média dos valores das barras 164, 168, 172, 176 e 180 é de 159,3580 N, compressão, e desvio padrão de 0,3491 N (0,2191% do valor da média);

- As cordoalhas 41, 45, 49, 53 e 57 apresentam a média dos valores igual a 258,1330 N (tração) e o desvio padrão de 0,5264 N (0,2039% do valor da média).

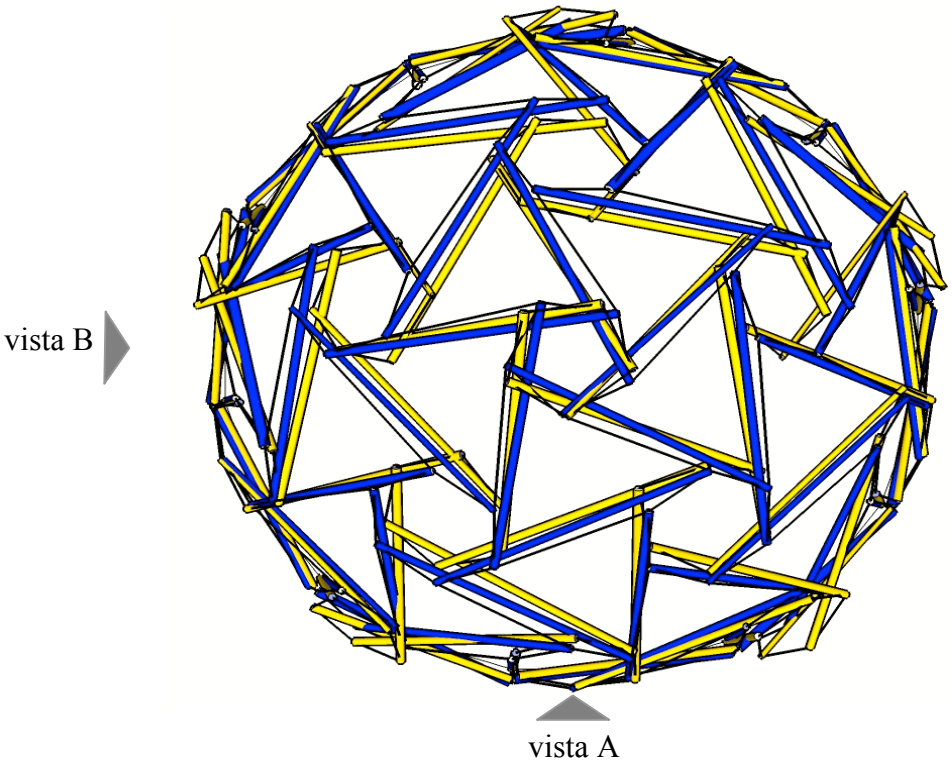
Ao se observar a FIG. 5.9c, o comportamento também é simétrico. Ou seja, para aplicação de cargas em todos os nós da estrutura, há simetria na distribuição dos esforços solicitantes tanto para barras quanto cordoalhas. Isto significa que, para esta aplicação de carga analisada, pode-se tirar partido da simetria para uma análise estrutural visando seu dimensionamento.

5.2.2 Aplicação de carga nos cinco nós da parte superior da cúpula

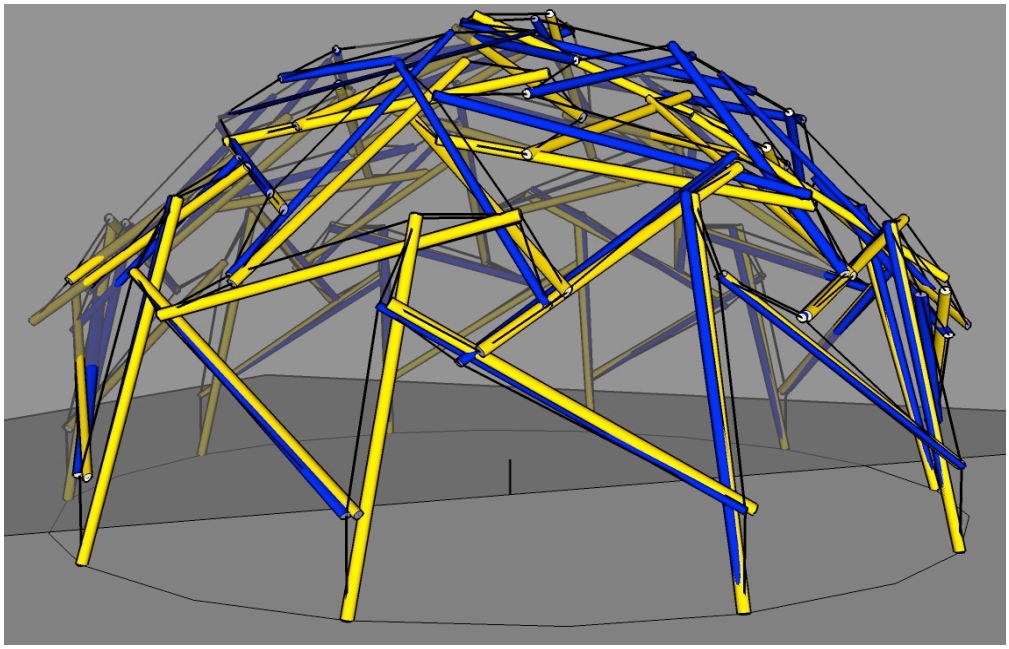
A FIG. 5.10 apresenta esquematicamente a perspectiva e vistas da cúpula geodésica antes e após a aplicação de cargas, simulando um mezanino apoiado nos cinco nós da parte superior da referida estrutura. Os elementos estruturais em azul apresentam a geodésica em sua configuração inicial, enquanto os elementos em amarelo apresentam a estrutura deformada após aplicação de 400 N.

A FIG. 5.11 apresenta a vista superior da cúpula com os deslocamentos para cargas aplicadas nos cinco nós do topo da cúpula. A numeração dos pontos de cada nó segue a mesma seqüência que a apresentada na FIG. 5.6.

Pode-se verificar que todos os nós tendem a se deslocar no sentido anti-horário. Entretanto, diferente do caso apresentado no item anterior, alguns nós se aproximam do centro da cúpula (como é o caso dos cinco nós da base do mezanino, onde foi aplicado o carregamento). Contudo, os nós pentagonais se deslocaram no sentido oposto ao centro geométrico da cúpula.

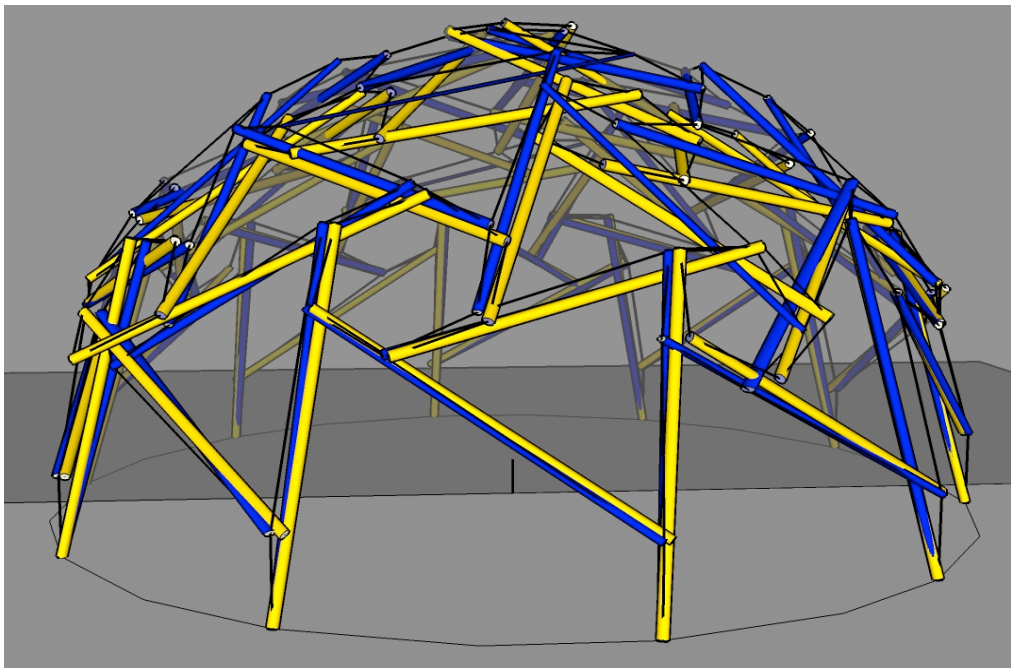


(a) Vista superior.

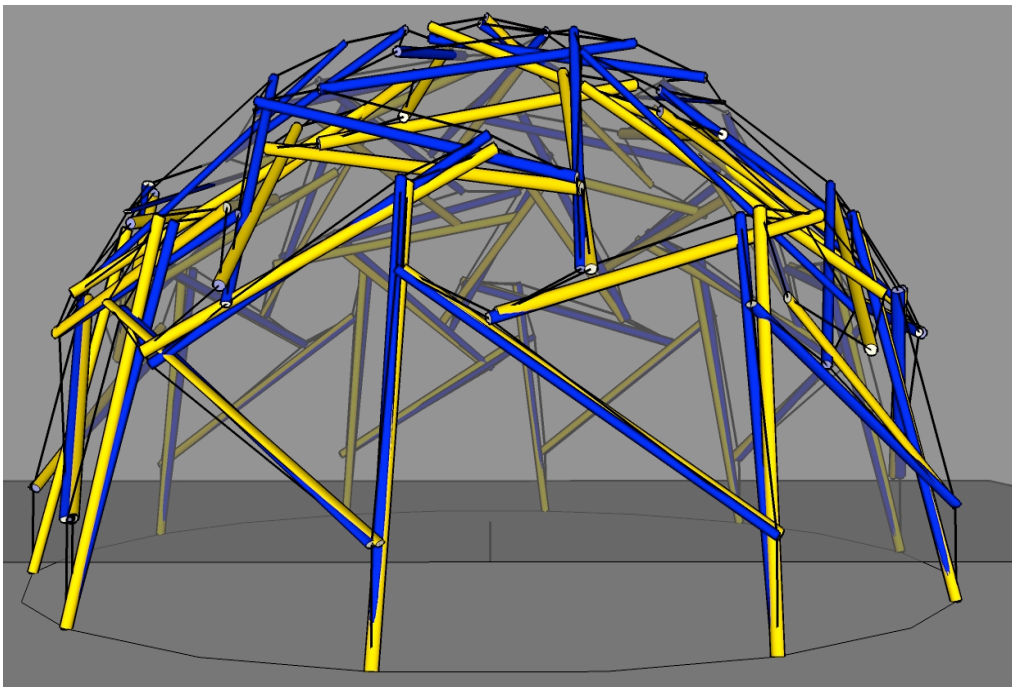


(b) Perspectiva.

FIGURA 5.10 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas (continua).



(c) Vista A.



(d) Vista B.

FIGURA 5.10 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas (conclusão).

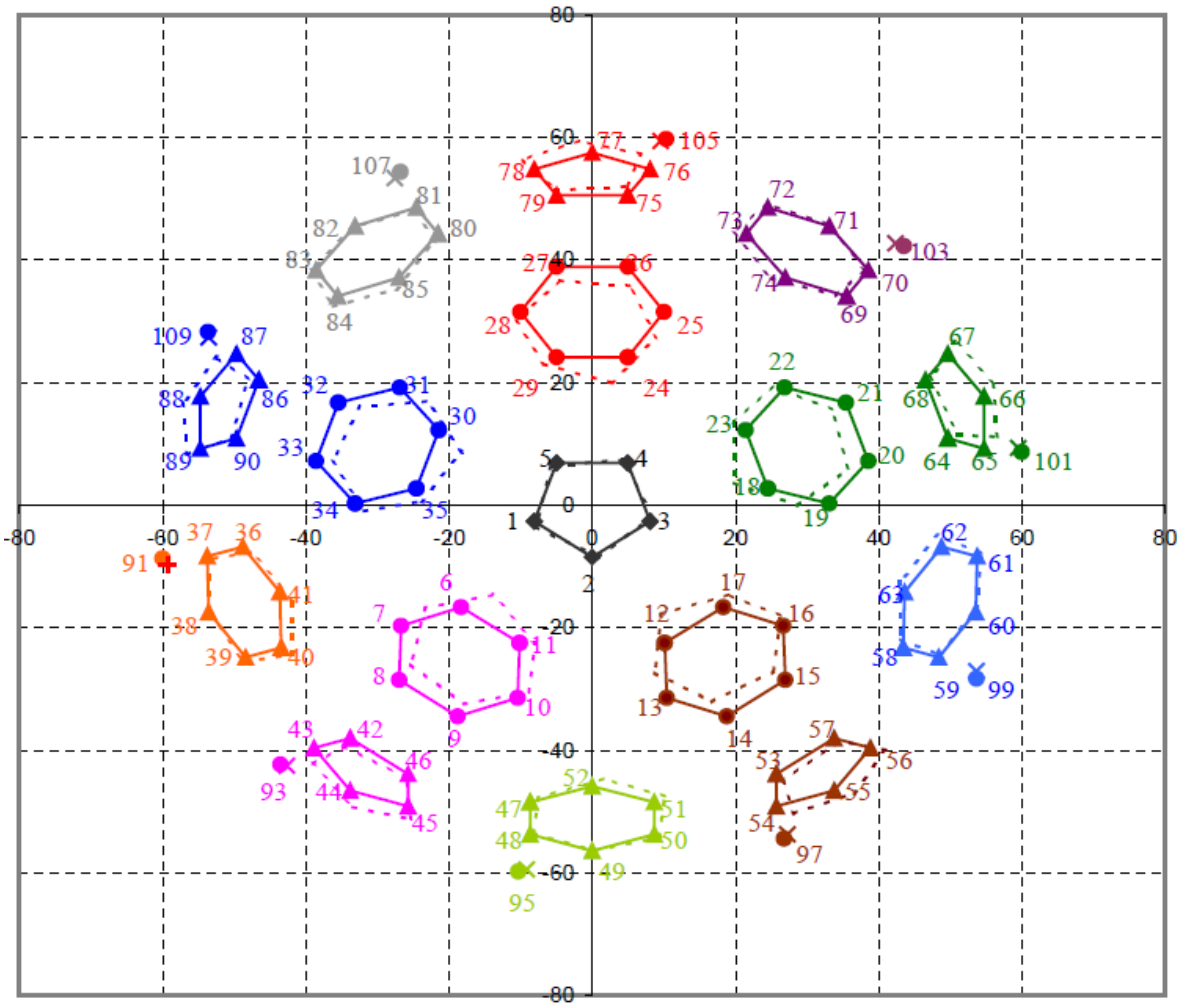
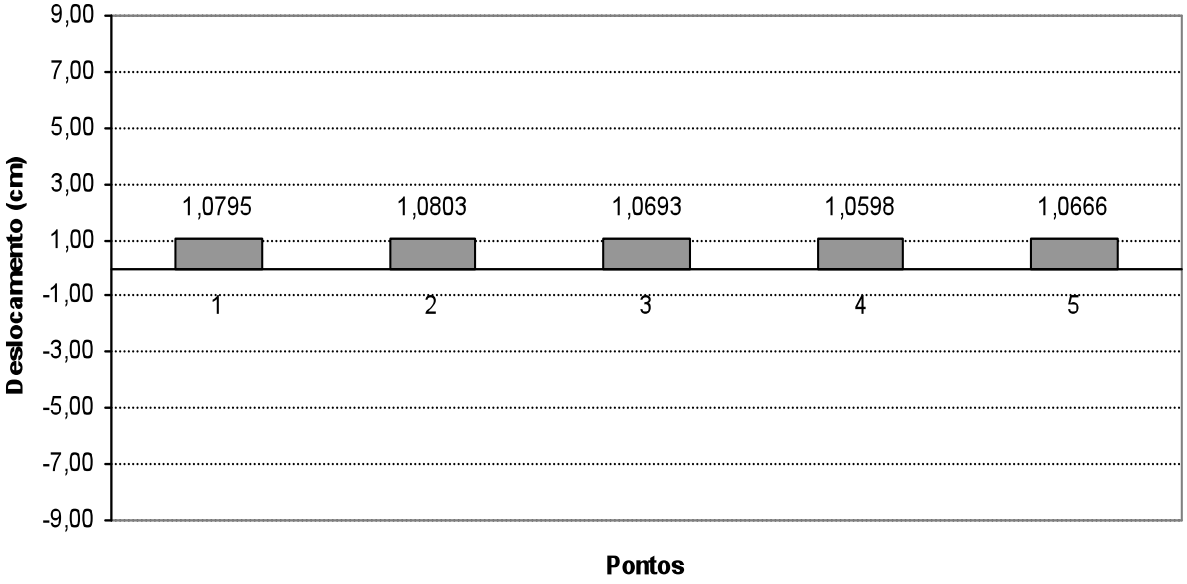


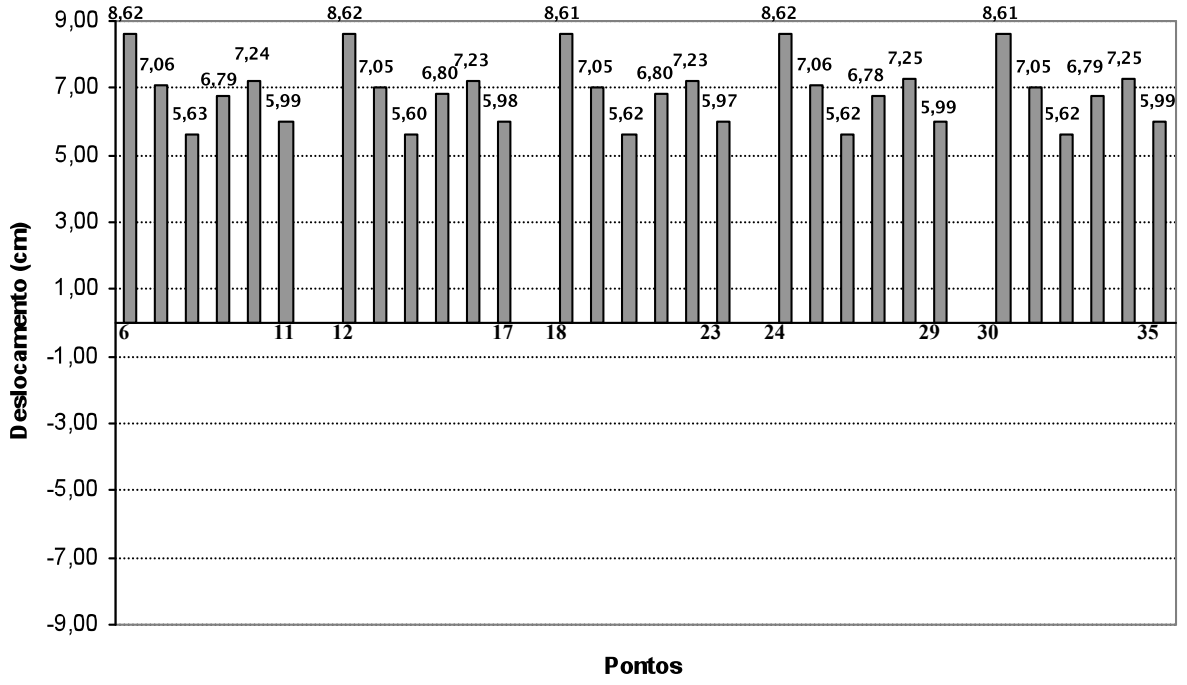
FIGURA 5.11 – Vista superior da cúpula com a numeração e os deslocamentos dos nós (numeração das ordenadas e abcissas em cm).

Os gráficos da FIG. 5.12 apresentam os valores dos deslocamentos resultantes dos pontos que apresentam as extremidades dos elementos estruturais (vide FIG. 5.11).

Ao se observar os pontos 1 a 5 (FIG. 5.12a), correspondentes ao nó do topo da cúpula, os deslocamentos apresentam valor médio igual a 1,0711 cm e desvio padrão de 0,0087 cm (0,8122% do valor da média).

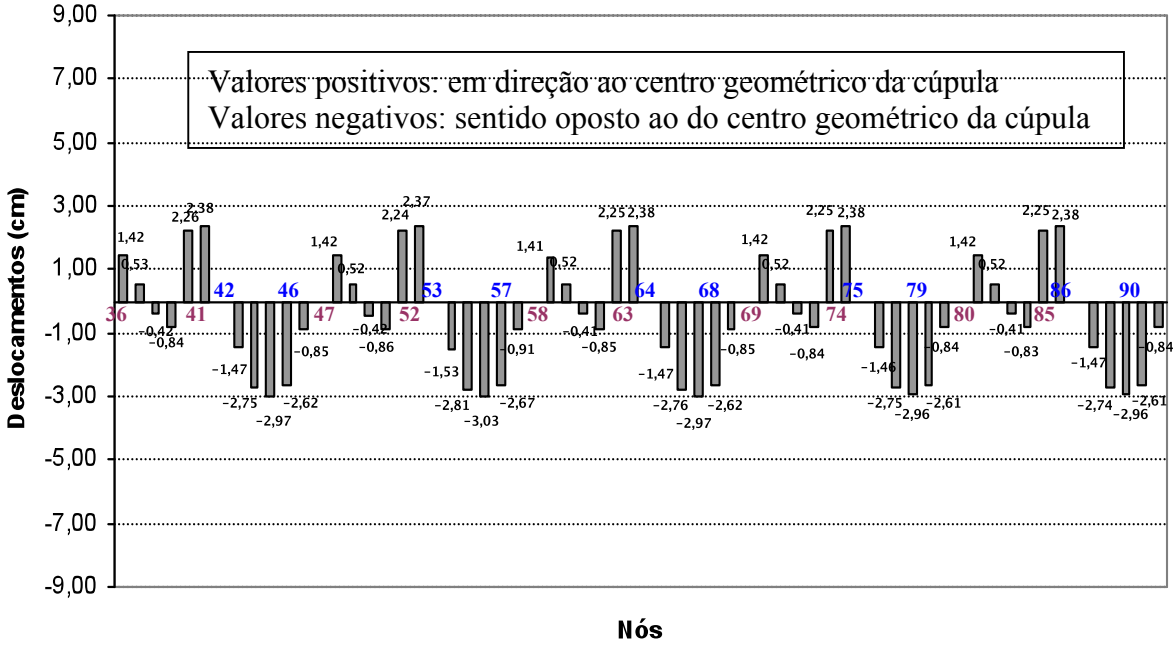


(a) Pontos 1 a 5.

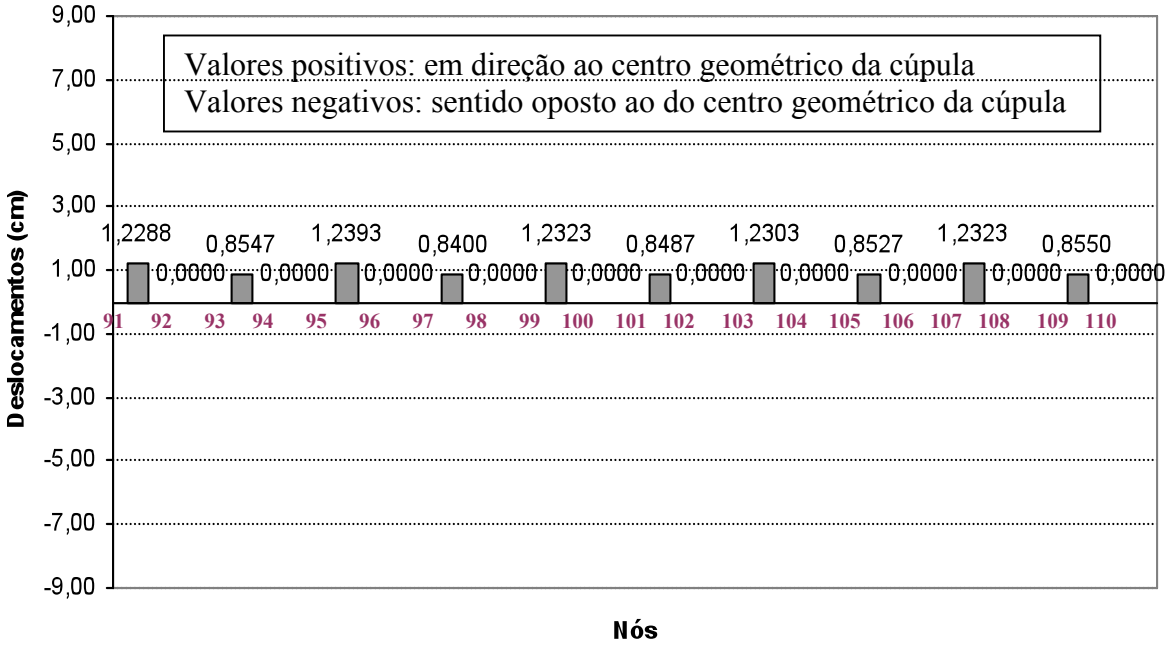


(b) Pontos 6 a 35.

FIGURA 5.12 – Deslocamentos radiais para aplicação de carga nos cinco nós da parte superior da cúpula (continua).



(c) Nós 36 a 90.



(d) Pontos 91 a 110.

FIGURA 5.12 – Deslocamentos radiais para aplicação de carga nos cinco nós da parte superior da cúpula (conclusão).

Nos gráficos da FIG. 5.12b, pode-se verificar que os resultados dos deslocamentos apresentam os valores de mesma ordem de grandeza quando se comparam os nós situados na mesma cota da geodésica (vide pontos 6, 12, 18, 24 e 30, por exemplo, cuja média é igual a 8,6164 cm).

Na FIG. 5.12c verifica-se que os nós pentagonais também apresentam deslocamentos com a mesma ordem de grandeza, quando comparados entre si (vide pontos 42 a 46, 53 a 57, 64 a 68, 75 a 79 e 86 a 90).

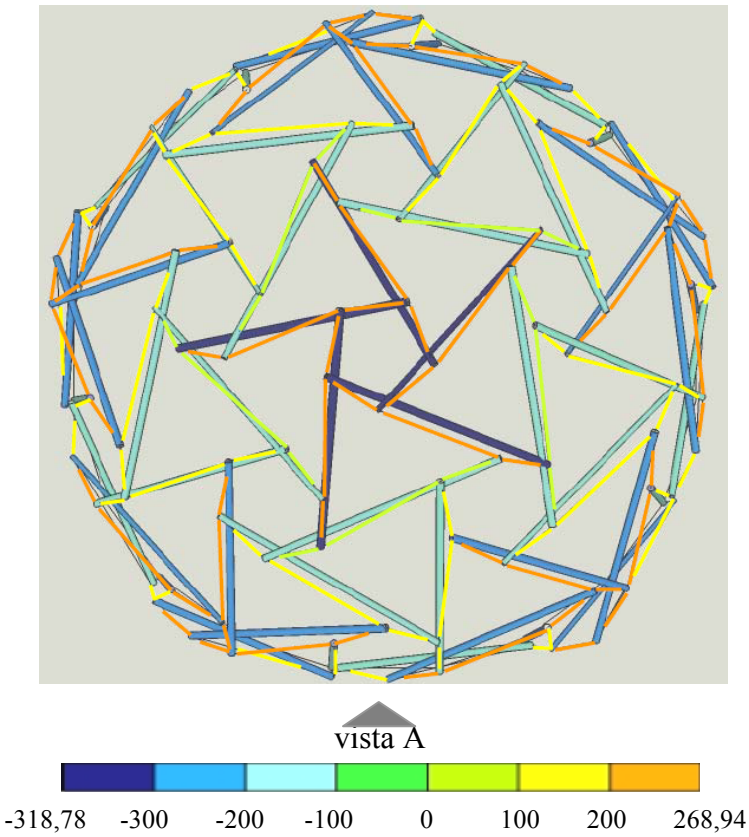
Observação análoga pode ser feita quando são comparados entre si os deslocamentos dos nós hexagonais (vide pontos 36 a 41, 47 a 52, 58 a 63, 69 a 74 e 80 a 85).

É importante salientar que os pontos 38 e 39, 49 e 50, 60 e 61, 71 e 72 e 82 e 83, diferentemente dos demais pontos pertencentes aos mesmos nós hexagonais, se deslocam no sentido oposto ao do centro geométrico da cúpula.

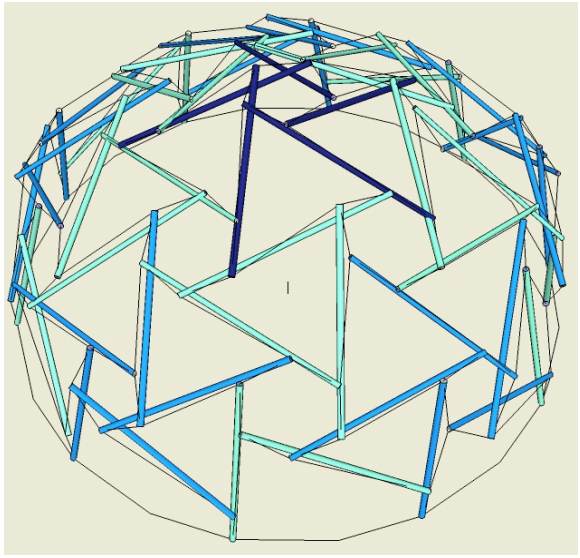
Verifica-se ainda que os pontos 92, 94, 96, 98, 100, 102, 104, 106, 108 e 110 (FIG. 5.12d), correspondentes aos apoios da estrutura (denominados de Bases I a X, FIG. 3.20) não se deslocam (adotando-se os vínculos dos apoios como articulados fixos).

Na FIG. 5.12d os pontos 91, 95, 99, 103 e 107 apresentam deslocamentos com a mesma ordem de grandeza, cuja média é igual a 1,2623 cm. O mesmo pode ser firmado com relação aos pontos 93, 97, 101, 105 e 109, cuja média é igual a 0,8502 cm.

Como no item 5.2.1, a FIG. 5.13 apresenta em escala de cores, os valores das forças de tração das cordoalhas e de compressão das barras, e seus valores são apresentados nos gráficos da FIG. 5.14 de forma análoga à FIG. 5.9.

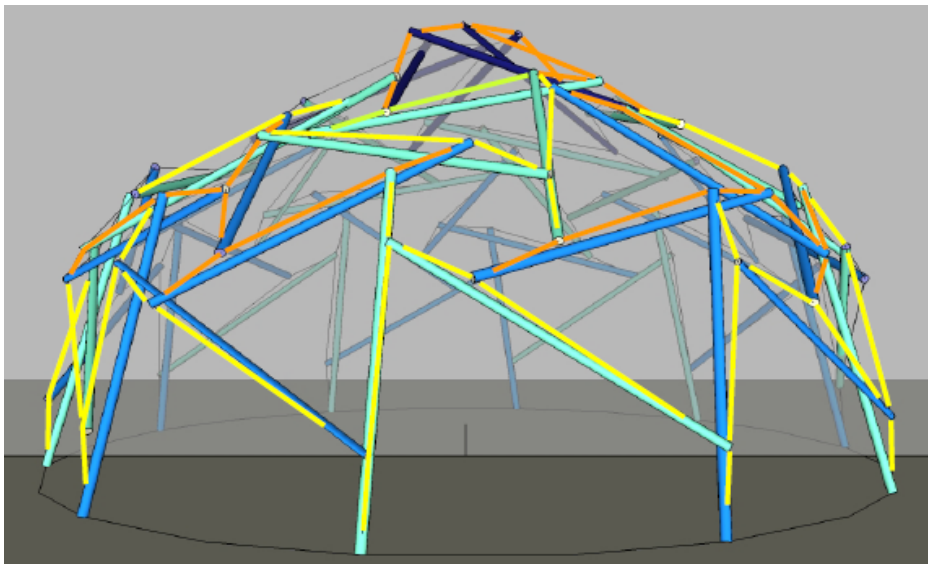


(a) Vista superior.



(b) Perspectiva.

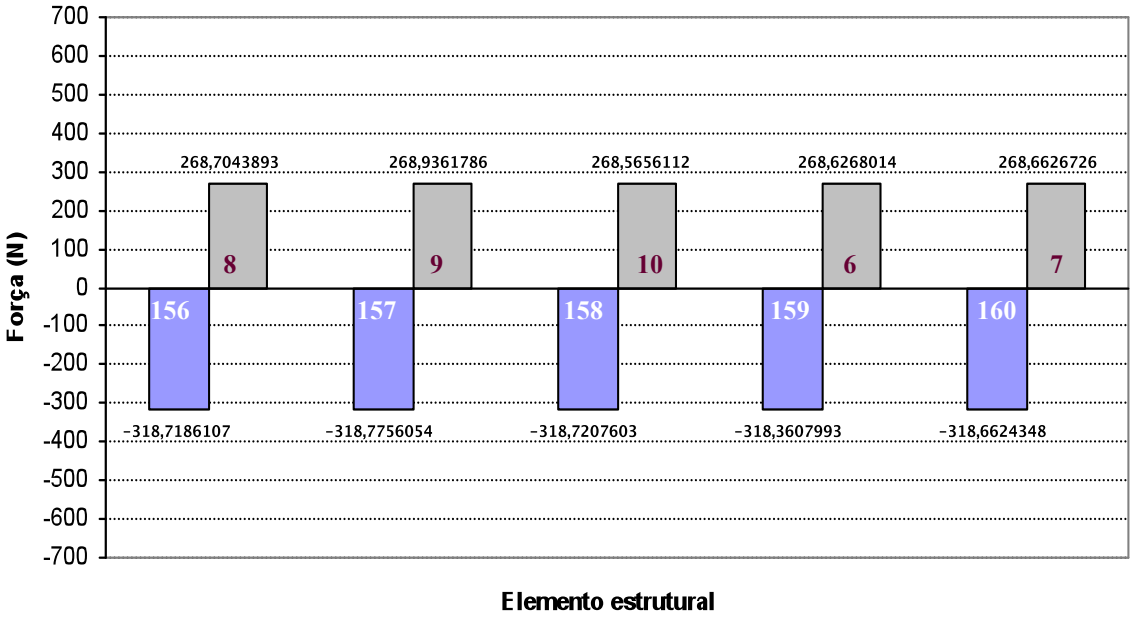
FIGURA 5.13 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (continua).



(c) Vista A.

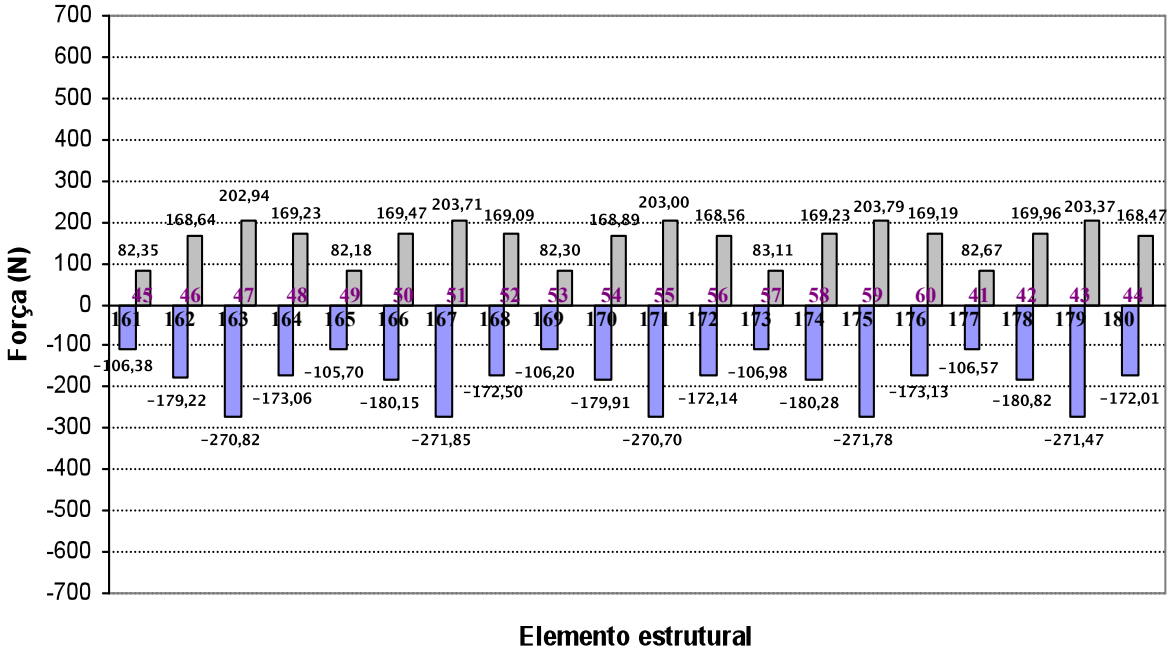


FIGURA 5.13 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (conclusão).

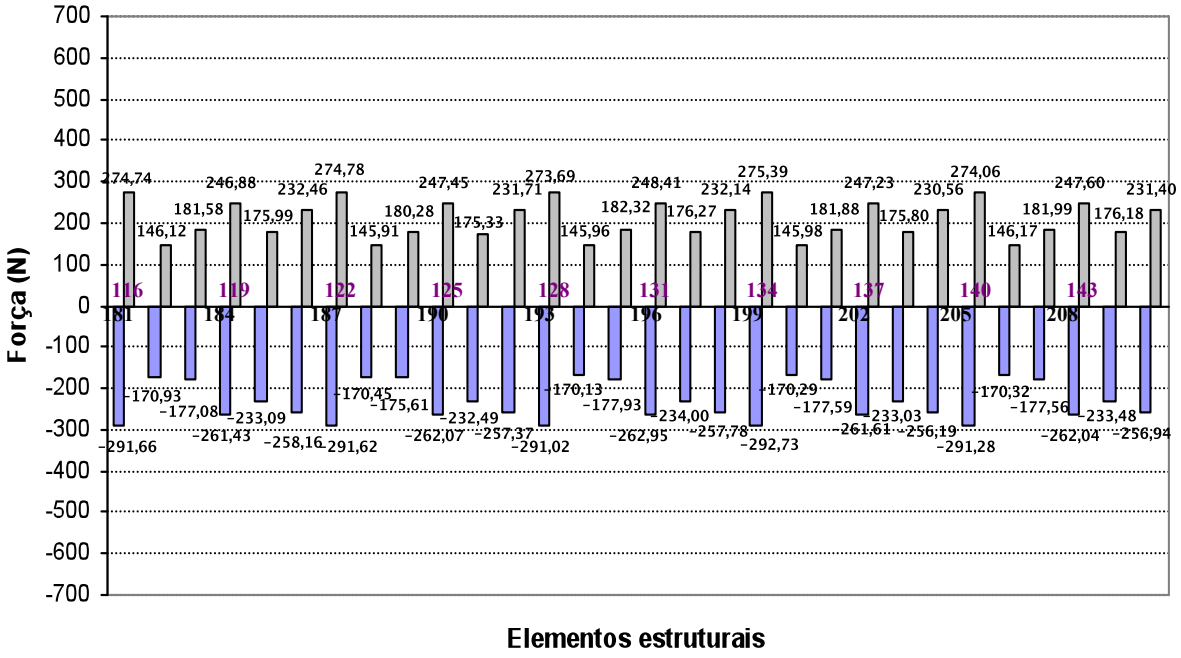


(a) Cordoalhas 6 a 10 e barras 156 a 160.

(b) FIGURA 5.14 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (continua).



(b) Cordoalhas 41 a 60 e barras 161 a 180.



(c) Cordoalhas 116 a 145 e barras 181 a 210.

FIGURA 5.14 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (conclusão).

Da mesma forma que a análise feita no item 5.2.1, verifica-se que há simetria na distribuição de esforços solicitantes tanto para barras quanto cordoalhas.

Ao se observar a FIG. 5.14a, verifica-se que o valor médio para as forças de compressão das barras 156 a 160 é igual a 318,6476 N, e desvio padrão igual a 0,1653 N, enquanto o valor médio para as forças de tração das cordoalhas 6 a 10 é igual a 268,6991 N, e desvio padrão igual a 0,1420 N.

Quanto à FIG. 5.14b, quando se verificam grupos de quatro cordoalhas e / ou barras vizinhas (assim como a FIG. 5.4), observam-se distribuições de esforços similares e com um determinado padrão, tais como os conjuntos das barras 164 a 167, 168 a 171, 172 a 175 e 176 a 179, ou ainda o conjunto de cordoalhas 41 a 44, 45 a 48, 49 a 52, 53 a 56 e 57 a 60.

A título de exemplo, tem-se:

- As cordoalhas 42, 46, 50, 54 e 58 apresentam valor médio para tração igual a 169,2376 N (desvio padrão igual a 0,5130 N), enquanto as cordoalhas 43, 47, 51, 55 e 59 apresentam a média para os valores de força de tração igual a 203,3606 N (desvio padrão igual a 0,3893 N).

- A média dos valores para as forças de compressão das barras 162, 166, 170, 174 e 178 é igual a 180,0763 N, sendo o desvio padrão igual a 0,5813 N (0,3228% do valor da média).

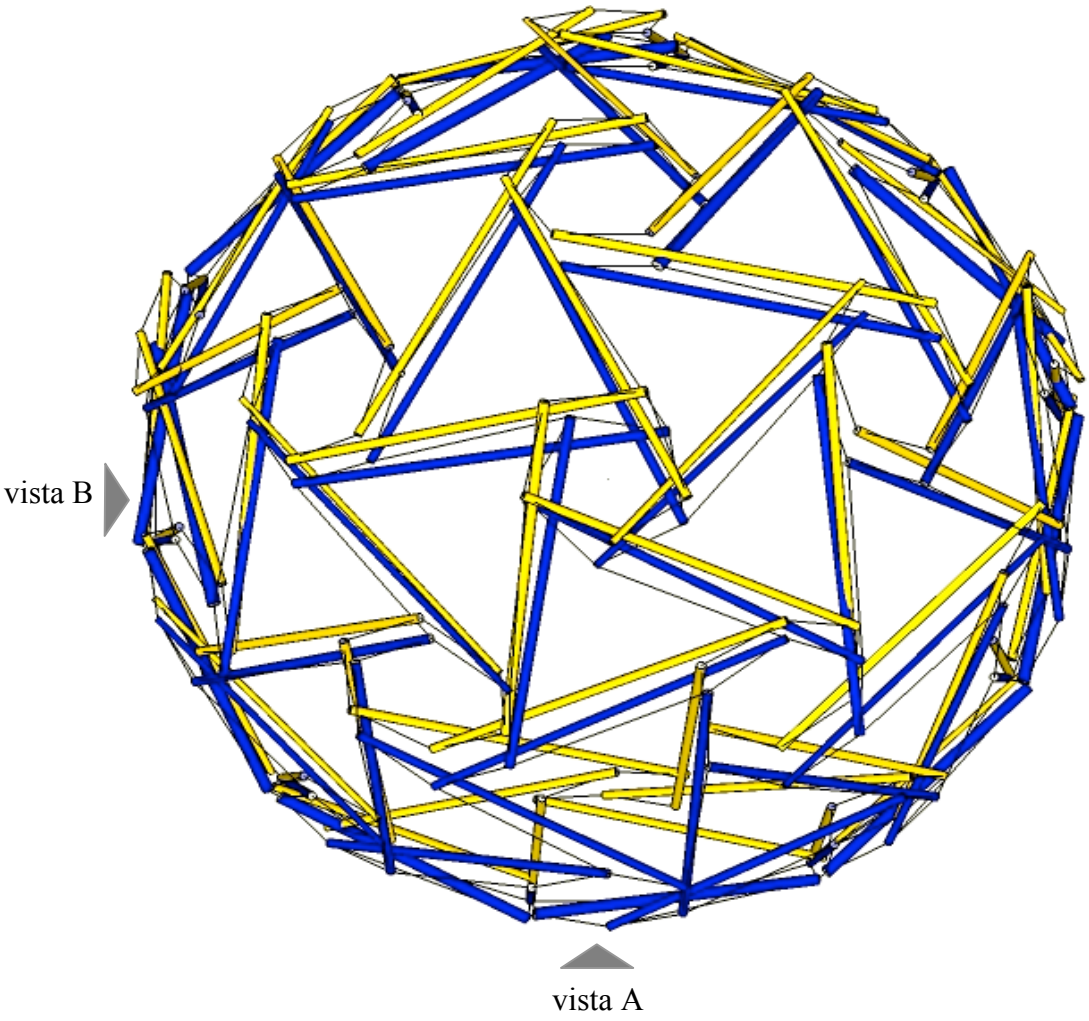
Ao se observar a FIG. 5.14c, verifica-se que a distribuição dos esforços na estrutura é simétrica. Ou seja, todos os outros elementos estruturais apresentam comportamento simétrico (levando-se em consideração a divisão das cordoalhas e barras em grupos de seis, da mesma forma que no item 5.2.1).

Ao se verificar os resultados como um todo, pode-se perceber que há simetria na distribuição dos esforços solicitantes, tanto para barras quanto cordoalhas. Isto significa que, para esta aplicação de carga analisada, pode-se tirar partido da simetria para uma análise estrutural visando seu dimensionamento.

Foi também utilizado, para a aplicação de carga analisada neste item, o programa computacional *ANSYS®* (MACROVISION CORPORATION, 1988-2003), e os resultados são apresentados no Anexo C.

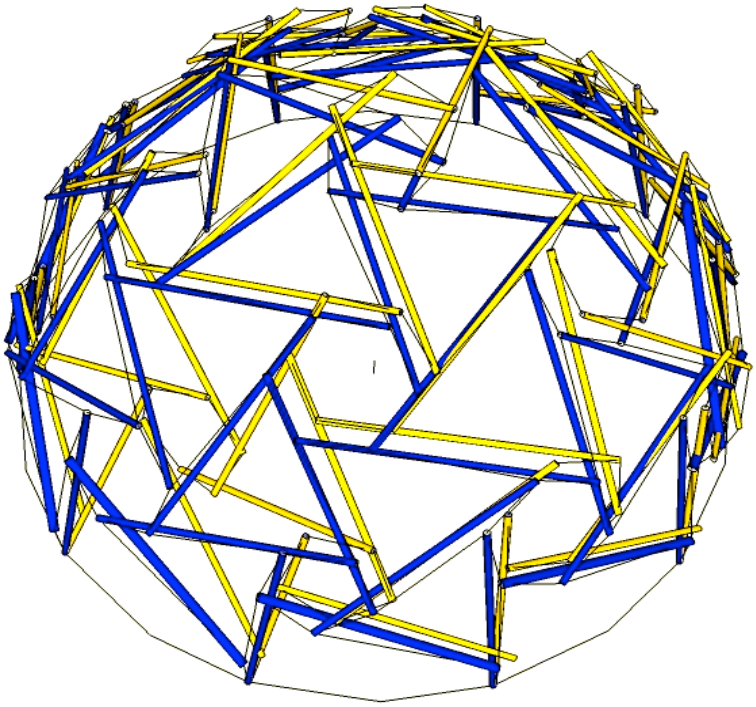
5.2.3 Aplicação de cargas assimétricas

A FIG. 5.15 apresenta esquematicamente a perspectiva e vistas da cúpula geodésica antes e após a aplicação de cargas assimétricas.

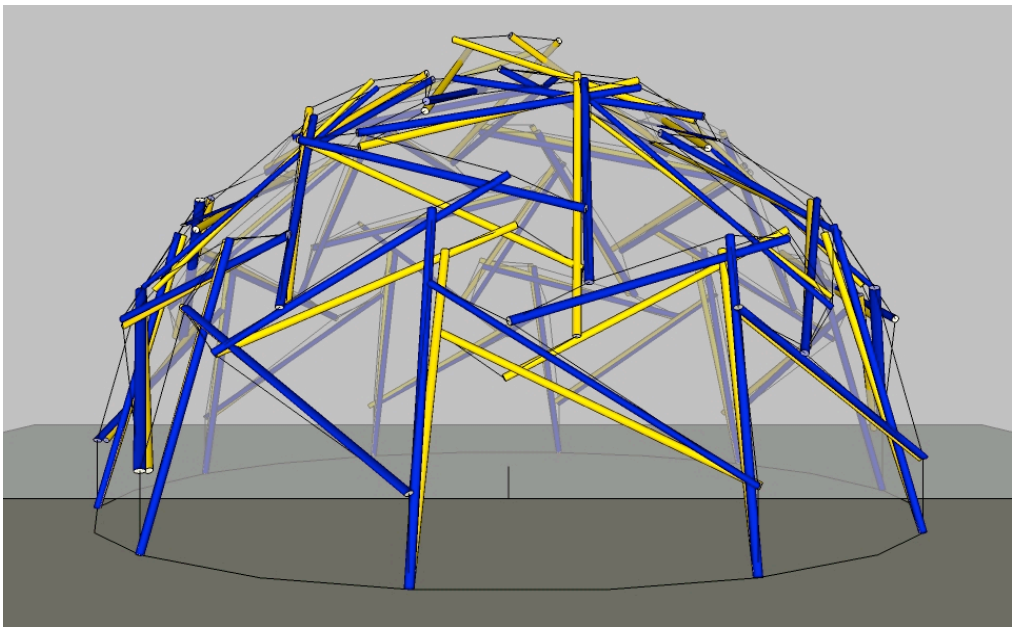


(a) Vista superior.

FIGURA 5.15 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas (continua).

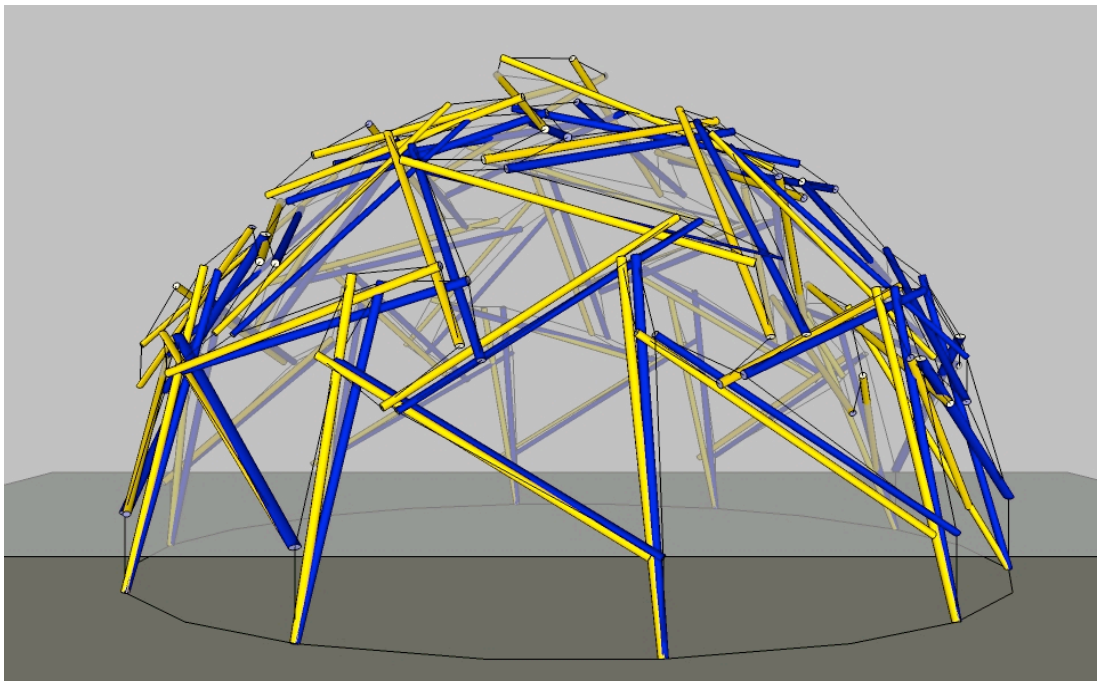


(b) Perspectiva.



(c) Vista A

FIGURA 5.15 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas (continua).



(d) Vista B.

FIGURA 5.15 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas (conclusão).

