

Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto  
Departamento de Engenharia Civil  
PROPEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

**ESTRUTURAS GEODÉSICAS:**  
**ESTUDOS RETROSPECTIVOS E**  
**PROPOSTA PARA UM ESPAÇO**  
**DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL.**

**Autor: João Antônio Valle Diniz, arquiteto**

**Orientador: Ernani Carlos de Araújo, prof. Dr.**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação do  
Departamento de Engenharia  
Civil da Escola de Minas da  
Universidade Federal de Ouro  
Preto, como parte integrante  
dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre em  
Engenharia Civil, área de  
concentração: Construção  
Metálica

**Ouro Preto, Agosto 2006.**

**Ficha Catalográfica:**

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for a catalog card. It occupies the lower half of the page.

Dissertação defendida em 31 de agosto de 2006 e aprovada pela banca  
examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Ernani Carlos de Araújo  
UFOP / Universidade Federal de Ouro Preto.

Prof. Dr. Geraldo Donizetti  
UFOP / Universidade Federal de Ouro Preto.

Prof. Dr. Joel Campolina  
UFMG / Universidade Federal de Minas Gerais.

Aos meus pais, Lúcia e Ricardo

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os que me ajudaram e estimularam no desenvolvimento deste trabalho, e em especial aos que estiveram próximos:

Ao orientador Ernani Carlos de Araújo pelo incentivo, inspiração e interatividade nas diversas etapas do trabalho.

Ao engenheiro Antônio Carlos Barbosa Vieira, o Calé, pela paciência e empenho nas discussões das questões estruturais e pelo auxílio no desenvolvimento da modelagem e análises estruturais computacionais.

À CSD, Superintendência de Desenvolvimento e Aplicação do Aço da Usiminas/Cosipa através de seu arquiteto superintendente Pedrosvaldo Caram Santos e do arquiteto Ascanio Merrighi por disponibilizarem recursos para a consultoria técnica na área da análise estrutural computacional.

Ao engenheiro Marcello Cláudio Teixeira pela ajuda nos trabalhos de análise estrutural.

Ao Antonio Mendes pela execução dos protótipos metálicos e o auxílio na avaliação prática da construção e montagem de estruturas a partir deles.

À Clarissa Bastos e ao João Pedro Torres pelo auxílio nos desenhos e modelagem arquitetônica em computador do projeto proposto nesta dissertação.

Aos colegas professores da FUMEC, Álvaro Veveco Hardy com saudades, Adriana Tonani Mazzeiro, Bruno Santa Cecília e Porfírio Valladares pelo valioso incentivo e auxílio acadêmico.

Ao Daniel d'Olivier pelo apoio logístico em Ouro Preto.

Ao Alexandre Brasil, meu colega de mestrado, pela companhia nos estudos e pelos diálogos mutidisciplinares durante o curso.

E a Ângela, Clara, Isabel e João Marcelo pela presença, incentivo e carinho constantes.

# SUMÁRIO

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

## RESUMO

## ABSTRACT

<b>Capítulo 1 – INTRODUÇÃO</b>	20
1.1 – Aproximações Conceituais	20
1.2 – Objetivo do Trabalho	22
1.3 – Estrutura do Trabalho	23
1.4 – Revisão Bibliográfica	24
<b>Capítulo 2 – MATRIZES NATURAIS E GEOMÉTRICAS</b>	32
2.1 – A Geodésica na Natureza e nas Construções	32
2.1.1 – O conceito de Freqüência nas Geodésicas	35
2.2 – Sistemas Geométricos de Ordenação	38
2.2.1 – O Triângulo Como Módulo Básico	38
2.2.2 – Os Sólidos Clássicos	41
2.2.2.1 – Os Sólidos Platônicos	41
2.2.2.2 – Os Sólidos de Arquimedes	43

<b>Capítulos 3 – A GEODÉSICA COMO SISTEMA CONSTRUTIVO</b>	47
3.1 – Cúpulas Históricas	47
3.2 – A contribuição de Buckminster Fuller	50
3.3 – Componentes do Sistema Construtivo	54
3.3.1 – Os Nós	54
3.3.2 – As Barras	63
3.3.3 – As Coberturas em ETFE	64
<b>Capítulo 4 – DUAS ESTRUTURAS GEODÉSICAS NOTÁVEIS</b>	66
4.1 – Biosfera, Pavilhão Expo Montreal 1967	67
4.2 – Éden Project	75
4.2.1 – Descrição do Éden Project	75
4.2.2 – Geometria e Conceito Estrutural	78
4.2.3 – Componentes do Sistema Construtivo	84
4.2.3.1 – O Nó de Conexão	84
4.2.3.2 – Vigas Superiores	86
4.2.3.3 – As Vigas Inferiores e as Diagonais	86
4.2.3.4 – Os Arcos	87
4.2.3.5 – Os Suportes	88
4.2.3.6 – Portas e Venezianas	89
4.2.3.7 – Fabricação	91
4.2.3.8 – Revestimento	92
4.2.3.9 – Construção	94
4.2.3.10 – Ficha Técnica do Éden Project	95

<b>Capítulo 5 – SOFTWARES DE MODELAGEM ARQUITETÔNICA E AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS GEODÉSICAS UTILIZADOS NESTE ESTUDO.</b>	97
5.1 – Softwares para o Projeto Arquitetônico	97
5.2 – O programa AnSys: Modelagem, Análise Estrutural e Pré-Dimensionamento	100
<b>Capítulo 6 – PROPOSIÇÃO PROJETUAL:</b>	
<b>as UMEAs: Unidades Moveis de Educação Ambiental</b>	103
6.1– Programa Arquitetônico e Características Espaciais	104
6.2 – Prospecções Experimentais	107
6,3 – Componentes do Sistema Construtivo	110
6.3.1 – Os Nós Tri-Ortogonais	111
6.4 – Avaliações Estruturais	114
6.4.1 – Modelagem e Triangulação	114
6.4.2 – Definição das Barras	119
6.4.3 – Carregamentos	121
6.4.4 – Resultados	122
6.4.5 – Discretização do Nó	128
<b>Capítulo 7 – CONCLUSÕES</b>	134
<b>Capítulo 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	138

## **LISTA DE FIGURAS**

- Figura 1 – Argumentações de Fuller sobre a teoria do Tetraedro.
- Figura 2 – Imagem de Drop City.
- Figura 3 – Desenhos de patente por Fuller.
- Figura 4 – Triangulação de Freqüência 2.
- Figura 5 – Triangulação de Freqüência 3.
- Figura 6 – Triangulação de Freqüência 6.
- Figura 7 – Triangulação de Freqüência 6 projetada sobre as faces de uma esfera.
- Figura 8 – Padrões mais complexos de divisão de faces de uma esfera.
- Figura 9 – Padrões mais complexos de divisão de faces de uma esfera.
- Figura 