Como adotado anteriormente, na FIG. 5.15, os elementos estruturais em azul apresentam a geodésica em sua configuração inicial e os elementos em amarelo mostram a estrutura deformada após aplicação de 50 N de carga, simulando sobrepressão, e 83 N, para sucção, como apresentado no item 3.2.4.

Esses valores foram obtidos levando-se em consideração os coeficientes de pressão externa C_e característicos de uma cúpula, com base na ABNT NBR 6123: 1988, onde o $C_e = 0,6$ (sobrepressão) foi adotado para a carga aplicada no nó 14, enquanto o $C_e = 1,0$ (sucção) foi adotado para o nó localizado no topo da cúpula (FIG. 3.27).

A FIG. 5.16 apresenta a vista superior da cúpula com a projeção ortogonal dos deslocamentos para cargas aplicadas assimetricamente. Pode-se verificar que todos os nós tendem a se deslocar no mesmo sentido que o do nó que sofreu aplicação da carga assimétrica (correspondente aos pontos 47 a 52).

A numeração dos pontos de cada nó também segue a mesma seqüência que a apresentada nas FIG. 5.6 e 5.11.

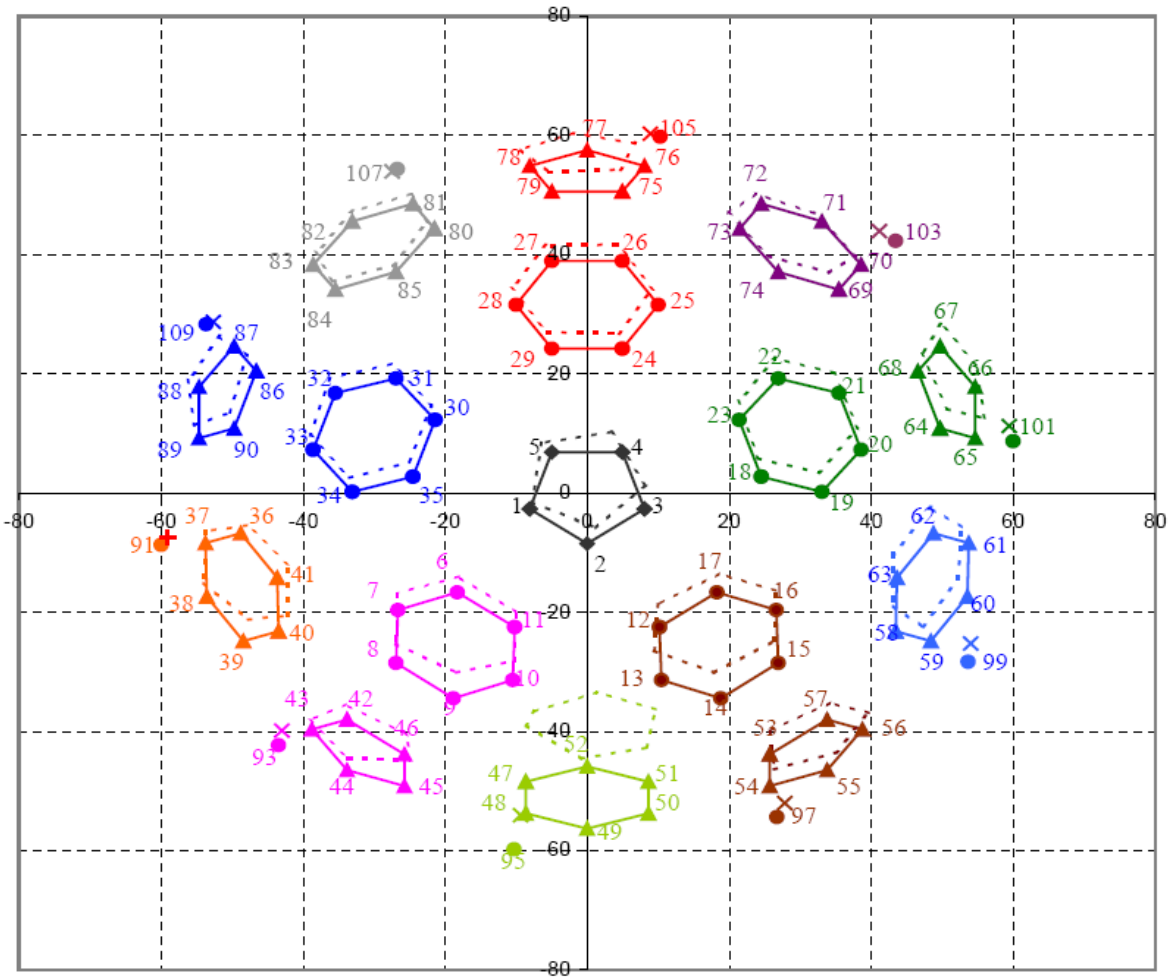
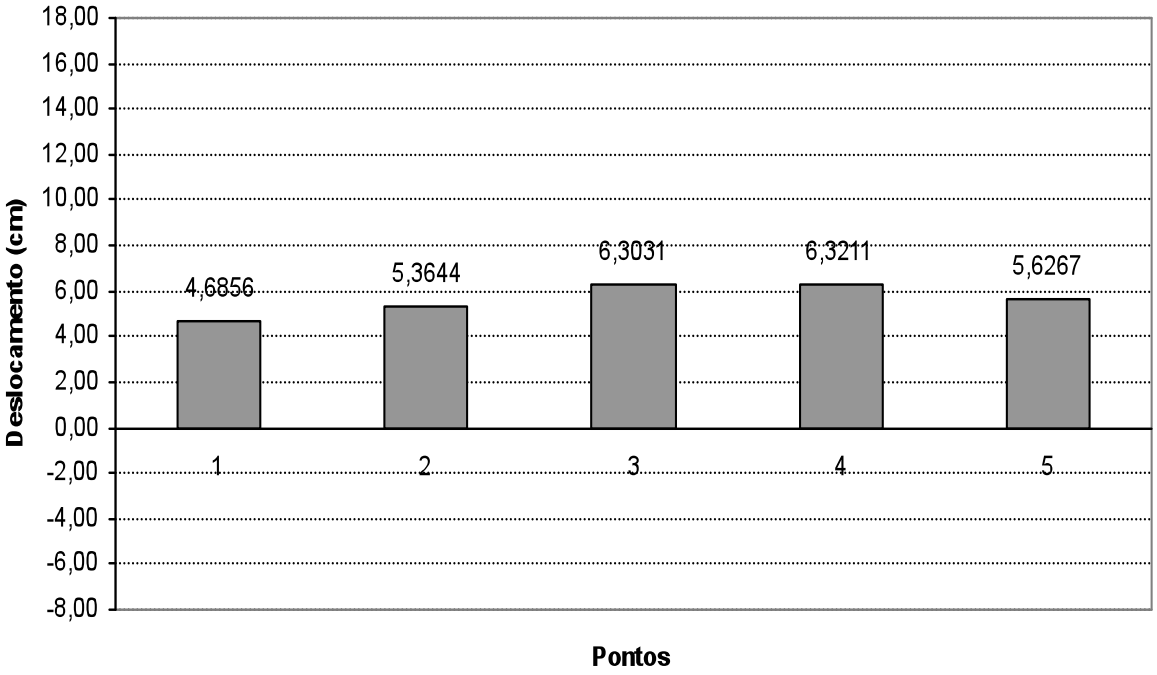
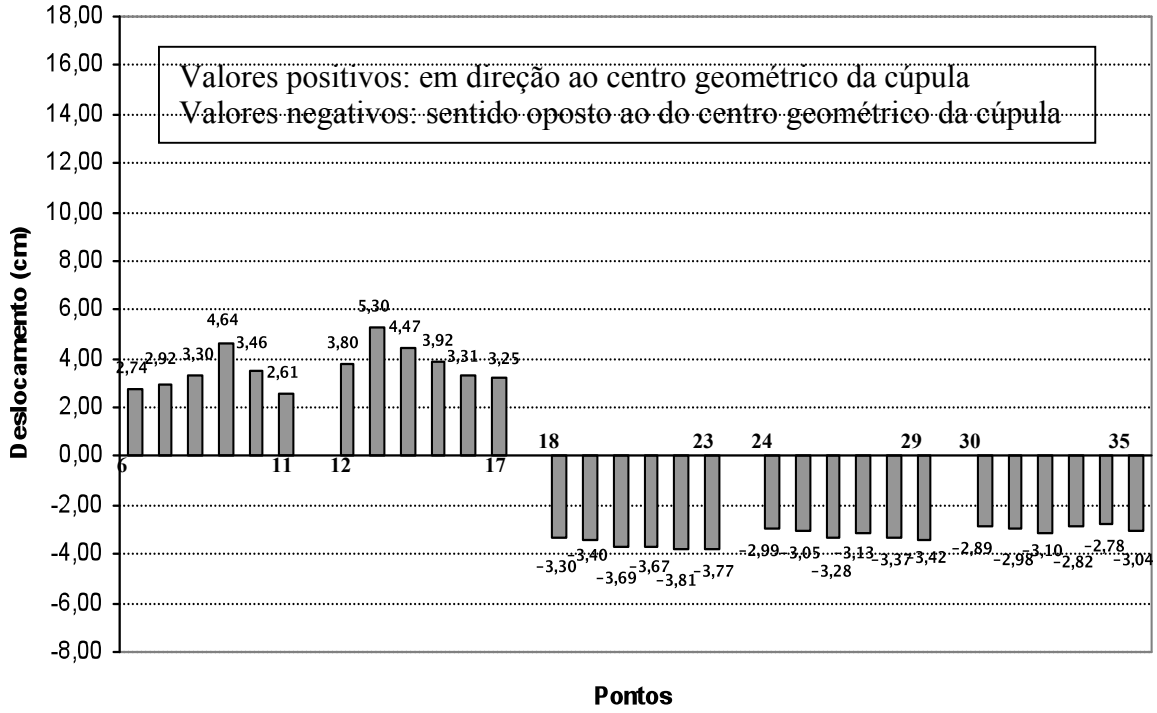


FIGURA 5.16 – Elevação superior da cúpula com a numeração e os deslocamentos dos nós (numeração das ordenadas e abcissas em cm).

Os gráficos da FIG. 5.17 apresentam os valores dos deslocamentos radiais dos pontos que representam as extremidades dos elementos estruturais.

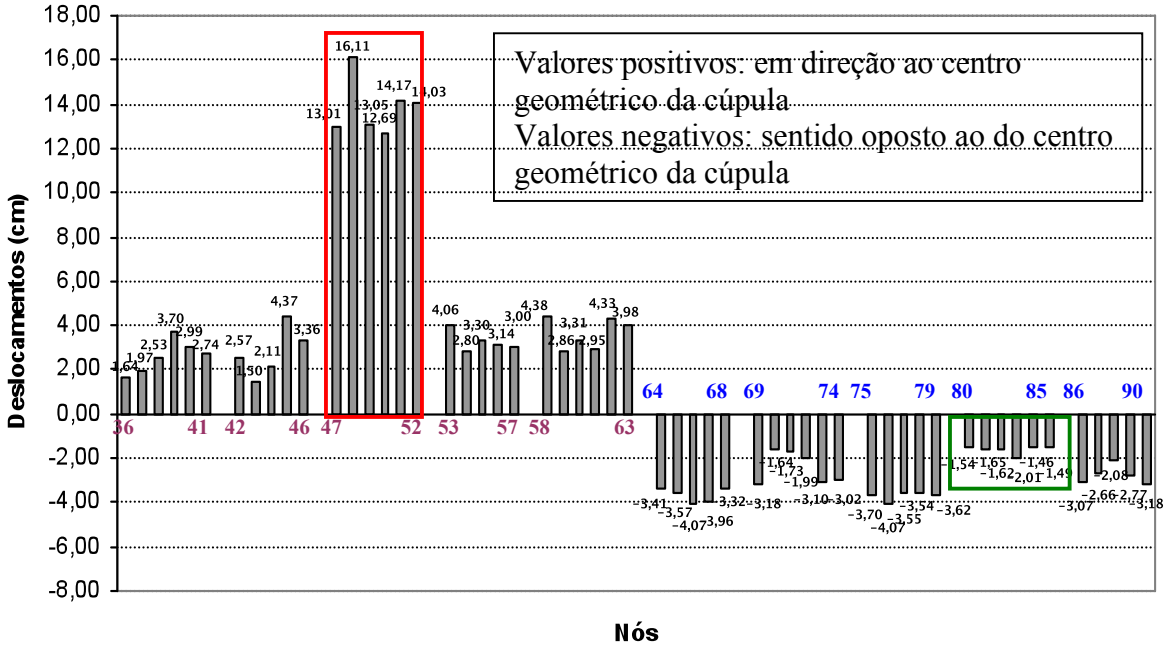


(a) Pontos 1 a 5.

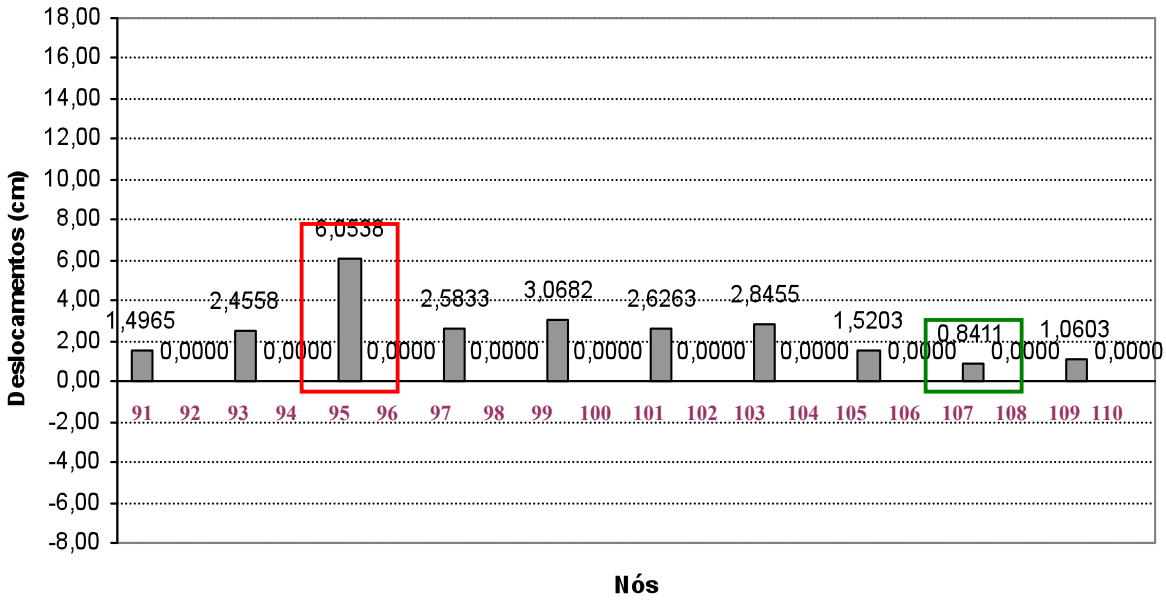


(b) Pontos 6 a 35.

FIGURA 5.17 – Deslocamentos radiais dos pontos (continua).



(c) Pontos 36 a 90.



(d) Pontos 91 a 110.

FIGURA 5.17 – Deslocamentos radiais dos pontos (conclusão).

Os pontos 1 a 5, referentes ao topo da cúpula, não apresentam deslocamentos iguais entre si, mesmo tendo carga aplicada simulando sucção. Como apresentado na FIG. 5.17a, o maior deslocamento é o do ponto 4 (6,3211 cm), seguido do ponto 3, com 6,3031 cm. Tanto o ponto 2 quanto o ponto 5 possuem deslocamentos menores (5,3644 cm e 5,6267 cm, respectivamente) que os pontos 3 e 4; entretanto, o menor valor é o apresentado pelo ponto 1, com 4,6856 cm.

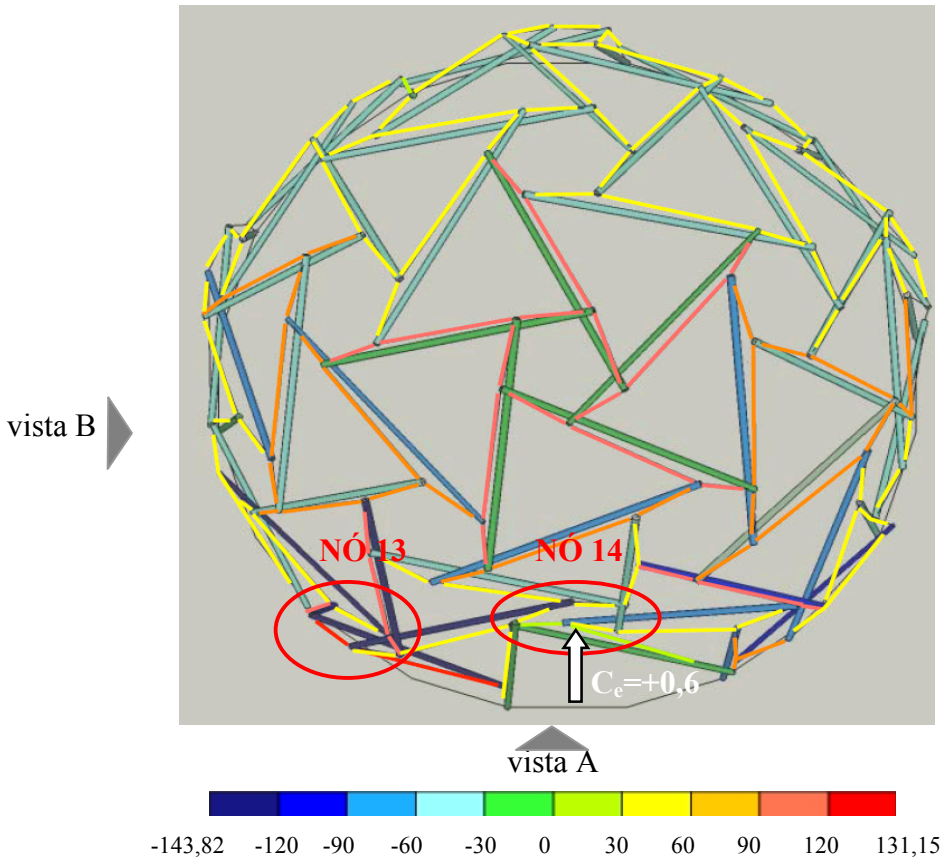
Na FIG. 5.17b, pode-se verificar que o ponto 13 possui o maior deslocamento, igual a 5,2965 cm, enquanto o menor deslocamento é apresentado pelo ponto 11, igual a 2,6067 cm (50,78% menor que o ponto 13).

Ao observar os resultados apresentados nos gráficos da FIG. 5.17c, pode-se verificar que o nó correspondente aos pontos 47 a 52, onde a sobrepressão foi aplicada, apresenta os maiores deslocamentos. Entretanto, esse nó não influencia de forma significante o comportamento dos demais nós adjacentes.

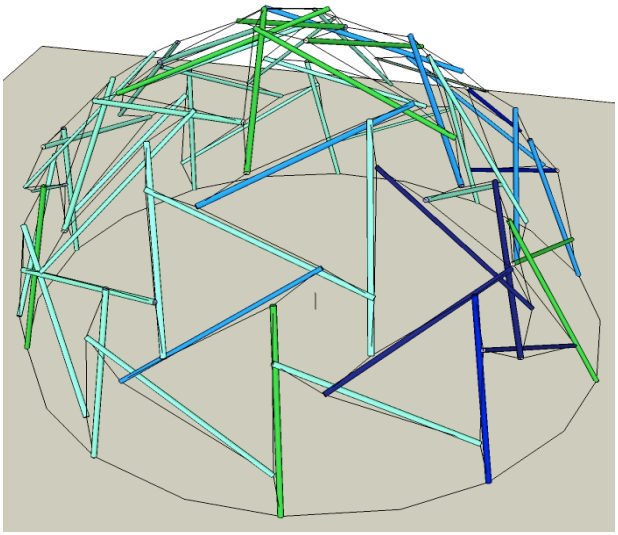
O nó correspondente aos pontos 80 a 85 (destacado com o retângulo verde) apresenta os menores valores para deslocamentos. É interessante notar que este nó fica diametralmente oposto ao nó de aplicação da carga de sobrepressão.

Com base nesta observação, e ao se analisar a FIG. 5.17d, pode-se verificar que os pontos que apresentam os menores deslocamentos (107 e 109) são os adjacentes ao nó correspondente aos pontos 80 a 85. Por outro lado, o ponto 95, adjacente ao nó correspondente aos pontos 47 a 52, apresentou o maior valor, ou seja, 6,0538 cm, 719,75% maior que o menor valor (0,8411 cm).

Como nos itens 5.2.1 e 5.2.2, a FIG. 5.18 (referida à FIG. 5.4) apresenta, em escala de cores, os valores das forças de tração das cordoalhas e de compressão das barras, e seus valores são apresentados nos gráficos da FIG. 5.19 de forma análoga à FIG. 5.9 e à FIG. 5.14.

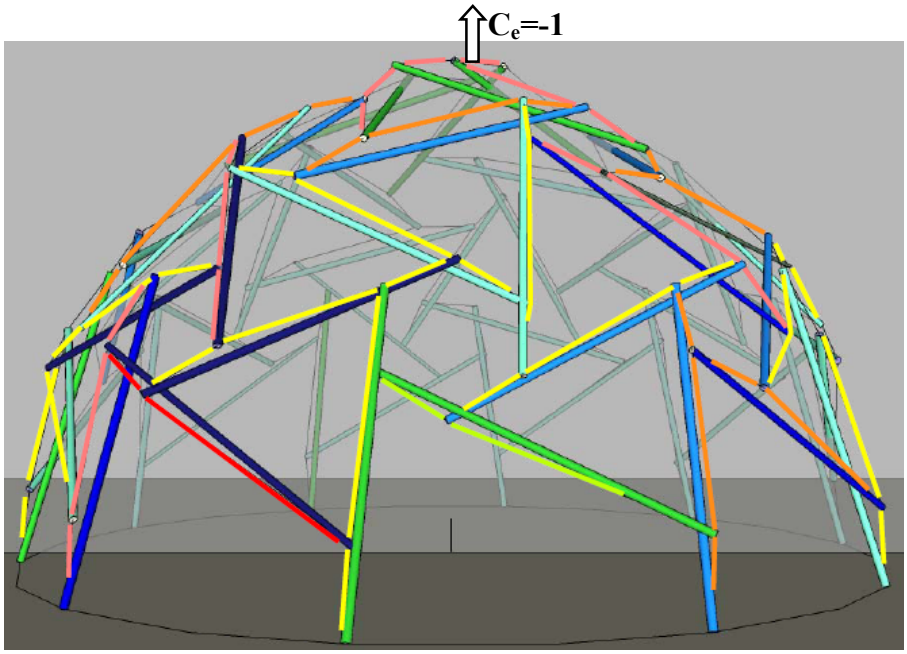


(a) Vista superior.



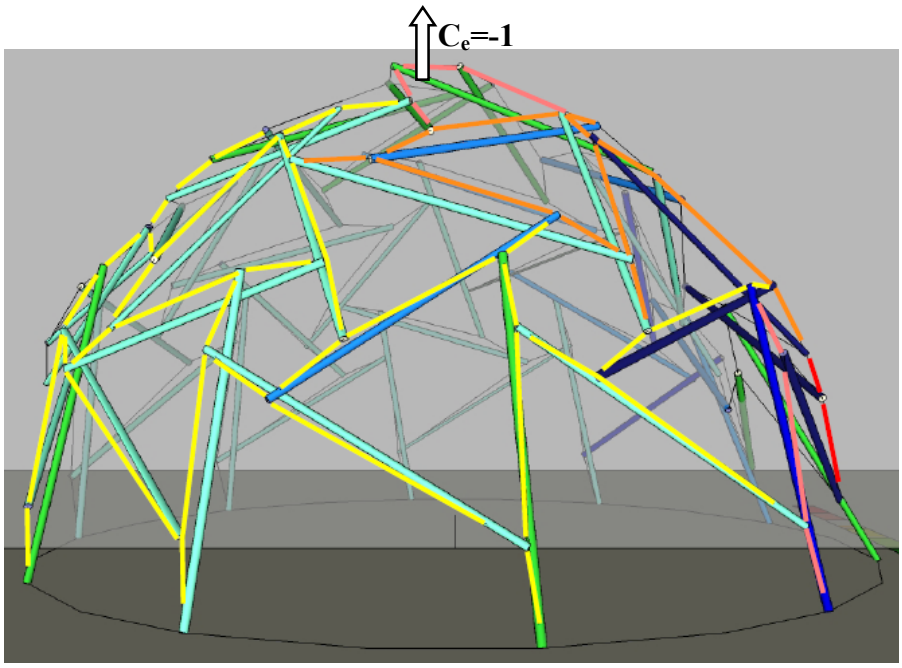
(b) Perspectiva.

FIGURA 5.18 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (continua).



(c) Vista A.





(d) Vista B.

FIGURA 5.18 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (conclusão).

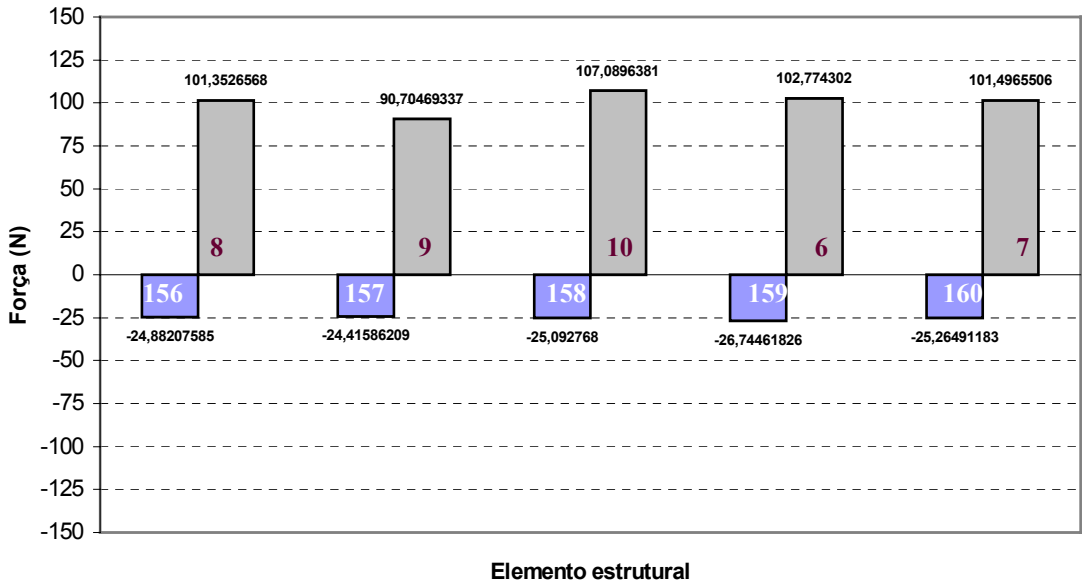
Observa-se que, na FIG. 5.18a, as barras com maiores esforços de compressão são as adjacentes ao nó 14, onde a pressão do vento foi aplicada (C_e = 0,6).

Na FIG. 5.19a, observa-se que as barra 156, 157, 158, 159 e 160 apresentam uma média igual a 25,2801 N e desvio padrão igual a 0,8783 N (3,4743% do valor da média).

Na FIG. 5.19b, os maiores valores de esforço de tração, comparando as cordoalhas 41 a 60, foram 105,8442 N e 93,9191 N, correspondentes aos elementos estruturais 43 e 47, respectivamente.

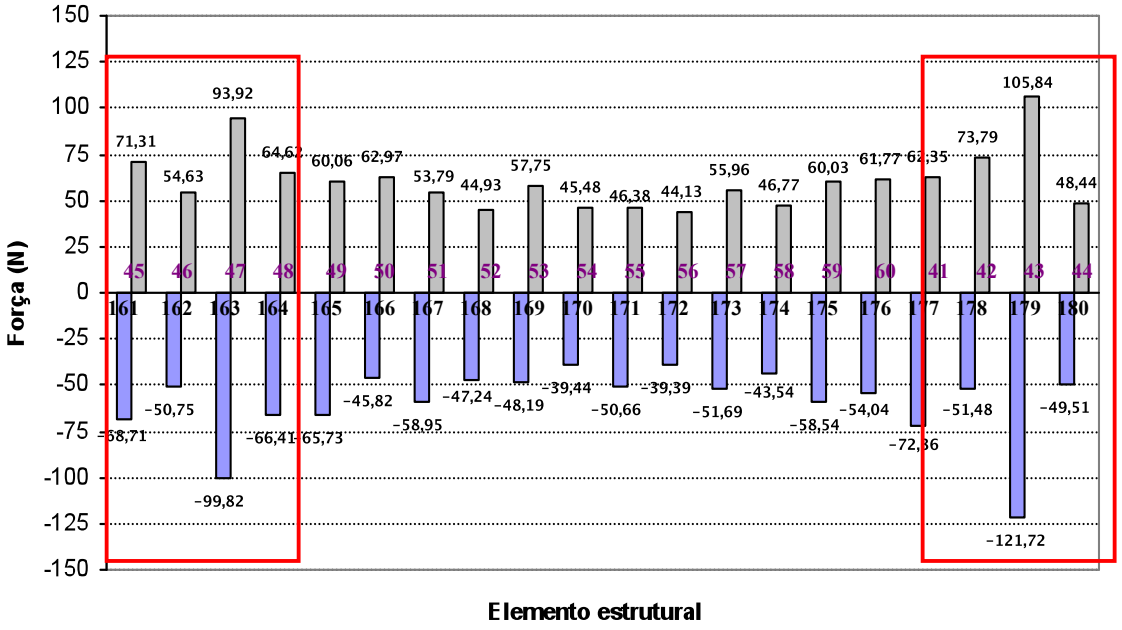
Os resultados destacados na FIG. 5.19b correspondem aos denominados nós 4 e 5 da FIG. 3.20, e são adjacentes ao nó 14 (estrutura nodal de aplicação da sobrepressão, como mencionado antes).

O nó 14, correspondente às cordoalhas 122 a 125 e barras 187 a 190 (destacadas com um retângulo vermelho na FIG. 5.19c), apresenta valores bastante díspares em relação aos outros nós.

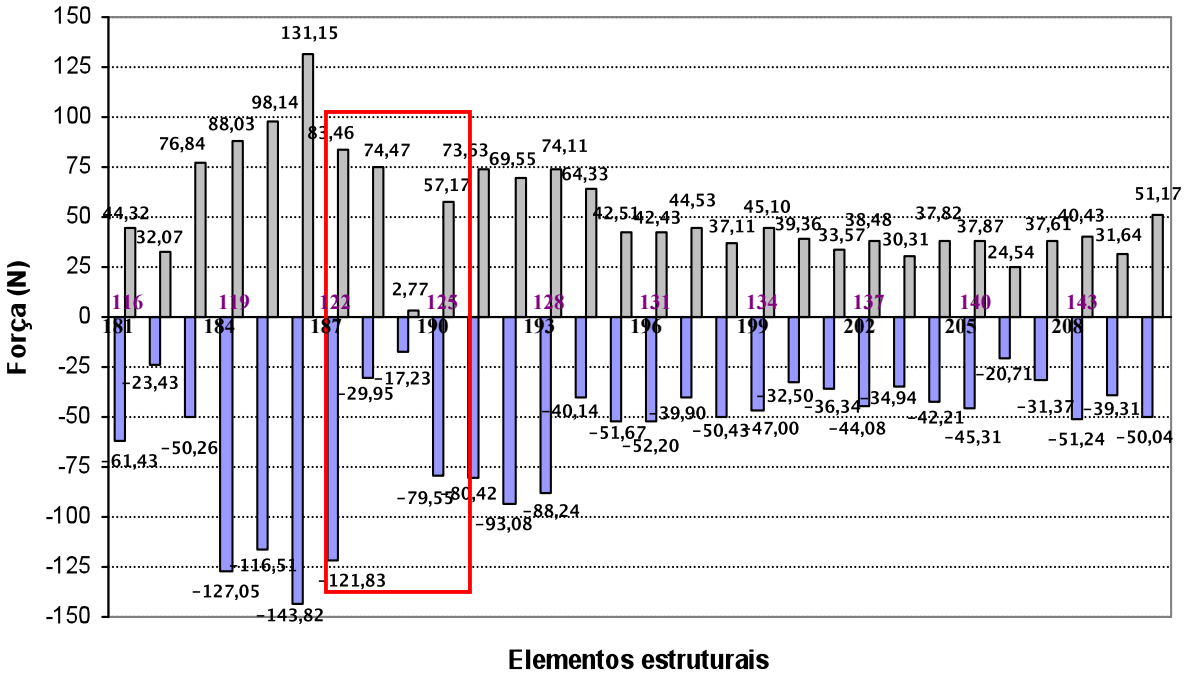


(a) Cordoalhas 6 a 10 e barras 156 a 160.

FIGURA 5.19 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (continua).



(b) Cordoalhas 41 a 60 e barras 161 a 180.



(c) Cordoalhas de 116 a 145 e barras de 181 a 210.

FIGURA 5.19 – Forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais da cúpula geodésica, em N (conclusão).

A barra com maior valor (186) apresenta 143,8206 N de força de compressão, enquanto a cordoalha 121 apresenta 131,1464 N de força de tração. Estes elementos estruturais estão no nó adjacente ao nó 14.

Por outro lado, a cordoalha 124 apresenta o menor valor (2,7677 N) para esforço de tração, enquanto a barra 189 apresenta o menor valor de esforço de compressão, igual a 17,2267 N.

Ao se verificar os dados anteriormente relacionados, pode-se perceber que, apesar da carga de sobrepressão ser aplicada no nó 14, os elementos estruturais que apresentaram os maiores valores foram aqueles adjacentes ao referido nó.

6

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

6.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentadas as comparações dos resultados obtidos na análise experimental e na análise numérica, sendo esta realizada segundo o Programa GRECO.

Para se fazer tais comparações, utilizou-se o seguinte procedimento:

a) A leitura dos deslocamentos experimentais foi obtida utilizando-se relógios comparadores analógicos (item 3.2.3) dispostos nos nós do modelo conceptivo-processual.

   Esses relógios comparadores foram dispostos adequadamente para medir os deslocamentos dos nós no sentido radial, ou seja, no sentido do raio da cúpula.

b) Entretanto, a simulação numérica via GRECO apresenta os valores dos deslocamentos por meio de Coordenadas Cartesianas.

   Assim, para possibilitar a avaliação comparativa entre os resultados da análise experimental e os da análise numérica, foi necessário representar, via programa computacional gráfico tridimensional *SketchUp®* (*GOOGLE™*, 2005), os deslocamentos dos nós da mesma forma que nos ensaios.

   Foram criadas linhas que uniam o centro geométrico dos nós com o centro geométrico da cúpula. Desta forma, ao se selecionar os planos equivalentes às extremidades das barras que iriam se deslocar, e utilizando as linhas que unem os centros geométricos dos nós aos da cúpula como guia, simulou-se o deslocamento real obtido nos ensaios.

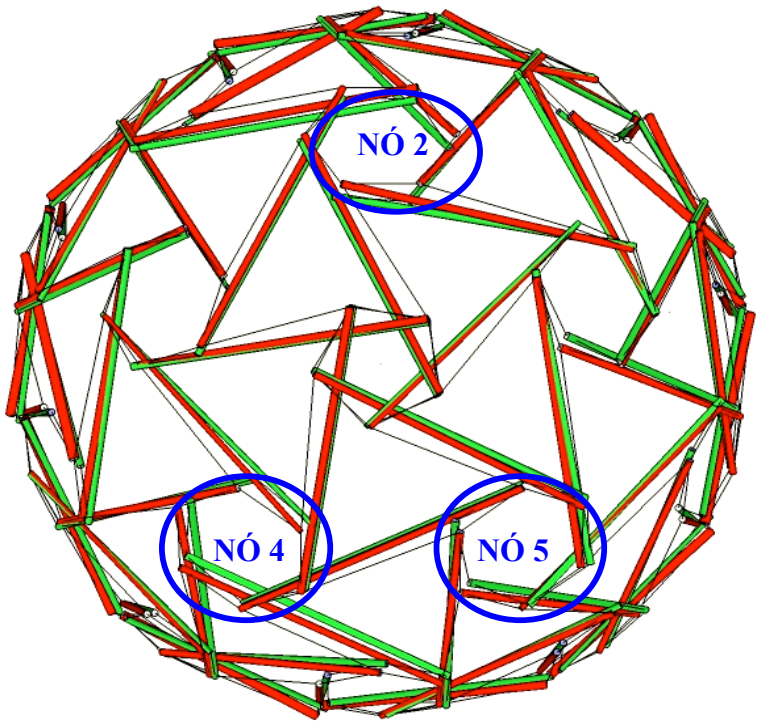
c) Foi possível, então, sobrepor graficamente a simulação dos deslocamentos ocorridos nos ensaios com os obtidos na análise numérica via GRECO.

   Cabe aqui ressaltar que o modelo construído no *SketchUp®* possui as mesmas características geométricas e dimensionais que o modelo conceptivo-processual, e sua base gráfica foi utilizada tanto para apresentar os resultados das análises numéricas via GRECO quanto os resultados das análises experimentais.

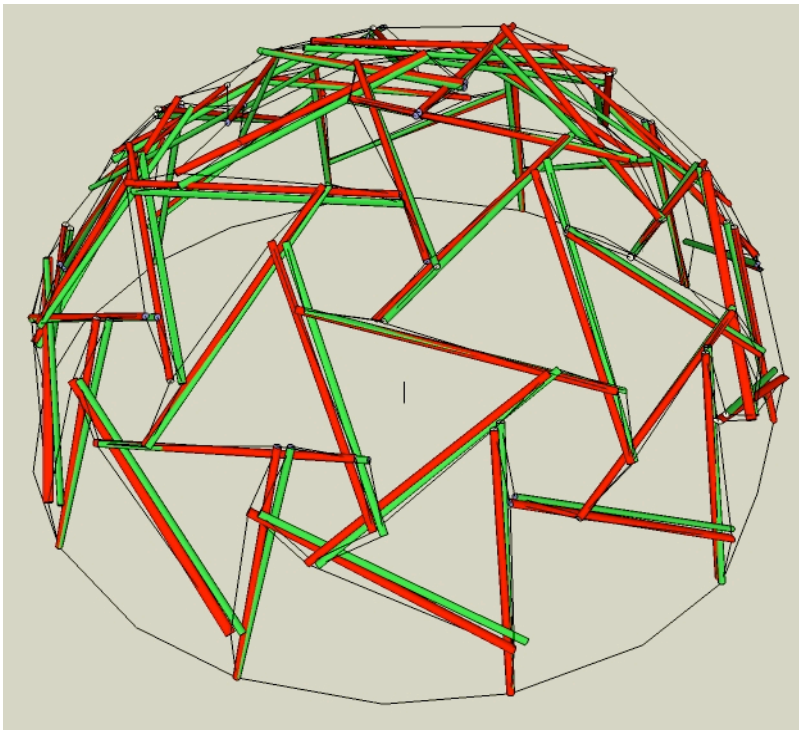
   Os parâmetros geométricos que possibilitaram a construção virtual da cúpula geodésica *Tensegrity* via *SketchUp®* são apresentados no Capítulo 7.

6.2 Aplicação de cargas em todos os nós

A FIG. 6.1 apresenta os deslocamentos ocorridos na estrutura com base nos dados experimentais (em vermelho) e numéricos (em verde), enquanto que a FIG. 6.2 apresenta a configuração da estrutura antes e depois do ensaio de aplicação de cargas em todos os nós.

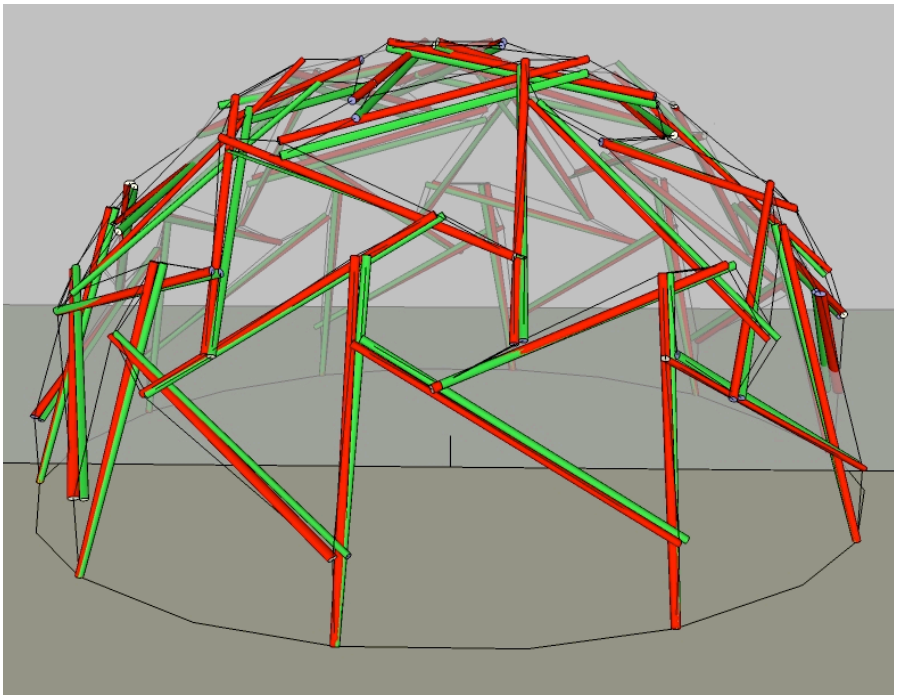


(a) Vista superior.



(b) Perspectiva.

FIGURA 6.1 – Deslocamentos obtidos nos ensaios (em vermelho) e na análise numérica (em verde) (continua).



(c) Vista lateral.

FIGURA 6.1 – Deslocamentos obtidos nos ensaios (em vermelho) e na análise numérica (em verde) (conclusão).

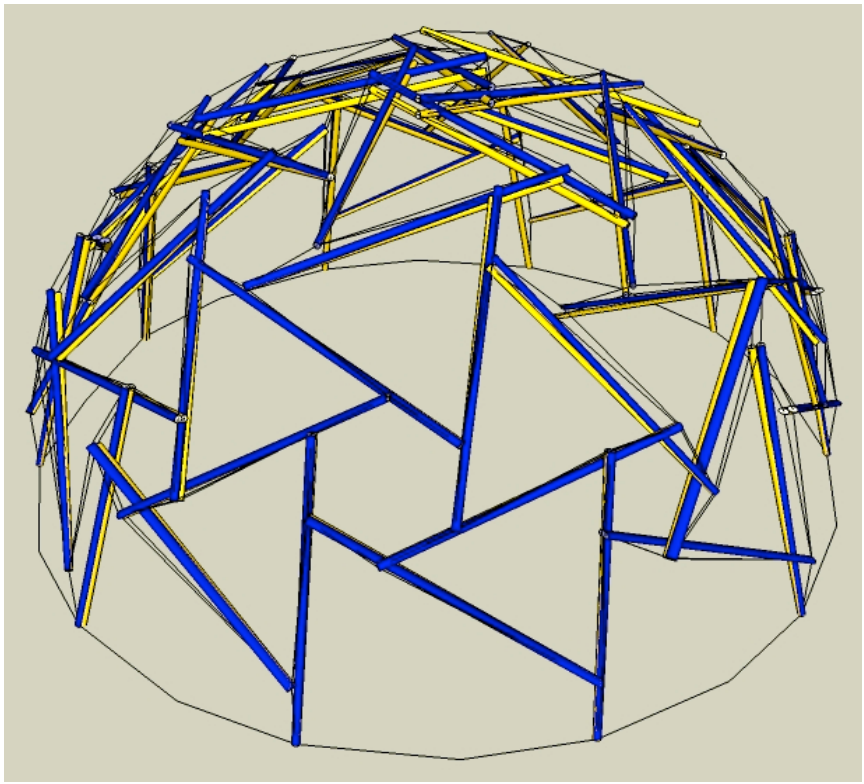
Pode-se verificar na FIG. 6.1 que, de um modo geral, os deslocamentos obtidos com o programa computacional são maiores que os obtidos nos ensaios. Entretanto, os sentidos dos deslocamentos apresentam similaridade.

É importante salientar que não foram medidos os deslocamentos de todos os nós (FIG. 3.25), pois não houve a instalação de relógios comparadores nos Nós 2, 4 e 5 (FIG. 3.20). Portanto, deve-se desconsiderar as diferenças de deslocamentos destes três nós marcados na FIG. 6.1a.

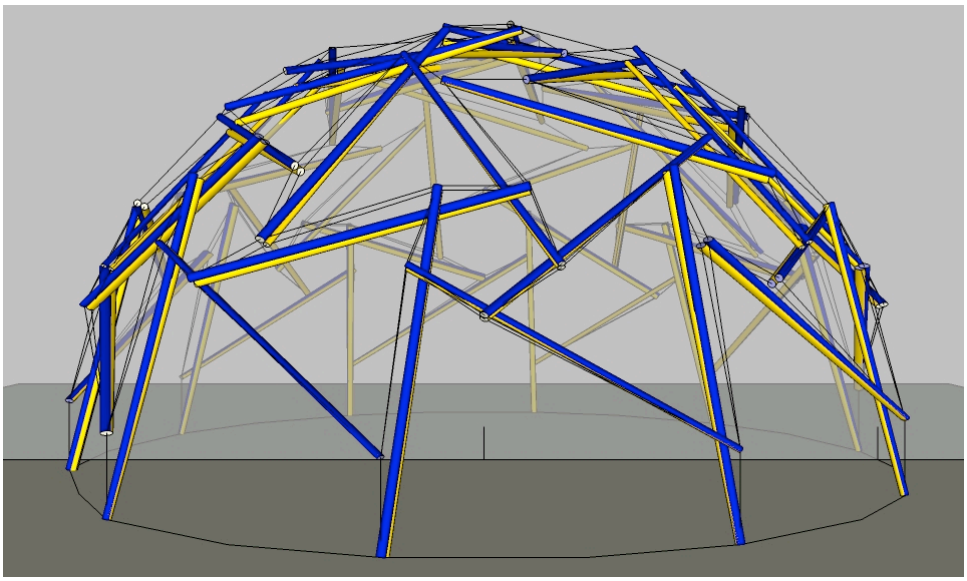
Quanto a este ensaio experimental, os deslocamentos apresentados são menores que os obtidos a partir de outras situações de ensaio (que serão apresentados a seguir).

Nos gráficos da FIG. 6.3 são comparados os valores dos deslocamentos obtidos nos ensaios (linhas tracejadas) e na análise numérica (linhas contínuas). A FIG. 6.3a apresenta os resultados obtidos para os Nós 1, 3 e 6 (equivalentes, respectivamente, aos nós 111, 115 e 112 da análise numérica – Anexo B), enquanto que a FIG. 6.3b apresenta

os valores dos deslocamentos dos Nós 7 a 16 (equivalentes, respectivamente, aos nós 118 a 127 da análise numérica – Anexo B).



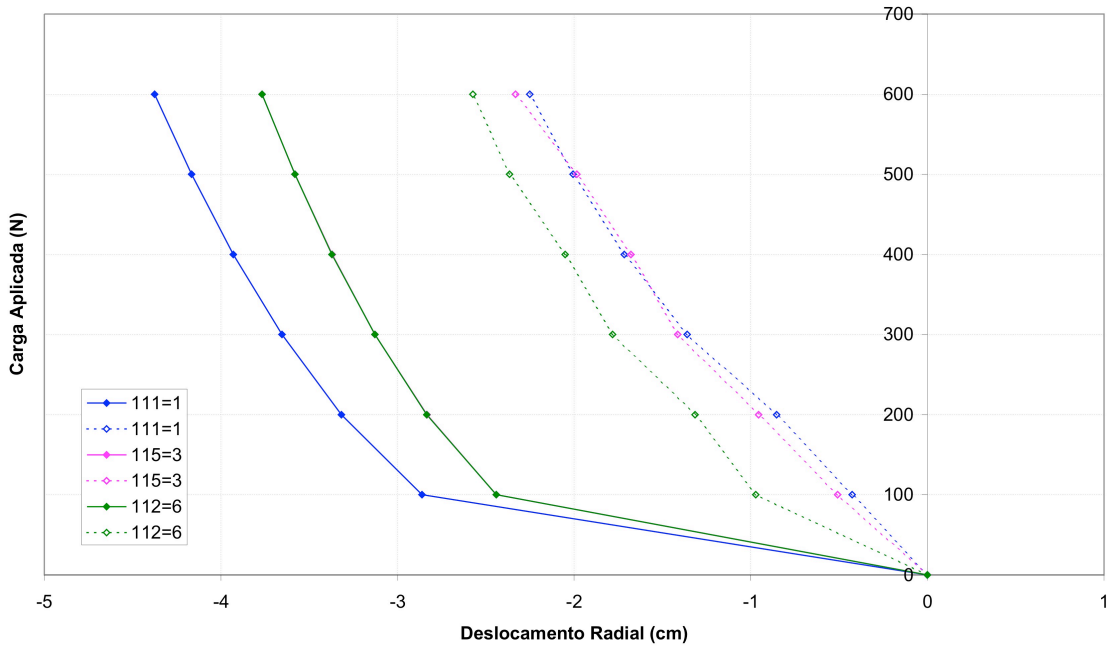
(a) Perspectiva.



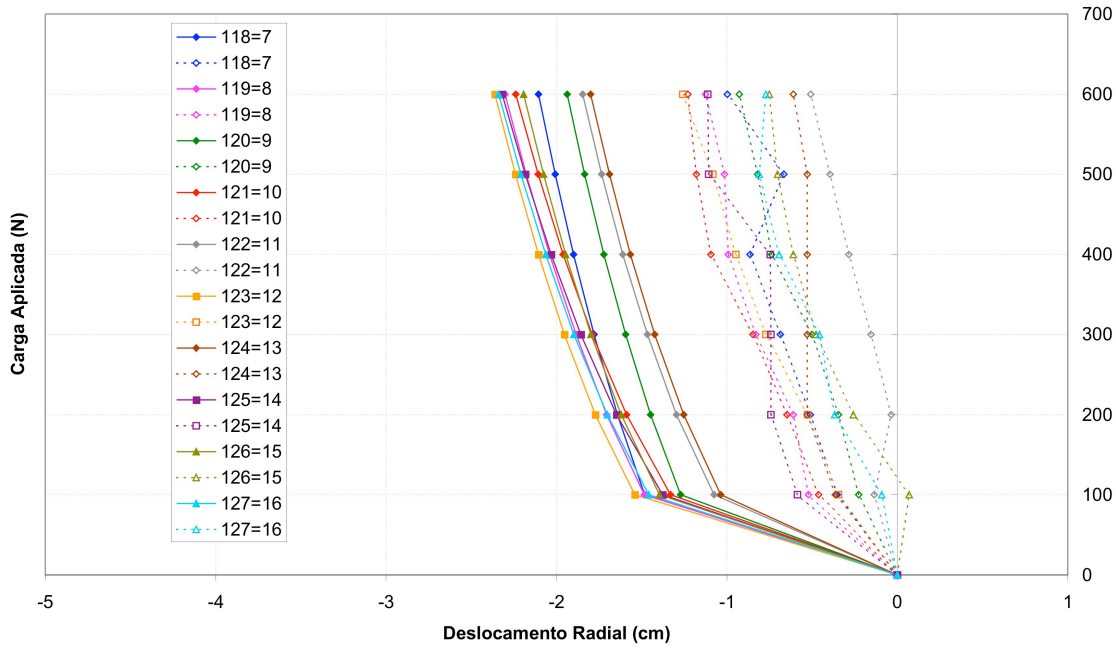
(b) Vista lateral.

FIGURA 6.2 – Cúpula geodésica antes (em azul) e após (em amarelo) a aplicação de cargas no ensaio experimental.

Pode-se verificar que, ao se comparar os valores obtidos no experimento e na análise numérica, há uma diferença constante entre esses valores a partir do primeiro passo de carga. Isso acontece tanto para os Nós 1, 3 e 6 como para os Nós 7 a 16.



(a) Nós 1, 3 e 6.

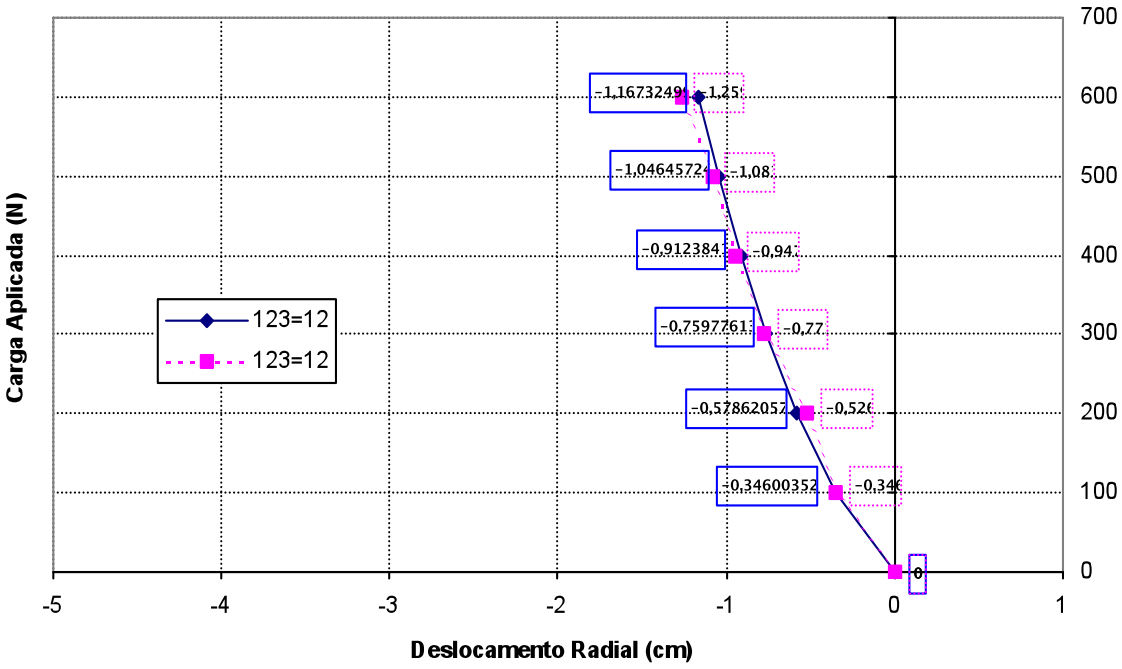


(b) Nós 7 a 16.

FIGURA 6.3 – Valores comparativos dos deslocamentos obtidos na análise numérica (linha contínua) e na experimental (linha tracejada).

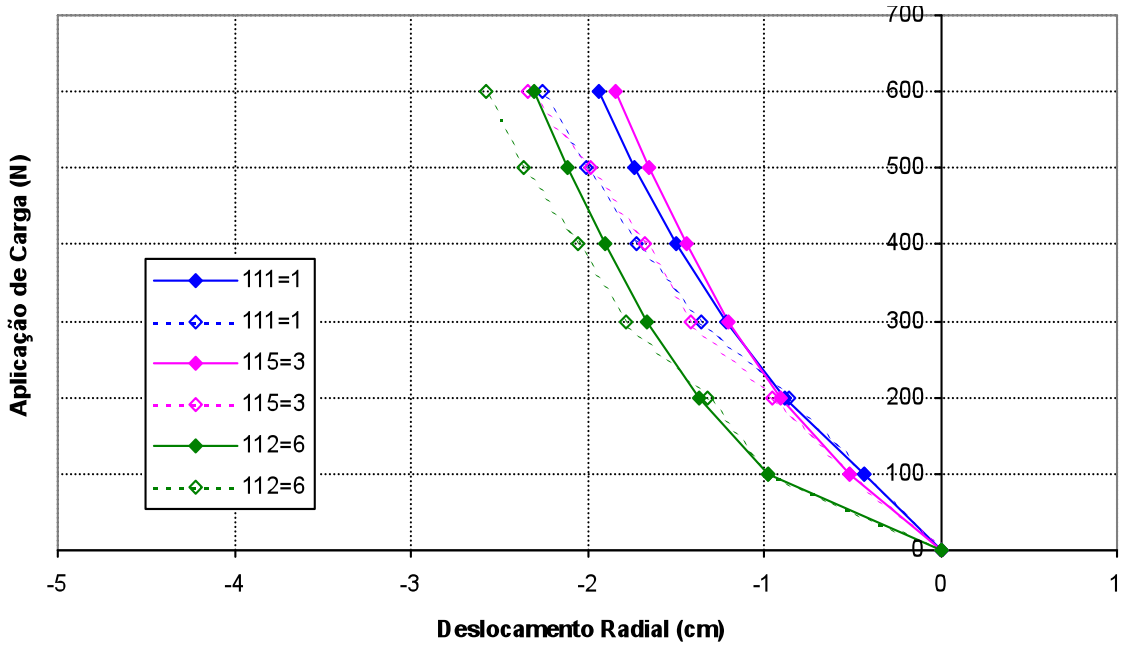
Observa-se que os restantes das curvas apresentam comportamentos similares entre si. Isto pode ser confirmado ao se analisar a FIG. 6.4a, onde se subtrai, em todas as etapas, a diferença do valor obtido na análise numérica e o valor experimental do primeiro passo de carga de ambas as análises. Nota-se que são obtidos valores muito próximos, onde a diferença média dos valores da análise numérica é 0,0173 cm acima dos resultados da análise experimental.

A FIG. 6.4b apresenta os valores comparativos entre análise numérica e experimental para os Nós 1, 3 e 6, com a diferença entre os valores do primeiro passo de carga excluídas. Também pode-se observar similaridade entre os comportamentos. A diferença média dos valores da análise numérica é 0,1317 cm abaixo dos resultados da análise experimental para o Nó 1. Para o Nó 3, 0,1923 cm abaixo dos resultados da análise experimental e 0,1081 cm abaixo dos resultados da análise experimental para o Nó 6.



(a) Nó 12.

FIGURA 6.4 – Valores comparativos dos deslocamentos obtidos na análise numérica (linha contínua) e na experimental (linha tracejada) após excluir diferença no primeiro passo de carga (continua).



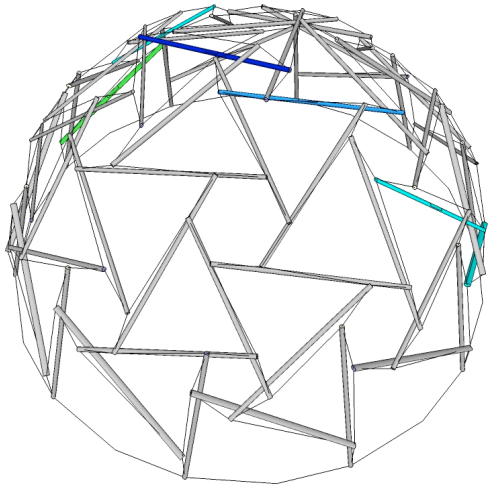
(b) Nós 1, 3 e 6.

FIGURA 6.4 – Valores comparativos dos deslocamentos obtidos na análise numérica (linha contínua) e na experimental (linha tracejada) após excluir diferença no primeiro passo de carga (conclusão).

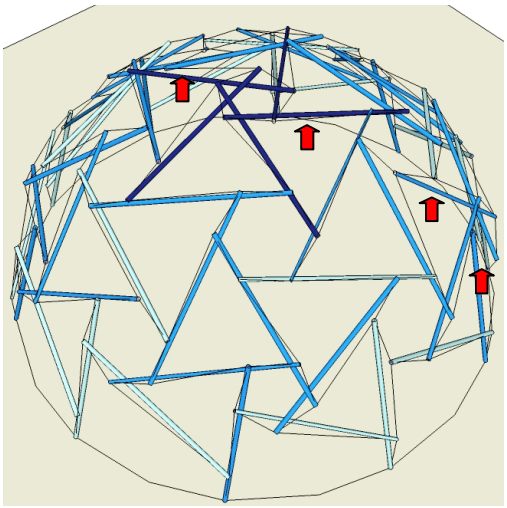
Na FIG. 6.5a e na FIG. 6.5c, para os elementos estruturais que foram instrumentados, verifica-se que, a exceção da barra correspondente ao PC E, as forças de compressão nas barras, e de tração nas cordoalhas, apresentam valores menores que os obtidos na análise numérica (FIG. 6.5b e 6.5d).

Referindo-se às barras que foram instrumentadas (FIG. 6.5), verifica-se que, na análise numérica, as barras do topo da cúpula apresentam valores entre 400 e 500 N, e na análise experimental, valores de força de compressão variando de 200 N a 500 N.

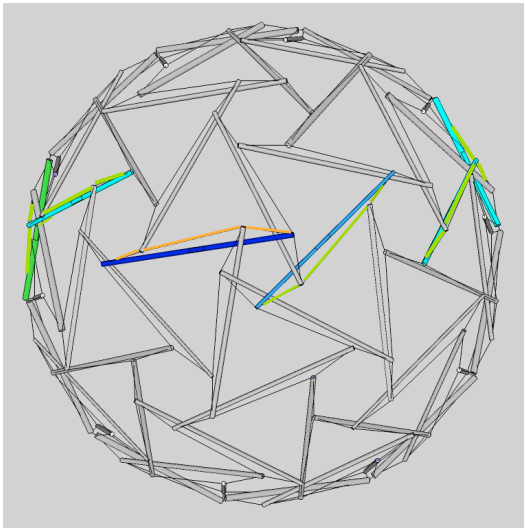
O mesmo pode ser dito das cordoalhas: enquanto a análise numérica apresenta forças entre 300 e 400 N de tração, os valores encontrados nos elementos instrumentados por EER estão em torno de 0 a 100 N, à exceção de uma cordoalha (EER F), que apresentou valor de força de tração na faixa de 200 N a 300 N.



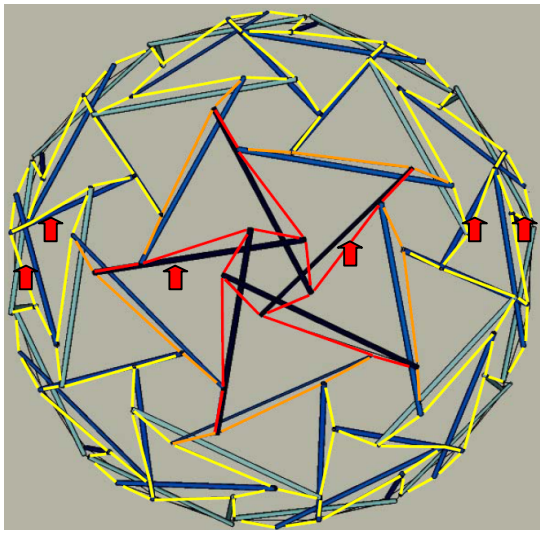
(a) Perspectiva (experimental).



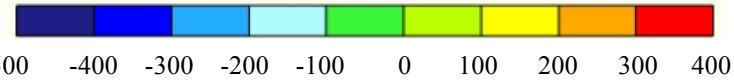
(b) Perspectiva (análise numérica).



(c) Vista superior (experimental).



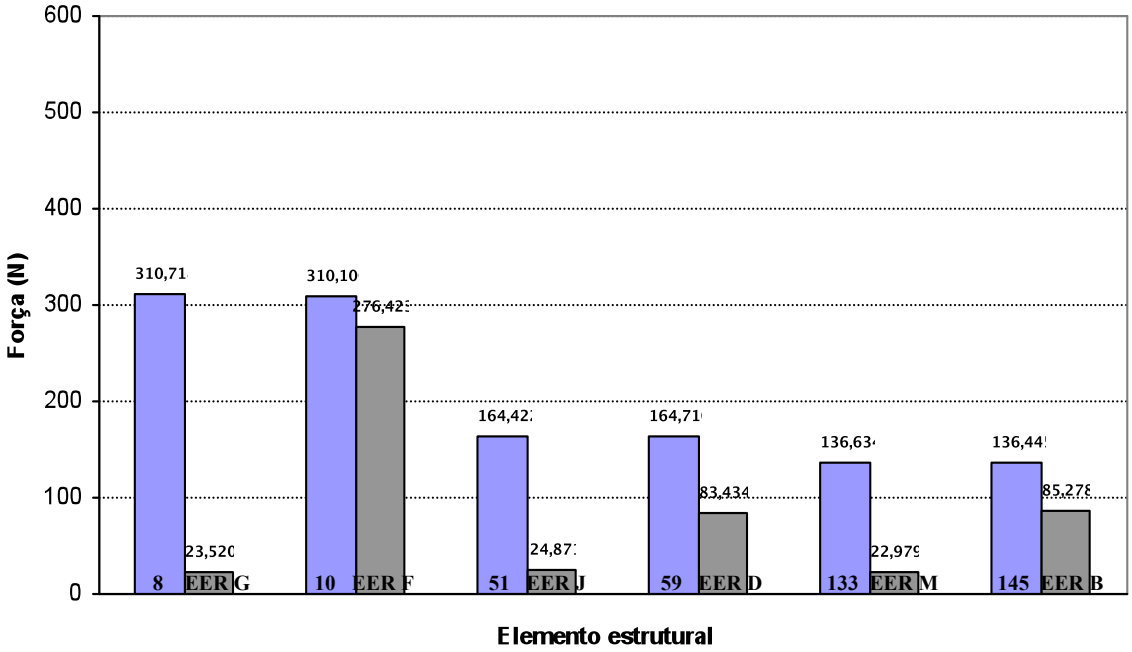
(d) Vista superior (análise numérica).



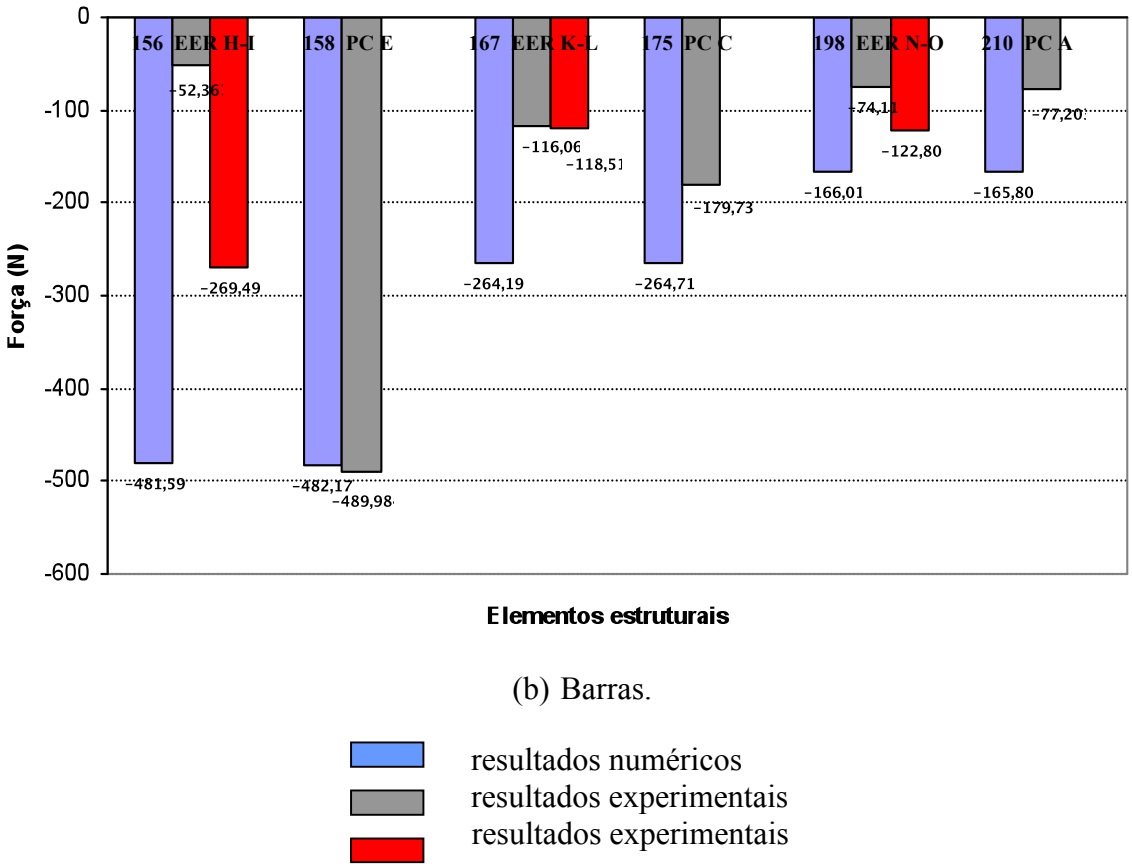
Legenda: ⬆ Elementos estruturais instrumentados

FIGURA 6.5 – Comparação dos valores das forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais instrumentados, em N.

Os gráficos da FIG. 6.6 apresentam os valores das forças de compressão e de tração das barras e cordoalhas instrumentadas, e as comparações com os valores obtidos pela análise numérica. As cordoalhas 8, 10, 51, 59, 133 e 145 correspondem, respectivamente, aos EER G, F, J, D, M e B; e as barras 156, 158, 167, 175, 198 e 210 correspondem, respectivamente, aos EER H-I, PC E, K-L, PC C, N-O e PC A (a disposição dos EER é apresentada no item 3.2.1).



(a) Cordoalhas.



(b) Barras.

resultados numéricos
resultados experimentais
resultados experimentais

FIGURA 6.6 – Comparação dos valores das forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais instrumentados, em N.

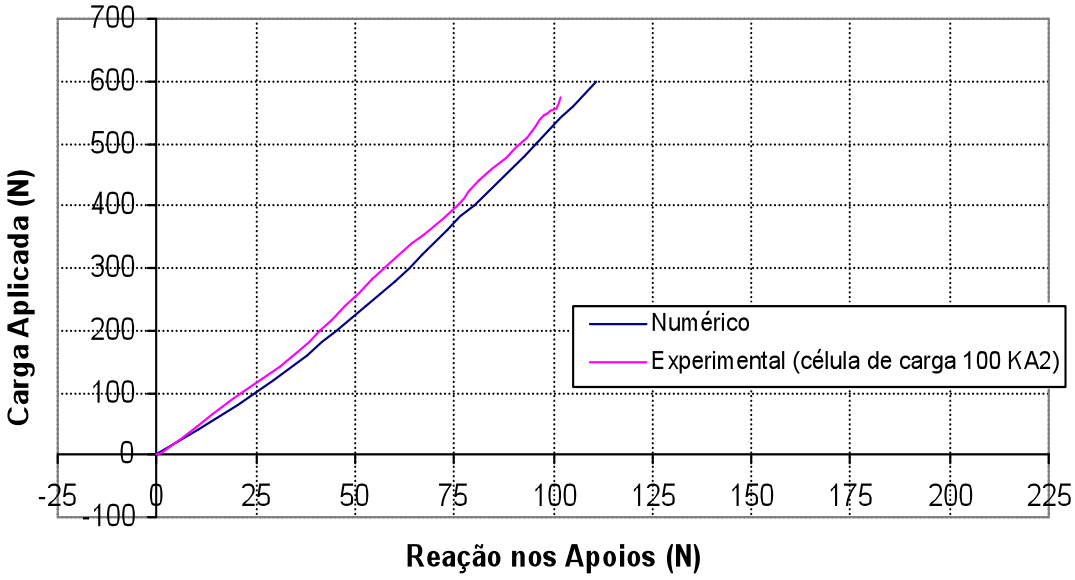
Pode-se verificar que, diferentemente dos resultados dos deslocamentos nodais, os valores das forças apresentados pelas barras e cordoalhas, quando se comparam os resultados da análise experimental com os da análise numérica, diferiram tanto na tração quanto na compressão.

Tem-se como exemplo a cordoalha 8 que, ao se comparar seu valor numérico igual a 310,72 N, com o valor obtido no ensaio, de 23,52 N, verifica-se uma diferença de 1.321,09%.

Já os maiores valores de força, tanto de tração quanto de compressão, se aproximam quando comparados os resultados experimentais aos da análise numérica: a cordoalha 10 apresentou, na análise numérica, uma força de tração 12,18% maior que a obtida com o EER F. A barra 158 apresentou um resultado numérico 1,59% menor que o obtido no experimento, por meio do PC E.

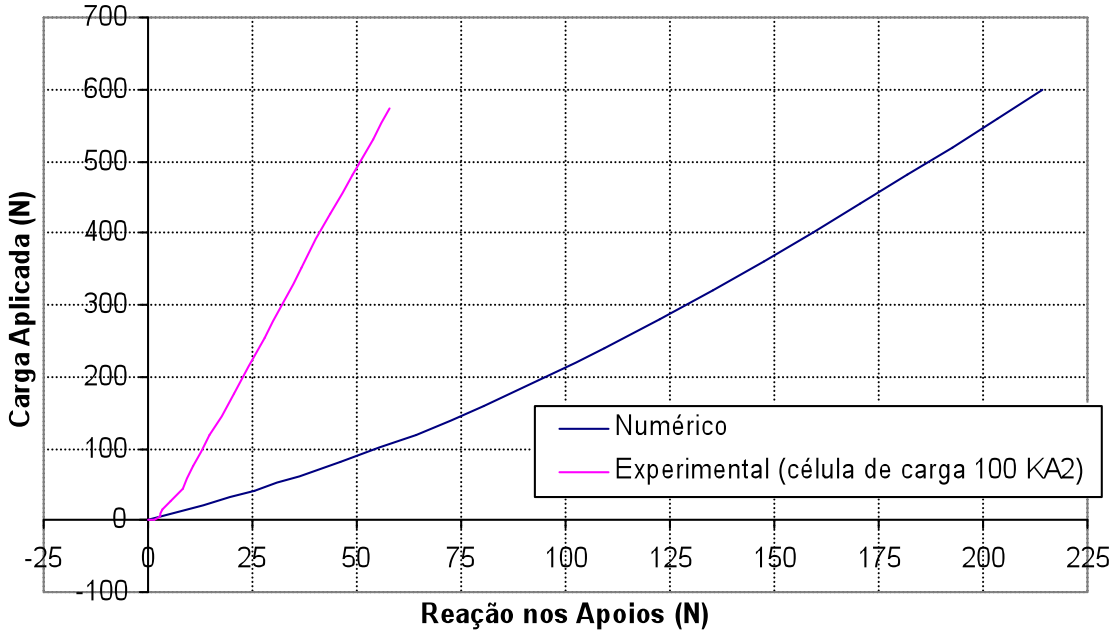
Desta forma, verifica-se que os resultados obtidos para as forças não permitem uma comparação conclusiva.

Os gráficos da FIG. 6.7 apresentam os comparativos entre os resultados da análise experimental e da análise numérica para as reações nos apoios da estrutura.

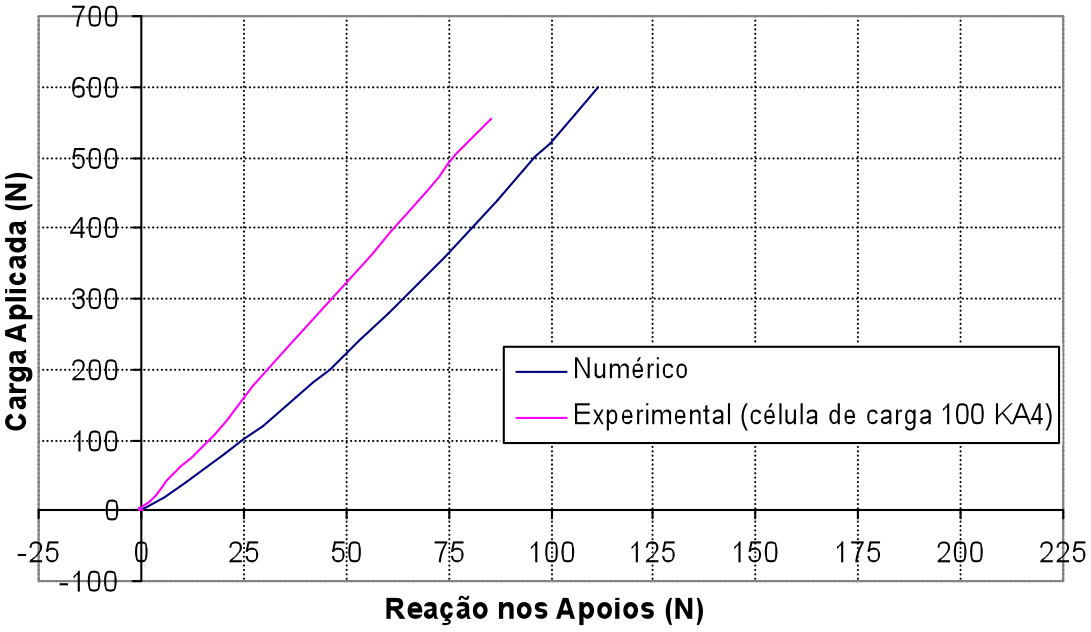


(a) Base I.

FIGURA 6.7 – Comparação entre os resultados das análises numérica e experimental das reações nos apoios (continua).

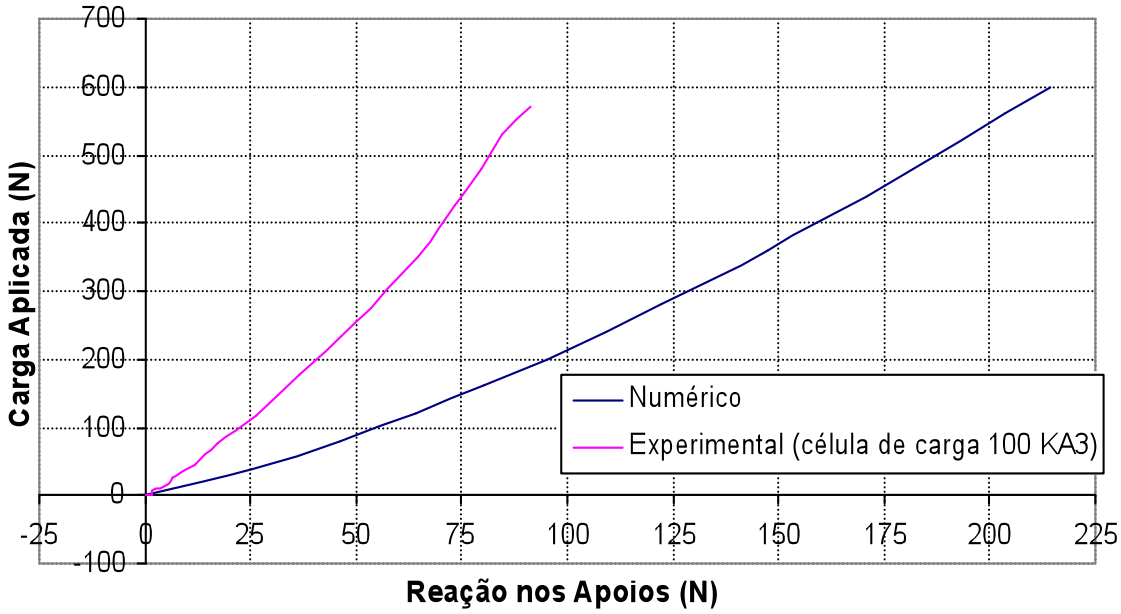


(b) Base II.

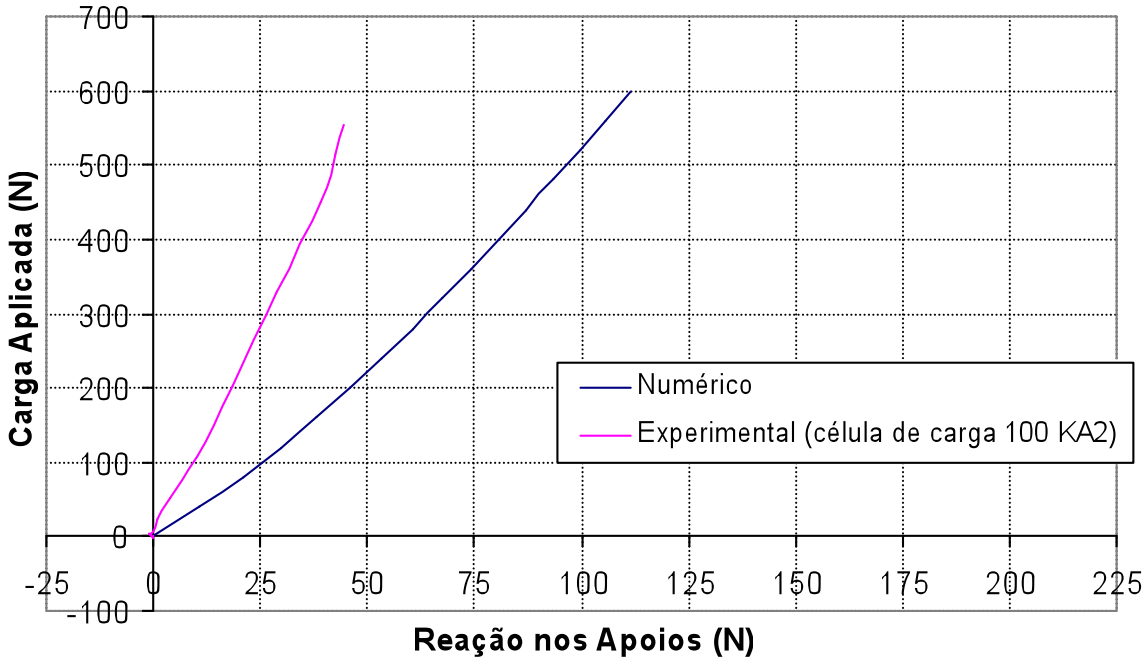


(c) Base III.

FIGURA 6.7 – Comparação entre os resultados das análises numérica e experimental das reações nos apoios (continua).

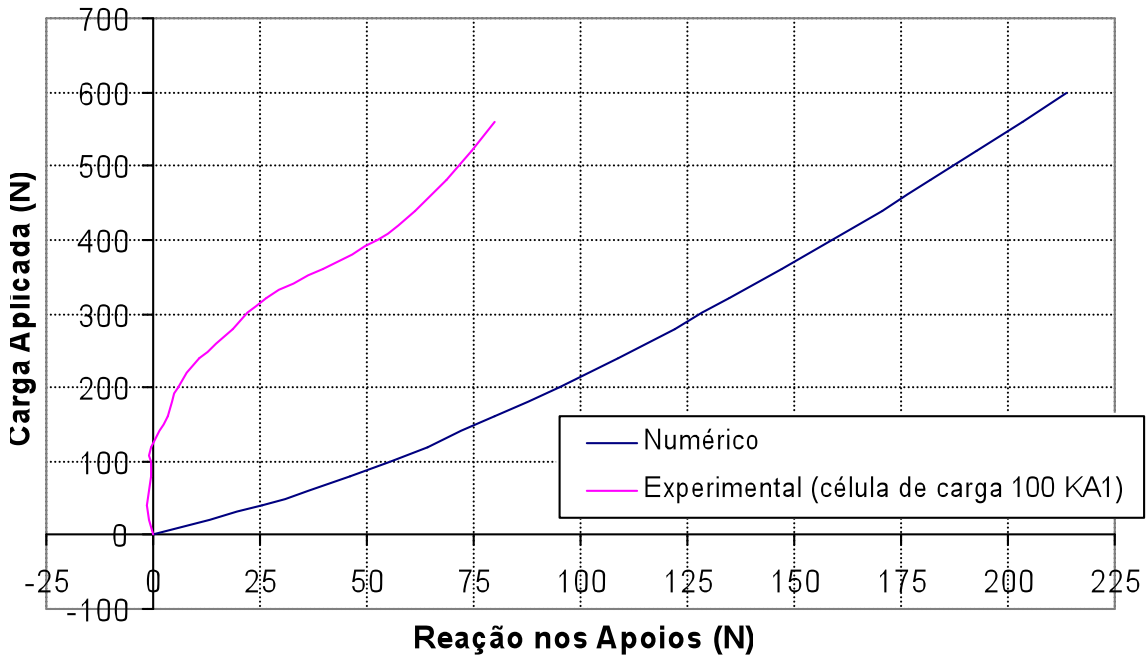


(d) Base IV.

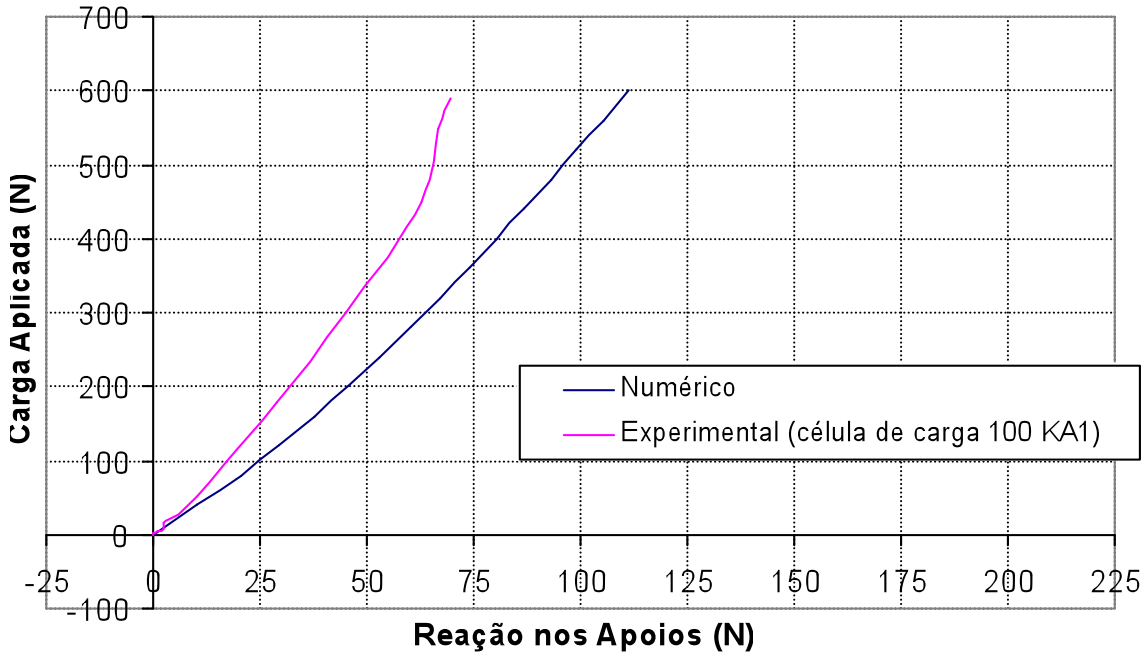


(e) Base V.

FIGURA 6.7 – Comparação entre os resultados das análises numérica e experimental das reações nos apoios (continua).

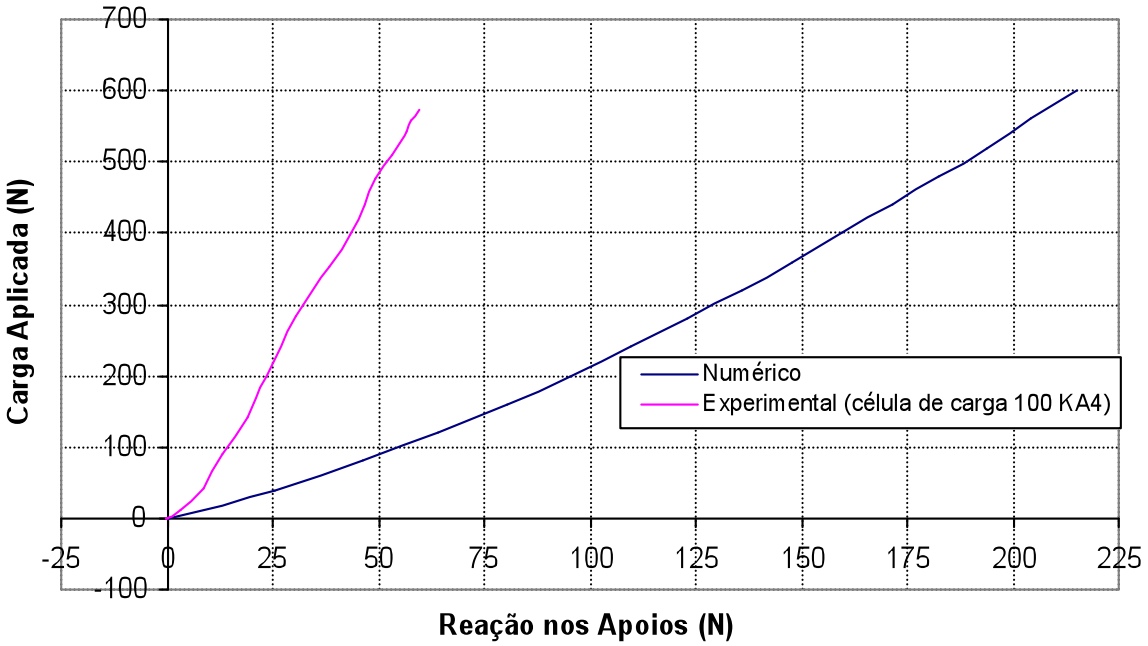


(f) Base VI.

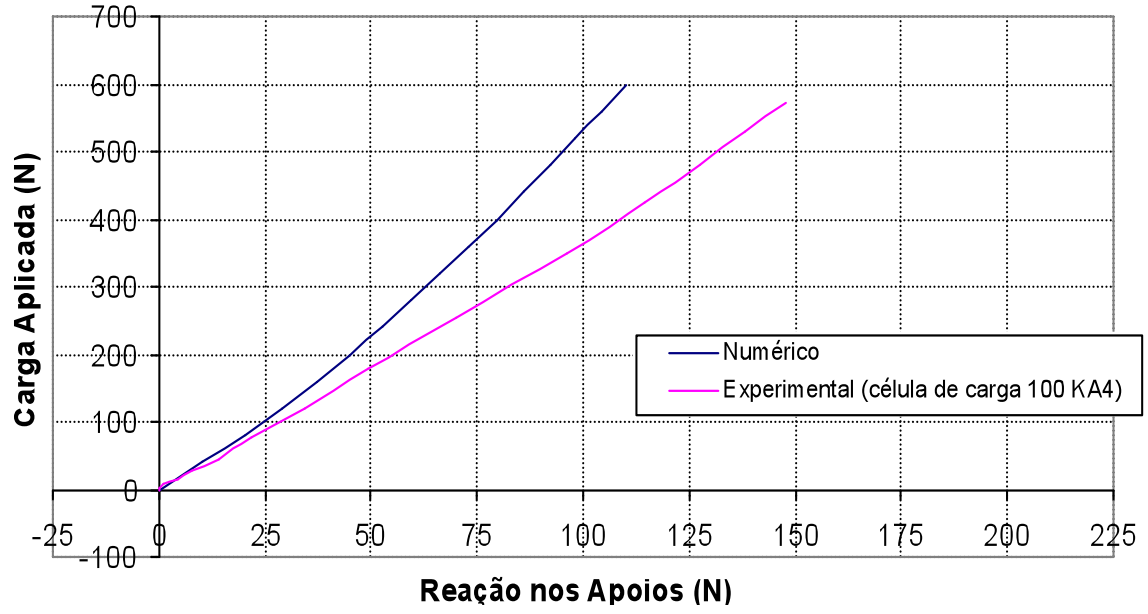


(g) Base VII.

FIGURA 6.7 – Comparação entre os resultados das análises numérica e experimental das reações nos apoios (continua).

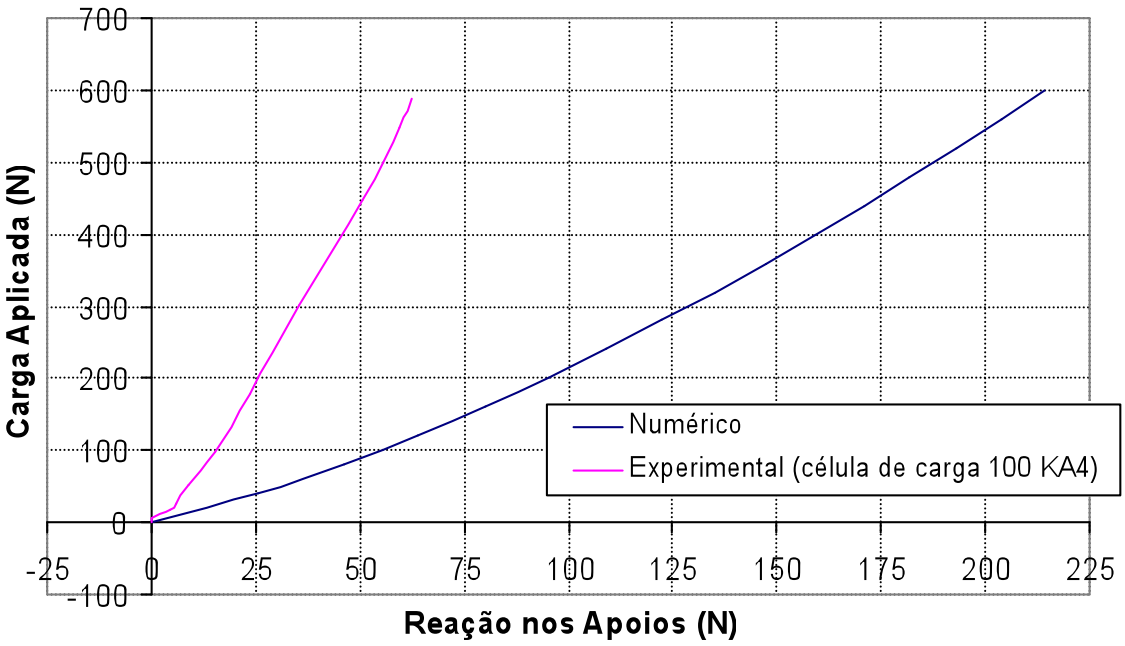


(h) Base VIII.



(i) Base IX.

FIGURA 6.7 – Comparação entre os resultados das análises numérica e experimental das reações nos apoios (continua).



(j) Base X.

FIGURA 6.7 – Comparação entre os resultados das análises numérica e experimental das reações nos apoios (continua).

Como se dispunha, na realização dos ensaios, de apenas quatro células de carga, a determinação numérica das reações nos dez apoios seguiu a metodologia análoga à adotada no item 3.2.2 da análise experimental. Isto permitiu realizar uma comparação mais adequada entre os resultados.

Ao se observar os gráficos da FIG. 6.7, pode-se verificar ha correspondência e coerência entre os resultados numéricos e os experimentais obtidos para as Bases I a X.

- Para a carga total aplicada de 600 N, a menor diferença entre as reações obtidas das análises experimental e numérica, é apresentada no gráfico da FIG. 5.29a, cujo valor é igual a 8,97 N;

- Já a maior diferença é apresentada no gráfico da FIG. 5.29b, cujo valor é igual a 156,37 N;

- À exceção dos gráficos da FIG. 5.29i, os valores obtidos na análise numérica são maiores que os valores obtidos na análise experimental;

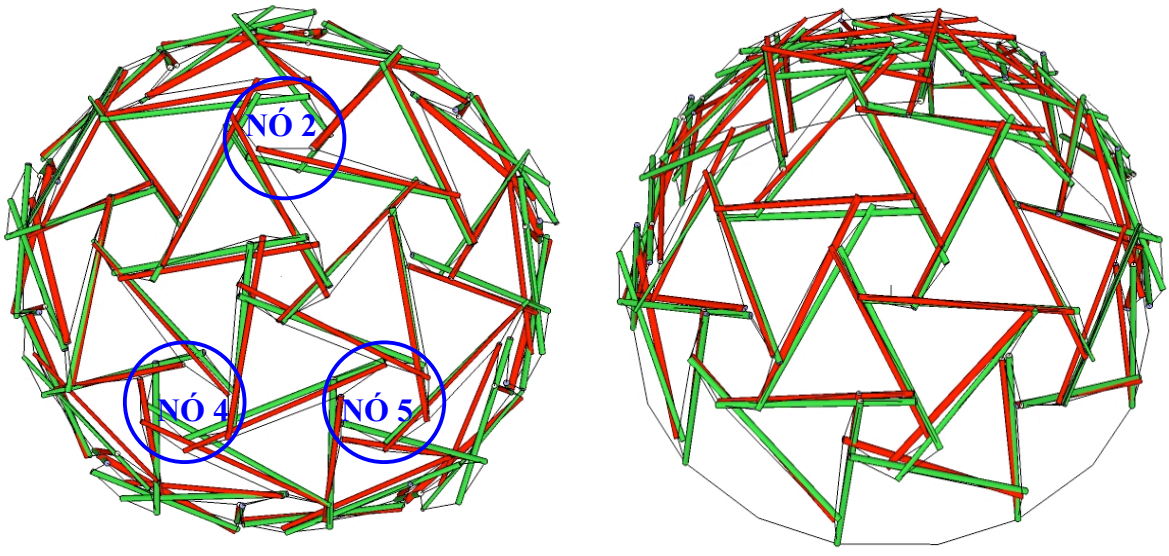
- As Bases pares II, IV, VI, VIII e X apresentam diferenças maiores entre os valores obtidos na análise numérica e os valores obtidos na análise experimental, quando comparados aos valores das Bases ímpares. A média dessa diferença é igual a 144,06 N.

6.3 Aplicação de cargas nos cinco nós da parte superior da cúpula

Como mencionado anteriormente, não houve leitura dos deslocamentos de todos os nós nos ensaios realizados. Assim, para a análise comparativa da simulação de um mezanino apoiado nos cinco nós do topo da cúpula, deve-se desconsiderar os três nós já citados e marcados novamente na FIG. 6.8, focando, desta forma, os dois nós remanescentes.

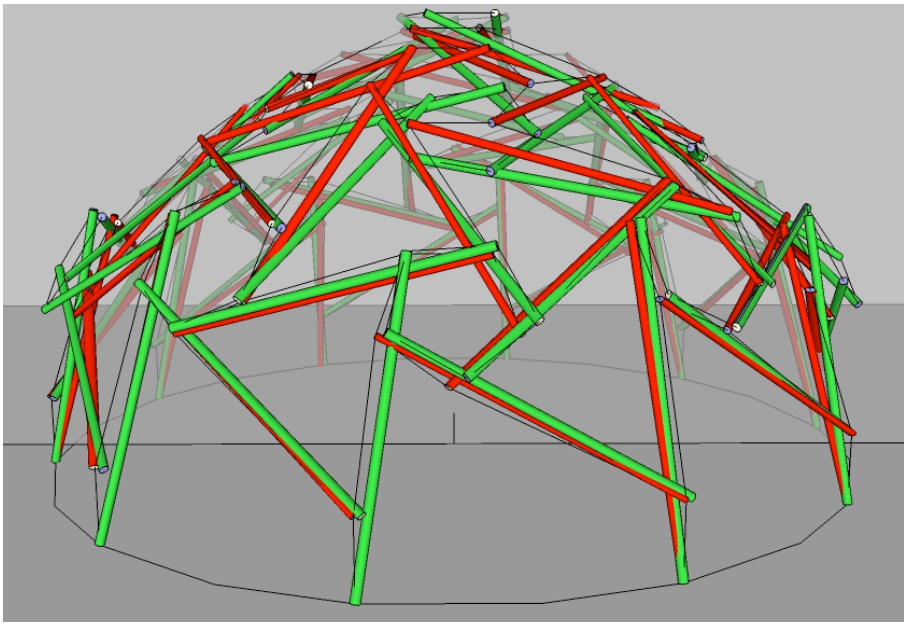
Observa-se na FIG. 6.8 que, qualitativamente, há uma semelhança entre as configurações deformadas da estrutura, tanto experimentalmente como numericamente.

Em alguns nós, os valores de deslocamento apresentados pela análise numérica foram maiores que os dos ensaios, principalmente quanto aos nós constituídos por cinco elementos estruturais.



(a) Vista superior. (b) Perspectiva.

FIGURA 6.8 – Deslocamentos obtidos nos ensaios (em vermelho) e na análise numérica (em verde) (continua).



(c) Vista lateral.

FIGURA 6.8 – Deslocamentos obtidos nos ensaios (em vermelho) e na análise numérica (em verde) (conclusão).

O gráfico da FIG. 6.9 compara os valores dos deslocamentos obtidos nos ensaios (linha tracejada) com os da análise numérica (contínua), para os Nós 1, 3 e 6 (equivalentes, respectivamente, aos nós 111, 115 e 112 da análise numérica – Anexo B).

Pode-se verificar que, analogamente ao ocorrido com a carga aplicada em todos os nós, ao se comparar os valores experimentais com os da análise numérica, há uma diferença constante entre esses valores a partir do primeiro passo de carga.

Entretanto, observa-se que as curvas apresentam um comportamento similar. Isto é confirmado ao se analisar a FIG. 6.10, onde se subtrai, em todas as etapas, a diferença do valor obtido na análise numérica e o valor experimental do primeiro passo de carga de ambas as análises. Nota-se que são obtidos valores muito próximos para os resultados numéricos e experimentais.

A FIG. 6.10 apresenta ainda, para comparação, os valores explícitos das análises numérica e experimental para o Nó 1. Também pode-se observar similaridade entre os resultados, sendo que a diferença média oriunda da análise numérica é de 0,261 cm menor que o valor da análise experimental. Para os Nós 3 e 6, as diferencias médias

obtidas nas análises numéricas são, respectivamente, de 0,116 cm e 0,086 cm menores que os valores das análises experimentais.

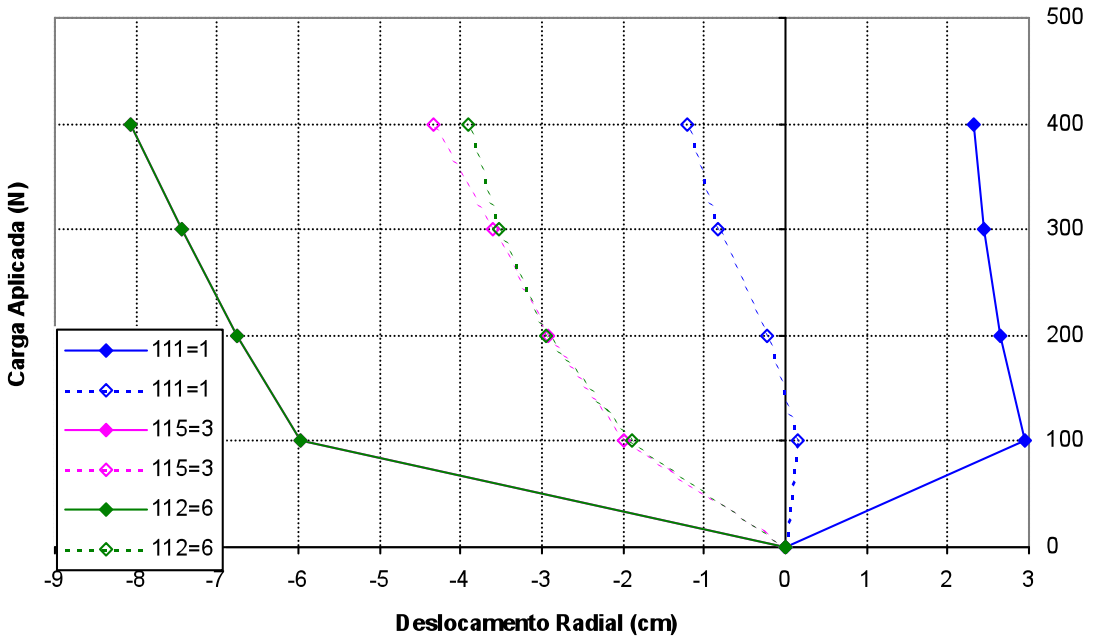


FIGURA 6.9 – Valores comparativos dos deslocamentos obtidos na análise numérica (linha contínua) e na experimental (linha tracejada).

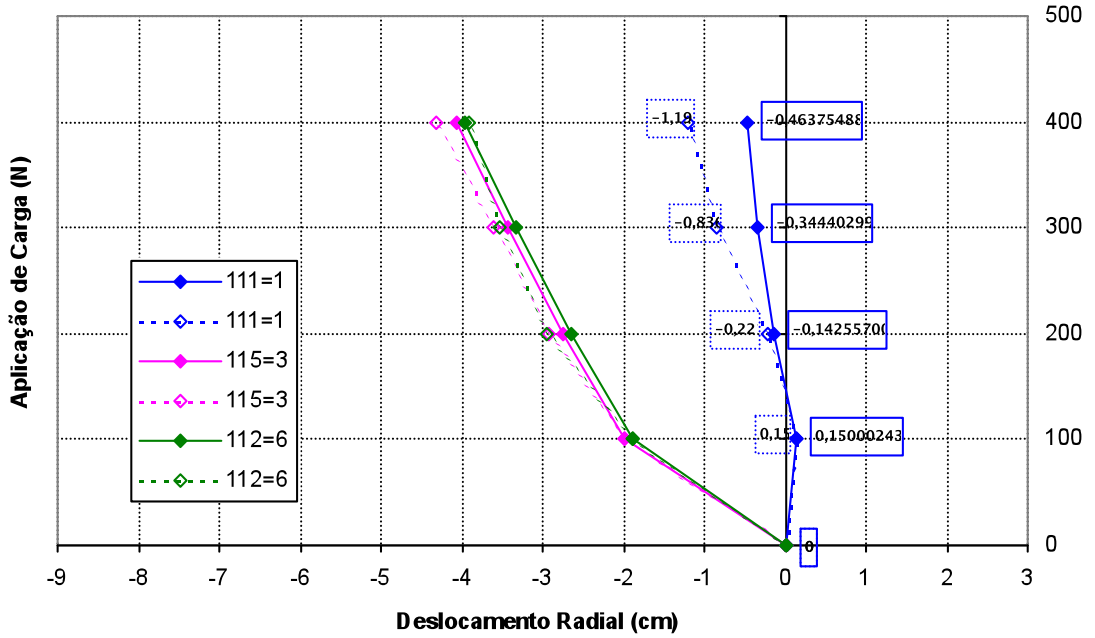
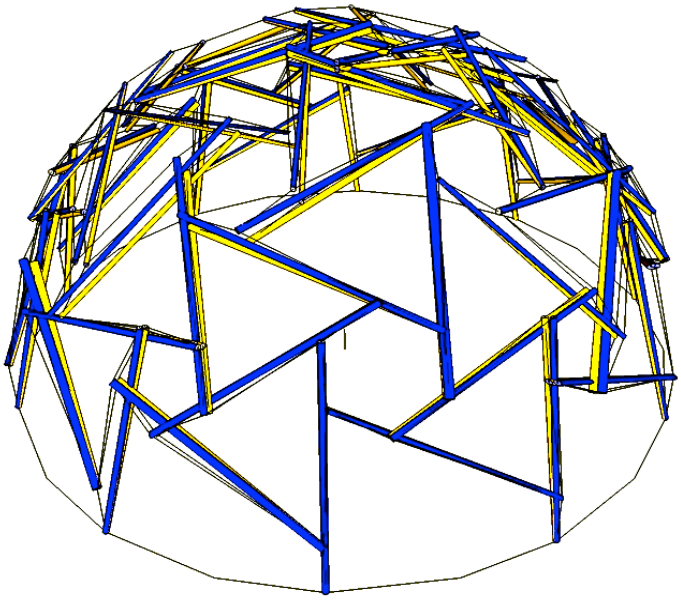


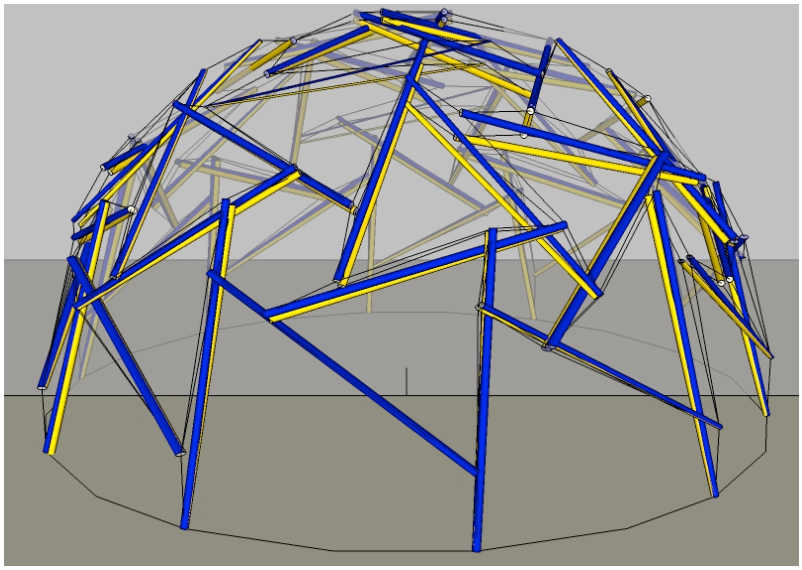
FIGURA 6.10 – Valores comparativos dos deslocamentos obtidos na análise numérica (linha contínua) e na experimental (linha tracejada) após excluir diferença no primeiro passo de carga.

Para o Nó 1, nota-se que a análise numérica permitiu a confirmação do comportamento do topo da cúpula, como mencionado no item 4.1.2 e esquematizado na FIG. 4.16.

A FIG. 6.11 refere-se aos deslocamentos das estruturas nodais antes e depois de aplicação de cargas simulando mezanino, especificamente para a situação de ensaio. À exceção dos cinco nós da aplicação de cargas, não houve deslocamentos significativos e, em alguns casos, estes resultaram próximo de zero.



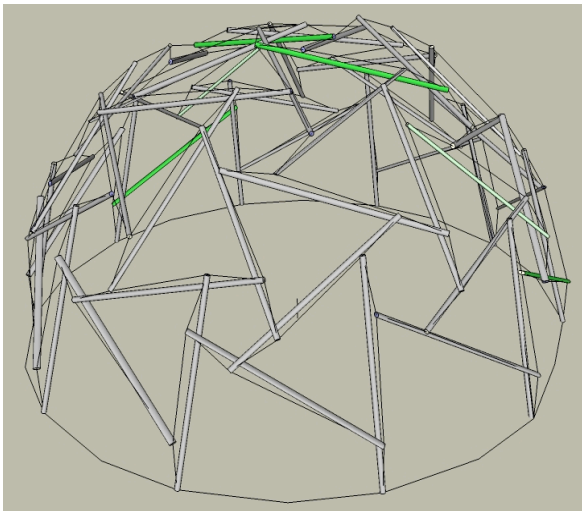
(a) Perspectiva.



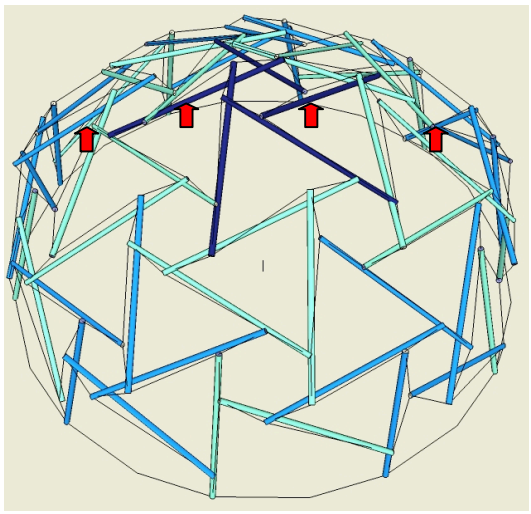
(b) Vista lateral.

FIGURA 6.11 – Cúpula geodésica antes e após a aplicação de cargas experimentais.

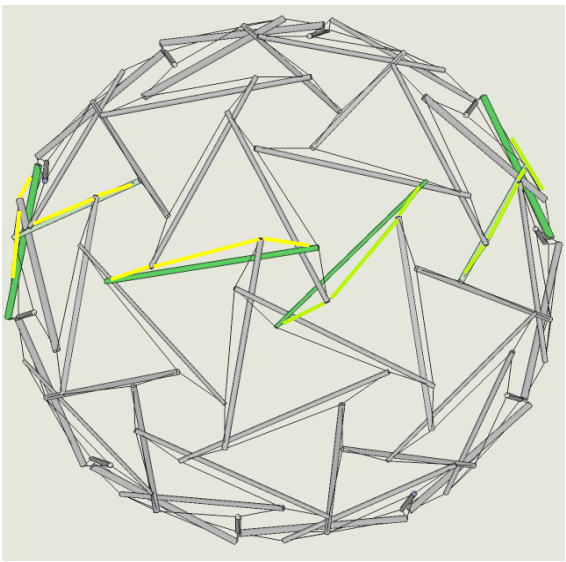
Ao se observar a FIG. 6.12, nota-se que as forças de compressão nas barras e de tração nas cordoalhas também apresentam valores menores que os obtidos na análise numérica.



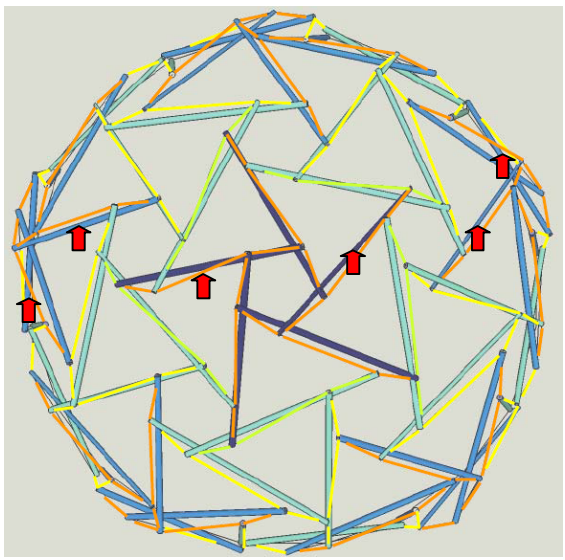
(a) Perspectiva (experimental).



(b) Perspectiva (análise numérica).



(c) Vista superior (experimental).



(d) Vista superior (análise numérica).



Legenda: ⬆ Elementos estruturais instrumentados

FIGURA 6.12 – Comparação dos valores das forças de tração (+) e de compressão (-) nos elementos estruturais instrumentados, em N.

Enquanto as barras do topo da cúpula apresentam valores entre 300 e 318,78 N na análise numérica, as mesmas que foram instrumentadas apresentam forças de compressão da ordem de 0 a 200 N.

O mesmo pode ser dito das cordoalhas: enquanto a análise numérica apresenta forças entre 200 e 268,94 N de tração, os valores encontrados nos elementos instrumentados por EER estão em torno de 0 a 200 N.

6.4 Aplicação de cargas assimétricas

Nos ensaios de cargas assimétricas, com apenas um passo de carga, as barras que compõem a estrutura nodal se tocaram (mencionado no item 4.1.3), não apresentando deformações significativas tanto das barras quanto das cordoalhas. Desta forma, não foi possível fazer uma análise comparativa e conclusiva entre os resultados do ensaio e da análise numérica.

7

PROJETO DE UM PROTÓTIPO

Neste capítulo, são apresentados os parâmetros geométricos característicos da Cúpula Geodésica *Tensegrity* objeto de estudo deste trabalho, além do projeto arquitetônico e o detalhamento das conexões entre cabos (cordoalhas no modelo conceptivo-processual) e barras e entre barras e base e das propostas para aplicações arquitetônicas.

7.1 Parâmetros geométricos

Os problemas geométricos investigados e resolvidos são:

- Obtenção das coordenadas esféricas e, em conseqüência, as coordenadas cartesianas da Cúpula *Tensegrity*;
- Definição da relação entre os comprimentos das barras com o raio da estrutura e deste com o raio dos nós;

- Definição do comprimento dos rasgos na extremidade dos tubos, em função do raio da cúpula geodésica;

- Definição dos sistemas de fixação dos cabos para melhor distribuição das forças.

7.1.1 Definições geométricas da Cúpula Geodésica *Tensegrity*

Como mencionado no Capítulo 2, a superfície geométrica adotada para a Cúpula Geodésica *Tensegrity* é o icosaedro de freqüência 2 (FIG. 7.1), cujas dimensões das arestas são definidas em relação ao raio desejado. Os valores das coordenadas esféricas são apresentados na TAB. 7.1, sua orientação é mostrada na FIG. 7.2. e a numeração na FIG. 7.3.

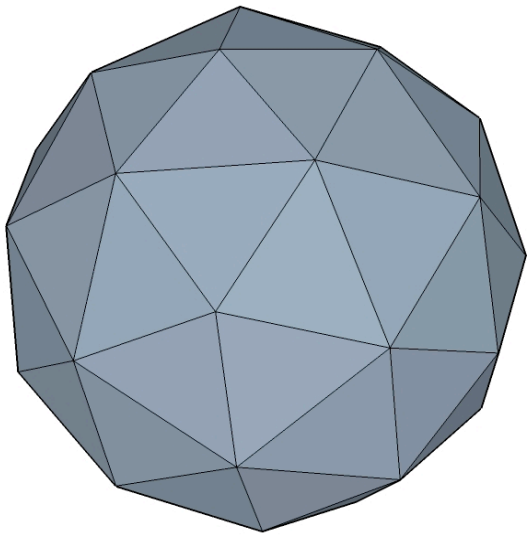


FIGURA 7.1 – Icosaedro de freqüência 2.

TABELA 7.1 – Coordenadas dos nós do icosaedro de freqüência 2.

NÓ	θ	φ	NÓ	θ	φ	NÓ	θ	φ
A	0°	0°	J	198°	$58,36^o$	S	180°	90°
B	90°	$31,71747^o$	K	234°	$63,43495^o$	T	216°	90°
C	162°	$31,71747^o$	L	270°	$58,36^o$	U	252°	90°
D	234°	$31,71747^o$	M	306°	$63,43495^o$	V	288°	90°
E	306°	$31,71747^o$	N	342°	$58,36^o$	W	324°	90°
F	18°	$31,71747^o$	O	18°	$63,43495^o$	X	360°	90°
G	90°	$63,43495^o$	P	54°	$58,36^o$	Y	36°	90°
H	126°	$58,36^o$	Q	108°	90°	Z	72°	90°
I	162°	$63,43495^o$	R	144°	90°			

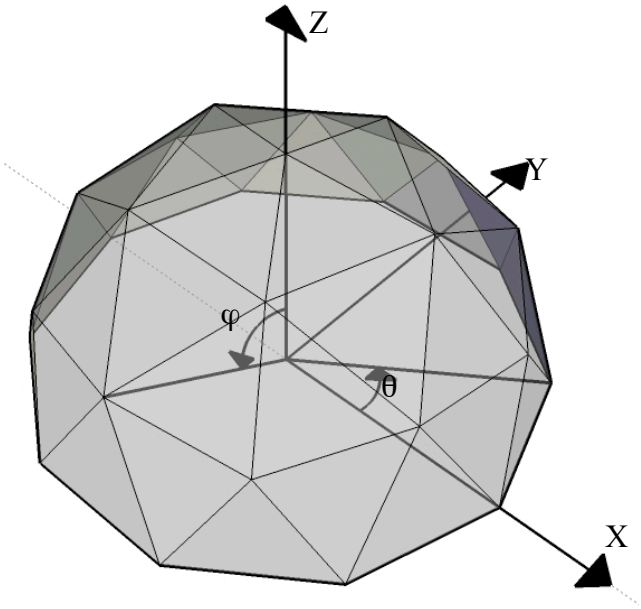


FIGURA 7.2 – Orientação dos ângulos das coordenadas esféricas.

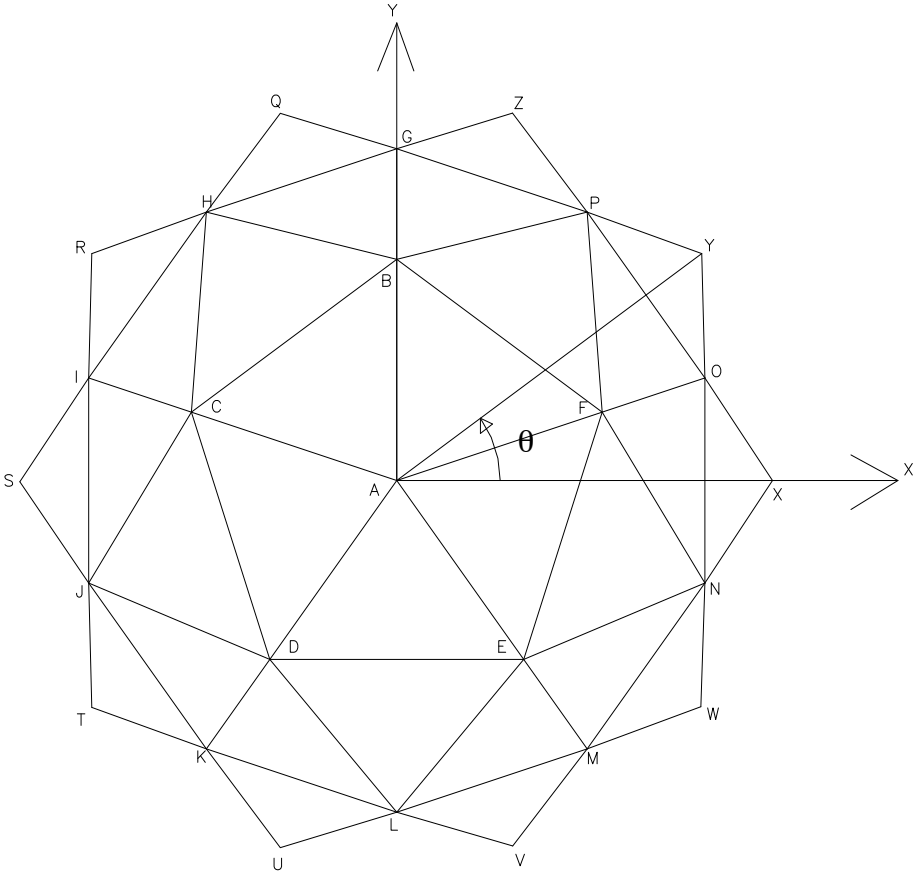
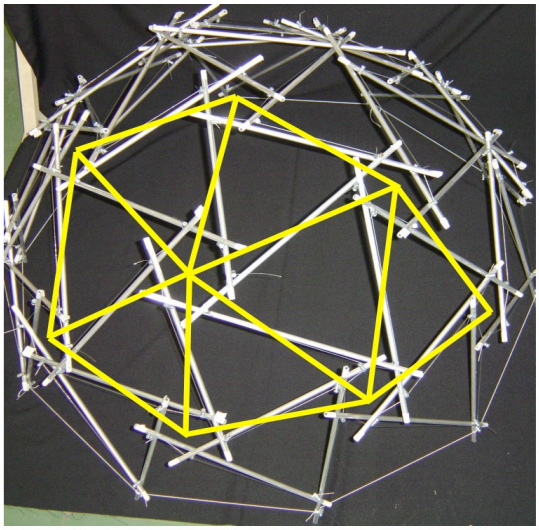


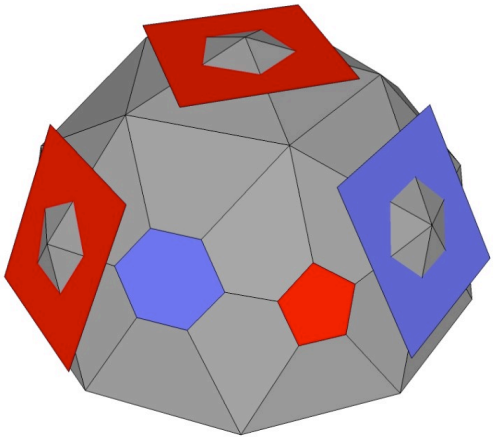
FIGURA 7.3 – Vista superior da cúpula geodésica com a numeração dos nós.

No item 2.6.1 é afirmado que a Cúpula Geodésica *Tensegrity*, objeto de estudo deste trabalho, é uma derivação do icosaedro de freqüência dois. Nesse icosaedro, cinco ou seis barras convergem para um único ponto (ou nó), enquanto na Cúpula *Tensegrity* este mesmo nó torna-se uma estrutura nodal (que, como mencionado no Capítulo 2, seria denominado, a partir de então, como nó). Esta estrutura nodal, por sua vez, forma um plano que, juntamente com as demais estruturas nodais, tornam-se as faces truncadas de um icosaedro de freqüência dois. Ou seja, o poliedro característico da Cúpula *Tensegrity* é obtido seccionando os vértices do icosaedro de freqüência dois.

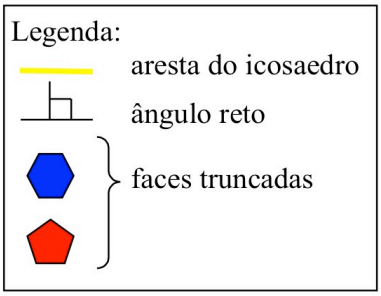
É importante salientar que estes planos foram observados, num primeiro momento, no modelo conceptivo-processual do LASE, verificando-se ainda que as formas geométricas contidas nestes planos (pentágonos e hexágonos), experimentavam uma rotação de tal forma que uma aresta do icosaedro era perpendicular a uma das arestas, tanto dos pentágonos quanto dos hexágonos (FIG. 7.4).

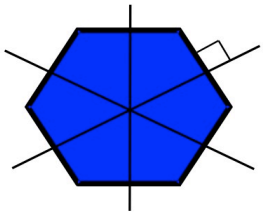


(a) sobreposição da geodésica com a cúpula *Tensegrity*.



(b) icosaedro de freqüência dois truncado.

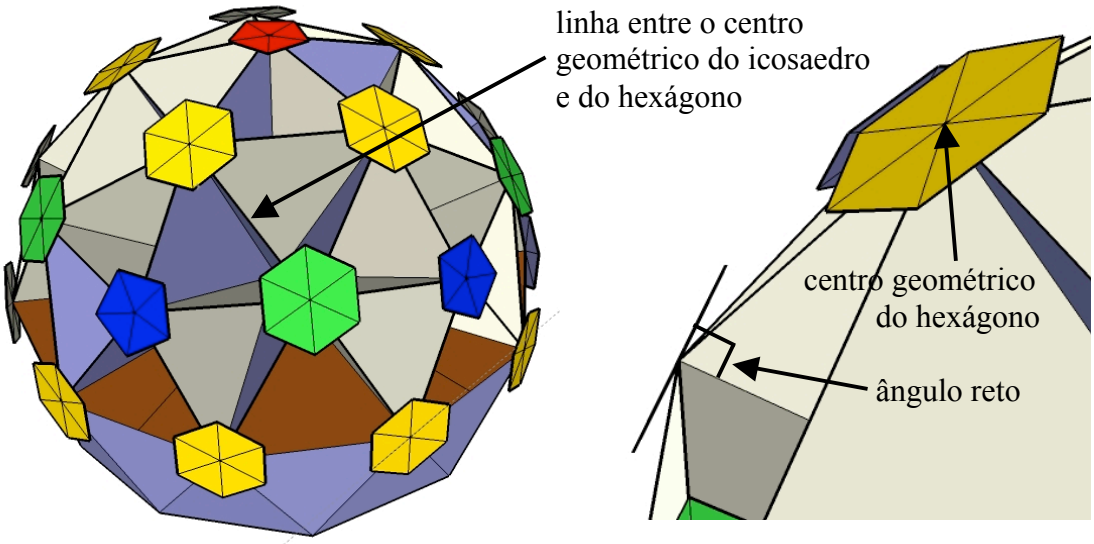




(c) plano formado por uma estrutura nodal (nó) e o ângulo reto entre as arestas do icosaedro e do hexágono.

FIGURA 7.4 – Relações geométricas da cúpula geodésica.

Observou-se ainda que o plano que continha uma estrutura nodal (ou nó) fazia um ângulo reto em relação a uma linha que partia do centro geométrico da cúpula e ia até o centro geométrico de um pentágono ou hexágono (FIG. 7.5).



(a) linha que une o centro geométrico do icosaedro e do hexágono.

(b) detalhe do centro geométrico do hexágono.

FIGURA 7.5 – Relações geométricas da cúpula geodésica.

Todas estas relações geométricas são conseqüência de se transformar o icosaedro em um poliedro truncado.

Assim, houve a necessidade de se obter a nova relação de comprimento das barras em função do raio. Esta relação é obtida pela Eq.(7.1) (PUGH, 1975):

$$d = \sqrt{R_5^2 + R_6^2 - 2R_5R_6\left[\cos\varphi_5\cos\varphi_6 + \cos(\theta_5 - \theta_6)sen\varphi_5 sen\varphi_6\right]} \qquad (7.1)$$

Onde d é a distância entre dois pontos inscritos em uma superfície esférica; R_5 e R_6 são os raios das esferas que circunscrevem, respectivamente, os vértices dos pentágonos e hexágonos do icosaedro de freqüência dois truncado; φ_5 *e* φ_6 os ângulos verticais dos vértices dos pentágonos e hexágonos deste poliedro, e θ_5 e θ_6 os ângulos horizontais dos mesmos.

Para a cúpula estudada, adotou-se o raio R do icosaedro de freqüência dois igual a 60 cm e, para as arestas, tanto dos pentágonos quanto dos hexágonos do icosaedro de

freqüência dois truncado, 10 cm de comprimento (um pouco maior que as arestas das estruturas nodais do Modelo conceptivo-processual).

Ao se adotar arestas iguais entre os pentágonos e os hexágonos do icosaedro de freqüência dois truncado, são determinados raios diferentes para as circunferências que circunscrevem estes polígonos (8,51 cm para o pentágono e 10 cm para o hexágono, FIG. 7.6).



(a) pentágono. (b) hexágono.

FIGURA 7.6 – Valores dos raios que circunscrevem os polígonos.

Por sua vez, os raios dos polígonos já mencionados determinam dois valores diferentes para os raios das esferas que circunscrevem os pentágonos e hexágonos do icosaedro de freqüência dois truncado, denominados na Eq. (7.1) como R_5 e R_6, respectivamente.

Os valores destes raios foram obtidos com o Teorema de Pitágoras para os triângulos isósceles apresentados na FIG. 7.7, e são: R_5 = 60,6 cm e R_6 = 60,83 cm.

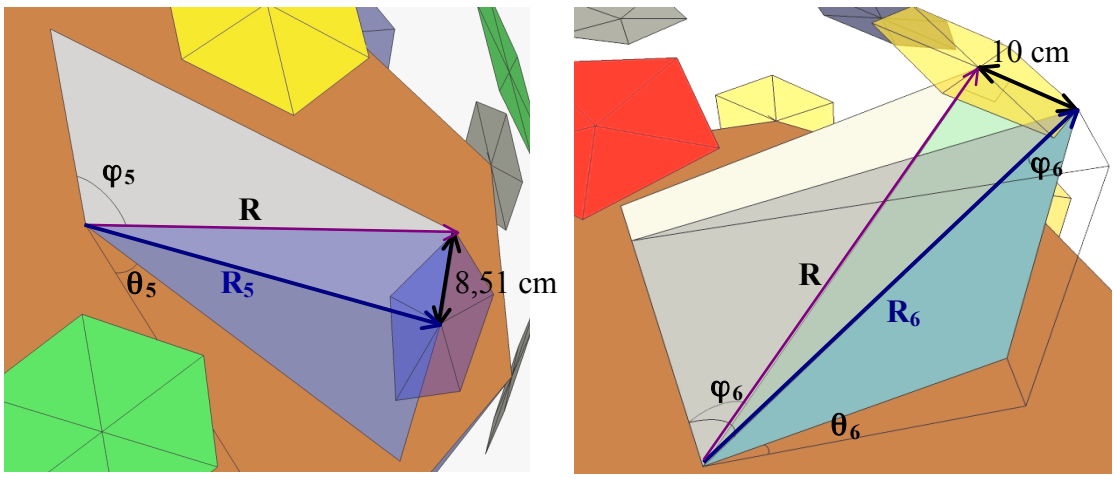


FIGURA 7.7 – Obtenção de R_5 = 60,6 cm e R_6 = 60,83 cm.

Os ângulos verticais e horizontais dos vértices nas esferas que circunscrevem os pentágonos e hexágonos do icosaedro de freqüência dois truncado foram determinados por meio de relações trigonométricas, que tiveram como conseqüência a obtenção das equações apresentadas na TAB. 7.2, e seus valores são apresentados no Anexo D (coordenadas esféricas) e o cálculo detalhado da obtenção dos mesmos, no Anexo E.

TABELA 7.2 – Equações das coordenadas esféricas dos nós do icosaedro de freqüência 2 truncado (VON KRÜGER *et al*, 2008).

Estrutura nodal		nós	φ	θ
topo		1 a 5	$= \text{arcsen}\frac{r_5}{R_5}$	$= 54° + k \cdot 72°$ (k = 0, 1, 2, 3, 4)
2° andar	hexágonos	6-11 12-17 18-23 24-29 30-35	$= \arccos\frac{Z + z_i}{R_6}$	$= \theta_i \pm \text{arcsen}\frac{a_6}{2(Z + z_i)tg\varphi}$
		7-10 13-16 19-22 25-28 31-34	$= \varphi_i$	$= \theta_i \pm arctg\frac{a_6}{R\,\text{sen}\,\varphi_i}$
		8-9 14-15 20-21 26-27 32-33	$= \arccos\frac{Z - z_i}{R_6}$	$= \theta_i \pm \text{arcsen}\frac{a_6}{2(Z - z_i)tg\varphi}$
1° andar	hexágonos	41 52 63 74 85	$= \varphi_i - arctg\frac{a_6}{R}$	$= \theta_i$
		38 49 60 71 82	$= \varphi_i + arctg\frac{a_6}{R}$	$= \theta_i$
		36-40 47-51 58-62 69-73 80-84	$= \arccos\frac{Z + z_{ii}}{R_6}$	$= \theta_i \pm \text{arcsen}\frac{a_6\sqrt{3}}{2\sqrt{R_6^2 - (Z + z_{ii})^2}}$
		37-39 48-50 59-61 70-72 81-83	$= \arccos\frac{Z - z_{ii}}{R_6}$	$= \theta_i \pm \text{arcsen}\frac{a_6\sqrt{3}}{2\sqrt{R_6^2 - (Z - z_{ii})^2}}$
	pentágonos	44 55 66 77 88	$= \varphi_i + arctg\frac{r_5}{R}$	$= \theta_i$
		42-46 53-57 64-68 75-79 86-90	$= \arccos\frac{Z + z_{iii}}{R_5}$	$= \theta_i \pm \text{arcsen}\frac{a_5}{2\sqrt{R_5^2 - (Z + z_{iii})^2}}$
		43-45 54-56 65-67 76-78 87-89	$= \arccos\frac{Z - z_{iv}}{R_5}$	$= \theta_i \pm \text{arcsen}\frac{r_5\,\text{sen}\,72°}{\sqrt{R_5^2 - (Z - z_{iv})^2}}$
base			$= 90° \pm \text{arcsen}\frac{a_6}{2R_6}$	$= \theta_i + arctg\frac{a_6\sqrt{3}}{2R}$

Onde:

R: raio do icosaedro de freqüência dois;

R_5: raio do icosaedro de freqüência dois truncado (referente aos vértices dos pentágonos);

R_6: raio do icosaedro de freqüência dois truncado (referente aos vértices dos hexágonos);

r_5: raio da circunferência circunscrita aos pentágonos;

r_6: raio da circunferência circunscrita aos hexágonos;

a_5: aresta dos pentágonos;

a_6: aresta dos hexágonos;

X, Y e Z: coordenadas cartesianas dos vértices do icosaedro de freqüência dois;

θ_i: coordenadas horizontais dos vértices do icosaedro de freqüência dois;

φ_i: coordenadas verticais dos vértices do icosaedro de freqüência dois.

$$z_i = \left(\frac{a}{2}\sqrt{3}\right)\operatorname{sen}\varphi_i \tag{7.2}$$

$$z_{ii} = \frac{a}{2}\cos(90° - \varphi_i) \tag{7.3}$$

$$z_{iii} = \left(\sqrt{r_5^2 - \frac{a^2}{4}}\right)\cos(90° - \varphi_i) \tag{7.4}$$

$$z_{iv} = r_5 \cos 72° \cos(90° - \varphi_i) = 0{,}309 r_5 \cos(90° - \varphi_i) \tag{7.5}$$

$$Z = R\cos\varphi_i \tag{7.6}$$

A FIG. 7.8 apresenta um exemplo de quais os pontos devem ser considerados para a obtenção dos comprimentos das barras e cordoalhas.

Ou seja, para se obter o comprimento do cabo marcado na FIG. 7.8, basta substituir na Eq.(7.1) as coordenadas esféricas dos pontos 2 e 17, e adicionar ao seu valor duas vezes a dimensão da aresta do poliedro (que, neste caso específico, possui mesmo valor, pois a aresta do pentágono é igual a do hexágono), que corresponde aos segmentos $\overline{12}$ e $\overline{1716}$. Para o comprimento da barra, substitui-se na mesma equação as coordenadas esféricas dos pontos 1 e 16.

Após a obtenção das coordenadas esféricas, foi executado o desenho via programa computacional gráfico *SketchUp®*, que é apresentado na FIG. 7.9.

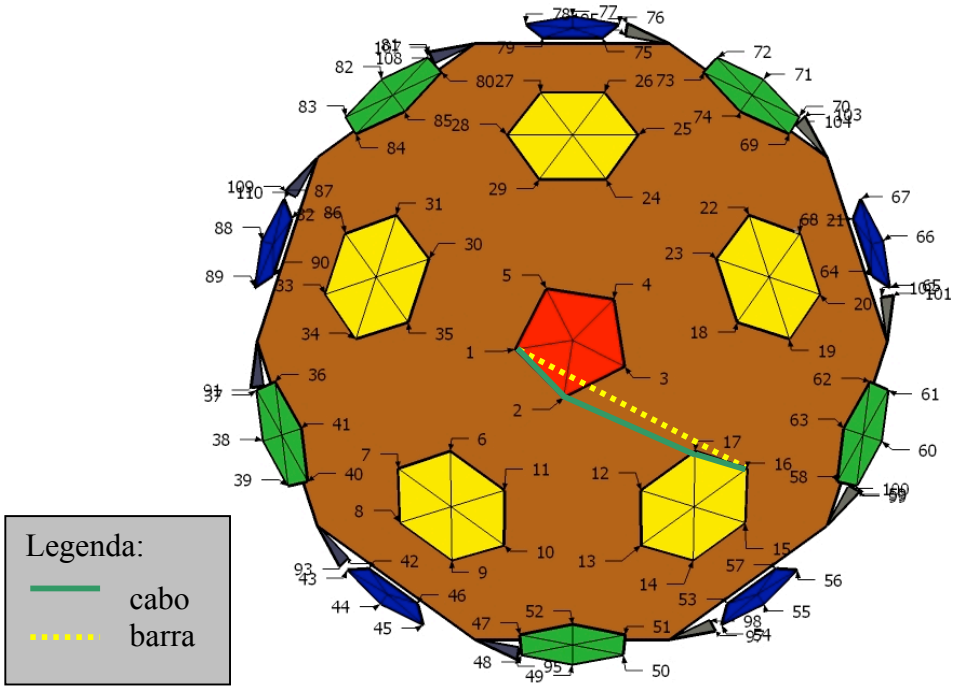


FIGURA 7.8 – Obtenção do comprimento das barras e cabos.

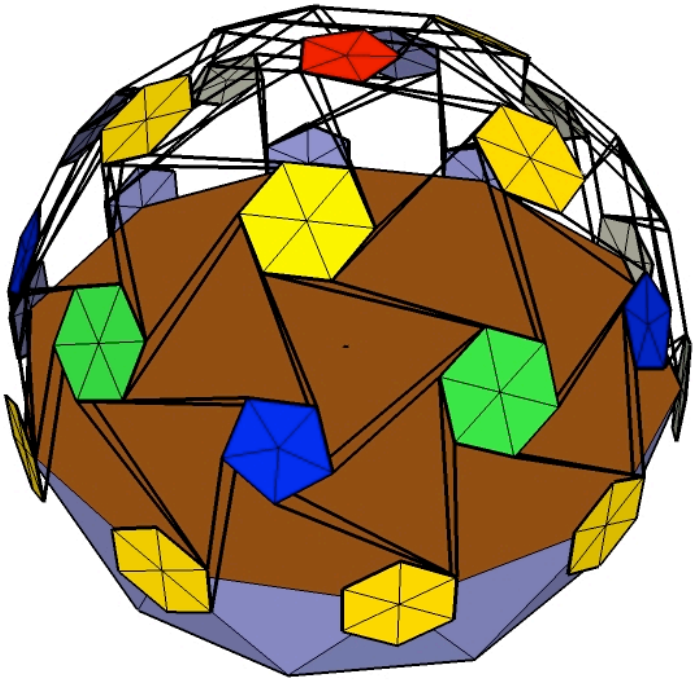


FIGURA 7.9 – Desenho com as linhas que representam as cordoalhas e barras.

Para se obter as coordenadas cartesianas necessárias como parte dos dados de entrada para a análise numérica apresentada no Capítulo 5, foram utilizadas as seguintes equações:

$$X = R\cos\theta\,\mathrm{sen}\,\varphi \tag{7.7}$$

$$Y = R\,\mathrm{sen}\,\theta\,\mathrm{sen}\,\varphi \tag{7.8}$$

$$Z = R\cos\varphi \tag{7.9}$$

Onde X, Y, e Z são as coordenadas cartesianas de um dos vértices dos polígonos, R o raio que circunscreve o poliedro (R_5 ou R_6) e φ e θ os ângulos verticais e horizontais dos pontos que representam estes vértices, respectivamente.

A FIG. 7.10 apresenta os valores dos comprimentos das barras e cordoalhas da Cúpula Geodésica *Tensegrity* com as mesmas proporções que às do modelo conceptivo-processual.

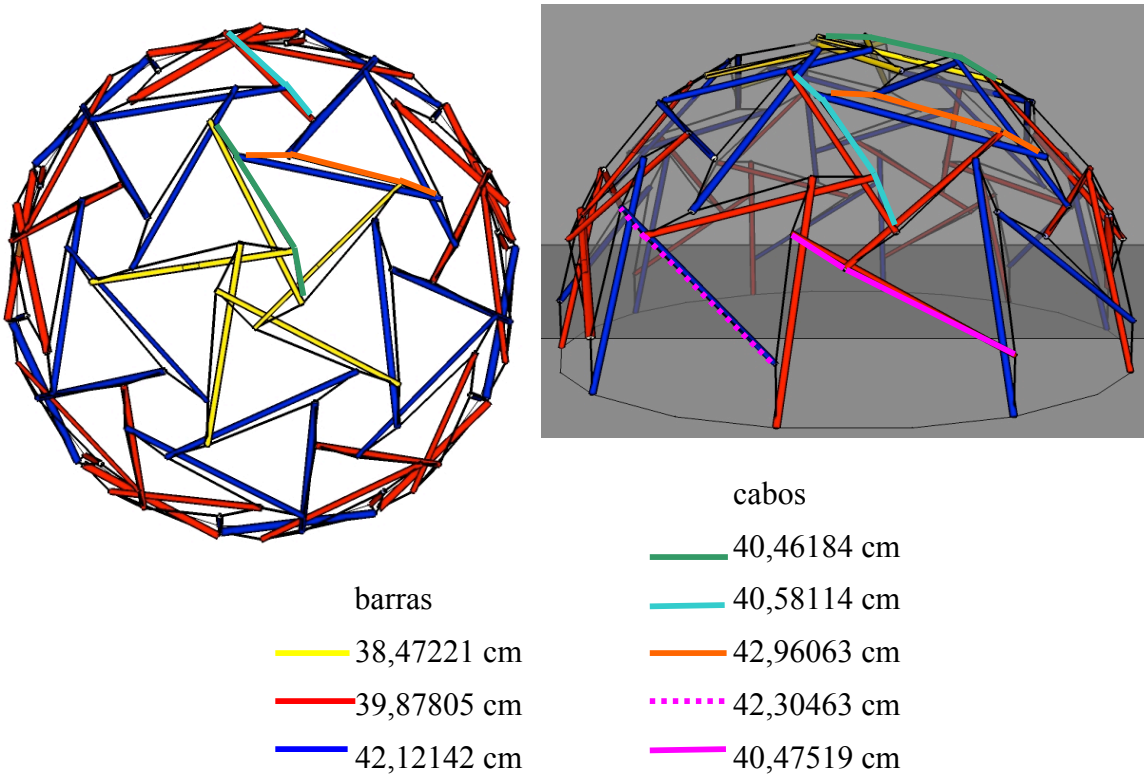


FIGURA 7.10 – Comprimento das barras e cordoalhas.

7.2 Projeto de um protótipo

7.2.1 Condições de semelhança

A análise do comportamento de um protótipo por meio do ensaio de um modelo reduzido é feita respeitando-se certas condições conhecidas como condições de semelhança.

As condições de semelhança possibilitam deduzir o comportamento de um determinado protótipo a partir do comportamento de um modelo reduzido. Segundo Fourier e Sedov (CARNEIRO, 1989), dois processos são semelhantes quando se pode deduzir, por um simples cálculo (análogo ao de uma mudança de sistema de unidades de medida), as características de um em relação a outro. Para tal, é necessário o conhecimento dos fatores de escala. Estes fatores de escala são estabelecidos por meio das condições de semelhança física.

As condições de semelhança física são expressas através da igualdade, no modelo e no protótipo, de parâmetros adimensionais formados por produtos de potências dos parâmetros originais do problema, denominados de números Π (CARNEIRO, 1989).

Por se tratar de um modelo conceptivo-processual, o mesmo apresenta a primeira condição de semelhança, que é a geométrica. Entretanto (e exatamente por não se tratar, necessariamente, de um modelo reduzido), fatores de forma e função de forma iguais não foram observados na presente pesquisa, tanto para o modelo quanto para o futuro protótipo. Ou seja, possíveis distorções e, conseqüentemente, erros de interpretação dos resultados, poderiam ocorrer.

A distorção aqui verificada é a diferença dimensional das cordoalhas em relação às barras: enquanto esta possui diâmetro nominal igual a 0,65 mm (cuja força normal de tração resistente de cálculo é igual a 212,76 N, Capítulo 3), aquela possui o diâmetro igual a 0,96 cm e a espessura de parede igual a 1,8 mm (cuja resistência à compressão ϕF_L é igual a 2.842,75 N, Capítulo 3).

Contudo, estas dimensões não inviabilizam o uso deste modelo como conceptivo-processual pelos motivos já explicitados no item 3.1, nem invalidam os resultados

obtidos nos ensaios e sua conseqüente comparação com a análise numérica, pois verificou-se (como mostrado no Capítulo 6) a convergência de valores relativos ao comportamento da estrutura.

A seguir, serão apresentadas as análises dimensionais das barras e cordoalhas.

7.2.1.1 Análise dimensional da barra tubular

Para a barra tubular, adotou-se o problema de flambagem de colunas. As grandezas aqui envolvidas são: l (comprimento em cm), A (área da seção transversal em cm^2), I (momento de inércia em cm^4), E (módulo de elasticidade em kN/cm^2), F_{cy} (resistência ao escoamento à compressão, em kN/cm^2) e P (carga aplicada em kN).

Por meio da matriz dimensional dessas grandezas, obtém-se quatro produtos adimensionais ou Πs, e são:

$$\Pi_1 = A/l^2 \tag{7.10}$$

$$\Pi_2 = I/l^4 \tag{7.11}$$

$$\Pi_3 = l^2 E/P \tag{7.12}$$

$$\Pi_4 = l^2 F_{cy}/P \tag{7.13}$$

Da condição de semelhança, tem-se:

$$\frac{A_m}{l_m^2} = \frac{A_p}{l_p^2} \therefore \frac{A_m}{A_p} = \frac{l_m^2}{l_p^2} = \frac{1}{\lambda^2} \tag{7.14}$$

$$\frac{I_m}{l_m^4} = \frac{I_p}{l_p^4} \therefore \frac{I_m}{I_p} = \frac{l_m^4}{l_p^4} = \frac{1}{\lambda^4} \tag{7.15}$$

$$\frac{E_m}{E_p} = \frac{1}{\mu} \tag{7.16}$$

$$\frac{P_m}{P_p} = \frac{1}{\lambda^2 \mu} \tag{7.17}$$

$$\frac{F_{cy_m}}{F_{cy_p}} = \frac{1}{\mu} \tag{7.18}$$

As características do modelo conceptivo-processual em alumínio (item 3.2.1) são: área da seção transversal do tubo A_m igual a 0,44 cm^2; comprimento da barra do modelo, l_m, igual a 42 cm; momento de inércia I_m igual a 0,034 cm^4; módulo de elasticidade do alumínio E_m igual a 6.960 kN/cm^2 (69.600 MPa); resistência ao escoamento à compressão F_{CYm} igual a 24 kN/cm^2 (240 MPa).

Adotando-se para o protótipo tubos de aço carbono, tem-se: módulo de elasticidade do aço carbono E_p igual a 20.500 kN/cm^2 e comprimento da barra do protótipo (calculado no item 7.2.2) l_p igual a 210,634 cm.

Assim, substituindo-se os valores dos módulos de elasticidade dos materiais que compõem o modelo e o protótipo na Eq. (7.16), tem-se que $E_m / E_p = 1/2{,}95 \approx 1/3$, sendo μ igual a 3. Se se proceder de maneira análoga para a resistência ao escoamento à compressão, tem-se $F_{cy_m} / F_{cy_p} = 1/3$. Se F_{CYm} = 24 kN/cm^2, obtém-se o valor de F_{CYp}, que deveria ser igual a 72 kN/cm^2.

Ao se dividir o comprimento da barra do modelo l_m pelo comprimento da barra l_p, tem-se: $l_m / l_p \approx 1/5$, sendo λ igual a 5. Assim, ao substituir esta relação na Eq. (7.14), encontra-se o valor da área da seção do tubo de aço carbono do protótipo A_p igual a 11,07 cm^2.

De forma análoga, ao se substituir a relação entre os comprimentos das barras do modelo e do protótipo à Eq. (7.15), obtém-se o valor do momento de inércia do perfil do protótipo I_p igual a 21,25 cm^4.

Finalmente, ao se substituir os valores de μ e λ (iguais, respectivamente, a três e cinco) na Eq. (7.17), tem-se o valor da carga aplicada na barra mais solicitada do protótipo, P_p, igual a 213,21 kN.

7.2.1.2 Análise dimensional da cordoalha

Para a cordoalha, adotou-se o problema de tração simples. As grandezas aqui envolvidas são: l (comprimento em cm), A (área da seção transversal em cm^2), E (módulo de elasticidade em kN/cm^2), F_y (resistência ao escoamento do aço, em kN/cm^2) e P (carga máxima à tração em kN).

Por meio da matriz dimensional dessas grandezas, obtém-se três produtos adimensionais ou Πs, e são:

$$\Pi_1 = A/l^2 \tag{7.19}$$

$$\Pi_2 = l^2 E/P \tag{7.20}$$

$$\Pi_3 = l^2 F_y/P \tag{7.21}$$

Da condição de semelhança, tem-se:

$$\frac{A_m}{l_m^2} = \frac{A_p}{l_p^2} \therefore \frac{A_m}{A_p} = \frac{l_m^2}{l_p^2} = \frac{1}{\lambda^2} \tag{7.22}$$

$$\frac{E_m}{E_p} = \frac{1}{\mu} \tag{7.23}$$

$$\frac{P_m}{P_p} = \frac{1}{\lambda^2 \mu} \tag{7.24}$$

$$\frac{F_{y_m}}{F_{y_p}} = \frac{1}{\mu} \tag{7.25}$$

As características da cordoalha modelo (item 3.2.1) são: área da seção transversal A_m igual a 0,0033 cm^2 (0,33 mm^2); comprimento da cordoalha do modelo l_m igual a 42,96 cm; módulo de elasticidade do aço inoxidável temperado tipo 301, E_m, igual a 19.310 kN/cm^2 (193.100 MPa); resistência ao escoamento F_{Ym} igual a 75,85 kN/cm^2 (758,5 MPa).

Adotando-se para o protótipo cabos de aço carbono, tem-se: módulo de elasticidade do aço carbono E_p igual a 20.500 kN/cm^2, comprimento do cabo do protótipo (também calculado no item 7.2.2) l_p igual a 214,8 cm e resistência ao escoamento F_{Yp} igual a 27,58 kN/cm^2.

Assim, substituindo-se os valores dos módulos de elasticidade dos materiais que compõem o modelo e o protótipo na Eq. (7.23), tem-se que $E_m / E_p = 1/1{,}1$, sendo μ igual a 1,1. Ao se dividir o comprimento da cordoalha do modelo l_m pelo comprimento do cabo de aço l_p, tem-se: $l_m / l_p = 1/5$, sendo λ igual a 5. Desta forma, ao substituir esta relação na Eq. (7.22), encontra-se o valor da área da seção transversal do cabo de aço do protótipo A_p igual a 0,0825 cm^2.

Substituindo os valores obtidos com as relações entre os módulos de elasticidade e comprimento da cordoalha e do cabo de aço na Eq. (7.24), obtém-se o valor para a carga máxima à tração no cabo mais solicitado do protótipo, P_p, igual a 5,85 kN.

7.2.2 Dimensionamento do protótipo

Para o projeto de um protótipo, serão adotados os seguintes valores de raio da cúpula (R_p) e das circunferências circunscritas nos nós compostos por cinco (r_{5p}) e seis (r_{6p}) barras:

- R_p = 300 cm
- r_{5p} = 42,5325 cm
- r_{6p} = 50 cm

O valor de R se deve ao fato de que esta estrutura poderá ser montada no LAEES, ou em outro laboratório que não dispõe de grandes espaços livres para montagem, sem a necessidade de grande área ou de transporte e montagem que exige infra-estrutura especial.

Os valores escolhidos para as demais dimensões do protótipo são proporcionais às dimensões do modelo conceptivo-processual, o que permitiu o uso dos mesmos ângulos verticais e horizontais listados no Anexo D.

Utilizando a Eq.(7.1) , tem-se os seguintes valores para as barras e cabos:

- Para as barras do topo da cúpula: 1.923,58 mm + 20% = 2.308,29 mm;
- Para as barras de maior dimensão: 2.106,34 mm + 20% = 2.527,61 mm;
- Para as barras de menor dimensão: 1.997,16 mm + 20% = 2.396,60 mm;
- Para os cabos correspondentes às barras do topo da cúpula: 2.023,07 mm + 800 mm = 2.823,07 mm;
- Para os cabos correspondentes às barras de maior dimensão: 2.147,99 mm + 800 mm = 2.947,99 mm;
- Para os cabos correspondentes às barras de menor dimensão: 2.029,04 mm + 800 mm = 2.829,04 mm;
- Para os cabos correspondentes às barras de maior dimensão, que apóiam na base: 2.115,18 mm + 800 mm = 2.915,18 mm;
- Para os cabos correspondentes às barras de menor dimensão, que apóiam na base: 2.023,73 mm + 800 mm = 2.823,73 mm.

São acrescidos 20% do comprimento de cada barra em função dos rasgos, que não são incluídos quando da obtenção das coordenadas esféricas dos pontos que caracterizam a barra. Este valor foi adotado com base no Modelo conceptivo-processual (item 3.1).

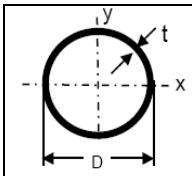
Para os cabos, foram acrescidos 800 mm devido ao sistema de fixação dos cabos, que será detalhado no item 7.2.3 e no Anexo F.

7.2.3 Especificação dos elementos estruturais no pré-dimensionamento

Como mencionado no item 7.2.1.1, foram adotados os tubos estruturais em aço carbono. Desta forma, serão especificados os tubos VMB250 com costura e com seção

proporcional ao modelo conceptivo-processual. Assim, para os tubos com os comprimentos apresentados no item 7.2.2, e com base na área da seção transversal do protótipo obtida no item 7.2.1.1 (A_p = 11,07 cm^2), têm-se o diâmetro externo destes elementos estruturais igual a 60,3 mm. A TAB. 7.3 apresenta as dimensões e propriedades geométricas do tubo estrutural especificado.

TABELA 7.3 Dimensões e propriedades geométricas do tubo estrutural especificado (V&M DO BRASIL, 2004).



Diâmetro externo	Espessura parede	Massa por compr. Unitário	Área seção transver. de aço	Momento de Inércia	Raio de Giração	Módulo Elást. de Resist. à Flexão	Módulo Plást. de Resist. À Flexão	Const. Torção	Módulo de Resist. à Torção	Área de Pintura
D (mm)	t (mm)	P (kg/m)	A (cm^2)	I (cm^4)	r (cm)	W (cm^3)	Z (cm^3)	I_T (cm^4)	W t (cm^3)	U (m^2 / m)
26,7	2,9	1,69	2,15	1,55	0,849	1,16	1,64	3,09	2,32	0,084
	3,9	2,20	2,80	1,87	0,818	1,40	2,05	3,74	2,80	
33,4	3,4	2,50	3,19	3,64	1,07	2,18	3,06	7,27	4,36	0,105
	4,6	3,24	4,12	4,40	1,03	2,63	3,82	8,79	5,27	
	6,4	4,24	5,40	5,21	0,98	3,12	4,73	10,4	6,24	
38,1	3,0	2,60	3,31	5,13	1,25	2,69	3,71	10,3	5,39	0,120
	5,0	4,08	5,20	7,28	1,18	3,82	5,52	14,6	7,65	
42,2	3,6	3,39	4,32	8,13	1,37	3,85	5,33	16,3	7,71	0,133
	4,9	4,47	5,69	10,1	1,33	4,78	6,80	20,2	9,56	
	6,4	5,61	7,15	11,8	1,29	5,62	8,25	23,7	11,2	
	9,7	7,77	9,90	14,2	1,20	6,75	10,5	28,5	13,5	
48,3	3,7	4,05	5,16	12,9	1,58	5,35	7,34	25,9	10,7	0,152
	5,1	5,41	6,90	16,3	1,54	6,76	9,53	32,7	13,5	
	7,1	7,25	9,23	20,1	1,48	8,34	12,2	40,3	16,7	
	10,2	9,55	12,2	23,7	1,40	9,81	15,1	47,4	19,6	
60,3	3,6	5,01	6,38	25,8	2,01	8,54	11,5	51,5	17,1	0,189
	3,9	5,44	6,93	27,7	2,00	9,18	12,5	55,3	18,4	
	4,4	6,03	7,68	30,2	1,98	10,0	13,7	60,4	20,0	
	4,8	6,54	8,34	32,4	1,97	10,7	14,8	64,7	21,5	
	5,5	7,48	9,53	36,1	1,95	12,0	16,7	72,2	23,9	
	6,4	8,45	10,8	39,7	1,92	13,2	18,6	79,4	26,3	
	7,1	9,36	11,9	42,9	1,90	14,2	20,3	85,8	28,4	
	8,7	11,1	14,2	48,4	1,85	16,1	23,5	96,8	32,1	
	11,1	13,4	17,1	54,5	1,78	18,1	27,3	109	36,1	

A título de verificação, a força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$, para as barras da estrutura em questão, deve ser calculada pela Eq. (7.26) (ABNT NBR 14762: 2001):

$$N_{c,Rd} = \rho A_{ef} f_y / \gamma \left(\gamma = 1{,}1\right) \tag{7.26}$$

Onde ρ é o fator de redução associado à flambagem, calculado por:

$$\rho = \frac{1}{\beta + \left(\beta^2 - \lambda_0^2\right)^{0,5}} \leq 1{,}0 \tag{7.27}$$

$$\beta = 0{,}5\left[1 + \alpha(\lambda_0 - 0{,}2) + \lambda^2{}_0\right] \tag{7.28}$$

Onde α é o fator de imperfeição inicial que, nos casos de flambagem por flexão, variam de acordo com o tipo de seção e eixo de flambagem. No caso de perfis tubulares de seção circular, $\alpha = 0{,}21$.

O índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas, λ_0, é dado por:

$$\lambda_0 = \left[\frac{A_{ef} f_y}{N_e} \right]^{0,5} \tag{7.29}$$

Onde A_{ef} é a área efetiva da seção transversal da barra, $\sigma = \rho f_y$ e N_e é a força normal de flambagem elástica da barra. O fator de redução associado à flambagem ρ pode ser determinado de forma aproximada, adotando $A_{ef} = A$ para o cálculo de λ_0.

Para perfis com dupla simetria, a força normal de flambagem elástica da barra N_e é o menor valor obtido entre a força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal x (N_{ex}), a força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo principal y (N_{ey}) e a força normal de flambagem elástica por torção (N_{et}). As equações destas forças estão relacionadas a seguir:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \tag{7.30}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \tag{7.31}$$

$$N_{et} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} + G I_t \right] \tag{7.32}$$

Onde a constante de empenamento da seção, C_w, é igual a zero (seção circular), o módulo de elasticidade do aço, E, igual a 205.000 MPa, o módulo de elasticidade transversal $G = E / 2(1 + v)$ e o coeficiente de Poisson do aço, v, igual a 0,3.

$K_x L_x$ é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo x, $K_y L_y$ é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo y e $K_t L_t$, o comprimento efetivo de flambagem por torção.

O raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção r_0 é dado por:

$$r_0 = \left[r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2\right]^{0,5} \tag{7.33}$$

Onde r_x e r_y são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y, respectivamente, e x_0 e y_0, as coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais x e y, respectivamente, em relação ao centróide da seção.

Por ser uma seção circular, x_0 e y_0 são iguais a zero. Assim, r_0 = 26,87 mm. Como N_{ex} é igual a N_{ey}, e K igual a 1 (vínculo articulado fixo em ambas as extremidades do comprimento da barra), tem-se, para a barra L = 1.923,58 mm:

- N_e = 234.341,90 N (menor valor que o obtido em N_{et}).

Ao se substituir o valor de N_e na Eq. (7.29), obtém-se o valor de λ_0 igual a 1,13. Substituindo-se este valor nas Eq. (7.27) e (7.28), obtém-se os valores de ρ igual a 0,576 e β igual a 1,24, respectivamente.

Substituindo esses valores obtidos na Eq. (7.26), a força normal de compressão resistente de cálculo é:

- $N_{c,Rd}$ = 155.781,82 N.

Para L = 2106,34 mm, utilizando as mesmas equações anteriormente citadas, tem-se:

- N_e = 195.440,02 N.

Substituindo-se N_e na Eq. (7.29), tém-se: λ_0 é igual a 1,23 e ρ é igual a 0,511. Assim, a força normal de compressão resistente de cálculo é:

- $N_{c,Rd}$ = 138.202,27 N.

Finalmente, para L = 1.997,16 mm, o valor de N_e é igual a:

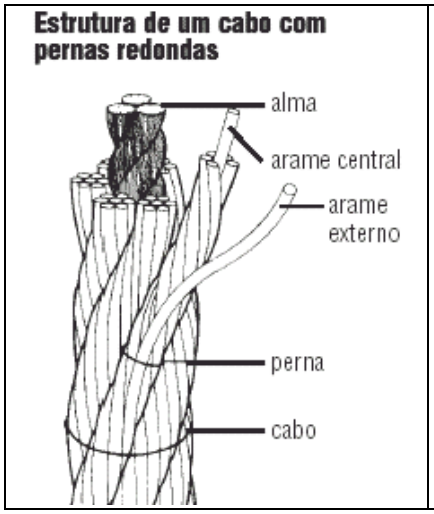
- N_e = 217.392,59 N.

Sendo λ_0 igual a 1,17 e ρ igual a 0,549, obtém-se:

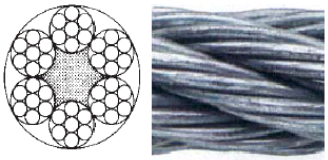
- $N_{c,Rd}$ = 148.479,55 N.

Para os cabos de aço, a carga de trabalho de uso geral não deve exceder a um quinto da sua carga de ruptura mínima efetiva, segundo recomendações da CIMAF (2004). Adotando a carga de ruptura mínima igual a 5.850,9 N (5,85 kN – item 7.2.1.2), obtém-se o valor para a carga de trabalho do cabo de aço do protótipo igual a 29.254,5 N.

Com base nesse valor (29,25 kN), adotou-se o cabo de aço galvanizado, com alma de fibra, construção 6 X 7 + AF (6 pernas a 7 fios e uma alma de fibra) e diâmetro de 8 mm (FIG. 7.11), cuja carga de ruptura mínima efetiva é igual a 35,87 N (CARL STAHL, 2001-2002).



Todos estes cabos estão disponíveis também com alma de aço.



G 0552.
Cabo de aço **galvanizado,** com alma de fibra, construção 6 x 7 + AF (6 pernas a 7 fios e uma alma de fibra)

Diâmetro do cabo em polegada	Carga de ruptura mínima 160 /185 kg/mm² kN	kgf
1/16"	1,47	150
5/64"	2,25	230
3/32"	3,09	315
1/8"	5,68	580
5/32"	9,41	960
3/16"	12,35	1.260
1/4"	23,32	2.380
5/16"	35,87	3.660
3/8"	52,04	5.310
1/2"	91,24	9.310
9/16"	106,82	10.900
5/8"	131,32	13.400

FIGURA 7.11 – Detalhes do cabo de aço (CARL STAHL, 2001-2002).

Este cabo possuir características apropriadas para o uso a que se destina, tais como boa resistência à abrasão e à pressão. Este tipo de cabo é normalmente utilizado onde há possibilidade de atritos durante sua operação e também para fins estáticos, como estais por exemplo (CIMAF, 2004).

Ao se comparar o valor da força normal de compressão resistente de cálculo da barra cujo L é igual a 1.923,58 mm ($N_{c,Rd}$ = 155,78 kN) com a carga de trabalho do cabo de aço adotado (35,87 kN), verifica-se que os valores não são aproximados (o valor da

carga de trabalho do cabo é 76,97% menor que a força normal de compressão resistente de cálculo da barra).

Serão necessários os seguintes acessórios para os laços (FIG. 7.12):

- Sapatilha protetora tipo leve (FIG. 7.13);
- Grampo tipo pesado (FIG. 7.14);
- Esticador com dois olhais (FIG. 7.15);
- Manilha tipo reta (FIG. 7.16).

Os modelos adotados estão marcados nas respectivas figuras. Serão utilizados, para cada laço, dois grampos espaçados 29 mm entre si. Assim, houve a necessidade de se aumentar o comprimento dos cabos para 800 mm, como mencionado no item 7.2.2.

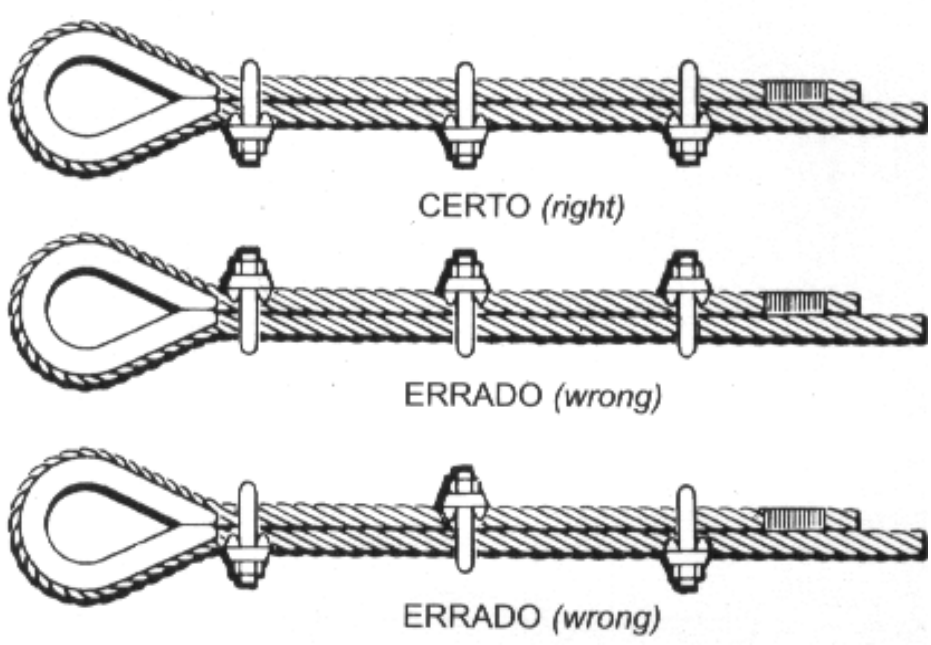
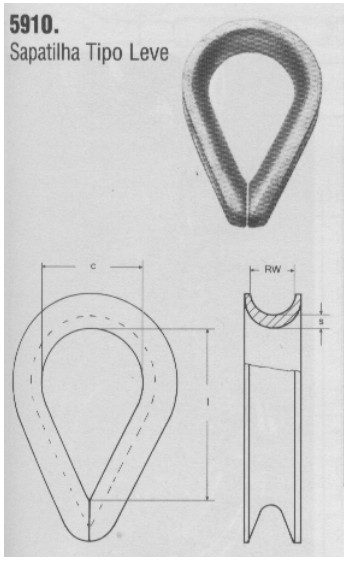


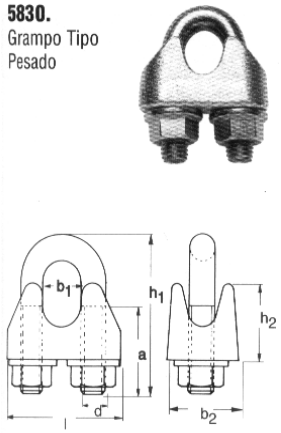
FIGURA 7.12 – Tipo de laço empregado (CIMAF, 2004).



Diâmetro do cabo	Dimensões em mm RW	c	l	s
1/8"	3	12	19	1,6
3/16"	4	13	21	1,6
1/4"	5	14	23	1,9
5/16"	6	16	25	2,4
3/8"	7	18	28	2,4
1/2"	8	20	32	2,8
5/8"	10	24	38	3,1
3/4"	12	28	45	3,3
7/8"	14	32	51	3,7
1"	16	36	58	3,8
1.1/4"	18	40	64	4,7
1.1/2"	20	45	72	5,7

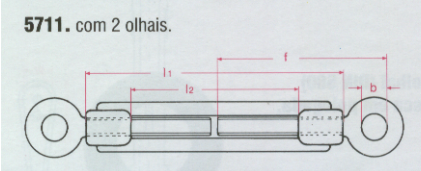
Obs.: Dimensões Aproximadas.

FIGURA 7.13 – Dimensões da sapatilha adotada (CARL STAHL, 2001-2002).



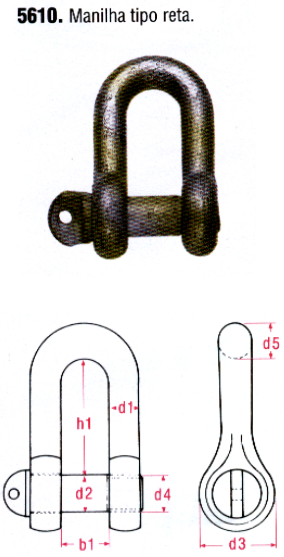
Diâmetro do cabo	Dimensões em mm e polegadas a	b1	b2	d	h1	h2	l
1/8"	10	8	20	7/32"	24	11	24
3/16"	15	11	23	1/4"	32	13	29
1/4"	18	12	24	5/16"	40	16	37
5/16"	19	14	33	3/8"	46	20	41
3/8"	20	16	38	7/16"	56	23	50
1/2"	35	18	49	1/2"	67	28	59
5/8"	35	21	53	9/16"	76	35	64
3/4"	38	25	57	5/8"	89	37	70
7/8"	50	27	64	3/4"	99	43	83
1"	60	31	72	3/4"	103	47	88
1.1/8"	60	35	74	3/4"	122	53	93
1.1/4"	65	40	83	7/8"	125	56	100

FIGURA 7.14 – Dimensões do grampo adotado (CARL STAHL, 2001-2002).



Diâmetro da rôsca	Carga de trabalho em kg		Rôsca	Medidas em mm					
	5710.	5711.		l 1	l 2	b	e	f	m
3/16"x3	70	80	3/16"	110	86	10	84	72	8
1/4"x3.1/2	170	230	1/4"	110	80	11	81	73	9
5/16"x4.1/2	280	320	5/16"	125	89	14	96	88	11
3/8"x5	400	480	3/8"	125	83	15	97	110	14
1/2"x6	590	320	1/2"	140	96	18	125	118	14
5/8"7	910	1.230	5/8"	170	116	25	171	145	16
3/4"x8	1.150	1.900	3/4"	200	132	25	168	173	18
7/8"x8	1.400	2.700	7/8"	255	177	34	192	187	25
1"x8	1.700	3.450	1"	255	165	34	220	230	33

FIGURA 7.15 – Dimensões do esticador adotado (CARL STAHL, 2001-2002).



Carga de Trabalho kg	Medidas em mm e polegadas						
	d1	d2	d3	d4	d5	b1	h1
300	1/4"	7,9	15	7,9	1/4"	11	22
500	5/16"	9,5	18	9,5	5/16"	14	26
700	3/8"	11,1	21	11,1	3/8"	17	32
1300	1/2"	15,9	28	15,9	1/2"	21	41
2000	5/8"	19,0	35	19,0	5/8"	27	51
2900	3/4"	22,2	42	22,2	3/4"	32	60
3900	7/8"	25,4	49	25,4	7/8"	36	71
5100	1"	28,6	56	28,6	1"	43	81
6000	1.1/8"	31,8	63	31,8	1.1/8"	46	90
7500	1.1/4"	34,9	70	34,9	1.1/4"	52	100
9000	1.3/8"	38,1	77	38,1	1.3/8"	57	111
10700	1.1/2"	41,3	84	41,3	1.1/2"	60	122
14600	1.3/4"	50,8	98	50,8	1.1/4"	73	146
19200	2"	57,2	112	57,2	2"	82	171
24400	2.1/4"	63,3	126	63,3	2.1/4"	98	181
30600	2.1/2"	69,9	140	69,9	2.1/2"	105	203
43900	3"	82,6	168	82,6	3"	127	216

FIGURA 7.16 – Dimensões da manilha adotada (CARL STAHL, 2001-2002).

7.2.4 Detalhamento

Os detalhes das conexões entre barras e cabos e das barras em relação à base são apresentados no Anexo F.

Ao se observar os detalhes apresentados no Anexo F, pode-se verificar que, nas ligações da cúpula, não são utilizados elementos (parafusos, rebites ou soldas) ou meios de ligação (chapas, cantoneiras) em grande quantidade ou complexidade, tal como nas estruturas metálicas convencionais.

7.3 Propostas de aplicações arquitetônicas

Neste item são apresentadas algumas aplicações arquitetônicas para a estrutura estudada, conjugando-a com sistemas de vedação e cobertura.

A cúpula geodésica *Tensegrity* permite uso nas situações mais diversas, propiciando ainda que todos os seus componentes sejam passíveis de montagens e desmontagens sucessivas, o que facilita seu transporte.

Visando atender à demanda por espaços para eventos, mostras e shows, tal sistema possui flexibilidade dimensional e modulação compatível com o mercado, incluindo o uso de acessórios disponíveis no mercado (como apresentado no item 7.2.3), além de poder ser empregado em eventos de médio porte (festas, bailes) e de grande porte (shows, amostras).

A seguir são relacionadas as diversas possibilidades de utilização da estrutura objeto de estudo deste trabalho:

- Estrutura para cobertura de stand e quiosque de venda (FIG. 7.17), podendo ainda ser utilizado com mezanino, criando dois ambientes distintos dentro do espaço delimitado pela estrutura da cúpula (FIG. 7.18);

- A estrutura como elemento estético delimitador de um determinado espaço que, montado dentro de áreas já cobertas, permitiria a sensação de espaço diferenciado apenas pela geodésica, sem o uso de divisórias ou outro tipo de artifício similar mais convencional;

- Criar uma área de meditação para o futuro morador de uma residência projetada pelo autor (FIG. 7.19);

- Estrutura de grandes vãos;

- Utilizando diversas geodésicas conjugadas que criam grandes espaços cobertos. Tem-se como exemplo a FIG. 7.20, que conjuga diversas geodésicas de pequena dimensão, que servem como estrutura para a cobertura de uma grande área. Assim, cada geodésica teria a função de pilar e o espaçamento existente entre elas, coberto por uma membrana, criando um ambiente de dimensão que poderia variar em função de sua utilização.

No caso dos exemplos de espaços cobertos, pode ser utilizada como cobertura uma membrana tencionada. A membrana tencionada é composta por trama de poliéster (leve e flexível) ou de fibra de vidro matriz de material polimérico, tal como PVC e silicone, para proteção da superfície às intempéries, poluição atmosférica etc.

A cobertura pode ser exterior à estrutura (exemplo anteriormente citado – FIG. 7.17) ou fixada internamente a esta, permitindo uma superfície cuja forma seja independente à cúpula geodésica *Tensegrity* (FIG. 7.21).

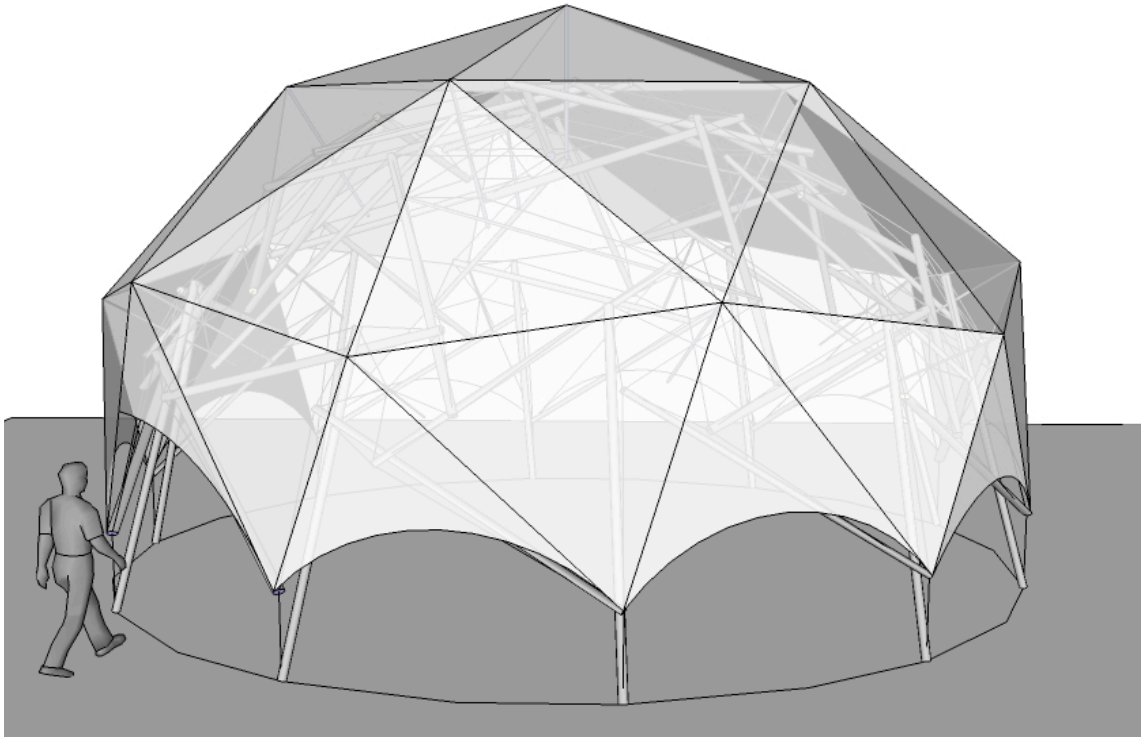


FIGURA 7.17 – Stand onde poderá ser utilizada a geodésica *Tensegrity* como estrutura para a cobertura (continua).

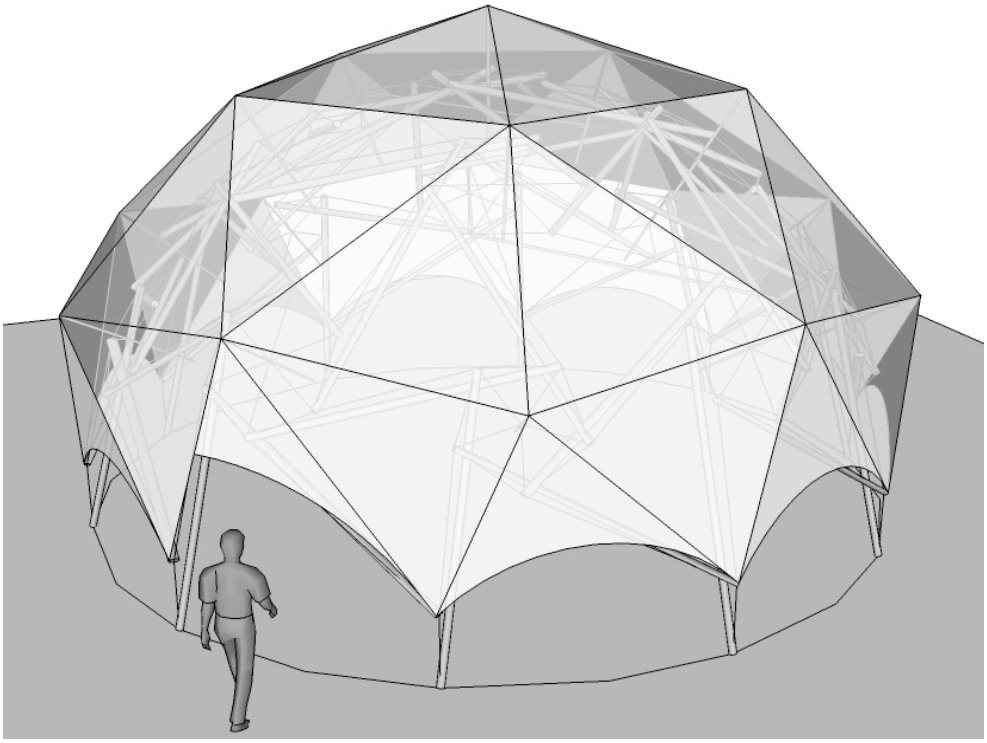


FIGURA 7.17 – Stand onde poderá ser utilizada a geodésica *Tensegrity* como estrutura para a cobertura (conclusão).

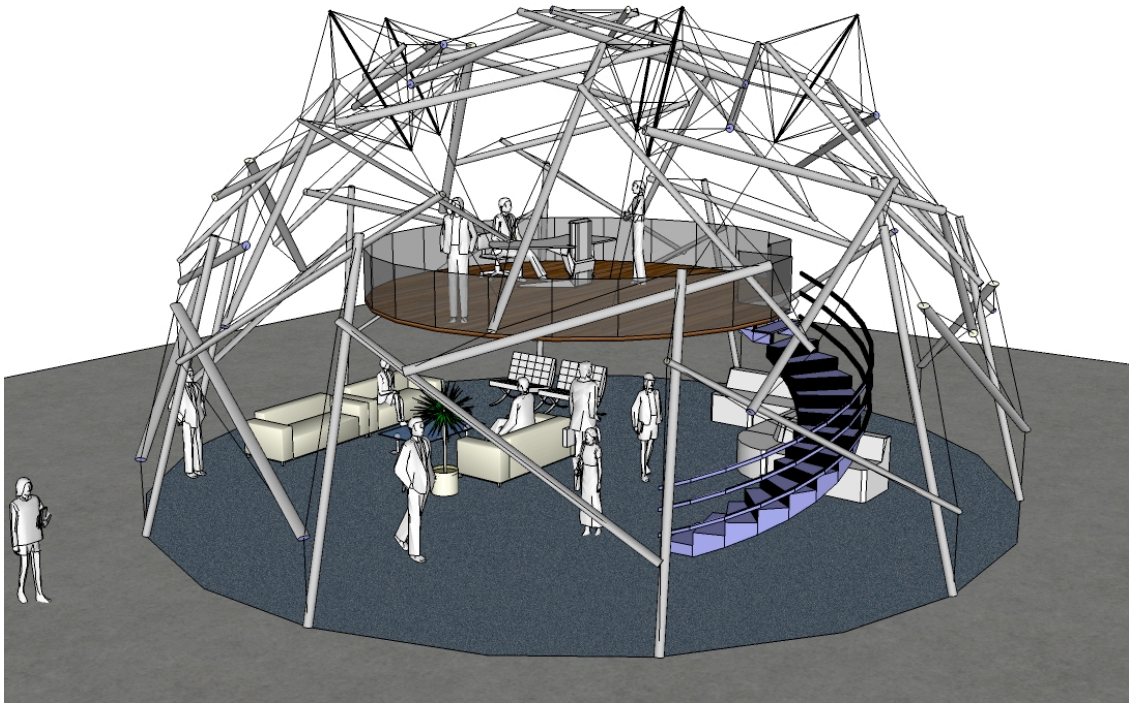


FIGURA 7.18 – Mezanino em uma cúpula (continua).

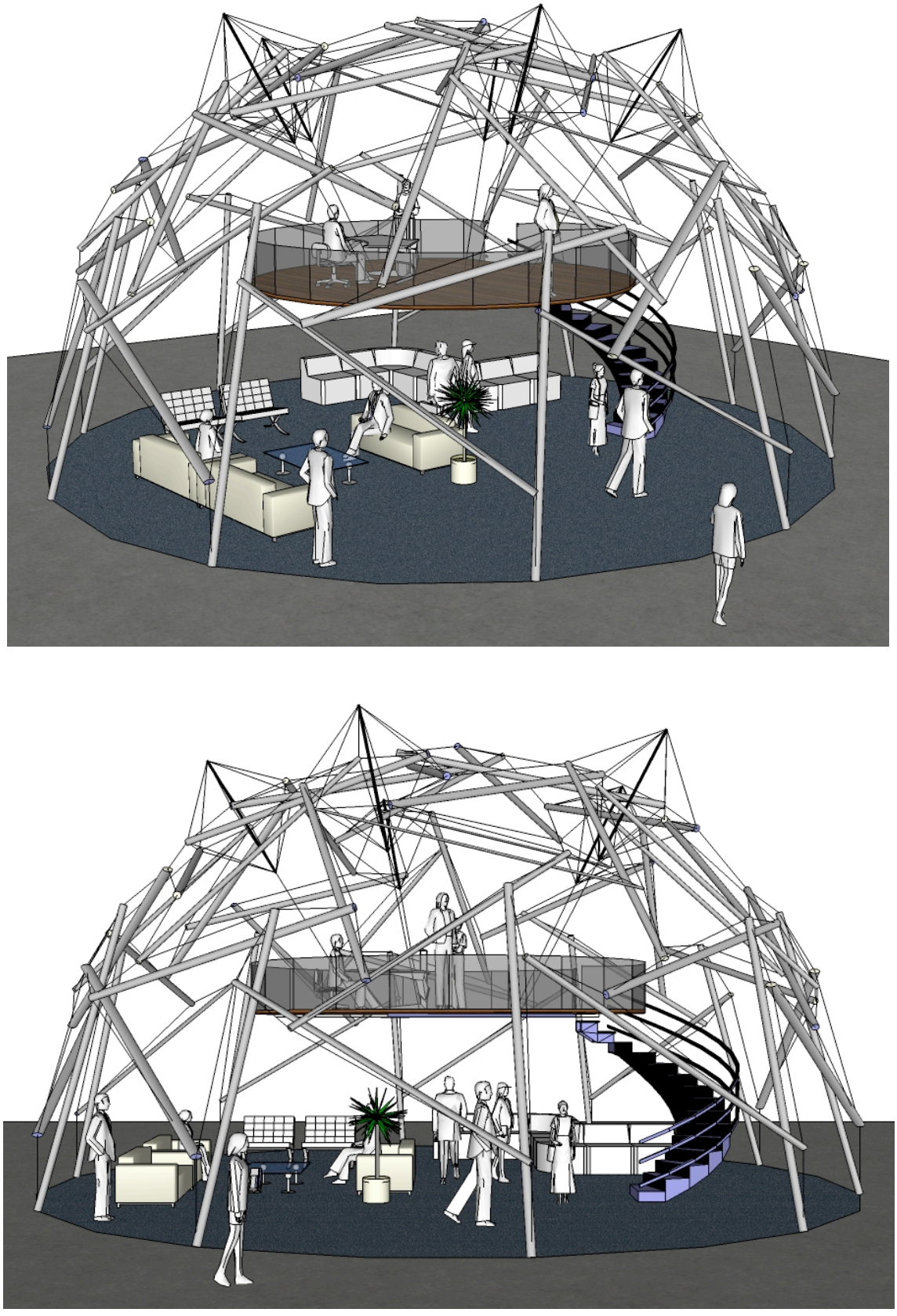


FIGURA 7.18 – Mezanino em uma cúpula (continua).

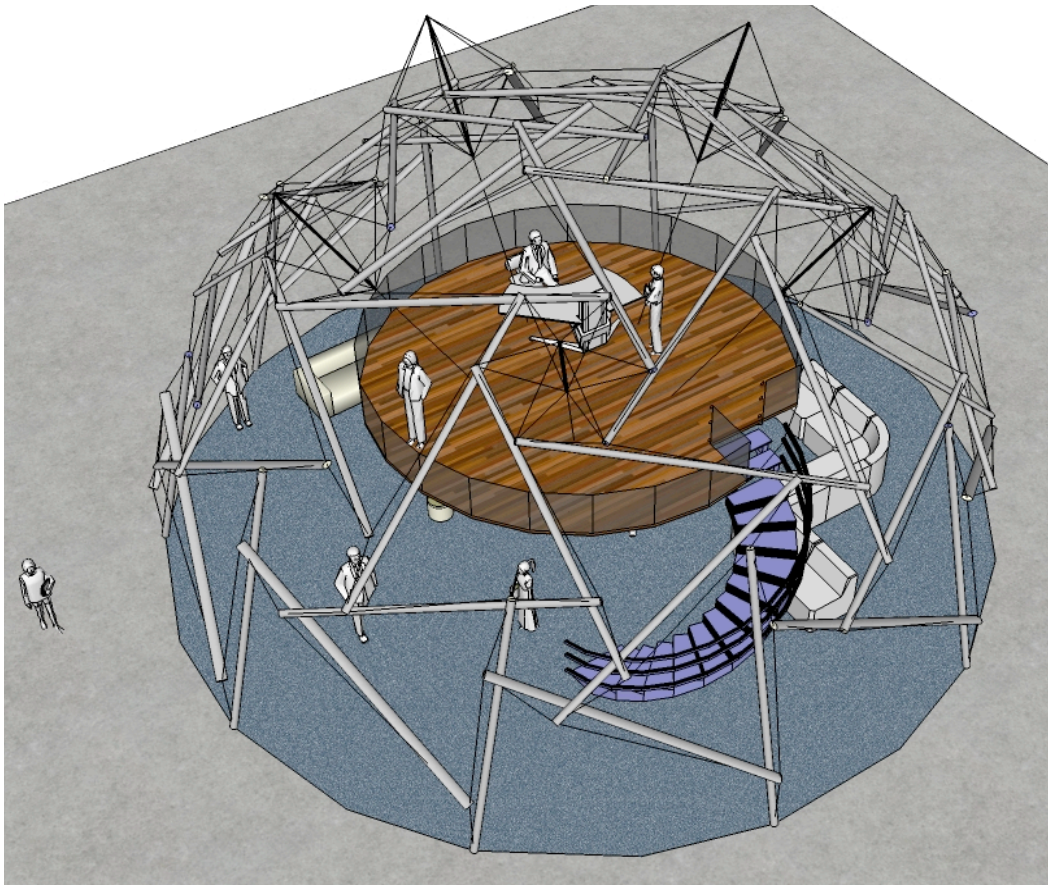


FIGURA 7.18 – Mezanino em uma cúpula (conclusão).

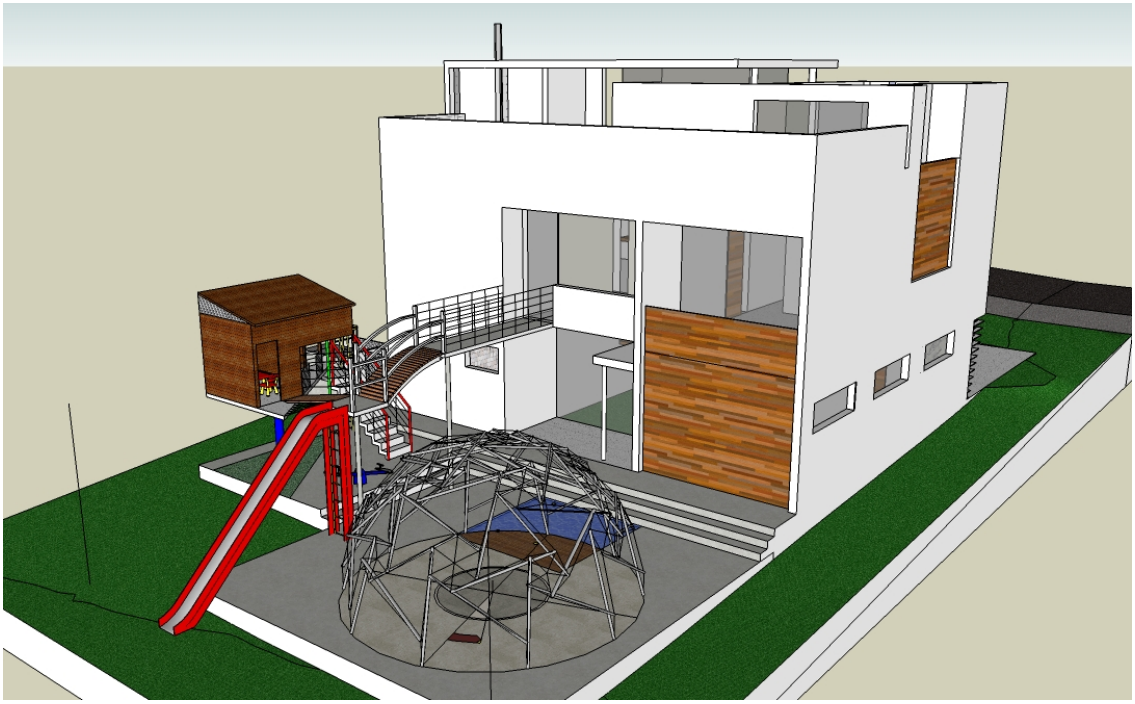


FIGURA 7.19 – Espaço de meditação para residência projetada pelo autor (continua).

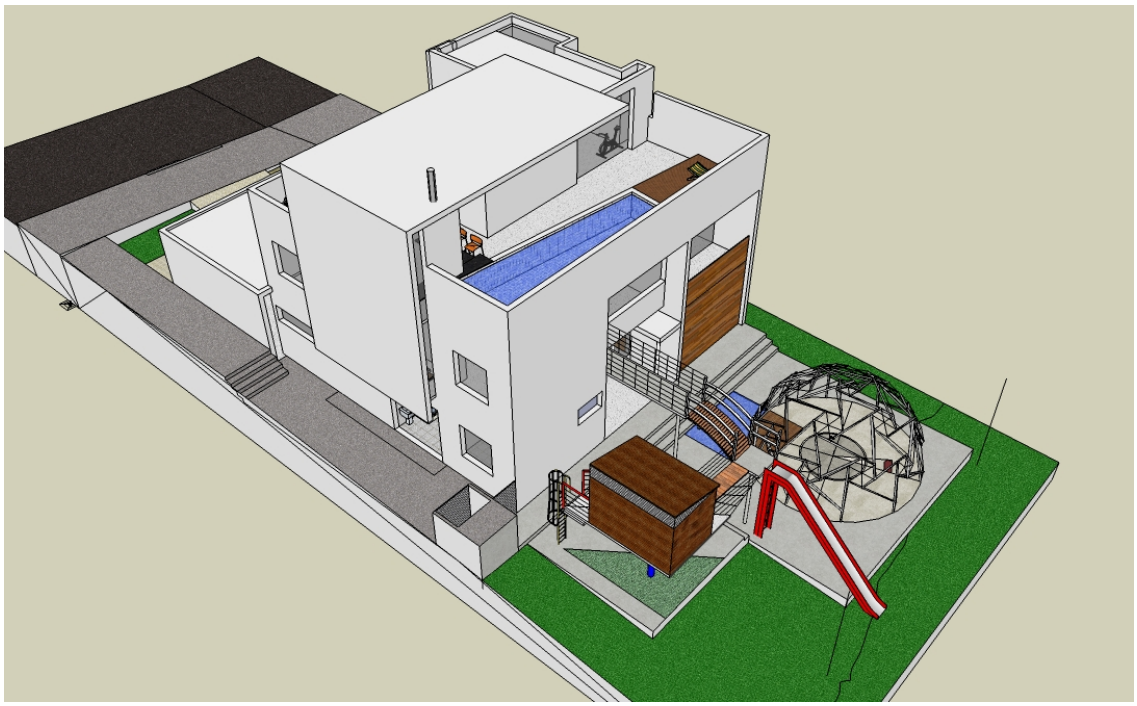


FIGURA 7.19 – Espaço de meditação para residência projetada pelo autor (conclusão).

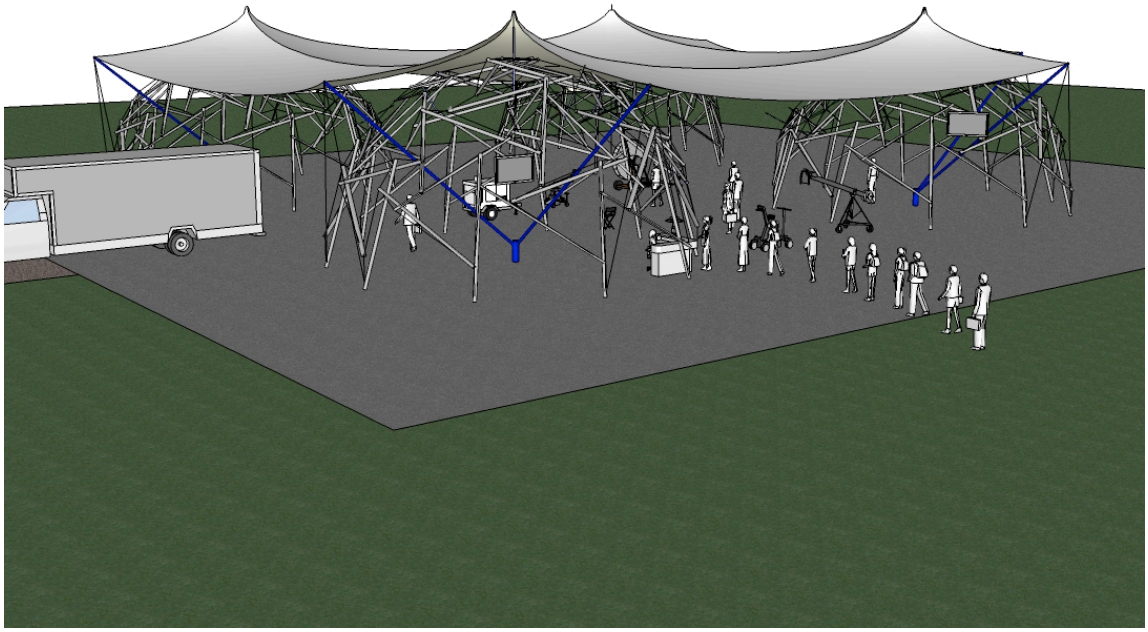


FIGURA 7.20 – Cúpulas funcionando como suporte das tendas delimitando espaços (continua).

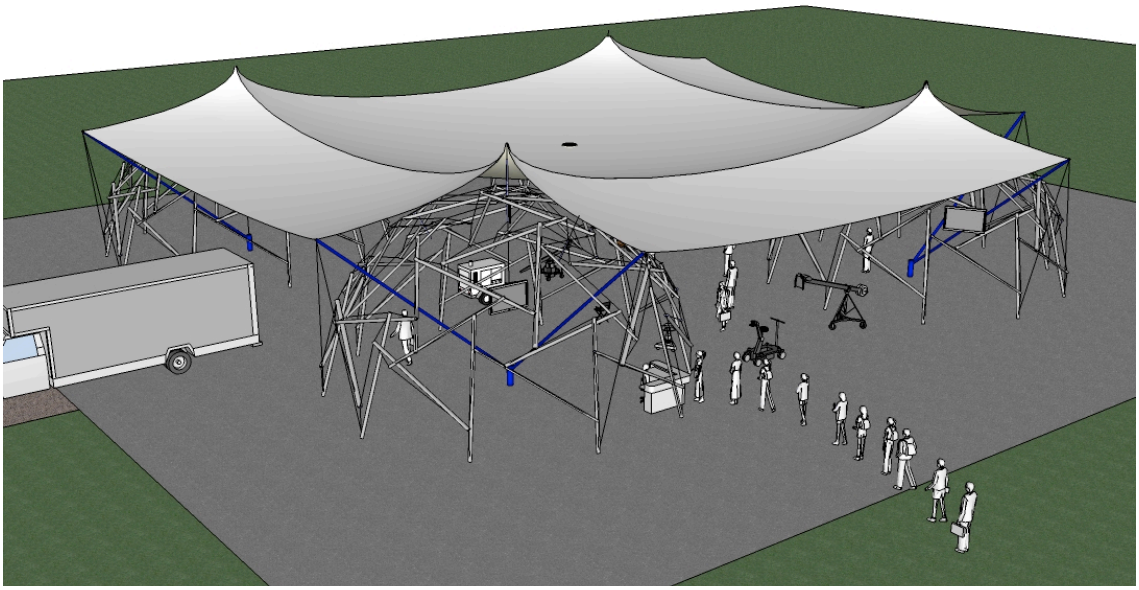


FIGURA 7.20 – Cúpulas funcionando como suporte das tendas delimitando espaços (conclusão).

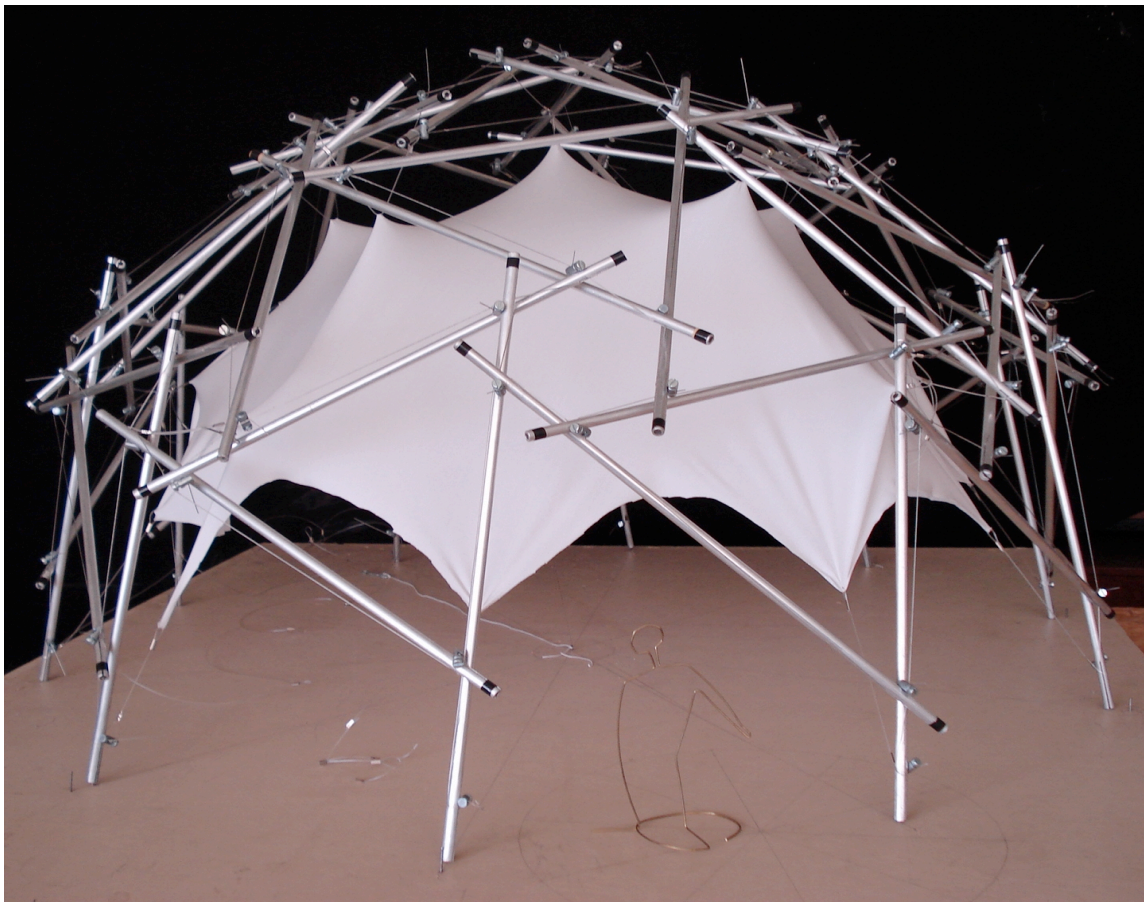


FIGURA 7.21 – Cobertura interna à geodésica *Tensegrity*.

7.4 Proposta de esquema de montagem de um protótipo

Neste item são apresentadas as etapas de montagem de um protótipo, tendo como base a unidade estrutural composta por um tubo de aço e um cabo de aço (FIG. 7.22):

- Montagem de um mastro para içamento da cúpula (FIG. 7.23a);
- Montagem da primeira etapa do poliedro (FIG. 7.23b);
- Fixação de cabos para içamento da primeira etapa do poliedro (FIG. 7.23c e 7.23d);
- Içamento do poliedro e fixação de duas barras por nó (FIG. 7.23e e 7.23f);
- Içamento da etapa anterior e fixação de duas barras por nó (FIG. 7.23g e 7.23h);
- Içamento da etapa anterior e fixação das duas últimas barras por nó (FIG. 7.23i e 7.23j);
- Desmontagem dos cabos e mastro de içamento (FIG. 7.23k e 7.23l).

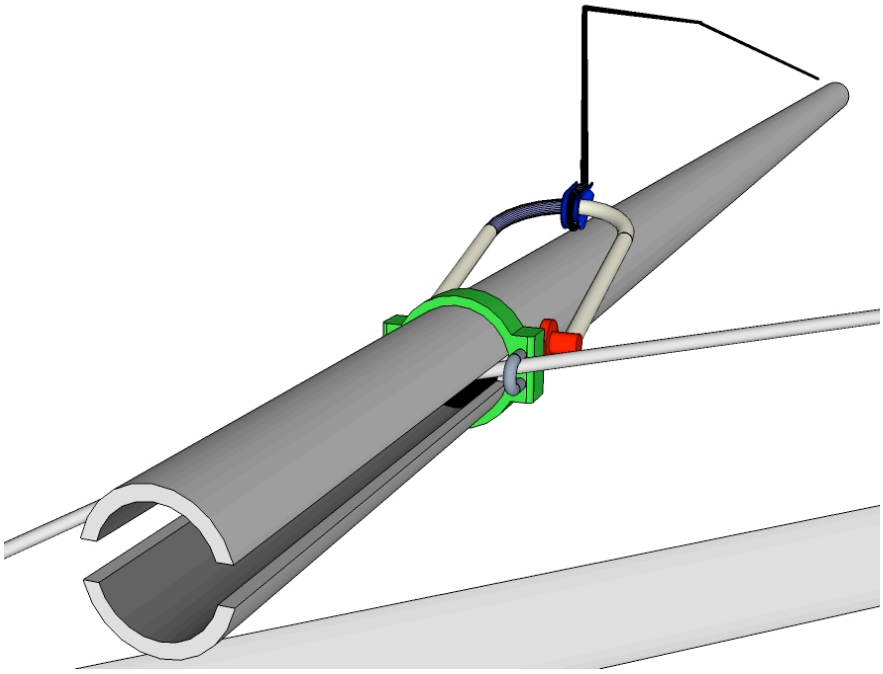


FIGURA 7.22 – Unidade estrutural constituída por tubo e cabo de aço (continua).

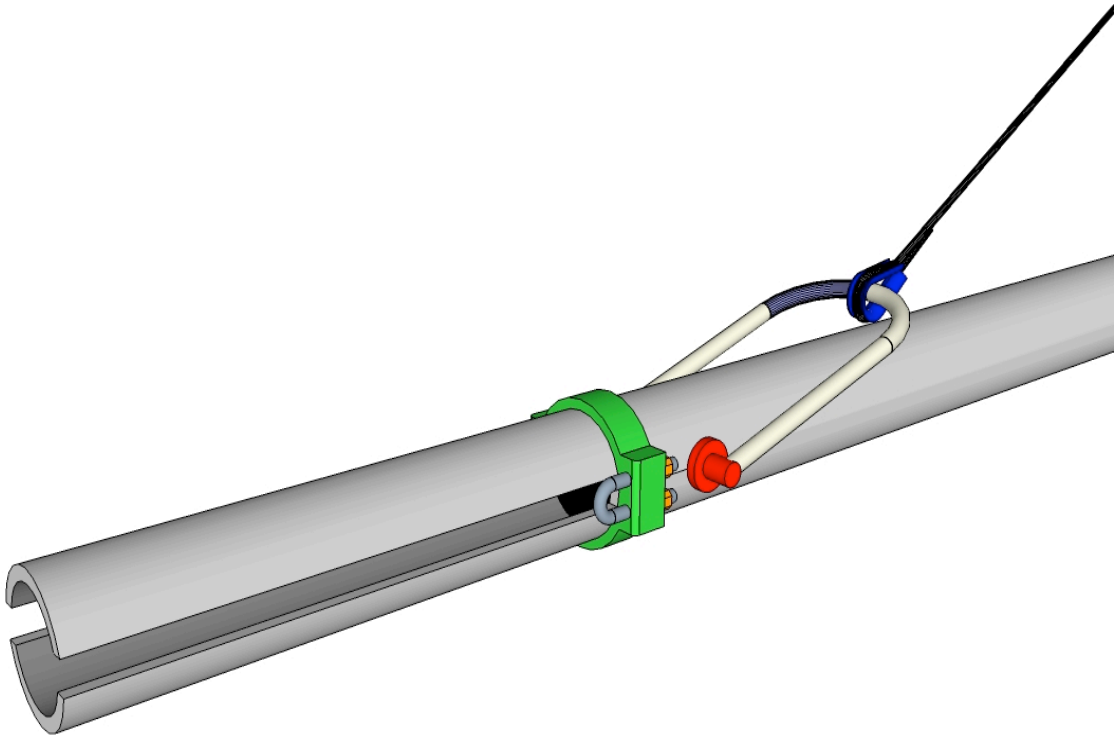
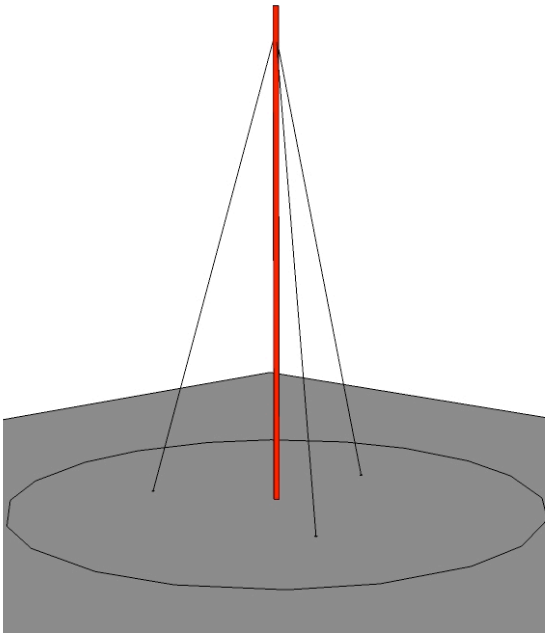
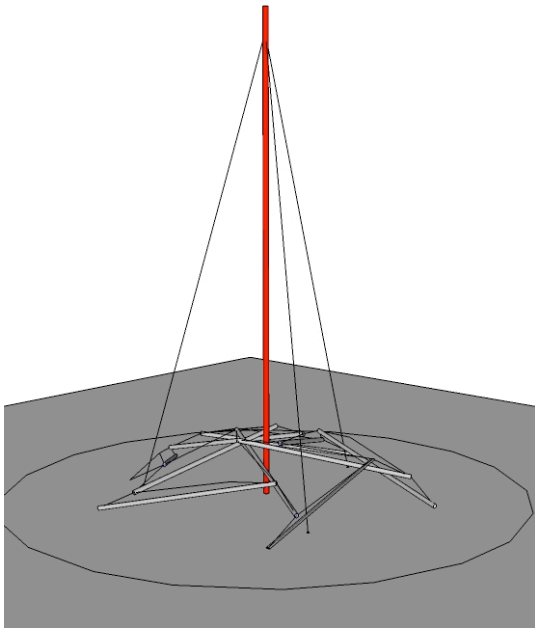


FIGURA 7.22 – Unidade estrutural constituída por tubo e cabo de aço (conclusão).

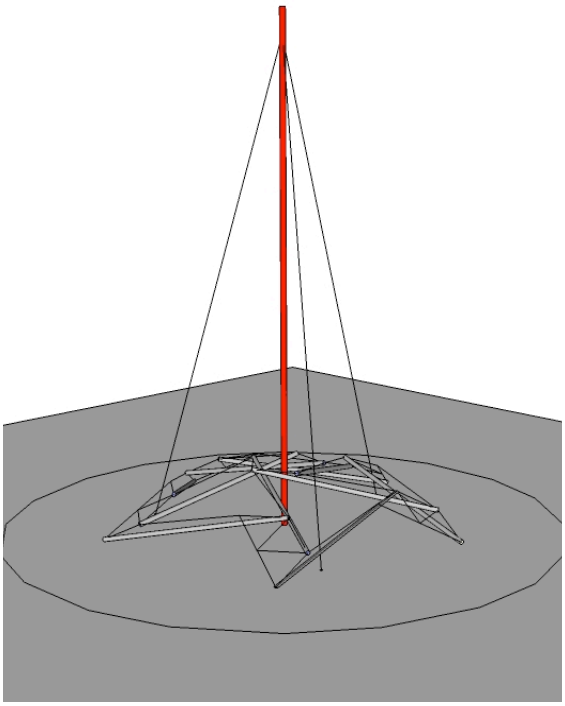


(a) Montagem de um mastro para içamento da cúpula.

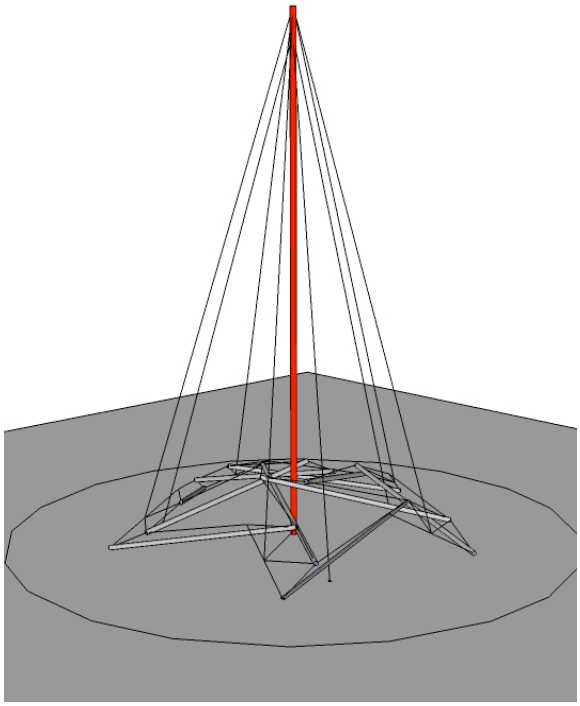


(b) Montagem da primeira etapa do poliedro.

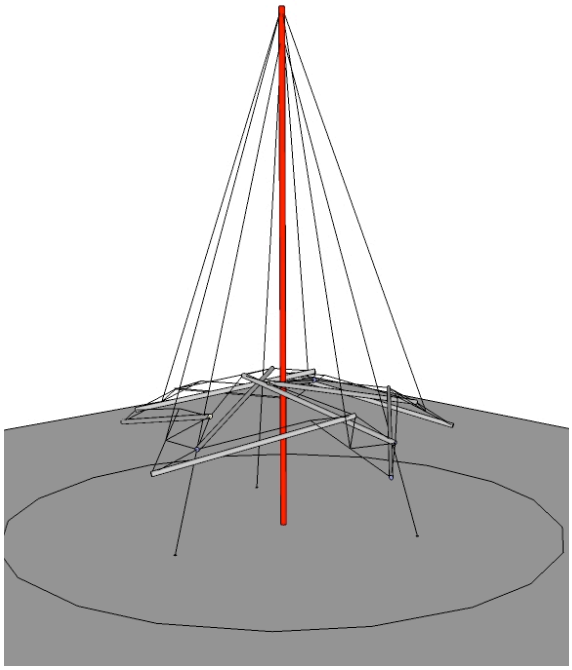
FIGURA 7.23 - Seqüência de montagem de um protótipo (continua).



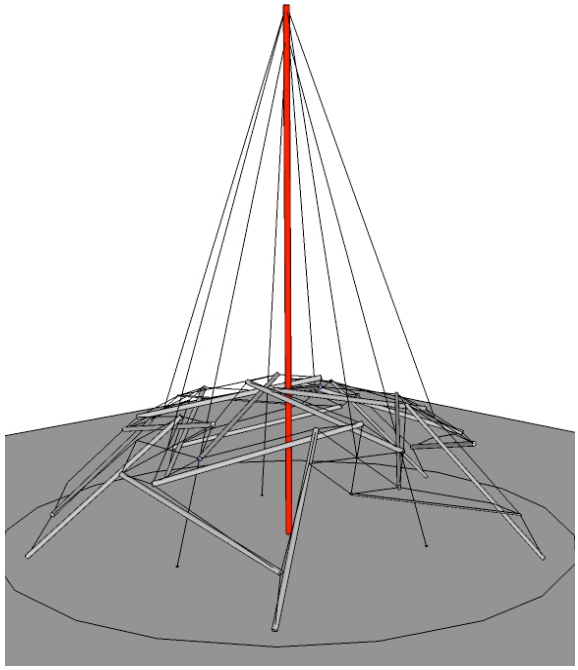
(c) Fixação de cabos para içamento da primeira etapa do poliedro.



(d) Fixação de cabos para içamento da primeira etapa do poliedro.

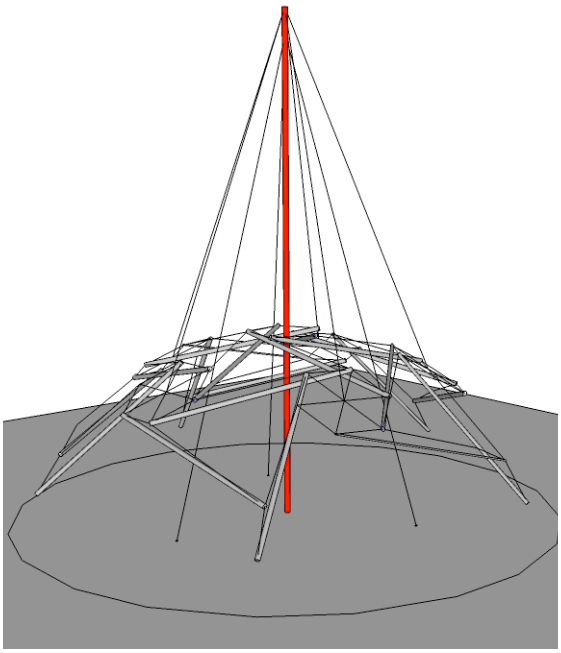


(e) Içamento do poliedro e fixação de duas barras por nó.

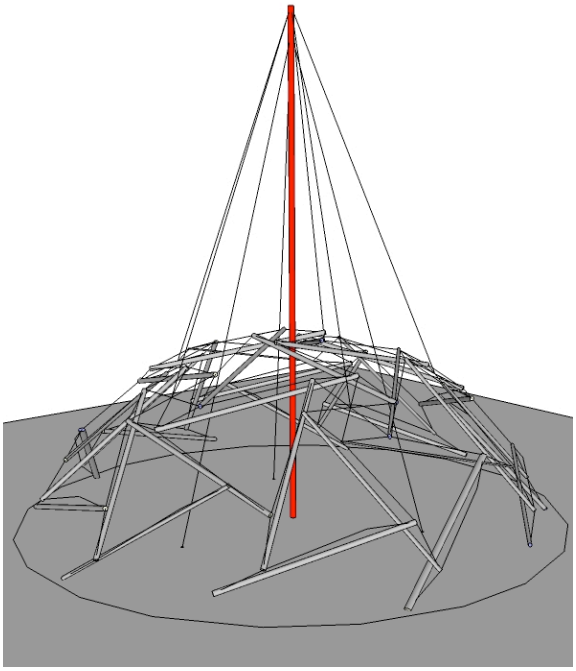


(f) Içamento do poliedro e fixação de duas barras por nó.

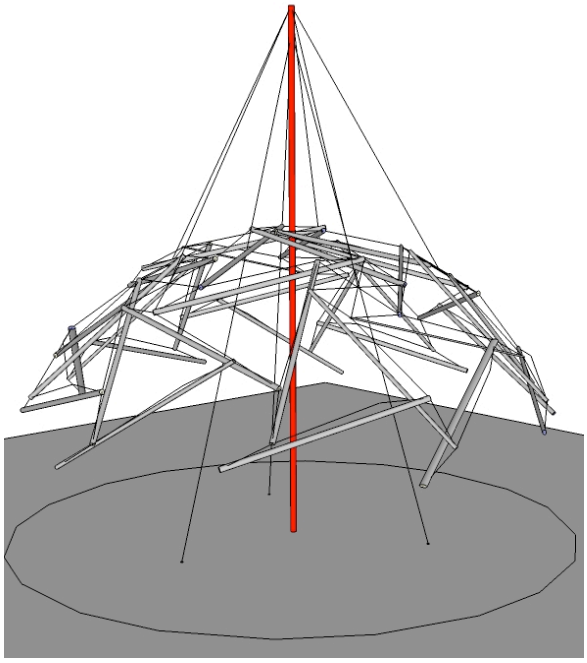
FIGURA 7.23 - Seqüência de montagem de um protótipo (continua).



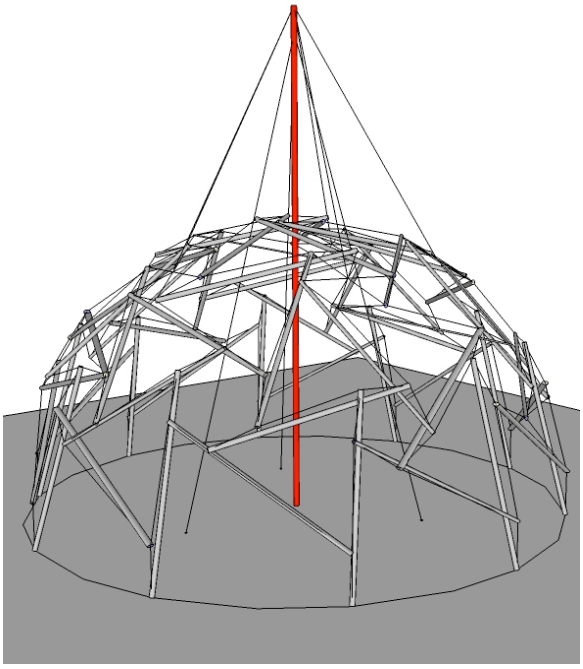
(g) Içamento da etapa anterior e fixação de duas barras por nó.



(h) Içamento da etapa anterior e fixação de duas barras por nó.

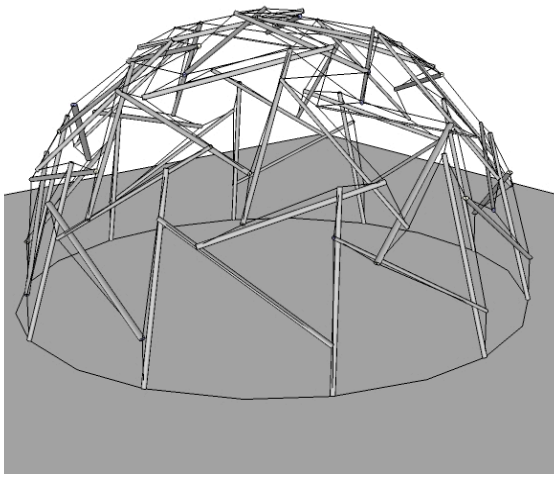


(i) Içamento da etapa anterior e fixação das duas últimas barras por nó.

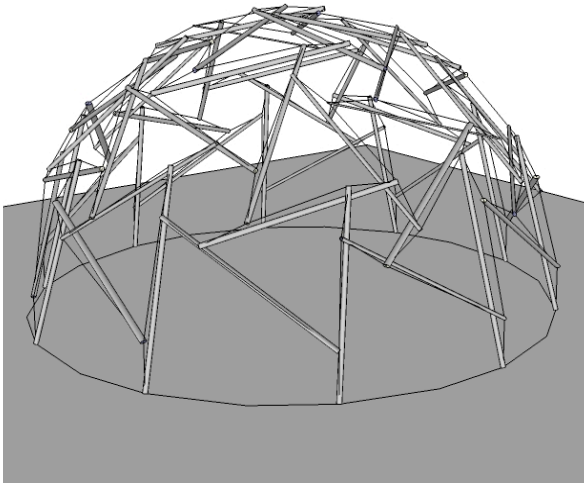


(j) Içamento da etapa anterior e fixação das duas últimas barras por nó.

FIGURA 7.23 - Seqüência de montagem de um protótipo (continua).



(k) Desmontagem dos cabos e mastro de içamento.



(l) Desmontagem dos cabos e mastro de içamento.

FIGURA 7.22 - Seqüência de montagem de um protótipo (conclusão).

8

CONCLUSÕES

8.1 Considerações finais

No primeiro capítulo deste trabalho foram listados os objetivos específicos a serem atingidos: desenvolver detalhes construtivos para exeqüibilidade da Cúpula Geodésica *Tensegrity* com tubos metálicos e cabos de aço e adaptações construtivas que levem a Cúpula a atender aos requisitos estáticos e geométricos da Engenharia de Estruturas; determinar o comportamento da Cúpula Geodésica *Tensegrity* a partir de modelos processuais; realizar análises numéricas para a determinação das forças solicitantes e deslocamentos da estrutura estudada, confrontando-os com os respectivos resultados experimentais e, por fim, definir os parâmetros geométricos da geodésica *Tensegrity* analisada.

Diversos modelos e conceitos de três áreas distintas, mas intrinsecamente ligadas - a arquitetura, o design e a engenharia de estruturas - foram utilizados para se atingir o

objetivo geral do presente trabalho, que é o de desenvolver a Cúpula Geodésica *Tensegrity* metálica, realizar estudos teóricos e experimentais e propor concepções arquitetônicas para o sistema estrutural desenvolvido.

Foram desenvolvidos detalhes construtivos para exeqüibilidade da Cúpula Geodésica *Tensegrity* e especificados os materiais constituintes dos elementos estruturais (tubos de aço e cabos de aço) e das ligações estruturais (alças, sapatilhas, etc), disponíveis no mercado, que permitem a construção de uma cúpula sem a necessidade de elementos estruturais com dimensões e características especiais, ou ainda conexões sofisticadas, que necessitem de serviços de tornearia, por exemplo.

Também foram obtidos os parâmetros geométricos específicos de uma cúpula geodésica *Tensegrity* cuja forma é baseada em um icosaedro de freqüência dois truncado. Com base nesses parâmetros, é possível obter as coordenadas e o comprimento das barras metálicas e dos cabos de cúpulas geodésicas *Tensegrity* (icosaedro de freqüência dois truncado) de qualquer dimensão, e as equações, inéditas até então, para obtenção das coordenadas esféricas são apresentados na TAB. 7.2.

Quanto ao programa experimental da presente pesquisa, pode-se concluir que se conseguiu monitorar experimentalmente, com boa precisão e ao longo de todos os ensaios, o comportamento estrutural do modelo testado, incluindo a determinação de deslocamentos, deformações e forças nas barras e nós instrumentados.

Os primeiros resultados obtidos com os testes experimentais permitiram verificar a necessidade de se fixar as barras, por meio de grampos, às cordoalhas, para evitar o escorregamento destas. Isto porque, em algumas respostas em termos de deformação nas barras e cordoalhas, ocorreram saltos (mudanças bruscas) de comportamento ao longo dos ensaios devido à acomodação da estrutura quando da aplicação das cargas.

Com esses ensaios, verificou-se uma assimetria quanto ao comportamento estrutural, mesmo para cargas simétricas. Entretanto, não é possível uma avaliação conclusiva quanto a existência ou não de distribuição simétrica ou assimétrica de cargas. Isto porque o modelo instrumentado apresenta imperfeições quanto à aplicação de cargas em

função das dificuldades de se puxar os nós, por meio de cordoalhas, com a mesma intensidade de carga por nó.

Em contrapartida, verificou-se uma simetria no comportamento dos elementos estruturais, para aplicação de cargas simétricas, quando analisados os valores obtidos na análise numérica.

Ao se comparar os valores numéricos com os experimentais, verificou-se que, de um modo geral, os valores das forças de compressão normal nas barras e de tração nas cordoalhas são menores na análise experimental em relação à numérica. Ou seja, os resultados obtidos para as forças não permitem uma comparação conclusiva.

Verificou-se ainda que há uma diferença constante entre os valores dos deslocamentos nodais a partir do primeiro passo de carga, quando comparados os resultados experimentais com os da análise numérica. Entretanto, ao subtrair, em todas as etapas, a diferença do valor obtido na análise numérica e o valor experimental do primeiro passo de carga, houve similaridade de comportamento.

8.2 Sugestões

A seguir, são apresentadas algumas sugestões para a continuidade do estudo desta pesquisa:

- Desenvolver, montar e ensaiar um protótipo em escala natural, com o intuito de minimizar as imperfeições quanto à aplicação de cargas (em função da dificuldade de se puxar os nós, por meio de cordoalhas, de forma igualitária) verificadas no modelo conceptivo-processual;

- Dar continuidade à análise experimental dinâmica iniciada e apresentada no Anexo A.

9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDRICH, J. B.; SKELTON, R. E.; KREUTZ-DELGADO, K. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE AMERICAN CONTROL CONFERENCE. *Control Synthesis for a Class of Light and Agile Robotic Tensegrity Structures*. Denver, CO, jun. 4-6 2003.

ALUMINUM DESIGN MANUAL. *Specification for Aluminum Structures* – Building Load and Resistance Factor Design. Part I-B. 3. ed. Washington: The Aluminum Association, Inc., 2005.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ANSI / ASCE-8-90. *Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members*. New York: American Society of Civil Engineers. 1991.114 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM / B 557M – TEA. *Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products [Metric]*. West Conshohocken: ASTM International. 200?.14 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM / E 8M – TER. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]*. West Conshohocken: ASTM International. 2003.24 p.

ARISTÓTELES: Ética. São Paulo: Coleção "Os Pensadores", vol. (?), Abril Cultural, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. ABAL. *Fundamentos do Alumínio e suas Aplicações*. São Paulo: ABAL, 2004. 82 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6123*: Forças Devidas ao Vento em Edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14762*: Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

BOULET, P. *Mât Chinois*. Exercices de Géométrie Constructive. École Nationale Supérieure des Beaux Arts Paris, Paris: Presses du Centre de Recherches et d'Urbanisme, 1970, p. 93.

CARL STAHL. *Catálogo Técnico nr. 2*. Versão 2001-2002. 87 p.

CARL STAHL. *Cable Design Guide*. 2006. Disponível em: <http://www.savacable.com> Acessado em: 28 abr. 2007.

CARNEIRO, FERNANDO L. *Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1993. 258 p.

CARRASCO, EDGAR V. M. *Análise Experimental de Tensões*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

CHAN, WAI LEUNG *et al*. Active Vibration Control of a Three-stage Tensegrity Structure. In: SPIE 11th ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART STRUTCTURES AND MATERIALS. San Diego. 2004. Disponível em: <http://maeweb.ucsd.edu/~skelton/publications/waileung-vibration-spie2004.pdf> Acessado em: 11 jun. 2007.

CHASSAGNOUX, A. *Mât Autotendant*. Exercices de Géométrie Constructive. École Nationale Supérieure des Beaux Arts Paris, Paris: Presses du Centre de Recherches et d'Urbanisme, 1970, p. 211.

CIMAF. *Cabos de Aço*: Superlaços. Osasco: Unimpress Gáfica Ltda. 2004. 155 p.

DEIFELD, TELMO EGMAR CAMILO. *Sobre a Análise e os Processos Construtivos das Estruturas Tensegrity*. 2005. 96 p. Tese de Doutorado, Engenharia de Estruturas – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

DOCZI, GYÖRGY. *O Poder dos Limites*: Harmonia e Proporções na Natureza, Arte e Arquitetura. Tradução de Maria Helena de Oliveira Tricca e Júlia Bárany Bartolomei. São Paulo: Mercuryo, 1990. 149 p.

DURANT, WILL. *A História da Filosofia*. Tradução: Luis Carlos do Nascimento Silva. São Paulo: Círculo do Livro Ltda, 1996. 480 p.

FEST, ETIENNE. *Une Structure Active de Type Tensegrité*. 2003. 184 p. Grade de Docteur ès Sciences - Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, section de Génie Civil, École Polytechnique Fédérale de Lousanne.

FILHO, DENIZART S. O.; OLIVEIRA, CARLOS F. S. E SILVEIRA, TITO L. *Extensômetros Elétricos de Resistência*. Faculdade de Engenharia Souza Marques, 1980.

FRANCO, CÉZAR VITÓRIO. *Cientistas Transformam o Plástico em Supercondutores*. 2001. Disponível em: <http://www.qmc.ufsc.br/~franco/Supermateriais/plasticossupercondutores.pdf> Acessado em: 15 nov. 2004.

FULLER, R. BUCKMINSTER E MARKS, R. *The Dymaxion World of Buckminster Fuller*. Anchor Books, 1973.

FULLER, R. BUCKMINSTER. *Manual de Operação para a Espaçonave Terra*. Tradução de Hélio Victor Nardes Mendes. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1985. 81 p.

GAUDI. *s. XXI*: El Templo de la Sagrada Família em Realidad Virtual 3D. Barcelona. Dirección y coordenación: Junta Constructora Del Templo Expiatório de la Sagrada Familia. Dirección y producción ejecutiva: Roger Gilabert. 2002. Disponivel em CD-ROM.

GEIGER ENGINEERS. s.d. Disponível em: <http://www.geigerengineers.com> Acessado em: 20 jun. 2007.

GENGNAGEL, CHRISTOPH. *Arbeitsblätter Tensegrity*. Technische Universität München, Fakultät für Architektur, Lehrstuhl für Hochbaustatik und Tragwerksplanung, Flächen- und Raumtragwerke, 01-02-leichtbaú 14.06.2002.

GOOGLE™. *SketchUp®*. 2005.

GREATBUILDINGS 1994-2004. Produced by Kevin Matthews and Artifice, Inc. Disponível em: <http://GreatBuildings.com/buildings/US_Pavilion_at_Expo_67.html> Acessado em: 15 nov. 2004.

GRECO, MARCELO, *et al*. Nonlinear Positional Formulation for Space Truss Analysis. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 42, p. 1079-1086, 2006.

GRECO, MARCELO E VENTURINI, W. S. Stability Analysis of Three-dimension Trusses. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 3, p. 325-344, 2006.

INGBER, DONALD E. Cellular Tensegrity: Defining New Rules of Biological Design that Govern the Cytoskeleton. *Journal of Cell Science*, v.104, p. 613-627, 1993.

INGBER, DONALD E. Tensegrity: the Architectural Basis of Cellular Mechanotransduction. *Annual Review of Physiology*, v.59, p. 575-599, 1997.

INGBER, DONALD E. The Architecture of Life. *Scientific American*, v.278, p. 48-57, jan., 1998. Disponível em: <http://vnweb.hwwilsonweb.com/hww/results/results_single_fulltext.jhtml> Acessado em: 22 jan. 2004.

JÁUREGUI, VALENTÍN GÓMES. *Tensegrity Structures and their Application to Architecture*. 2004. 202 p. MSc in Architecture – School of Architecture, Queen's University, Belfast.

JANBERG, NICOLAS. *Structurae*. 2004. Disponível em: <http://structurae.net/photos/index.cfm?JS=3723> Acessado em: 15 jun. 2005.

LABORTOIRE DE MÉCANIQUE ET GÉNIE CIVIL. *Conception em Structures*. Repport d'Activités, 1999-2002.

LABORATÓRIO DE DINÂMICA ESTRUTURAL E CONFIABILIDADE. LDEC. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

LAZZARI, MASSIMILIANO, *et al*. Dynamic Behavior of a Tensegrity System Subjected to Follower Wind Loading, *Computers & Structures*, v. 81, p. 2199-2217, 2003.

LEVIN, S. M. Continuous Tension, Discontinuous Compression: a Model for Biomechanical Support of the Body. *Bulletin of Structural Integration*, Rolf Institute, Bolder, p. 31-33, 1982. Disponível em: <http://www.biotensegrity.com/paper2.html>

LOTUFO, VITOR AMARAL E LOPES, JOÃO MARCOS DE ALMEIDA. *Geodésicas & Cia*. São Paulo: Projeto Editores Associados, 1981. 60 p.

LYALL, SUTHERLAND. *Master of Structure*: Engineering Today's Innovative Buildings. London: Laurence King Publishing Ltd, 2002. 224 p.

MACROVISION CORPORATION. *ANSYS®*. US Patents 5,390,297 and 5,671,412. 1988-2003.

MAKE ARCHITECTS. 2007. Disponível em: <http://www.makearchitects.com> Acessado em: 30 jun. 2007.

MEDEIROS, MIGUEL A. *Fulerenos*. 2004. Disponível em: <http://www.quiprocura.he.com.br/fulerenos> Acessado em: 15 nov. 2004.

MOREIRA, LUÍS EUSTÁQUIO; RIPPER, JOSÉ LUÍS MENDES E SILVA, MARCELO FONSECA. Técnicas de Constituição de Objetos Tecnológicos e sua Aplicação à Geração de um Domos de Bambu *Tensegrity*. s.d.

MOTRO, RENÉ. *Tensegrity*: Structural Systems for the Future. London and Sterling: Kogan Page Science, 2003. 238 p.

MOTRO, RENÉ; BELKACEM, R. E VASSART, N. Form Finding Numerical Methods for Tensegrity Systems. In: SPATIAL, LATTICE AND TENSION STRUCTURES, PROCEEDING OF THE IASS-ASCE INTERNATIONAL SYMPOSIUM. New York,1994. p. 704-713.

NOSEK, FILIP. 2005. Disponível em: < http://www.philippnosek.com/tensegrity/tensegrity.htm> Acessado em: 30 jun. 2007.

PAUL, C.; LIPSON, H. E VALERO CUEVAS, F. J. Design of Tensegrity Robots for Fault Tolerant Locomotion. In: PROCEEDINGS OF 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED ROBOTICS ICAR. Seattle, july, 2005. p.18-20.

PORTO, CLAUDIA ESTRELA. *Estruturas Espaciais*: Estado da Questão em 1950. 2007. Cadernos Eletrônicos. Programa de Pós-graduação - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Disponível em: <http://www.unb.br/fau/pos_graduacao/cadernos_eletronicos/estruturas_espaciais/estruturas.htm> Acessado em abr. 2007.

PUGH, A. *Polyhedra*: a Visual Approach. Berkeley: University of California Press, 1975. 121 p.

PUGH, A. *An Introduction to Tensegrity*. Berkeley: University of California Press, 1976. 122 p.

RAPOSO, ANA CRISTINA PONTES; DUARTE, ANA LUÍSA BORGES E ROSÁRIO, MILENA IZABEL FINO. *Artistas Matemáticos*. 2000? Disponível em:

<http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm2000/icm33/art_mat.html> Acessado em: 15 jun. 2005.

REBELLO, YOPANAN CONRADO PEREIRA. *A Concepção Estrutural e a Arquitetura*. São Paulo: Zigurate Editora, 2001. 271 p.

RIPPER, JOSÉ LUIZ MENDES E MOREIRA, LUÍS EUSTÁQUIO. Métodos de Ensino de Design de Produtos e sua Aplicação às Estruturas da Engenharia Civil. In: COBENGE 2004. Brasília.

RIPPER, JOSÉ LUIZ MENDES et al. Design de Estruturas Mínimas de Bambu. In: IX ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. Cuiabá. 2004.

ROBIN, TONY. New York, 2005. Disponível em: <http://tonyrobbin.home.att.net/book_eng.htm> Acessado em: 15 jun. 2007.

ROTHMAN, TONY. *Science à la Mode*: Physical Fashions and Fictions. Princeton: Princeton University Press, 1989. Disponível em: <http://dilip.chem.wfu.edu/Rothman/domes.html> Acesso em: 15 nov. 2004.

SILVA, CLÁUDIO. *Guia de Estudos de Filosofia*. 2005. Disponível em: <http:/www.vestibular1.com.br/revisão/filosofia_III.doc> Acessado em: 26 mai. 2005.

SILVA, VÂNIA. Paredes de Nuvens. *AU: Arquitetura & Urbanismo*, São Paulo, n. 90, p. 26-27, jun./jul., 2000a.

SILVA, VÂNIA. Vida Pós-muro. *AU: Arquitetura & Urbanismo*, São Paulo, n. 92, p. 36-37, out./nov., 2000b.

SILVA, VÂNIA E FAKRI, VOLDEMIR B. Teto Têxtil. *AU: Arquitetura & Urbanismo*, São Paulo, n. 92, p. 38-39, out./nov., 2000.

SILVA, VÂNIA E FRANÇA, RICARDO. Fora do Comum. *AU: Arquitetura & Urbanismo*, São Paulo, n. 90, p. 28-29, jun./jul., 2000.

SNELSON, KENNETH. 2005. Disponível em: <http://www.kennethsnelson.net/> Acessado em: 18 out. 2005.

STELDI-AIR. 2005. Disponível em: < http://steldi-air.com/munich05/munih.html> Acessado em: 28 jun. 2007.

TIBERT, GUNNAR. *Deployable Tensegrity Structures for Space Applications*. 2002. 244 p. Doctoral Thesis – Department of Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.

TIBERT, A.GUNNAR. E PELLEGRINO, S. Deployable Tensegrity Masts. In: STRUCTURES, STRUCTURAL DYNAMICS, AND MATERIALS CONFERENCE AND EXHIBIT. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC, Norfolk, Apr., 2003.

VASCONCELOS, AUGUSTO CARLOS DE. *Estruturas da Natureza*: um Estudo da Interface entre Biologia e Engenharia. São Paulo: Studio Nobel, 2000. 311 p.

V & M DO BRASIL. Tubos Estruturais Seção Circular, Quadrada e Retangular. 2004. Disponível em: www.vmtubes.com.br Acessado em: 06 jul. 2007.

VON KRÜGER, PAULO G.; RODRIGUES, FRANCISCO C., MOREIRA, LUIS E., CARRASCO, EDGAR V. M. E GRECO, MARCELO. Mechanical Behavior of a Tensegrity Dome. *Mechanic Research Communications*, v. 35, p. 460-465, 2008.

WGBH Educational Foundation. 2000-2001. Disponível em: <http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/wonder/structure/georgia.html> Acessado em: 15 jun. 2007.

WIKIPÉDIA. 2007. Disponível em: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Bourse_de_commerce_de_Paris> Acessado em: 23 jun. 2007.

WILKEN, TIMOTHY. *A Gift Tensegrity*. 2001. Disponível em: <http://www.synearth.net/Restricted-Confidential/Gift/Gift_Tensegrity.html> Acessado em: 15 jun. 2007.

ZOLI, LORENZO. *Tecnologie Innovative Leggere Aplicate all´Architettura Transitória*: l´Ipotesi delle Strutture Tensegrali. 2007. Tesi dottorale, Tecnologia dell´Architettura – Dipartimento di Tecnologie dell´Architettura e Design "Píer Luigi Spadolini", Università Degli Studi di Firenze.

10

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AGENDA 21 BRASILEIRA – Bases para Discussão. Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e da Agenda 21 Brasileira. 2000. Coordenação: Ministério do Meio Ambiente. Cópia parcial gentilmente cedida por: Maelí Estrela Borges.

AGENDA 21 BRASILEIRA – Cidades Sustentáveis. Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e da Agenda 21 Brasileira. 2000. Coordenação: Ministério do Meio Ambiente. Cópia parcial gentilmente cedida por: Maelí Estrela Borges.

ARSENAULT, MARC E GOSSELIN, CLÉMENT. M. Kinematic, Static and Dynamic Analysis of a Planar 2-DOF Tensegrity Mechanism. *Mechanism and Machine*, v.41, p.1072-1089, 2006.

BAHAMÓN, ALEJANDRO. *Arquitetura Efêmera Têxtil*. Tradução de Inês Guerreiro. Lisboa: Dinalivro, 2004. 176p.

BARELLA, JOSÉ EDUARDO. Ousadia Inspirada na Natureza, *Veja*, São Paulo, ed. 1843, ano 37, n. 9, p. 52-55, março, 2004.

BUCHANAN, PETER. *Renzo Piano Building Workshop*: Complete Works Volume One. London: Phaidon Press Limited, 1993. 240 p.

BUCHANAN, PETER. *Renzo Piano Building Workshop*: Complete Works Volume Two. London: Phaidon Press Limited, 1993. 240 p.

BUCHANAN, PETER. *Renzo Piano Building Workshop*: Complete Works Volume Three. London: Phaidon Press Limited, 1993. 240 p.

COSTA, PEDRO ZÖHRER RODRIGUES DA. *Estruturas Tensegrities e Eco-design*: uma Técnica de Solução Construtiva Ambiental. 2005. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Design – Departamento de Artes & Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CUITO, AURORA E MONTES, CRISTINA. *Obra Completa*: Gaudí. Madrid: H Kliczkowski-Onlybook, 2002. 240 p.

ENGEL, HEINO. *Sistemas Estruturais*. Versão portuguesa de Ether Pereira da Siva; revisão de Carla Zollinger. Barcelona: Editora Gustavo Gili AS, 1997. 352 p.

ESTRADA, G. GOMEZ ; BUNGARTZ H. J. E MOHRDIECK, C. Numerical Form-Finding of Tensegrity Structures. *International Journal of Solids and Structures*, v. 43, p. 6855-6868, 2006.

FERREOL, ROBERT. *Encyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables*. 2003. Disponível em: <http://www.mathcurve.com>. Acessado em: 13 nov. 2004.

FERREOL, ROBERT. *Encyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables*. 2004. Disponível em: <http://www.mathcurve.com>. Acessado em: 13 nov. 2004.

FERREOL, ROBERT E ESCULIER, ALAIN. *Encyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables*. 2003. Disponível em: <http://www.mathcurve.com>. Acessado em: 13 nov. 2004.

FERREOL, ROBERT E MANDONNET, JACQUES. *Encyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables*. 2000. Disponível em: <http://www.mathcurve.com>. Acessado em: 12 nov. 2004.

FERREOL, ROBERT E MANDONNET, JACQUES. *Encyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables*. 2001. Disponível em: <http://www.mathcurve.com>. Acessado em: 12 nov. 2004.

FERREOL, ROBERT E MANDONNET, JACQUES. *Encyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables*. 2003. Disponível em: <http://www.mathcurve.com>. Acessado em: 12 nov. 2004.

FERREOL, ROBERT E MANDONNET, JACQUES. *Encyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables*. 2004. Disponível em: <http://www.mathcurve.com>. Acessado em: 12 nov. 2004.

FERREOL, ROBERT et al. *Encyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables*. 2003. Disponível em: <http://www.mathcurve.com>. Acessado em: 13 nov. 2004.

FERREOL, ROBERT et al. *Encyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables*. 2004a. Disponível em: <http://www.mathcurve.com>. Acessado em: 13 nov. 2004.

FERREOL, ROBERT et al. *Encyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables*. 2004b. Disponível em: <http://www.mathcurve.com>. Acessado em: 13 nov. 2004.

FILGUEIRAS, RONEI LOMBARDI. *Membranas*. Belo Horizonte: Arbor Engenharia. s.d. Catálogo Técnico.

FU, FENG. Structural Behavior and Design Methods of Tensegrity Domes. *Journal of Constructional Stell Research*, v. 61, p. 23-35, 2005.

FULLER`S GLOBAL RESEARCH: Buckminster Fuller was one of our world's first futurists and global thinkers. s.d. Disponível em:
< http://www.bfi.org/fullers_global_research.htm.>. Acessado em: 27 jan. 2005.

GEOSITES. 2004. Disponível em:
<http://www.geocities.com/afalciforme/foice.html>. Acessado em: 15 nov. 2004.

INGBER, D.E. Tensigrity: The Architectural Basis of Cellular Mechanotransduction. *Annu. Rev. Physiol*, v. 59, p. 575-599, 1997.

JAGER, DE BRAM E SKETTON E. ROBERT. Stiffness of Planar Tensegrity Truss Topologies. *International Journal of Solids and Structures*, v. 43, p. 1308-1330, 2006.

JODIDIO, PHILIP. *Santiago Calatrava*. Köln: Taschen, 2001. p. 175.

JODIDIO, PHILIP. *Sir Norman Foster*. Köln: Taschen, 2001. 175 p.

KAHLA, NABIL BEN E KEBICHE, K. Nonlinear Elastoplastic Análisis of Tensegrity Systems. *Engineering Structures*, v. 23, p. 1552-1566, 2000.

KEBICHE, K.; KAZI-AOUAL, M.N. E MOTRO, R. Geometrical Non-Linear Analysis of Tensegrity Systems. *Engineering Structures*, v. 21, p. 864-876, 1999.

KRINENBURG, ROBERT. *Architectural Monographs No 48*: FTL Todd Dalland and Nicholas Goldsmith; Softness Movement and Light. London: Academy Editions, 1997. 127 p.

LORES, RAUL JUSTE. A Obra de 1,5 bi de Reais, *Veja*, São Paulo, ed. 1781, v. 35, n. 49, p. 72–74, dezembro, 2002.

MAINA, J.N. Spectaculary Robust! Tensegrity Principle Explains the Mechanical Strength of the Avian Lung. *Respirratory Physiology & Neurobiology*, 2006.

MASIC, MILENKO; SKELTON, ROBERT E. E GILL, PHILIP E. Algebraic Tensegrity Form-Finding. International Journal of Solids and Structures, v.42, p.4833-4858, 2005.

MASIC, MILENKO E SKETTON E. ROBERT. Selection of Prestress for Optimal Dynamic / Control Performance of Tensegrity Structures. *International Journal of Solids and Structures*, v. 43, p. 2110-2125, 2006.

MASIC, MILENKO; SKELTON E. ROBERT E GILL, PHILIP E. Optimizations of Tensegrity Structures. *International Journal of Solids and Structures*, v. 43, p. 6855-6868, 2006.

MIRANDA, DIMAS FELIPE DE E LAUDARES, JOÃO BOSCO. *Quádricas*. s.d. 97 p. Cadernos UCMG 15 – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MOORE, ROWAN (INTRODUÇÃO) E POWELL, KENNETH (EDIÇÃO). *Structure, Space and Skin*: The Work of Nicholas Grimshaw and Partners. London: Phaidon Press Limited, 1993. 255 p.

MURAKAMI, HIDENORI E NISHIMURA, YOSHITAKA. Initial Shape-Finding and Modal Analyses of Cyclic Right-Cilindrical Tensegrity Modules. Computers and Structures, n.79, p.891-917, 2001.

MURAKAMI, HIDENHORI E NISHIMURA, YOSHITAKA. Static and Dynamic Characterizationa of Regular Truncated Icosahedral and Dodecahedral Tensigrity Modules. *International Journal of Solids and Structures* v. 38, p. 9359-9381, 2001.

NISHIMURA, YOSHITAKA E MURAKAMI, HIDENORI. Initial Shape-Finding and Modal Analyses of Cyclic Frustum Tensegrity Modules. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 190, p. 5795-5818, 2001.

OPPENHEIM, I. J. E WILLIAMS, W.O. Geometric Effects is an Elastic Tensegrity Structure. *Journal of Elasticity*, v.59, p.51-65, 2000.

OPPENHEIM, IRVING J. E WILLIAMS, WILLIAM *O.* Vibrations of an elastic tensegrity structure. *Éditions scientifiques et médicales*, v.20, p.1023-1031, 2001.

SÁ, RICARDO. *Edros*. São Paulo: Projeto Editores Associados, 1982. 124 p.

SILVANA, DA DALT. *Física das Partículas*. 2004. Disponível em: <http://if.ufrgs.br/tex/fis01043/20031/Silvana/fispart.html>.Acessado em: 15 nov. 2004.

SLESSOR, CATHERINE. *Eco-Tec:* Sustainable Architecture and High Tecnology. London: Thames and Hudson, 1997. 192 p.

SULTAN, CORNEL; CORLESS, MARTIN, SKELTON E. ROBERT. Linear Dynamics of Tensegrity Structures. *Engeneering Structures*, v. 24, p. 671-685, 2002.

SULTAN, CORNEL ; CORTESS, MARTIN E SKELTON, ROBERT E. The Prestressability Problem of Tensegrity Structures: Some Analytical solutions. *International Journal of Solids and Strctures*, v.38, p. 5223-5252, 2000.

SULTAN, CORNEL E SKELTON, ROBERT. Deployment of Tensegrity Structures. *International Journal of Solids and Structures*, v. 40, p. 4637-4657, 2003.

TEIXEIRA, FÁBIO GONÇALVES E LEMES, MARTA REGINA TOCCHETTO. *Superfícies Helicoidais*. 2003. p. 50-61. Núcleo de Computação Gráfica Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TZINIS, ALEXANDRE. *Santiago Calatrava*: The Poetics of Movement. New York: Universe Publishing, 1999. 239 p.

WILLIAMSON, DARRELL; SKELTON, ROBERT E. E HAN, JEONGHEON. Equilibrium Conditions of a Tensegrity Structure. *International Journal of Solids and Structures*, v. 40, p. 6347-6367, 2003.

ZHANG, J.Y E OHSAKI, M. Adaptive Force Density Method for Form-Finding Problem of Tensegrity Structures. *International Journal of Solids and Structure*s, v.43, p. 56-58, 2006.

ZHANG, J.Y; OHSAKI, M. E KANNO, Y. A Direct Approach to Design of Geometry and Forces of Tensegrity Systems. *International Journal of Solids and Structures*, v. 43, p. 2260-2278, 2006.

A

PROJETO E RESULTADOS DO ENSAIO DINÂMICO

Projeto do Experimento Dimâmico

O objetivo deste ensaio foi obter, por meio do uso de instrumentação, a freqüência natural correspondente ao modo de vibração da estrutura após submetê-la a um deslocamento inicial prescrito no topo da estrutura, buscando simular a vibração livre da mesma. A FIG. A.1 apresenta um corte esquemático da estrutura, onde é demonstrada a direção e sentido do deslocamento inicial e o seu modo de vibração procurado.

A FIG. A.2 apresenta uma curva de deflexão com amortecimento para uma estrutura de um grau de liberdade posta a vibrar a partir de uma perturbação do seu estado de repouso, onde o eixo das abscissas representa o tempo t e as ordenadas a amplitude do deslocamento u(t). A referida curva está limitada por curvas exponenciais envoltórias, sendo T_d o período amortecido, u_0 o deslocamento inicial e $\mathring{u}_0$ a amplitude do movimento em t = 0.

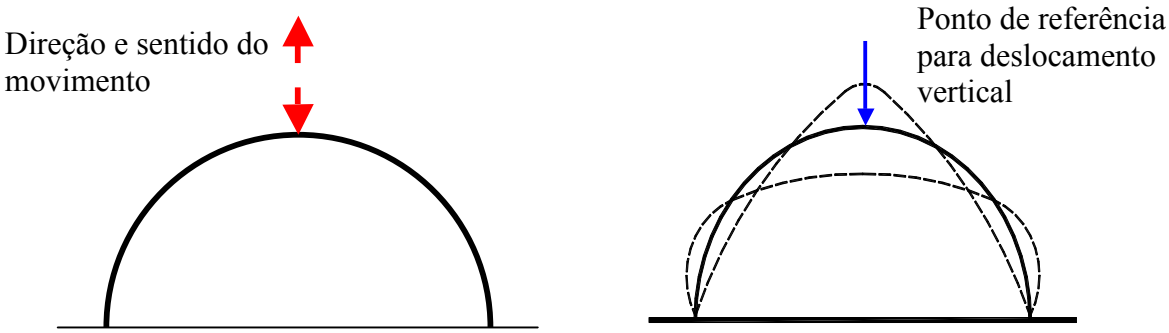


FIGURA A.1 – Direção e sentido do movimento analisado

Esta curva demonstra que a amplitude diminui com o tempo, isto porque as vibrações são gradualmente amortecidas. As forças de amortecimento podem ser causadas por: atrito entre superfícies dos componentes estruturais e o ar, nas ligações e apoios, com ou sem lubrificação etc.

As forças de amortecimento anteriormente relacionadas são fontes de dissipação de energia. O amortecimento viscoso também é uma fonte de dissipação de energia, sendo esta proporcional à velocidade de deformação.

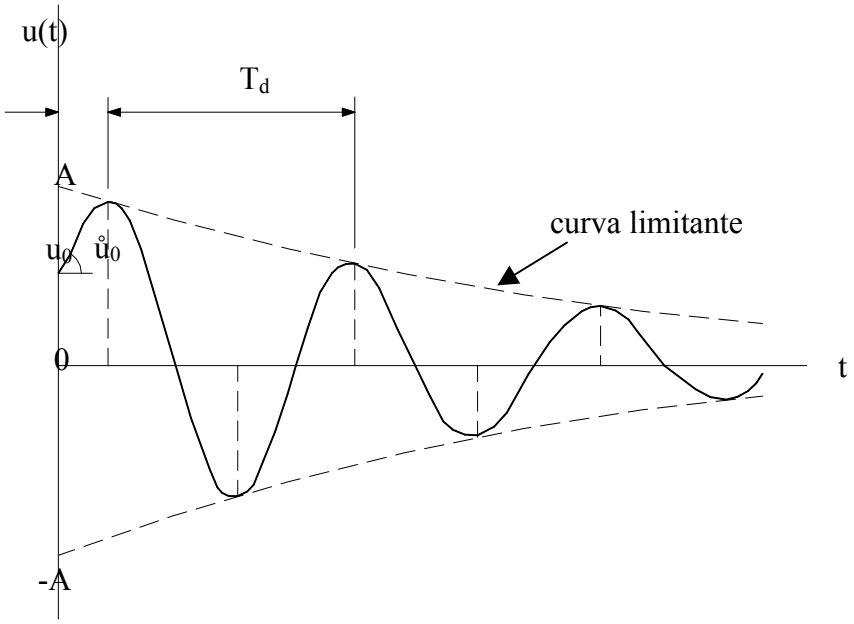


FIGURA A.2 – Curva de deslocamento em função do tempo.

Este tipo de amortecimento é fundamental para equacionar a dissipação de energia com o ciclo de vibração, sendo que o amortecimento estrutural devido ao atrito interno, por exemplo, deve ser abordado desta forma, ou seja, deve ser definido um amortecimento viscoso equivalente que dissipe a mesma quantidade de energia em um ciclo real com os tipos de amortecimento anteriormente citados.

Para a realização deste ensaio foi fixada cordoalha somente no nó 1 (topo da cúpula), que por sua vez foi puxado pelo sistema de macaco pantográfico. Próximo à situação de contato entre as barras que compõem os nós, os mesmos foram liberados por meio do corte da cordoalha que fixava o macaco pantográfico ao nó.

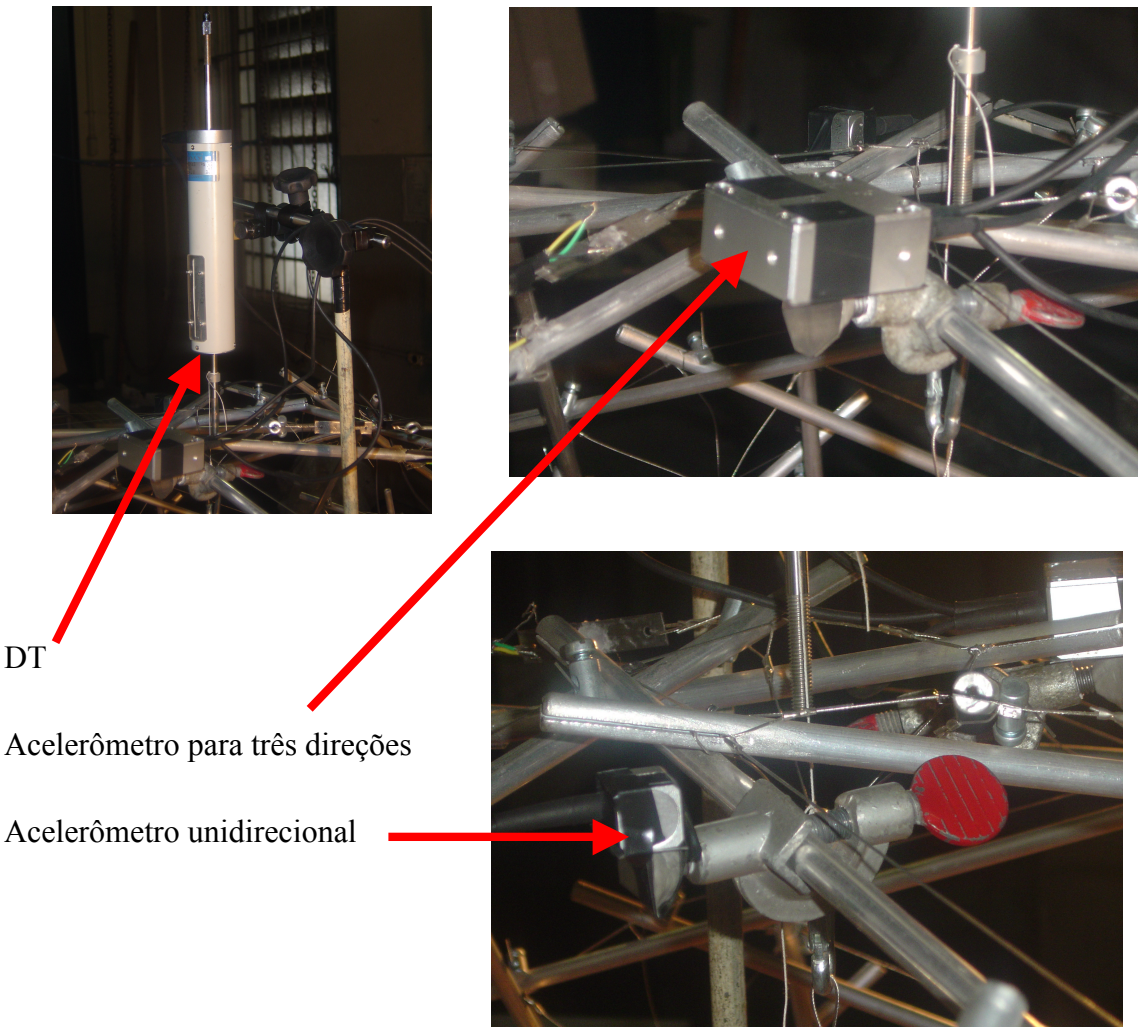


FIGURA A.3 – Instrumentação para o ensaio dinâmico

Os dados foram obtidos utilizando-se dois acelerômetros fixados no topo da estrutura, além de um transdutor de deslocamento linear (DT-50A, nº de série: EN9300014, da Kyowa, cursor de 50 mm, ponte completa) locado no eixo de simetria vertical da cúpula (FIG. A.3). Um acelerômetro (AR-F nº 81415, da Tokyo Sokki Kenkyujo CO. LTD) permite medir a vibração em apenas uma direção, enquanto o outro, também fixado à estrutura (AR-2TF nº 92040, da Tokyo Sokki Kenkyujo CO. LTD), permite medir a vibração em três direções (transversal, longitudinal e vertical).

Tanto os acelerômetros quanto o transdutor de deslocamento linear (DT) foram ligados ao Sistema de Aquisição de Dados em ponte completa.

Resultados do Ensaio Dimâmico

As resultados deste ensaio são apresentados nos gráficos das FIG. A.4, FIG. A.5 e FIG. A.6.

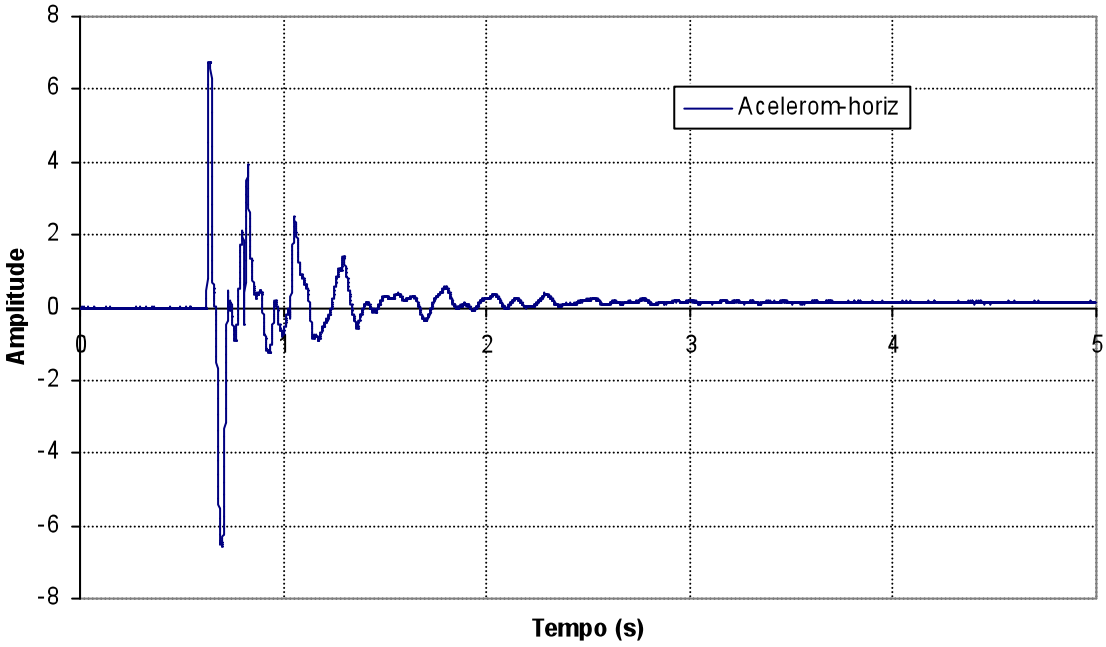


FIGURA A.4 – Acelerômetro unidirecional

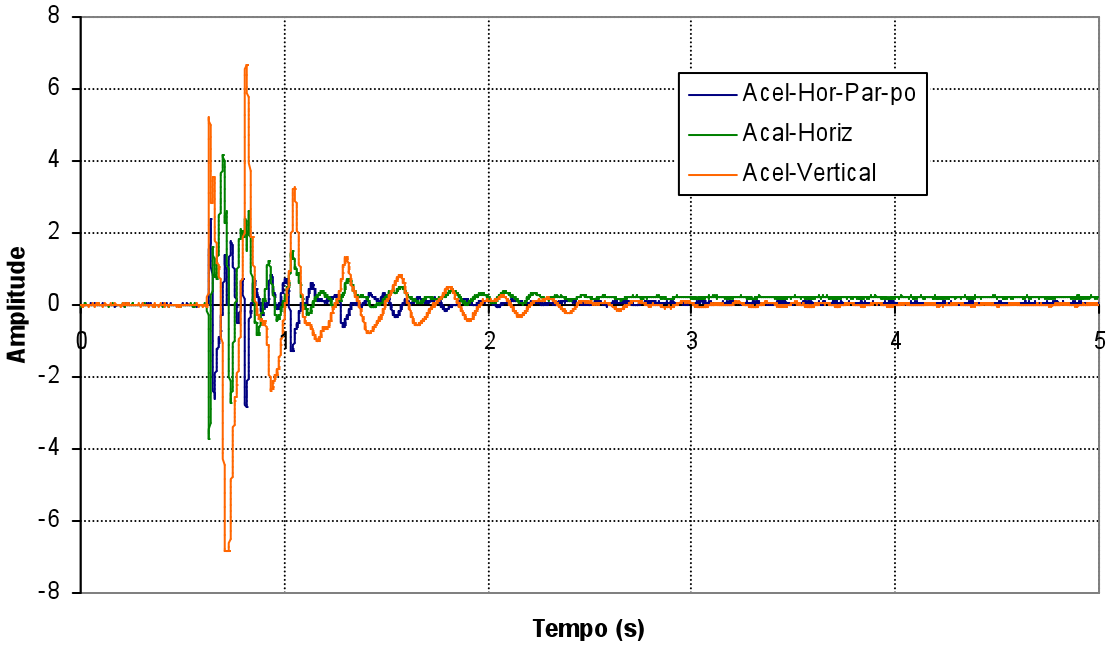


FIGURA A.5 – Acelerômetro para três direções

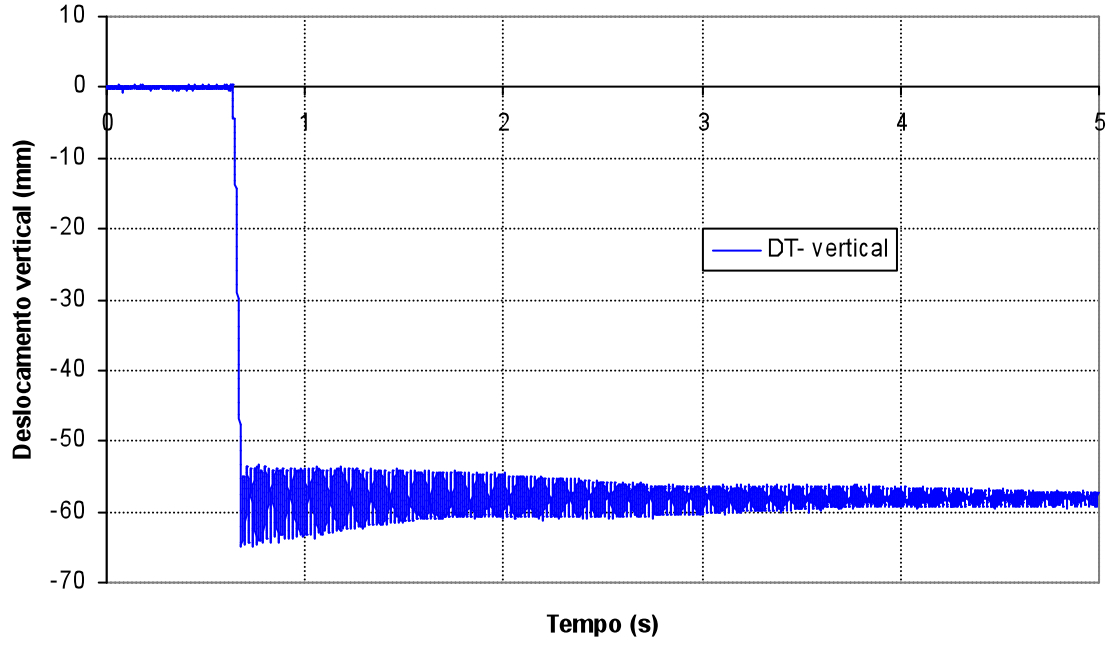


FIGURA A.5 – DT vertical

B

DADOS DE ENTRADA PARA A ANÁLISE NUMÉRICA

A seguir serão apresentados os dados de entrada da análise numérica dos ensaios de simulação de cargas em todas as estruturas nodais, simulação de mezanino apoiado nas cinco estruturas nodais da parte superior da cúpula e simulação de cargas assimétricas para simular ação de vento.

Aplicação de cargas em todos os nós

Treliça 3D

Número de Elementos
316
Número de Nós
127
Número de Nós com Graus de Liberdade Prescritos
11
Número de Nós com Carregamentos Prescritos (Não Nulos)
1

Tolerância
0.00000001
Número de Passos de Carga
6000
Freq. de impressão das posições nodais nos arquivos 'SAIDA.TXT' e 'NORMAL.TXT'
100
Nó a ser Listado no Arquivo 'RESULT.TXT'
111

Nó, Coord.X, Coord.Y, Coord.Z	Nó, Coord.X, Coord.Y, Coord.Z	Nó, Coord.X, Coord.Y, Coord.Z
1, -1.3307, 59.9948, -8.4018	44, -46.482, 19.2278, -33.782	86, 20.3962, 32.9946, -46.5582
2, -8.4018, 59.9948, -1.3307	45, -49.1236, 24.4856, -25.6794	87, 24.638, 24.4856, -49.657
3, -3.8619, 59.9948, 7.5794	46, -43.8658, 32.9946, -25.6794	88, 17.7546, 19.2278, -54.6608
4, 6.0150, 59.9948, 6.0150	47, -48.4632, 35.7378, -8.6614	89, 9.2456, 24.4856, -54.6608
5, 7.5794, 59.9948, -3.8619	48, -53.6956, 27.2288, -8.6614	90, 10.8712, 32.9946, -49.657
6, -16.6116, 55.6006, -18.2626	49, -56.3372, 22.9616, 0.0	91, -8.6614, 5.0038, -59.9948
7, -19.6342, 51.0286, -26.6192	50, -53.6956, 27.2288, 8.6614	92, -8.6614, -5.0038, -59.9948
8, -28.5496, 46.482, -26.924	51, -48.4632, 35.7378, 8.6614	93, -42.2656, 5.0038, -43.4594
9, -34.417, 46.482, -18.8214	52, -45.847, 39.9796, 0.0	94, -42.2656, -5.0038, -43.4594
10, -31.3944, 51.0286, -10.4394	53, -43.8404, 32.9946, 25.7048	95, -59.7408, 5.0038, -10.3124
11, -22.5044, 55.6006, -10.16	54, -49.1236, 24.511, 25.6794	96, -59.7408, -5.0038, -10.3124
12, -22.5044, 55.6006, 10.16	55, -46.5074, 19.2278, 33.7566	97, -54.3814, 5.0038, 26.7716
13, -31.3944, 51.0286, 10.4394	56, -39.624, 24.4602, 38.7858	98, -54.3814, -5.0038, 26.7716
14, -34.417, 46.482, 18.8214	57, -37.973, 32.9692, 33.8074	99, -28.2702, 5.0038, 53.6194
15, -28.5496, 46.482, 26.924	58, -23.2156, 35.7378, 43.4086	100, -28.2702, -5.0038, 53.6194
16, -19.6342, 51.0286, 26.6192	59, -24.8412, 27.2288, 48.4124	101, 8.6614, 5.0038, 59.9948
17, -16.6116, 55.6006, 18.2626	60, -17.399, 22.9616, 53.5686	102, 8.6614, -5.0038, 59.9948
18, 2.7178, 55.6006, 24.5364	61, -8.3566, 27.2288, 53.7464	103, 42.2656, 5.0038, 43.4594
19, 0.2286, 51.0286, 33.0962	62, -6.731, 35.7378, 48.768	104, 42.2656, -5.0038, 43.4594
20, 7.2644, 46.482, 38.5572	63, -14.1732, 39.9796, 43.5864	105, 59.7408, 5.0038, 10.3124
21, 16.7894, 46.482, 35.4584	64, 10.8712, 32.9946, 49.657	106, 59.7408, -5.0038, 10.3124
22, 19.2532, 51.0286, 26.8986	65, 9.2456, 24.4856, 54.6608	107, 54.3814, 5.0038, -26.7716
23, 12.2174, 55.6006, 21.4376	66, 17.7546, 19.2278, 54.6608	108, 54.3814, -5.0038, -26.7716
24, 24.1808, 55.6006, 5.0038	67, 24.638, 24.4856, 49.657	109, 28.2702, 5.0038, -53.6194
25, 31.5468,51.0286,10.0076	68, 20.3962, 32.9946, 46.5582	110, 28.2702, -5.0038, -53.6194
26, 38.9128, 46.482, 5.0038	69, 34.1122, 35.7378, 35.4838	111, 0.0000, 59.9948, 0.0000
27, 38.9128, 46.482, -5.0038	70, 38.354, 27.2288, 38.5826	112, 9.7476, 51.0391, 30.0000
28, 31.5468, 51.0286, -10.0076	71, 45.5676, 22.9616, 33.0962	113, -25.5195, 51.0391, 18.5410
29, 24.1808, 55.6006, -5.0038	72, 48.5394, 27.2288, 24.5618	114, -25.5195, 51.0391, -18.5410
30, 12.2174, 55.6006, -21.4376	73, 44.2976, 35.7378, 21.4884	115, 9.7476, 51.0391, -30.0000
31, 19.2532, 51.0286, -26.8986	74, 37.084, 39.9796, 26.9494	116, 31.5439, 51.0391, 0.0000
32, 16.7894, 46.482, -35.4584	75, 50.5968, 32.9946, 5.0038	117, 0.0000, 5.0000, 0.0000
33, 7.2644, 46.482, -38.5572	76, 54.8386, 24.4856, 8.1026	118, 16.5836, 26.8328, 51.0390
34, 0.2286, 51.0286, -33.0962	77, 57.4802, 19.2278, 0.0	119, 41.3259, 31.4748, 30.0250
35, 2.7178, 55.6006, -24.5364	78, 54.8386, 24.4856, -8.1026	120, 53.6656, 26.8328, 0.0000
36, -6.731, 35.7378, -48.768	79, 50.5968, 32.9946, -5.0038	121, 41.3259, 31.4748, -30.0250
37, -8.3566, 27.2288, -53.7464	80, 44.2976, 35.7378, -21.4884	122, 16.5836, 26.8328, -51.0390
38, -17.399, 22.9616, -53.5686	81, 48.5394, 27.2288, -24.5618	123, -15.7851, 31.4748, -48.5815
39, -24.8412, 27.2288, -48.4124	82, 45.5676, 22.9616, -33.0962	124, -43.4164, 26.8328, -31.5439
40, -23.2156, 35.7378, -43.4086	83, 38.354, 27.2288, -38.5826	125, -51.0817, 31.4748, 0.0000
41, -14.1732, 39.9796, -43.5864	84, 34.1122, 35.7378, -35.4838	126, -43.4164, 26.8328, 31.5439
42, -37.9984, 32.9946, -33.782	85, 37.084, 39.9796, -26.9494	127, -15.7851, 31.4748, 48.5815
43, -39.624, 24.4856, -38.7858		

EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]	EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]
1, 1, 2, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	64, 37, 38, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
2, 2, 3, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	65, 38, 39, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
3, 3, 4, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	66, 39, 40, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
4, 4, 5, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	67, 42, 43, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
5, 5, 1, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	68, 43, 44, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
6, 1, 11, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	69, 44, 45, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
7, 2, 17, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	70, 45, 46, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
8, 3, 23, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	71, 46, 42, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
9, 4, 29, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	72, 47, 48, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
10, 5, 35, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	73, 48, 49, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
11, 11, 6, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	74, 49, 50, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
12, 6, 7, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	75, 50, 51, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
13, 7, 8, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	76, 51, 52, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
14, 8, 9, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	77, 52, 47, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
15, 9, 10, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	78, 53, 54, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
16, 10, 11, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	79, 54, 55, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
17, 12, 13, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	80, 55, 56, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
18, 13, 14, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	81, 56, 57, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
19, 14, 15, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	82, 57, 53, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
20, 15, 16, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	83, 58, 59, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
21, 16, 17, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	84, 59, 60, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
22, 17, 12, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	85, 60, 61, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
23, 18, 19, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	86, 61, 62, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
24, 19, 20, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	87, 62, 63, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
25, 20, 21, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	88, 63, 58, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
26, 21, 22, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	89, 64, 65, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
27, 22, 23, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	90, 65, 66, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
28, 23, 18, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	91, 66, 67, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
29, 24, 25, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	92, 67, 68, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
30, 25, 26, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	93, 68, 64, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
31, 26, 27, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	94, 69, 70, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
32, 27, 28, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	95, 70, 71, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
33, 28, 29, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	96, 71, 72, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
34, 29, 24, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	97, 72, 73, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
35, 30, 31, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	98, 73, 74, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
36, 31, 32, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	99, 74, 69, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
37, 32, 33, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	100, 75, 76, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
38, 33, 34, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	101, 76, 77, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
39, 34, 35, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	102, 77, 78, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
40, 35, 30, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	103, 78, 79, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
41, 6, 34, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	104, 79, 75, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
42, 7, 40, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	105, 80, 81, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
43, 8, 46, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	106, 81, 82, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
44, 9, 52, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	107, 82, 83, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
45, 10, 12, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	108, 83, 84, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
46, 13, 51, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	109, 84, 85, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
47, 14, 57, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	110, 85, 80, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
48, 15, 63, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	111, 86, 87, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
49, 16, 18, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	112, 87, 88, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
50, 19, 62, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	113, 88, 89, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
51, 20, 68, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	114, 89, 90, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
52, 21, 74, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	115, 90, 86, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
53, 22, 24, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	116, 36, 89, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
54, 25, 73, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	117, 37, 91, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
55, 26, 79, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	118, 38, 93, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
56, 27, 85, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	119, 39, 42, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
57, 28, 30, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	120, 43, 93, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
58, 31, 84, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	121, 44, 95, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
59, 32, 90, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	122, 45, 47, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
60, 33, 41, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	123, 48, 95, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
61, 40, 41, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	124, 49, 97, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
62, 41, 36, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	125, 50, 53, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
63, 36, 37, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	126, 54, 97, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075

EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]	EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]
127, 55, 99, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	190, 49, 57, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
128, 56, 58, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	191, 53, 98, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
129, 59, 99, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	192, 54, 99, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
130, 60, 101, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	193, 55, 63, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
131, 61, 64, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	194, 58, 100, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
132, 65, 101, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	195, 59, 101, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
133, 66, 103, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	196, 60, 68, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
134, 67, 69, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	197, 64, 102, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
135, 70, 103, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	198, 65, 103, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
136, 71, 105, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	199, 66, 74, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
137, 72, 75, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	200, 69, 104, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
138, 76, 105, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	201, 70, 105, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
139, 77, 107, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	202, 71, 79, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
140, 78, 80, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	203, 75, 106, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
141, 81, 107, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	204, 76, 107, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
142, 82, 109, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	205, 77, 85, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
143, 83, 86, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	206, 80, 108, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
144, 87, 109, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	207, 81, 109, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
145, 88, 91, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	208, 82, 90, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
146, 91, 92, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	209, 86, 110, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
147, 93, 94, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	210, 87, 91, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
148, 95, 96, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	211, 111, 1, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
149, 97, 98, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	212, 111, 2, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
150, 99, 100, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	213, 111, 3, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
151, 101, 102, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	214, 111, 4, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
152, 103, 104, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	215, 111, 5, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
153, 105, 106, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	216, 112, 18, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
154, 107, 108, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	217, 112, 19, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
155, 109, 110, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	218, 112, 20, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
156, 2, 22, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	219, 112, 21, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
157, 3, 28, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	220, 112, 22, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
158, 4, 34, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	221, 112, 23, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
159, 5, 10, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	222, 113, 13, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
160, 1, 16, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	223, 113, 14, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
161, 9, 17, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	224, 113, 15, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
162, 12, 50, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	225, 113, 16, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
163, 13, 56, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	226, 113, 17, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
164, 14, 62, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	227, 113, 12, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
165, 15, 23, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	228, 114, 6, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
166, 18, 61, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	229, 114, 7, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
167, 19, 67, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	230, 114, 8, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
168, 20, 73, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	231, 114, 9, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
169, 21, 29, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	232, 114, 10, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
170, 24, 72, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	233, 114, 11, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
171, 25, 78, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	234, 115, 30, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
172, 26, 84, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	235, 115, 31, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
173, 27, 35, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	236, 115, 32, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
174, 30, 83, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	237, 115, 33, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
175, 31, 89, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	238, 115, 34, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
176, 32, 36, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	239, 115, 35, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
177, 11, 33, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	240, 116, 24, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
178, 6, 39, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	241, 116, 25, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
179, 7, 45, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	242, 116, 26, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
180, 8, 51, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	243, 116, 27, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
181, 41, 88, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	244, 116, 28, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
182, 36, 92, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	245, 116, 29, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
183, 37, 93, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	246, 117, 112, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
184, 38, 46, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	247, 117, 113, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
185, 42, 94, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	248, 117, 114, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
186, 43, 95, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	249, 117, 115, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
187, 44, 52, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	250, 117, 116, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
188, 47, 96, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	251, 118, 64, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
189, 48, 97, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	252, 118, 65, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075

EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]	EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]
253, 118, 66, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	285, 124, 43, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
254, 118, 67, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	286, 124, 44, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
255, 118, 68, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	287, 124, 45, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
256, 119, 69, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	288, 124, 46, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
257, 119, 70, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	289, 125, 47, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
258, 119, 71, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	290, 125, 48, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
259, 119, 72, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	291, 125, 49, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
260, 119, 73, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	292, 125, 50, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
261, 119, 74, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	293, 125, 51, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
262, 120, 75, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	294, 125, 52, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
263, 120, 76, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	295, 126, 53, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
264, 120, 77, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	296, 126, 54, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
265, 120, 78, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	297, 126, 55, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
266, 120, 79, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	298, 126, 56, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
267, 121, 80, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	299, 126, 57, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
268, 121, 81, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	300, 127, 58, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
269, 121, 82, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	301, 127, 59, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
270, 121, 83, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	302, 127, 60, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
271, 121, 84, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	303, 127, 61, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
272, 121, 85, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	304, 127, 62, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
273, 122, 86, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	305, 127, 63, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
274, 122, 87, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	306, 117, 118, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
275, 122, 88, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	307, 117, 119, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
276, 122, 89, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	308, 117, 120, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
277, 122, 90, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	309, 117, 121, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
278, 123, 36, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	310, 117, 122, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
279, 123, 37, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	311, 117, 123, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
280, 123, 38, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	312, 117, 124, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
281, 123, 39, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	313, 117, 125, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
282, 123, 40, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	314, 117, 126, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
283, 123, 41, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	315, 117, 127, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
284, 124, 42, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	316, 117, 111, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075

Onde:
EL: Elemento;
NI: Nó Inicial;
NF: Nó Final;
E: Módulo de Elasticidade;
A: Área;
KM: Módulo Plástico;
HM: Módulo de Encruamento Cinemático;
SY: Tensão de cisalhamento;
DI: Deformação Inicial [%];

Restrição de Graus de Liberdade
Nó, GL1, GL2, GL3
92, 1, 1, 1
94, 1, 1, 1
96, 1, 1, 1
98, 1, 1, 1
100, 1, 1, 1
102, 1, 1, 1
104, 1, 1, 1
106, 1, 1, 1
108, 1, 1, 1
110, 1, 1, 1
117, 1, 0, 1

Leitura dos Valores Prescritos
Nó, Px, Py, Pz
92, 0.0, 0.0, 0.0
94, 0.0, 0.0, 0.0
96, 0.0, 0.0, 0.0
98, 0.0, 0.0, 0.0
100, 0.0, 0.0, 0.0
102, 0.0, 0.0, 0.0
104, 0.0, 0.0, 0.0
106, 0.0, 0.0, 0.0
108, 0.0, 0.0, 0.0
110, 0.0, 0.0, 0.0
117, 0.0, 0.0, 0.0

Nós com Carregamento Prescritos
Nó, Fx, Fy, Fz
117, 0.0, -0.10, 0.0

Aplicação de cargas nos cinco nós da parte superior da cúpula

Treliça 3D

Número de Elementos
250
Número de Nós
117
Número de Nós com Graus de Liberdade Prescritos
11
Número de Nós com Carregamentos Prescritos (Não Nulos)
1
Tolerância
0.00000001
Número de Passos de Carga
4000
Freq. de impressão das posições nodais nos arquivos 'SAIDA.TXT' e 'NORMAL.TXT'
100
Nó a ser Listado no Arquivo 'RESULT.TXT'
111

Nó, Coord.X, Coord.Y, Coord.Z	Nó, Coord.X, Coord.Y, Coord.Z	Nó, Coord.X, Coord.Y, Coord.Z
1, -1.3307, 59.9948, -8.4018	40, -23.2156, 35.7378, -43.4086	79, 50.5968, 32.9946, -5.0038
2, -8.4018, 59.9948, -1.3307	41, -14.1732, 39.9796, -43.5864	80, 44.2976, 35.7378, -21.4884
3, -3.8619, 59.9948, 7.5794	42, -37.9984, 32.9946, -33.782	81, 48.5394, 27.2288, -24.5618
4, 6.0150, 59.9948, 6.0150	43, -39.624, 24.4856, -38.7858	82, 45.5676, 22.9616, -33.0962
5, 7.5794, 59.9948, -3.8619	44, -46.482, 19.2278, -33.782	83, 38.354, 27.2288, -38.5826
6, -16.6116, 55.6006, -18.2626	45, -49.1236, 24.4856, -25.6794	84, 34.1122, 35.7378, -35.4838
7, -19.6342, 51.0286, -26.6192	46, -43.8658, 32.9946, -25.6794	85, 37.084, 39.9796, -26.9494
8, -28.5496, 46.482, -26.924	47, -48.4632, 35.7378, -8.6614	86, 20.3962, 32.9946, -46.5582
9, -34.417, 46.482, -18.8214	48, -53.6956, 27.2288, -8.6614	87, 24.638, 24.4856, -49.657
10, -31.3944, 51.0286, -10.4394	49, -56.3372, 22.9616, 0.0	88, 17.7546, 19.2278, -54.6608
11, -22.5044, 55.6006, -10.16	50, -53.6956, 27.2288, 8.6614	89, 9.2456, 24.4856, -54.6608
12, -22.5044, 55.6006, 10.16	51, -48.4632, 35.7378, 8.6614	90, 10.8712, 32.9946, -49.657
13, -31.3944, 51.0286, 10.4394	52, -45.847, 39.9796, 0.0	91, -8.6614, 5.0038, -59.9948
14, -34.417, 46.482, 18.8214	53, -43.8404, 32.9946, 25.7048	92, -8.6614, -5.0038, -59.9948
15, -28.5496, 46.482, 26.924	54, -49.1236, 24.511, 25.6794	93, -42.2656, 5.0038, -43.4594
16, -19.6342, 51.0286, 26.6192	55, -46.5074, 19.2278, 33.7566	94, -42.2656, -5.0038, -43.4594
17, -16.6116, 55.6006, 18.2626	56, -39.624, 24.4602, 38.7858	95, -59.7408, 5.0038, -10.3124
18, 2.7178, 55.6006, 24.5364	57, -37.973, 32.9692, 33.8074	96, -59.7408, -5.0038, -10.3124
19, 0.2286, 51.0286, 33.0962	58, -23.2156, 35.7378, 43.4086	97, -54.3814, 5.0038, 26.7716
20, 7.2644, 46.482, 38.5572	59, -24.8412, 27.2288, 48.4124	98, -54.3814, -5.0038, 26.7716
21, 16.7894, 46.482, 35.4584	60, -17.399, 22.9616, 53.5686	99, -28.2702, 5.0038, 53.6194
22, 19.2532, 51.0286, 26.8986	61, -8.3566, 27.2288, 53.7464	100, -28.2702, -5.0038, 53.6194
23, 12.2174, 55.6006, 21.4376	62, -6.731, 35.7378, 48.768	101, 8.6614, 5.0038, 59.9948
24, 24.1808, 55.6006, 5.0038	63, -14.1732, 39.9796, 43.5864	102, 8.6614, -5.0038, 59.9948
25, 31.5468,51.0286,10.0076	64, 10.8712, 32.9946, 49.657	103, 42.2656, 5.0038, 43.4594
26, 38.9128, 46.482, 5.0038	65, 9.2456, 24.4856, 54.6608	104, 42.2656, -5.0038, 43.4594
27, 38.9128, 46.482, -5.0038	66, 17.7546, 19.2278, 54.6608	105, 59.7408, 5.0038, 10.3124
28, 31.5468, 51.0286, -10.0076	67, 24.638, 24.4856, 49.657	106, 59.7408, -5.0038, 10.3124
29, 24.1808, 55.6006, -5.0038	68, 20.3962, 32.9946, 46.5582	107, 54.3814, 5.0038, -26.7716
30, 12.2174, 55.6006, -21.4376	69, 34.1122, 35.7378, 35.4838	108, 54.3814, -5.0038, -26.7716
31, 19.2532, 51.0286, -26.8986	70, 38.354, 27.2288, 38.5826	109, 28.2702, 5.0038, -53.6194
32, 16.7894, 46.482, -35.4584	71, 45.5676, 22.9616, 33.0962	110, 28.2702, -5.0038, -53.6194
33, 7.2644, 46.482, -38.5572	72, 48.5394, 27.2288, 24.5618	111, 0.0000, 59.9948, 0.0000
34, 0.2286, 51.0286, -33.0962	73, 44.2976, 35.7378, 21.4884	112, 9.7476, 51.0391, 30.0000
35, 2.7178, 55.6006, -24.5364	74, 37.084, 39.9796, 26.9494	113, -25.5195, 51.0391, 18.5410
36, -6.731, 35.7378, -48.768	75, 50.5968, 32.9946, 5.0038	114, -25.5195, 51.0391, -18.5410
37, -8.3566, 27.2288, -53.7464	76, 54.8386, 24.4856, 8.1026	115, 9.7476, 51.0391, -30.0000
38, -17.399, 22.9616, -53.5686	77, 57.4802, 19.2278, 0.0	116, 31.5439, 51.0391, 0.0000
39, -24.8412, 27.2288, -48.4124	78, 54.8386, 24.4856, -8.1026	117, 0.0000, 5.0000, 0.0000

EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]	EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]
1, 1, 2, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	64, 37, 38, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
2, 2, 3, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	65, 38, 39, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
3, 3, 4, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	66, 39, 40, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
4, 4, 5, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	67, 42, 43, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
5, 5, 1, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	68, 43, 44, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
6, 1, 11, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	69, 44, 45, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
7, 2, 17, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	70, 45, 46, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
8, 3, 23, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	71, 46, 42, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
9, 4, 29, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	72, 47, 48, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
10, 5, 35, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	73, 48, 49, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
11, 11, 6, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	74, 49, 50, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
12, 6, 7, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	75, 50, 51, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
13, 7, 8, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	76, 51, 52, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
14, 8, 9, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	77, 52, 47, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
15, 9, 10, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	78, 53, 54, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
16, 10, 11, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	79, 54, 55, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
17, 12, 13, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	80, 55, 56, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
18, 13, 14, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	81, 56, 57, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
19, 14, 15, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	82, 57, 53, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
20, 15, 16, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	83, 58, 59, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
21, 16, 17, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	84, 59, 60, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
22, 17, 12, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	85, 60, 61, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
23, 18, 19, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	86, 61, 62, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
24, 19, 20, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	87, 62, 63, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
25, 20, 21, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	88, 63, 58, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
26, 21, 22, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	89, 64, 65, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
27, 22, 23, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	90, 65, 66, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
28, 23, 18, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	91, 66, 67, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
29, 24, 25, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	92, 67, 68, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
30, 25, 26, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	93, 68, 64, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
31, 26, 27, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	94, 69, 70, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
32, 27, 28, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	95, 70, 71, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
33, 28, 29, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	96, 71, 72, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
34, 29, 24, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	97, 72, 73, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
35, 30, 31, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	98, 73, 74, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
36, 31, 32, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	99, 74, 69, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
37, 32, 33, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	100, 75, 76, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
38, 33, 34, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	101, 76, 77, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
39, 34, 35, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	102, 77, 78, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
40, 35, 30, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	103, 78, 79, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
41, 6, 34, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	104, 79, 75, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
42, 7, 40, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	105, 80, 81, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
43, 8, 46, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	106, 81, 82, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
44, 9, 52, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	107, 82, 83, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
45, 10, 12, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	108, 83, 84, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
46, 13, 51, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	109, 84, 85, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
47, 14, 57, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	110, 85, 80, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
48, 15, 63, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	111, 86, 87, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
49, 16, 18, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	112, 87, 88, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
50, 19, 62, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	113, 88, 89, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
51, 20, 68, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	114, 89, 90, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
52, 21, 74, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	115, 90, 86, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
53, 22, 24, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	116, 36, 89, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
54, 25, 73, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	117, 37, 91, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
55, 26, 79, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	118, 38, 93, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
56, 27, 85, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	119, 39, 42, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
57, 28, 30, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	120, 43, 93, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
58, 31, 84, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	121, 44, 95, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
59, 32, 90, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	122, 45, 47, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
60, 33, 41, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	123, 48, 95, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
61, 40, 41, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	124, 49, 97, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
62, 41, 36, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	125, 50, 53, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
63, 36, 37, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	126, 54, 97, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075

EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]	EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]
127, 55, 99, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	189, 48, 97, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
128, 56, 58, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	190, 49, 57, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
129, 59, 99, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	191, 53, 98, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
130, 60, 101, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	192, 54, 99, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
131, 61, 64, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	193, 55, 63, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
132, 65, 101, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	194, 58, 100, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
133, 66, 103, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	195, 59, 101, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
134, 67, 69, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	196, 60, 68, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
135, 70, 103, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	197, 64, 102, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
136, 71, 105, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	198, 65, 103, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
137, 72, 75, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	199, 66, 74, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
138, 76, 105, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	200, 69, 104, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
139, 77, 107, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	201, 70, 105, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
140, 78, 80, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	202, 71, 79, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
141, 81, 107, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	203, 75, 106, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
142, 82, 109, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	204, 76, 107, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
143, 83, 86, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	205, 77, 85, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
144, 87, 109, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	206, 80, 108, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
145, 88, 91, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	207, 81, 109, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
146, 91, 92, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	208, 82, 90, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
147, 93, 94, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	209, 86, 110, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
148, 95, 96, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	210, 87, 91, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
149, 97, 98, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	211, 111, 1, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
150, 99, 100, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	212, 111, 2, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
151, 101, 102, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	213, 111, 3, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
152, 103, 104, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	214, 111, 4, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
153, 105, 106, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	215, 111, 5, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
154, 107, 108, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	216, 112, 18, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
155, 109, 110, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	217, 112, 19, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
156, 2, 22, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	218, 112, 20, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
157, 3, 28, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	219, 112, 21, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
158, 4, 34, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	220, 112, 22, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
159, 5, 10, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	221, 112, 23, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
160, 1, 16, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	222, 113, 13, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
161, 9, 17, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	223, 113, 14, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
162, 12, 50, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	224, 113, 15, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
163, 13, 56, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	225, 113, 16, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
164, 14, 62, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	226, 113, 17, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
165, 15, 23, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	227, 113, 12, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
166, 18, 61, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	228, 114, 6, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
167, 19, 67, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	229, 114, 7, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
168, 20, 73, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	230, 114, 8, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
169, 21, 29, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	231, 114, 9, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
170, 24, 72, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	232, 114, 10, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
171, 25, 78, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	233, 114, 11, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
172, 26, 84, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	234, 115, 30, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
173, 27, 35, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	235, 115, 31, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
174, 30, 83, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	236, 115, 32, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
175, 31, 89, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	237, 115, 33, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
176, 32, 36, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	238, 115, 34, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
177, 11, 33, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	239, 115, 35, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
178, 6, 39, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	240, 116, 24, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
179, 7, 45, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	241, 116, 25, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
180, 8, 51, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	242, 116, 26, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
181, 41, 88, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	243, 116, 27, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
182, 36, 92, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	244, 116, 28, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
183, 37, 93, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	245, 116, 29, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
184, 38, 46, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	246, 117, 112, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
185, 42, 94, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	247, 117, 113, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
186, 43, 95, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	248, 117, 114, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
187, 44, 52, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	249, 117, 115, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
188, 47, 96, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	250, 117, 116, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075

Onde:
EL: Elemento;
NI: Nó Inicial;
NF: Nó Final;
E: Módulo de Elasticidade;
A: Área;
KM: Módulo Plástico;
HM: Módulo de Encruamento Cinemático;
SY: Tensão de cisalhamento;
DI: Deformação Inicial [%];

Restrição de Graus de Liberdade
Nó, GL1, GL2, GL3
92, 1, 1, 1
94, 1, 1, 1
96, 1, 1, 1
98, 1, 1, 1
100, 1, 1, 1
102, 1, 1, 1
104, 1, 1, 1
106, 1, 1, 1
108, 1, 1, 1
110, 1, 1, 1
117, 1, 0, 1

Leitura dos Valores Prescritos
Nó, Px, Py, Pz
92, 0.0, 0.0, 0.0
94, 0.0, 0.0, 0.0
96, 0.0, 0.0, 0.0
98, 0.0, 0.0, 0.0
100, 0.0, 0.0, 0.0
102, 0.0, 0.0, 0.0
104, 0.0, 0.0, 0.0
106, 0.0, 0.0, 0.0
108, 0.0, 0.0, 0.0
110, 0.0, 0.0, 0.0
117, 0.0, 0.0, 0.0

Nós com Carregamento Prescritos
Nó, Fx, Fy, Fz
117, 0.0, -0.1, 0.0

Aplicação de cargas assimétricas

Treliça 3D

Número de Elementos
252
Número de Nós
118

Número de Nós com Graus de Liberdade Prescritos
11
Número de Nós com Carregamentos Prescritos (Não Nulos)
2
Tolerância
0.00000001
Número de Passos de Carga
500
Freq. de impressão das posições nodais nos arquivos 'SAIDA.TXT' e 'NORMAL.TXT'
100
Nó a ser Listado no Arquivo 'RESULT.TXT'
111

Nó, Coord.X, Coord.Y, Coord.Z	Nó, Coord.X, Coord.Y, Coord.Z	Nó, Coord.X, Coord.Y, Coord.Z
1, -1.3307, 59.9948, -8.4018	40, -23.2156, 35.7378, -43.4086	79, 50.5968, 32.9946, -5.0038
2, -8.4018, 59.9948, -1.3307	41, -14.1732, 39.9796, -43.5864	80, 44.2976, 35.7378, -21.4884
3, -3.8619, 59.9948, 7.5794	42, -37.9984, 32.9946, -33.782	81, 48.5394, 27.2288, -24.5618
4, 6.0150, 59.9948, 6.0150	43, -39.624, 24.4856, -38.7858	82, 45.5676, 22.9616, -33.0962
5, 7.5794, 59.9948, -3.8619	44, -46.482, 19.2278, -33.782	83, 38.354, 27.2288, -38.5826
6, -16.6116, 55.6006, -18.2626	45, -49.1236, 24.4856, -25.6794	84, 34.1122, 35.7378, -35.4838
7, -19.6342, 51.0286, -26.6192	46, -43.8658, 32.9946, -25.6794	85, 37.084, 39.9796, -26.9494
8, -28.5496, 46.482, -26.924	47, -48.4632, 35.7378, -8.6614	86, 20.3962, 32.9946, -46.5582
9, -34.417, 46.482, -18.8214	48, -53.6956, 27.2288, -8.6614	87, 24.638, 24.4856, -49.657
10, -31.3944, 51.0286, -10.4394	49, -56.3372, 22.9616, 0.0	88, 17.7546, 19.2278, -54.6608
11, -22.5044, 55.6006, -10.16	50, -53.6956, 27.2288, 8.6614	89, 9.2456, 24.4856, -54.6608
12, -22.5044, 55.6006, 10.16	51, -48.4632, 35.7378, 8.6614	90, 10.8712, 32.9946, -49.657
13, -31.3944, 51.0286, 10.4394	52, -45.847, 39.9796, 0.0	91, -8.6614, 5.0038, -59.9948
14, -34.417, 46.482, 18.8214	53, -43.8404, 32.9946, 25.7048	92, -8.6614, -5.0038, -59.9948
15, -28.5496, 46.482, 26.924	54, -49.1236, 24.511, 25.6794	93, -42.2656, 5.0038, -43.4594
16, -19.6342, 51.0286, 26.6192	55, -46.5074, 19.2278, 33.7566	94, -42.2656, -5.0038, -43.4594
17, -16.6116, 55.6006, 18.2626	56, -39.624, 24.4602, 38.7858	95, -59.7408, 5.0038, -10.3124
18, 2.7178, 55.6006, 24.5364	57, -37.973, 32.9692, 33.8074	96, -59.7408, -5.0038, -10.3124
19, 0.2286, 51.0286, 33.0962	58, -23.2156, 35.7378, 43.4086	97, -54.3814, 5.0038, 26.7716
20, 7.2644, 46.482, 38.5572	59, -24.8412, 27.2288, 48.4124	98, -54.3814, -5.0038, 26.7716
21, 16.7894, 46.482, 35.4584	60, -17.399, 22.9616, 53.5686	99, -28.2702, 5.0038, 53.6194
22, 19.2532, 51.0286, 26.8986	61, -8.3566, 27.2288, 53.7464	100, -28.2702, -5.0038, 53.6194
23, 12.2174, 55.6006, 21.4376	62, -6.731, 35.7378, 48.768	101, 8.6614, 5.0038, 59.9948
24, 24.1808, 55.6006, 5.0038	63, -14.1732, 39.9796, 43.5864	102, 8.6614, -5.0038, 59.9948
25, 31.5468,51.0286,10.0076	64, 10.8712, 32.9946, 49.657	103, 42.2656, 5.0038, 43.4594
26, 38.9128, 46.482, 5.0038	65, 9.2456, 24.4856, 54.6608	104, 42.2656, -5.0038, 43.4594
27, 38.9128, 46.482, -5.0038	66, 17.7546, 19.2278, 54.6608	105, 59.7408, 5.0038, 10.3124
28, 31.5468, 51.0286, -10.0076	67, 24.638, 24.4856, 49.657	106, 59.7408, -5.0038, 10.3124
29, 24.1808, 55.6006, -5.0038	68, 20.3962, 32.9946, 46.5582	107, 54.3814, 5.0038, -26.7716
30, 12.2174, 55.6006, -21.4376	69, 34.1122, 35.7378, 35.4838	108, 54.3814, -5.0038, -26.7716
31, 19.2532, 51.0286, -26.8986	70, 38.354, 27.2288, 38.5826	109, 28.2702, 5.0038, -53.6194
32, 16.7894, 46.482, -35.4584	71, 45.5676, 22.9616, 33.0962	110, 28.2702, -5.0038, -53.6194
33, 7.2644, 46.482, -38.5572	72, 48.5394, 27.2288, 24.5618	111, 0.0000, 59.9948, 0.0000
34, 0.2286, 51.0286, -33.0962	73, 44.2976, 35.7378, 21.4884	112, 9.7476, 51.0391, 30.0000
35, 2.7178, 55.6006, -24.5364	74, 37.084, 39.9796, 26.9494	113, -25.5195, 51.0391, 18.5410
36, -6.731, 35.7378, -48.768	75, 50.5968, 32.9946, 5.0038	114, -25.5195, 51.0391, -18.5410
37, -8.3566, 27.2288, -53.7464	76, 54.8386, 24.4856, 8.1026	115, 9.7476, 51.0391, -30.0000
38, -17.399, 22.9616, -53.5686	77, 57.4802, 19.2278, 0.0	116, 31.5439, 51.0391, 0.0000
39, -24.8412, 27.2288, -48.4124	78, 54.8386, 24.4856, -8.1026	117, 0.0000, 5.0000, 0.0000
		118, -51.0817, 31.4748, 0.0000

EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]	EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]
1, 1, 2, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	63, 36, 37, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
2, 2, 3, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	64, 37, 38, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
3, 3, 4, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	65, 38, 39, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
4, 4, 5, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	66, 39, 40, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
5, 5, 1, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	67, 42, 43, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
6, 1, 11, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	68, 43, 44, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
7, 2, 17, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	69, 44, 45, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
8, 3, 23, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	70, 45, 46, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
9, 4, 29, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	71, 46, 42, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
10, 5, 35, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	72, 47, 48, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
11, 11, 6, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	73, 48, 49, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
12, 6, 7, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	74, 49, 50, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
13, 7, 8, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	75, 50, 51, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
14, 8, 9, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	76, 51, 52, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
15, 9, 10, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	77, 52, 47, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
16, 10, 11, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	78, 53, 54, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
17, 12, 13, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	79, 54, 55, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
18, 13, 14, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	80, 55, 56, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
19, 14, 15, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	81, 56, 57, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
20, 15, 16, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	82, 57, 53, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
21, 16, 17, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	83, 58, 59, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
22, 17, 12, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	84, 59, 60, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
23, 18, 19, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	85, 60, 61, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
24, 19, 20, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	86, 61, 62, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
25, 20, 21, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	87, 62, 63, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
26, 21, 22, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	88, 63, 58, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
27, 22, 23, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	89, 64, 65, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
28, 23, 18, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	90, 65, 66, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
29, 24, 25, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	91, 66, 67, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
30, 25, 26, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	92, 67, 68, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
31, 26, 27, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	93, 68, 64, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
32, 27, 28, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	94, 69, 70, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
33, 28, 29, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	95, 70, 71, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
34, 29, 24, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	96, 71, 72, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
35, 30, 31, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	97, 72, 73, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
36, 31, 32, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	98, 73, 74, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
37, 32, 33, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	99, 74, 69, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
38, 33, 34, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	100, 75, 76, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
39, 34, 35, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	101, 76, 77, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
40, 35, 30, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	102, 77, 78, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
41, 6, 34, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	103, 78, 79, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
42, 7, 40, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	104, 79, 75, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
43, 8, 46, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	105, 80, 81, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
44, 9, 52, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	106, 81, 82, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
45, 10, 12, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	107, 82, 83, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
46, 13, 51, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	108, 83, 84, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
47, 14, 57, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	109, 84, 85, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
48, 15, 63, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	110, 85, 80, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
49, 16, 18, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	111, 86, 87, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
50, 19, 62, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	112, 87, 88, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
51, 20, 68, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	113, 88, 89, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
52, 21, 74, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	114, 89, 90, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
53, 22, 24, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	115, 90, 86, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
54, 25, 73, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	116, 36, 89, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
55, 26, 79, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	117, 37, 91, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
56, 27, 85, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	118, 38, 93, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
57, 28, 30, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	119, 39, 42, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
58, 31, 84, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	120, 43, 93, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
59, 32, 90, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	121, 44, 95, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
60, 33, 41, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	122, 45, 47, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
61, 40, 41, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	123, 48, 95, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
62, 41, 36, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	124, 49, 97, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075

EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]	EL, NI, NF, E, Á, KM, HM, SY, DI [%]
125, 50, 53, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	189, 48, 97, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
126, 54, 97, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	190, 49, 57, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
127, 55, 99, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	191, 53, 98, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
128, 56, 58, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	192, 54, 99, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
129, 59, 99, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	193, 55, 63, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
130, 60, 101, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	194, 58, 100, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
131, 61, 64, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	195, 59, 101, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
132, 65, 101, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	196, 60, 68, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
133, 66, 103, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	197, 64, 102, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
134, 67, 69, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	198, 65, 103, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
135, 70, 103, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	199, 66, 74, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
136, 71, 105, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	200, 69, 104, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
137, 72, 75, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	201, 70, 105, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
138, 76, 105, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	202, 71, 79, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
139, 77, 107, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	203, 75, 106, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
140, 78, 80, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	204, 76, 107, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
141, 81, 107, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	205, 77, 85, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
142, 82, 109, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	206, 80, 108, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
143, 83, 86, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	207, 81, 109, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
144, 87, 109, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	208, 82, 90, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
145, 88, 91, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	209, 86, 110, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
146, 91, 92, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	210, 87, 91, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0
147, 93, 94, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	211, 111, 1, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
148, 95, 96, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	212, 111, 2, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
149, 97, 98, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	213, 111, 3, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
150, 99, 100, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	214, 111, 4, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
151, 101, 102, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	215, 111, 5, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
152, 103, 104, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	216, 112, 18, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
153, 105, 106, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	217, 112, 19, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
154, 107, 108, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	218, 112, 20, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
155, 109, 110, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075	219, 112, 21, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
156, 2, 22, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	220, 112, 22, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
157, 3, 28, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	221, 112, 23, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
158, 4, 34, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	222, 113, 13, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
159, 5, 10, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	223, 113, 14, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
160, 1, 16, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	224, 113, 15, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
161, 9, 17, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	225, 113, 16, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
162, 12, 50, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	226, 113, 17, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
163, 13, 56, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	227, 113, 12, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
164, 14, 62, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	228, 114, 6, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
165, 15, 23, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	229, 114, 7, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
166, 18, 61, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	230, 114, 8, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
167, 19, 67, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	231, 114, 9, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
168, 20, 73, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	232, 114, 10, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
169, 21, 29, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	233, 114, 11, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
170, 24, 72, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	234, 115, 30, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
171, 25, 78, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	235, 115, 31, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
172, 26, 84, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	236, 115, 32, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
173, 27, 35, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	237, 115, 33, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
174, 30, 83, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	238, 115, 34, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
175, 31, 89, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	239, 115, 35, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
176, 32, 36, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	240, 116, 24, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
177, 11, 33, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	241, 116, 25, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
178, 6, 39, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	242, 116, 26, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
179, 7, 45, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	243, 116, 27, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
180, 8, 51, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	244, 116, 28, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
181, 41, 88, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	245, 116, 29, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
182, 36, 92, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	246, 117, 118, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
183, 37, 93, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	247, 118, 47, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
184, 38, 46, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	248, 118, 48, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
185, 42, 94, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	249, 118, 49, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
186, 43, 95, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	250, 118, 50, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
187, 44, 52, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	251, 118, 51, 193.1d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075
188, 47, 96, 62.5d5, 0.44, 0, 0, 1.0d99, 0	252, 118, 52, 210.0d5, 0.35d-2, 0, 0, 1.0d99, -0.000075

Onde:
EL: Elemento;
NI: Nó Inicial;
NF: Nó Final;
E: Módulo de Elasticidade;
A: Área;
KM: Módulo Plástico;
HM: Módulo de Encruamento Cinemático;
SY: Tensão de cisalhamento;
DI: Deformação Inicial [%];

Restrição de Graus de Liberdade
Nó, GL1, GL2, GL3
92, 1, 1, 1
94, 1, 1, 1
96, 1, 1, 1
98, 1, 1, 1
100, 1, 1, 1
102, 1, 1, 1
104, 1, 1, 1
106, 1, 1, 1
108, 1, 1, 1
110, 1, 1, 1
117, 1, 0, 1

Leitura dos Valores Prescritos
Nó, Px, Py, Pz
92, 0.0, 0.0, 0.0
94, 0.0, 0.0, 0.0
96, 0.0, 0.0, 0.0
98, 0.0, 0.0, 0.0
100, 0.0, 0.0, 0.0
102, 0.0, 0.0, 0.0
104, 0.0, 0.0, 0.0
106, 0.0, 0.0, 0.0
108, 0.0, 0.0, 0.0
110, 0.0, 0.0, 0.0
117, 0.0, 0.0, 0.0

Nós com Carregamento Prescritos
Nó, Fx, Fy, Fz
117, 0.0, -0.06, 0.0
118, 0.0, 0.1, 0.0

C

ANÁLISE NUMÉRICA PELO *ANSYS®*

Foi também utilizado o programa computacional *ANSYS®* (MACROVISION CORPORATION, 1988-2003) para a análise numérica do sistema estrutural aqui proposto.

A simulação do carregamento no mezanino seguiu a mesma metodologia dos ensaios experimentais e da análise numérica descrita em 5.2, ou seja, a aplicação de carga foi executada por meio de elementos estruturais (cordoalhas) que fixavam-se às estruturas nodais (nós) e a um nó central que, por sua vez, era solicitado pelo macaco pantográfico.

Foram adotados dois tipos de elementos estruturais para análise numérica via *ANSYS®*: LINK 8 (elementos tipo 1) para as barras e LINK 10 (elementos tipo 2) para as cordoalhas. Os mesmos são apresentados na FIG. C.1.

Para as barras, foi adotado o módulo de elasticidade do alumínio E = 62.500 MPa (obtido em ensaios no LAEES – FIG. C.4) e área da seção transversal igual a 44 mm^2. Este ensaio seguiu as diretrizes da ASTM B 557M – 02a (200?) e ASTM E 8M – 04 (2003).

Para os elementos correspondentes às cordoalhas, foi adotado o módulo de elasticidade do aço inoxidável E = 193.100 MPa, área da seção A = 0,33 mm^2 e deformação inicial ε_{y0} = 0,02 (inclui erros de geometria e deformação inicial nos cabos).

O valor da deformação inicial de 75,4418.10^{-6} não foi processado pelo programa computacional, adotando assim o menor valor possível, sendo ε_{y0} = 0,02, por ser esta a menor deformação inicial aceita pelo programa.

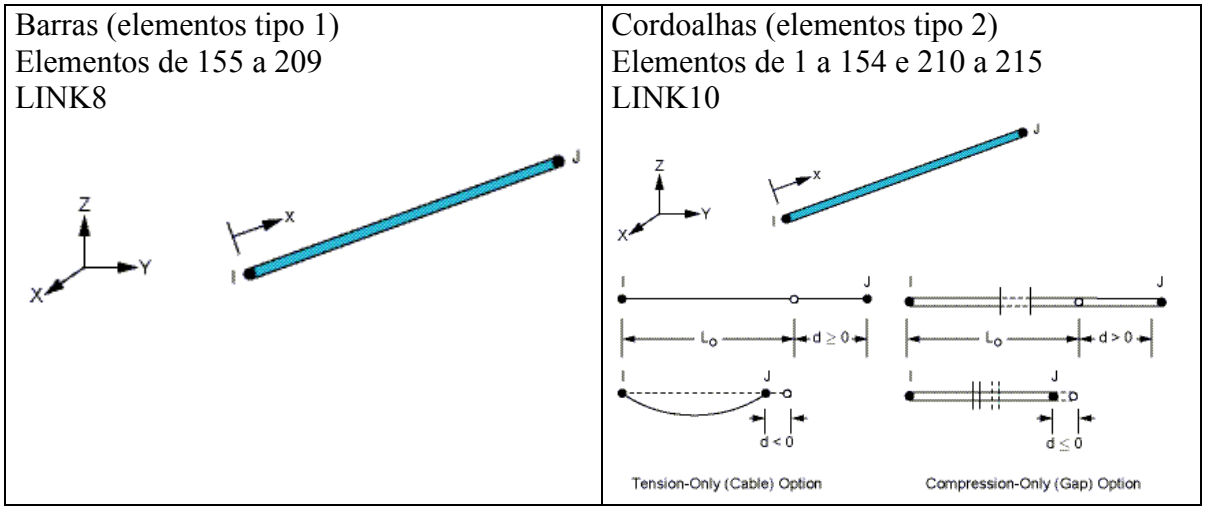


FIGURA C.1 – Tipos e numeração dos elementos estruturais (MACROVISION CORPORATION, 1988-2003).

As FIG. C.2 e FIG. C.3 apresentam a configuração deformada e a escala de cores das forças solicitantes nos elementos da estrutura.

Os elementos 112 a 117 correspondem às cordoalhas onde foram aplicadas as cargas de mesma intensidade que as do ensaio da análise experimental e numérica já apresentados, com resultante igual a 400 N.

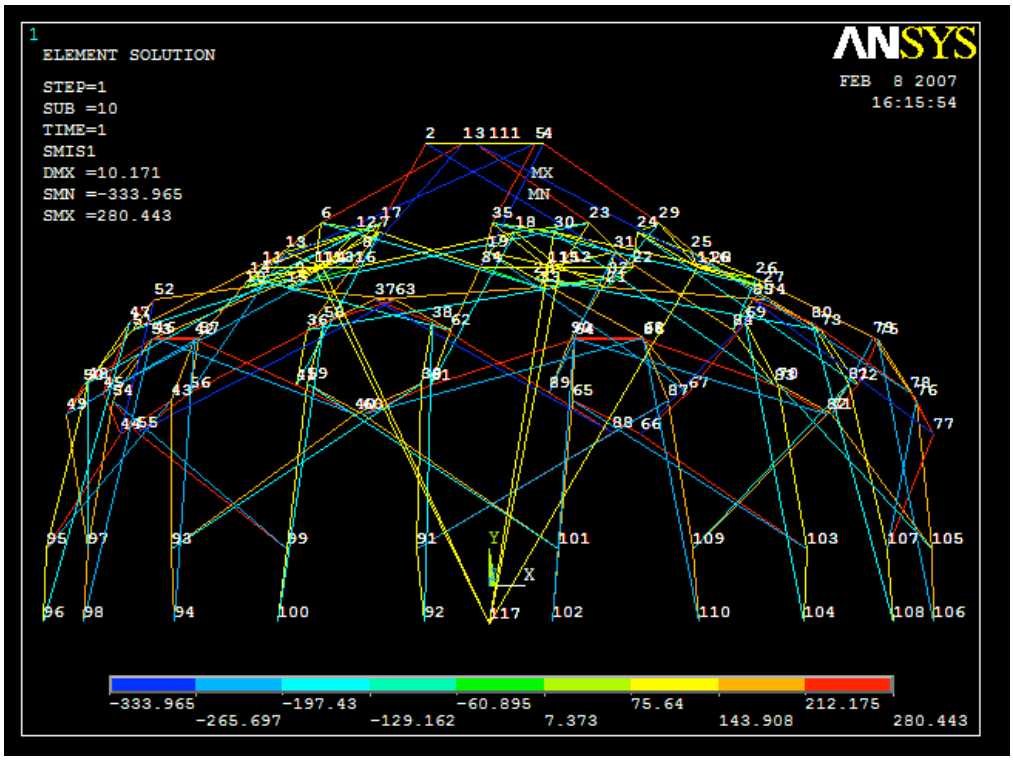


FIGURA C.2 – Vista lateral com os valores das forças das barras e cordoalhas.

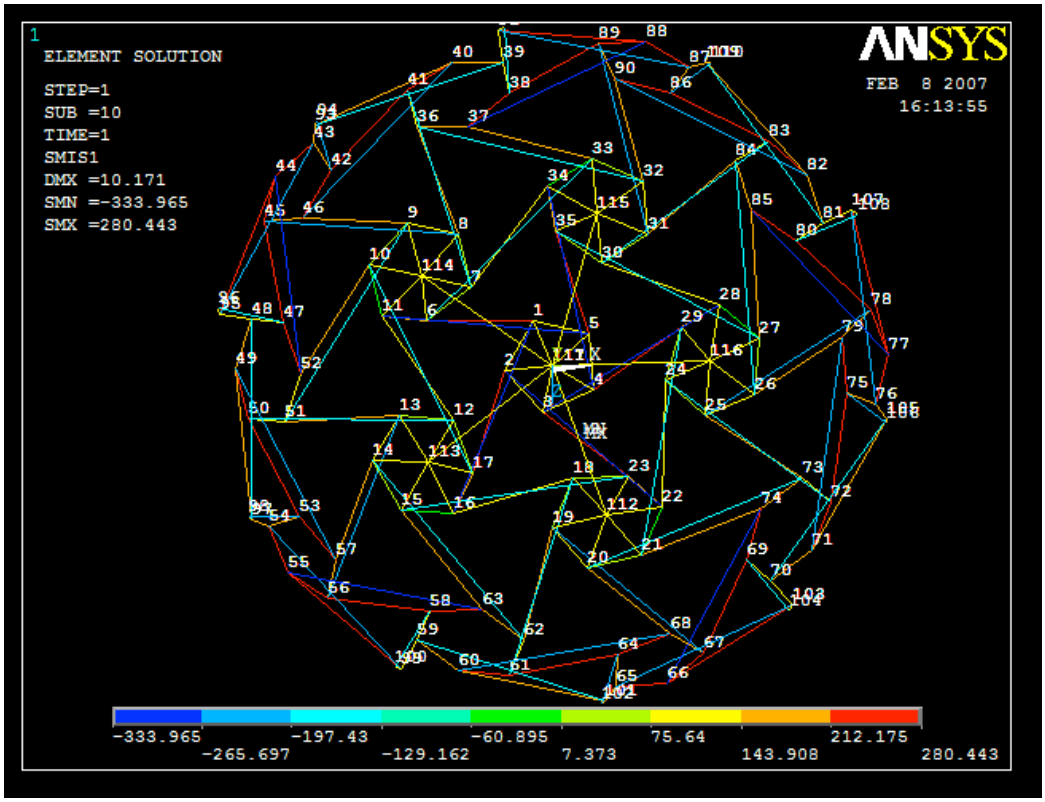


FIGURA C.3 – Vista superior com os valores das forças das barras e cordoalhas.

As barras e cordoalhas que apresentaram maiores esforços de compressão e tração, respectivamente, foram as do topo da cúpula. Algumas barras próximas à base da estrutura também apresentaram esforços de mesma magnitude que as barras do topo, o mesmo acontecendo com as respectivas cordoalhas.

É importante também observar que as barras dos apoios ficam submetidas à compressão com valores entre 265,697 N e 197,43 N, que são inferiores aos valores das barras anteriormente citadas, não sendo as barras mais solicitadas.

Apesar de haver aplicação de carga nas cordoalhas correspondentes aos elementos 112 a 117, os mesmos apresentaram baixo esforço à tração em relação às cordoalhas correspondentes aos elementos do topo da cúpula.

Ao se comparar os valores de compressão das barras obtidos na análise numérica via *ANSYS®* e via GRECO, observa-se que: os valores das forças de compressão das barras correspondentes ao topo da cúpula, obtidos na análise via GRECO, possuem valores semelhantes aos da análise numérica via *ANSYS®*. Quanto às barras de apoio da estrutura, tanto a análise via GRECO quanto via *ANSYS®* apresentaram valores de forças de compressão similares.

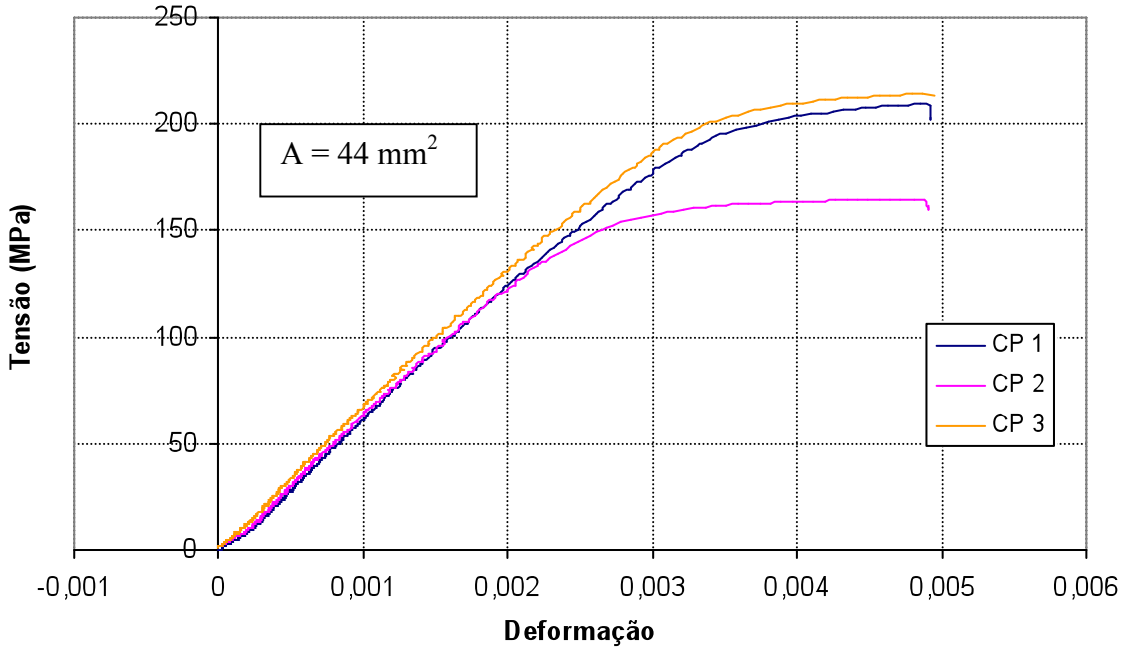


FIGURA C.4 – Gráfico tensão X deformação para os três corpos de prova (barras de alumínio), onde A é a área da seção transversal destes.

D

COORDENADAS ESFÉRICAS DA CÚPULA GEODÉSICA *TENSEGRITY*

Serão apresentadas, na TAB. D, as coordenadas esféricas da cúpula geodésica *Tensegrity* objeto de estudo deste trabalho.

TABELA D – Coordenadas esféricas da cúpula geodésica *Tensegrity*

NÓ	θ(graus)	φ(graus)	R(cm)	NÓ	θ(graus)	φ(graus)	R(cm)
1	198	8,07	60,60	56	314,39	66,17	60,60
2	270	8,07	60,60	57	311,64	57,02	60,60
3	342	8,07	60,60	58	331,83	53,71	60,83
4	54	8,07	60,60	59	332,82	63,14	60,83
5	126	8,07	60,60	60	342	67,82	60,83
6	222,32	23,95	60,83	61	351,18	63,14	60,83
7	216,41	31,72	60,83	62	352,17	53,71	60,83
8	226,68	40,16	60,83	63	342	48,90	60,83
9	241,32	40,16	60,83	64	12,36	57,02	60,60
10	251,59	31,72	60,83	65	9,61	66,17	60,60
11	245,68	23,95	60,83	66	18	71,51	60,60
12	294,32	23,95	60,83	67	26,39	66,17	60,60
13	288,41	31,72	60,83	68	23,64	57,02	60,60
14	298,68	40,16	60,83	69	43,83	53,71	60,83
15	313,32	40,16	60,83	70	44,82	63,14	60,83
16	323,59	31,72	60,83	71	54	67,82	60,83
17	317,68	23,95	60,83	72	63,18	63,14	60,83
18	6,32	23,95	60,83	76	64,17	53,71	60,83
19	0,41	31,72	60,83	74	54	48,90	60,83
20	10,68	40,16	60,83	75	84,36	57,02	60,60
21	25,32	40,16	60,83	76	81,61	66,17	60,60
22	35,59	31,72	60,83	77	90	71,51	60,60
23	29,68	23,95	60,83	78	98,39	66,17	60,60
24	78,32	23,95	60,83	79	95,64	57,02	60,60
25	72,41	31,72	60,83	80	115,83	53,71	60,83
26	82,68	40,16	60,83	81	116,82	63,14	60,83
27	97,32	40,16	60,83	82	126	67,82	60,83
28	107,59	31,72	60,83	83	135,18	63,14	60,83
29	101,68	23,95	60,83	84	136,17	53,71	60,83
30	150,32	23,95	60,83	85	126	48,90	60,83
31	144,41	31,72	60,83	86	156,36	57,02	60,60
32	154,68	40,16	60,83	87	153,61	66,17	60,60
33	169,32	40,16	60,83	88	162	71,51	60,60
34	179,59	31,72	60,83	89	170,39	66,17	60,60
35	173,68	23,95	60,83	90	167,64	57,02	60,60
36	198	67,82	60,83	91	188,21	85,29	60,83
37	198	48,90	60,83	92	188,21	94,71	60,83
38	208,17	53,71	60,83	93	224,21	85,29	60,83
39	198	48,90	60,83	94	224,21	94,71	60,83
40	187,83	53,71	60,83	95	260,21	85,29	60,83
41	188,82	63,14	60,83	96	260,21	94,71	60,83
42	228,36	57,02	60,60	97	296,21	85,29	60,83
43	225,61	66,17	60,60	98	296,21	94,71	60,83
44	234	71,51	60,60	99	332,21	85,29	60,83
45	242,39	66,17	60,60	100	332,21	94,71	60,83
46	239,64	57,02	60,60	101	8,21	85,29	60,83
47	259,93	53,71	60,83	102	8,21	94,71	60,83
48	260,82	63,14	60,83	103	44,21	85,29	60,83
49	270	67,82	60,83	104	44,21	94,71	60,83
50	279,18	63,14	60,83	105	80,21	85,29	60,83
51	280,17	53,71	60,83	106	80,21	94,71	60,83
52	270	48,90	60,83	107	116,21	85,29	60,83
53	300,36	57,02	60,60	108	116,21	94,71	60,83
54	297,61	66,17	60,60	109	152,21	85,29	60,83
55	306	71,51	60,60	110	152,21	94,71	60,83

E

OBTENÇÃO DAS COORDENADAS ESFÉRICAS

Neste anexo, são apresentados as formulações trigonométricas que permitiram a obtenção das coordenadas esféricas da Cúpula Geodésica *Tensegrity* objeto de estudo deste trabalho.

E.1 Sobre os parâmetros geométricos

Como mencionado no item 7.1.1, adotou-se o raio do icosaedro de freqüência dois igual a 60 cm e, para as arestas dos pentágonos e dos hexágonos do icosaedro de freqüência dois truncado, 10 cm de dimensão.

Desta forma, e como apresentado na FIG. 7.6, obteve-se o valor igual a 8,51 cm para o raio que circunscreve o pentágono, e 10 cm para o raio que circunscreve hexágono.

De posse destes valores e utilizando o Teorema de Pitágoras, foram obtidos: o raio da esfera que circunscreve os pentágonos (R_5 = 60,6 cm) e a esfera que circunscreve os hexágonos (R_6 = 60,83 cm).

Assim, tem-se os seguintes valores iniciais para se obter os ângulos verticais e horizontais dos pontos que caracterizam o icosaedro de freqüência dois truncado:

- r_5 = 8,51 cm
- r_6 = 10 cm
- R = 60 cm
- R_5 = 60,6 cm
- R_6 = 60,83 cm

Sendo r_5 e r_6 os raios das circunferências que circunscrevem os pentágonos e hexágonos, respectivamente, e R o raio da esfera que circunscreve o icosaedro de freqüência dois.

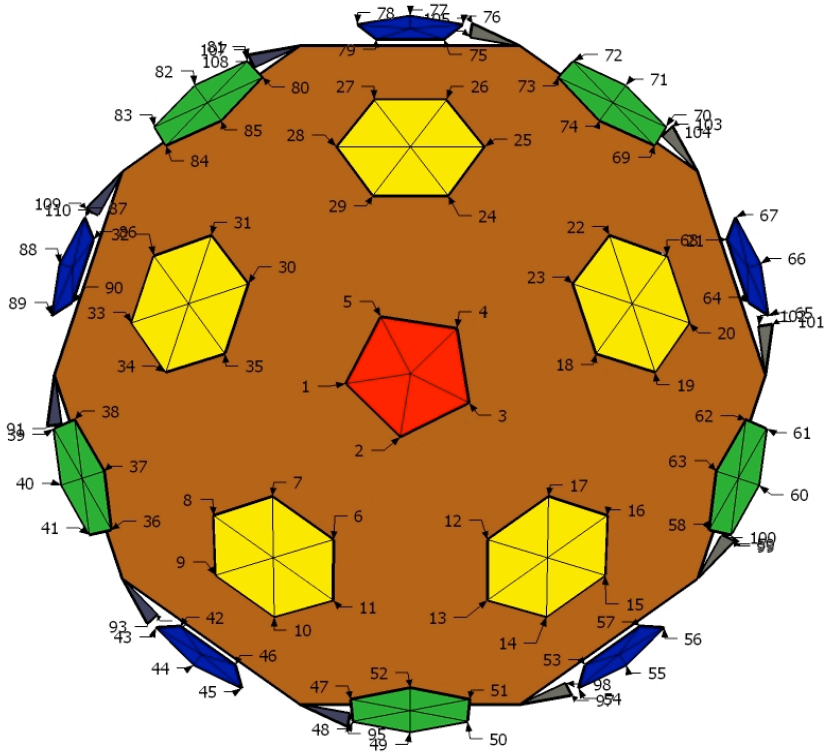


FIGURA E.1 – Nomenclatura dos pontos do icosaedro de freqüência dois truncado.

A seguir, serão apresentados três exemplos de obtenção dos ângulos verticais e horizontais dos vértices dos polígonos que caracterizam a Cúpula deste trabalho. A nomenclatura adotada para os pontos é apresentada na FIG. E.1.

E.2 Ângulos dos pontos 1 a 5

E.2.1 Ângulos verticais

Todos os ângulos verticais (φ) dos vértices do pentágono localizado no topo da Cúpula serão iguais a 8,07º.

Ao se observar a FIG. E.2, verifica-se que o pentágono forma um plano paralelo ao plano horizontal de projeção, o que caracteriza a igualdade dos valores dos ângulos de seus vértices.

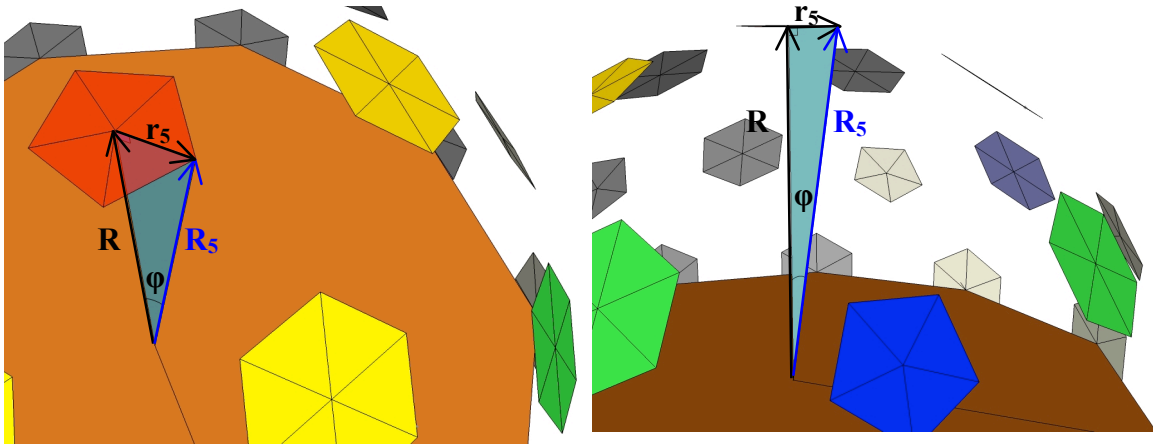


FIGURA E.2 – Ângulo vertical φ de um vértice do pentágono do topo da Cúpula.

Para se obter o valor de φ, utilizou-se a equação $\varphi = arcsen\frac{r_5}{R_5}$, sendo que os valores de R_5 e r_5 já foram apresentados anteriormente.

E.2.2 Ângulos horizontais

Como mencionado no item 6.1.1, os polígonos são rotacionados para que suas arestas formem um ângulo de 90º com os plano que unem dois vértices do icosaedro de freqüência dois (FIG. E.3).

Assim, é possível obter, inicialmente, o ângulo horizontal θ` (FIG. E.3) e somar ao ângulo horizontal do nó F (TAB. 6.1), aqui denominado de θ_F, para se obter o valor de θ do vértice 4 do pentágono do topo da Cúpula (FIG. E.3).

O valor de θ` é igual a 36º, ou seja, é a metade do ângulo central do pentágono. Para se obter os ângulos horizontais dos demais vértices, basta somar ao primeiro angulo θ o valor de 72º (ou seja, o valor do ângulo central do pentágono).

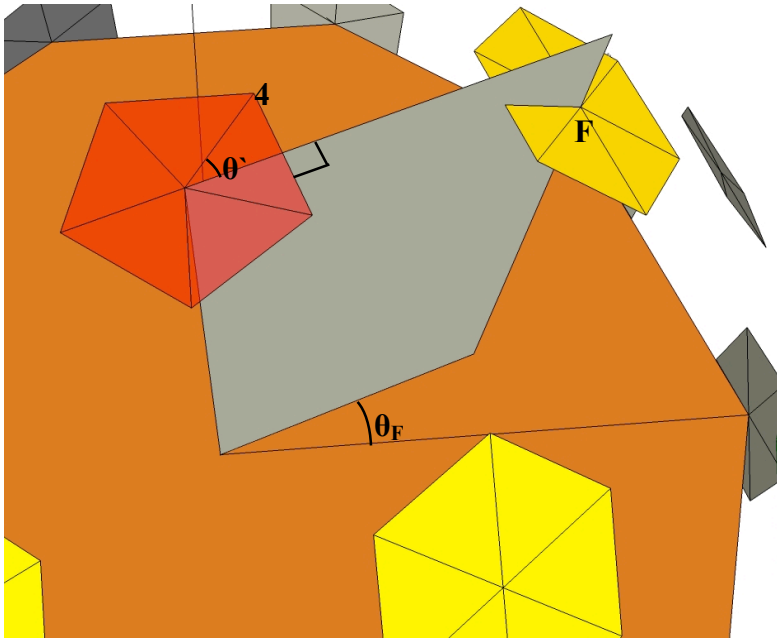


FIGURA E.3 – Ângulo horizontal θ de um vértice do pentágono do topo da Cúpula.

E.3 Ângulos do vértice 23

E.3.1 Ângulo vertical

Para se obter o valor do ângulo vertical deste ponto, é necessário obter, inicialmente, sua coordenada cartesiana Z (FIG. E.4a). Para tal, foi necessário somar o valor da coordenada cartesiana Z do ponto F, aqui denominado Z_F, com o valor de Z` (FIG. E.4b).

O valor de Z_F é obtido por meio da equação $Z_F = R\cos\varphi_F$, onde φ_F é o ângulo vertical do ponto F, obtido na TAB. 6.1. Ou seja, Z_F é igual a 51,04 cm.

Para se obter o valor de *Z`*, utilizou-se o triângulo apresentado na FIG. E.4b. O valor de *r* é obtido por meio da equação $r = \sqrt{r_6^2 - (r_6/2)^2}$, e é igual a 8,66 cm. Substituindo-se o valor de *r* na equação $Z^{``} = r \cdot sen\varphi_F$, obtém-se um valor igual a 4,55 cm. Somando-se Z` a ZF, tem-se a coordenada cartesiana do vértice 23, *Z*, igual a 55,59 cm. De posse deste resultado, substitui-se este valor na equação $\varphi = \arccos\frac{Z}{R_6}$, obtendo-se o valor do ângulo vertica φ do vértice 23 igual a 23,95º. Este ângulo se repete para os vértices 6, 7, 12, 17, 18, 4, 29, 30 e 35, pois todos estes possuem a mesma coordenada cartesiana *Z*.

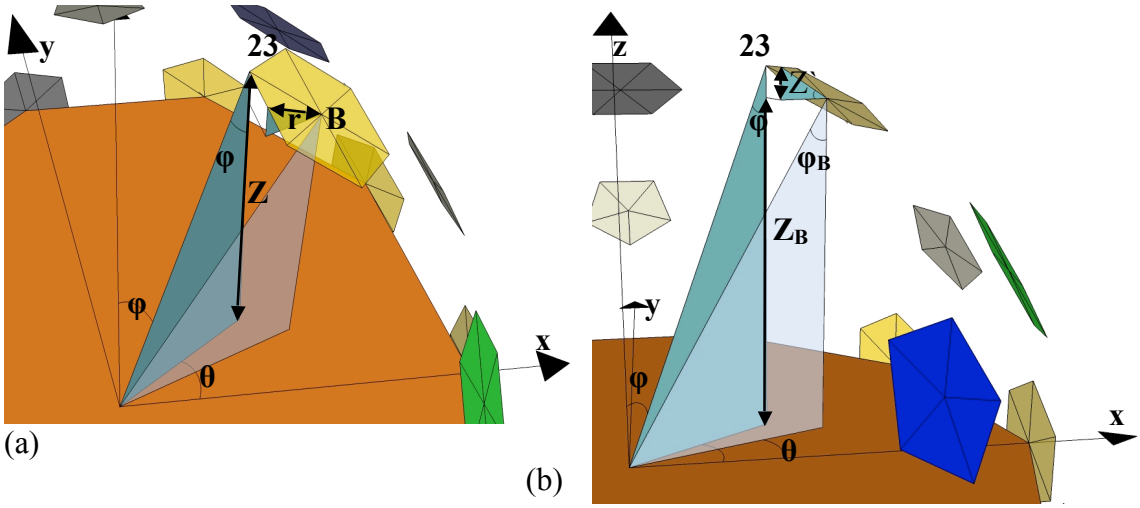


FIGURA E.4 – Ângulo vertical φ do vértice 23: a) coordenada cartesiana *Z*; b) coordenadas cartezianas Z_B e *Z`*.

E.3.2 Ângulo horizontal

Para se obter o valor do ângulo horizontal deste ponto, é necessário, inicialmente, encontrar o valor de sua coordenada cartesiana *X* (FIG. E.5). Para tal, utilizou-se a equação $X = Z \cdot tg\varphi$, sendo que os valores da coordenada cartesiana *Z* e o ângulo vertical φ já foram obtidos o item anterior. O valor de *X* para este vértice é igual a 24,69 cm.

Após a determinação da coordenada cartesiana X, obteve-se o valor do ângulo horizontal θ` (FIG. E.5) por meio da equação $\theta` = arcsen\frac{r_6/2}{X}$ e seu valor é igual a 11,68º.

De posse deste dado, determina-se o valor do ângulo horizontal θ somando-se o ângulo vertical do vértice F (TAB. 7.1), denominado θ_F, ao ângulo θ`. O valor encontrado é igual a 29,68º.

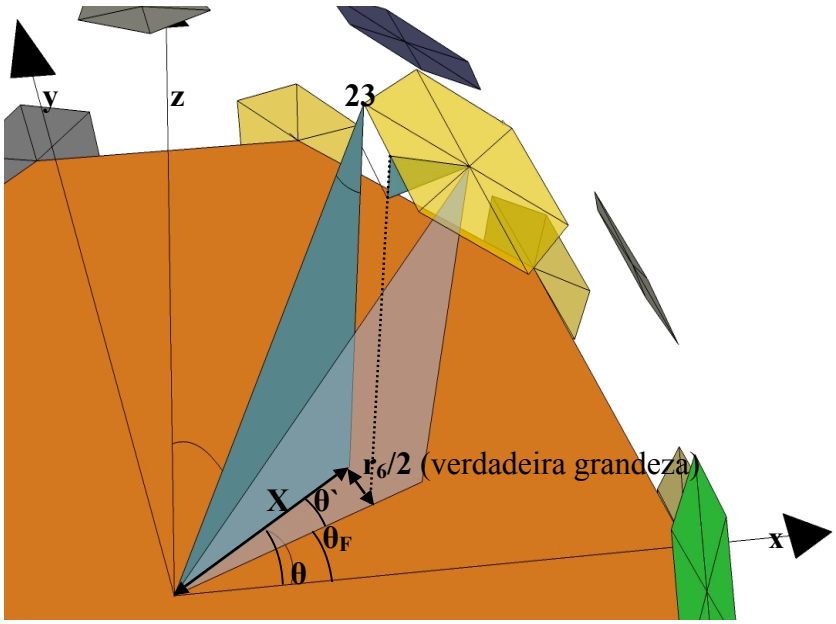


FIGURA E.5 – Ângulo horizontal θ do vértice 23.

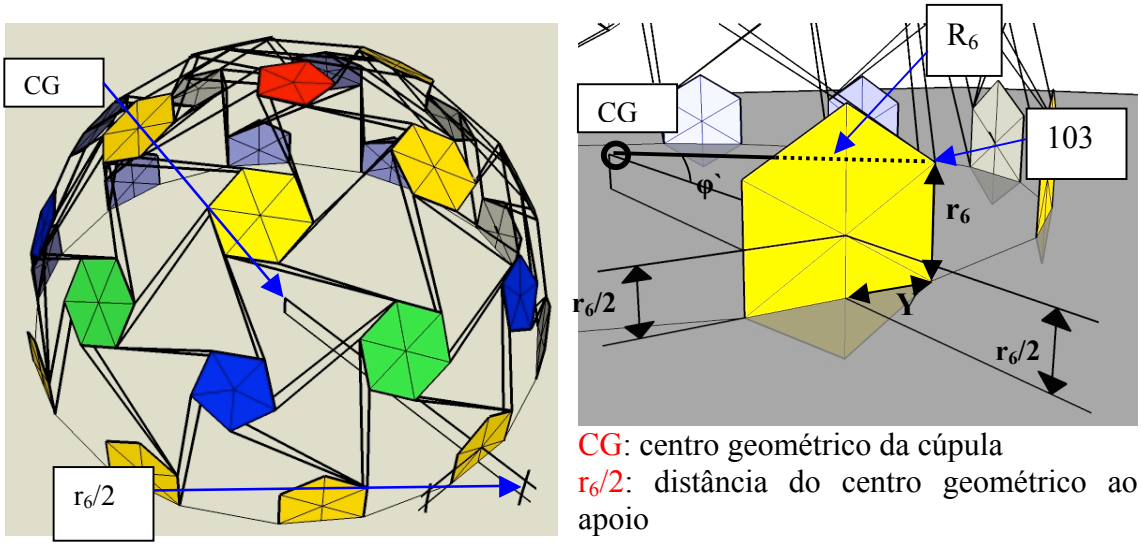
Para se obter os demais valores das coordenadas horizontais dos vértices 6, 17, 29 e 35, basta somar o valor da coordenada horizontal θ anteriormente determinada pelas coordenadas horizontais dos vértices D, E, B, e C, apresentados na TAB. 7.1 e, para os ângulos horizontais dos vértices 7, 12, 18, 24 e 30, subtrai-se o mesmo valor de θ aos valores dos ângulos horizontais dos vértices D, E, B, e C (TAB. 7.1).

E.4 Ângulos do vértice 103

E.4.1 Ângulo vertical

Para se determinar o ângulo vertical φ do vértice 103 (que é igual a 85,29º), subtraiu-se 90º ao valor do ângulo denominado φ`, que foi obtido utilizando-se a equação $\varphi` = arcsen \frac{r_6/2}{R_6}$ (FIG. E.5), sendo igual a 4,71º. O mesmo pode ser feito para os vértices 91, 93, 95, 97, 99, 101, 105, 107 e 109.

Para os vértices 92, 94, 96, 98, 100, 102, 104, 106, 108 e 110, basta somar o valor de φ a 90º.



CG: centro geométrico da cúpula
$r_6/2$: distância do centro geométrico ao apoio

FIGURA E.6 – Ângulos vertical e horizontal do vértice 103.

E.4.2 Ângulo horizontal

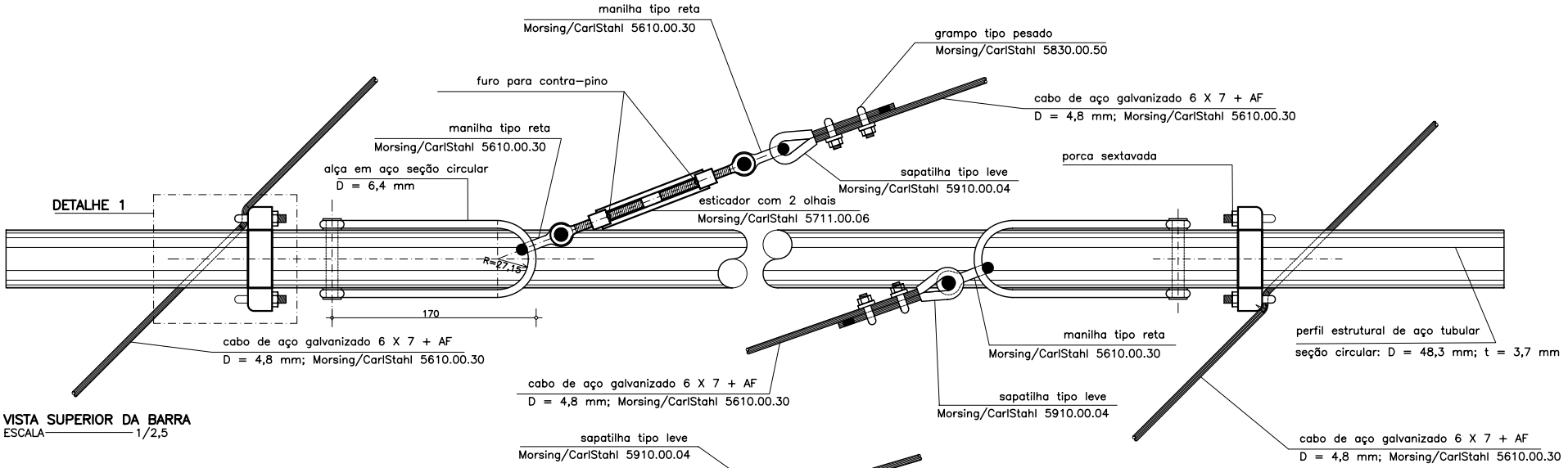
O valor de ângulo horizontal θ para o vértice 103 é igual a 44,21º, e foi obtido ao se somar o valor do ângulo horizontal θ` ao valor do ângulo horizontal do vértice $Y$ (TAB. 6.1) do icosaedro de freqüência dois. O ângulo $\theta$` é igual a 8,21º e foi obtido utilizando-se a equação $\theta` = arctg \frac{Y_{103}}{R}$, onde Y_{103} é a coordenada cartesiana Y do vértice 103.

Esta coordenada foi determinada ao se utilizar a equação $Y_{103} = \sqrt{r_6^2 - (r_6/2)^2}$ e seu valor é igual a 8,66 cm.

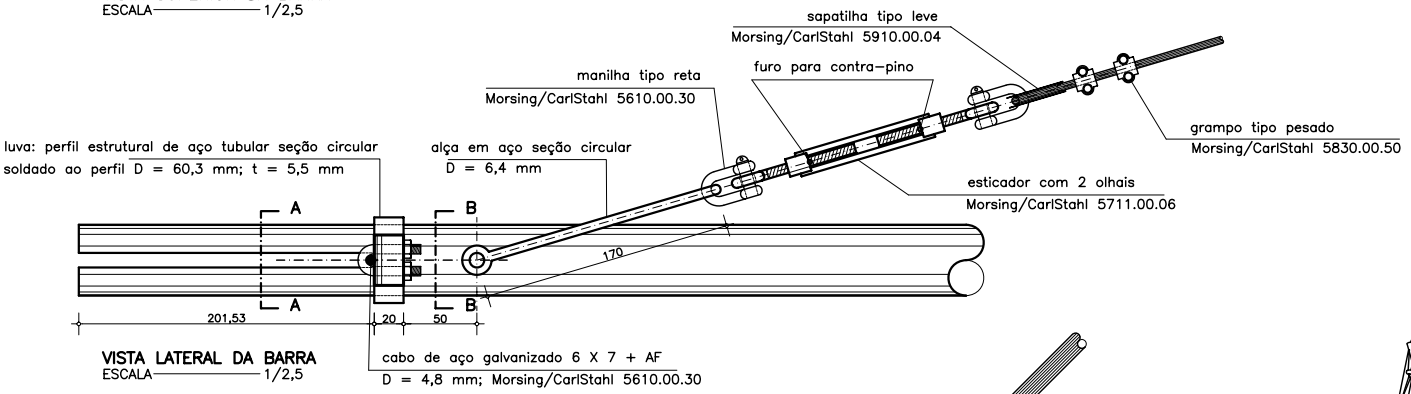
O valor de ângulo horizontal θ para o vértice 103 é igual ao do vértice 104 e, para determinar os ângulos horizontais dos vértices 91-92, 93-94, 95-96, 97-98, 99-100, 101-102, 105-106, 107-108 e 109-110, basta somar o θ` anteriormente obtido aos ângulos dos vértices S, T, U, V, W, X, Z, Q e R, respectivamente, sendo que seus valores são apresentados na TAB. 7.1.

F

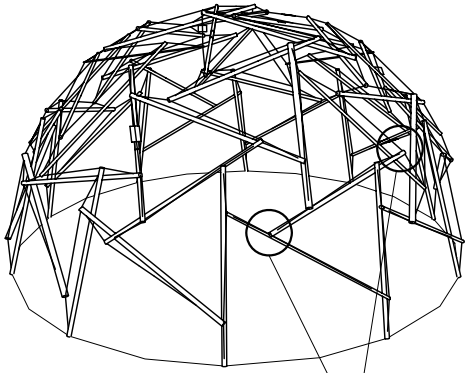
DETALHAMENTO



VISTA SUPERIOR DA BARRA
ESCALA 1/2,5

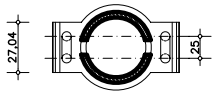


VISTA LATERAL DA BARRA
ESCALA 1/2,5

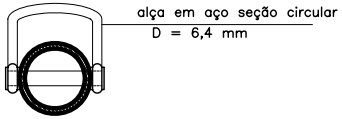


PERSPECTIVA
SEM ESCALA

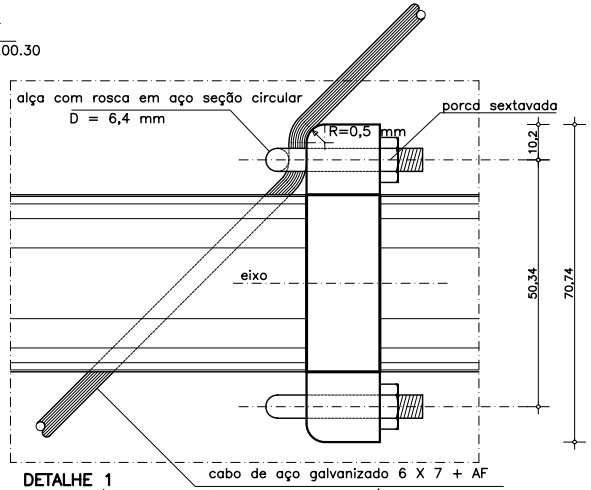
posição dos detalhes



SEÇÃO AA
ESCALA 1/2,5



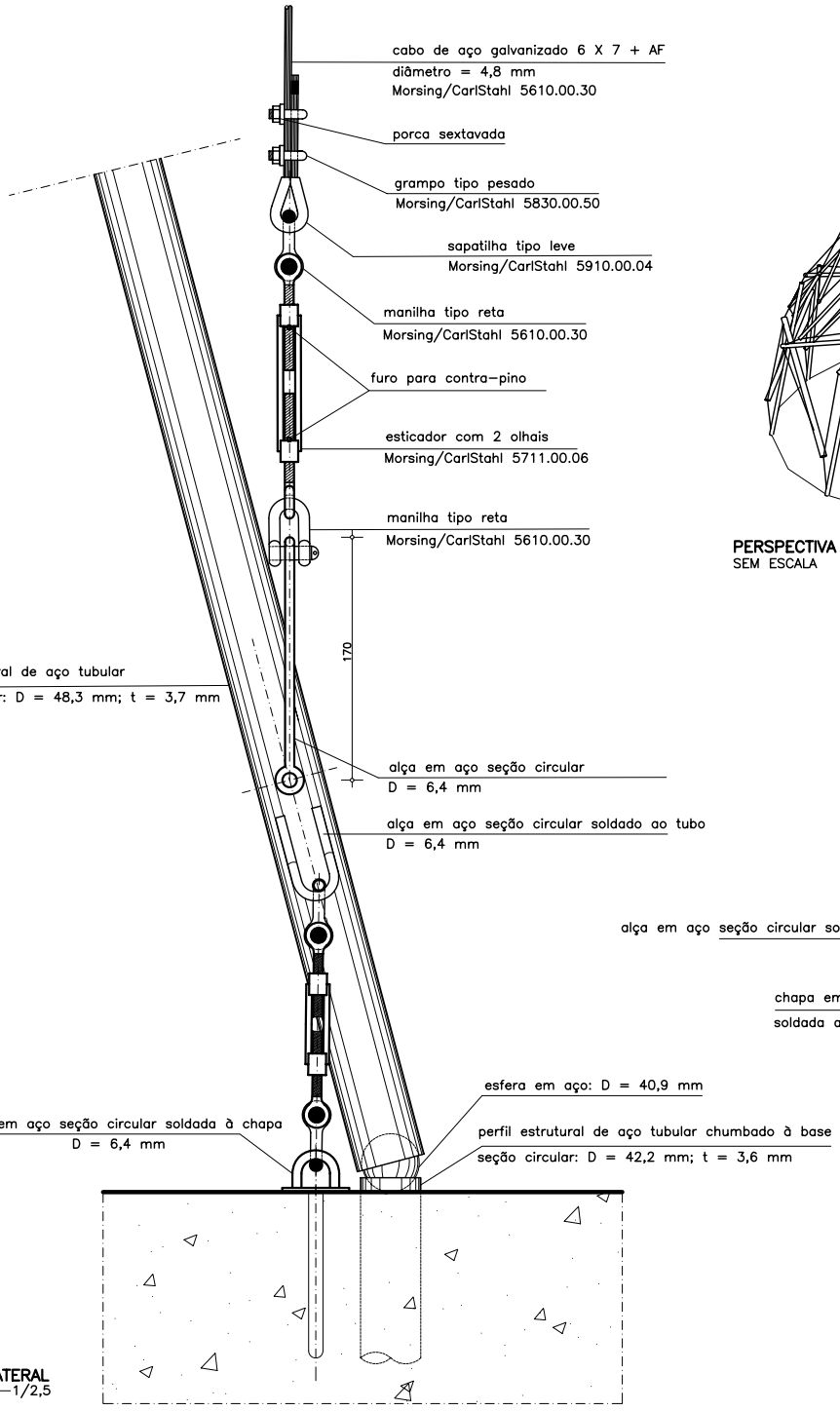
SEÇÃO BB
ESCALA 1/2,5



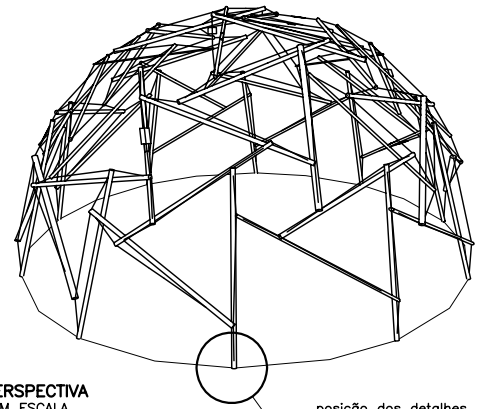
DETALHE 1
ESCALA 1/1

Obs.: cotas em mm

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – DEP. DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS	
TESE DE DOUTORADO: CÚPULA GEODÉSICA TENSEGRITY METÁLICA – ANEXO F	
AUTOR Paulo Gustavo von Krüger	PRANCHA 1/2
ORIENTADORES Francisco Carlos Rodrigues e Luís Eustáquio Moreira	



VISTA LATERAL
ESCALA —— 1/2,5



PERSPECTIVA
SEM ESCALA

SEÇÃO DO PERFIL/VISTA FRONTAL
ESCALA —— 1/2,5

Obs.: cotas em mm

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – DEP. DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

TESE DE DOUTORADO: CÚPULA GEODÉSICA TENSEGRITY METÁLICA – ANEXO F

AUTOR
Paulo Gustavo von Krüger

ORIENTADORES
Francisco Carlos Rodrigues e Luís Eustáquio Moreira

PRANCHA
2/2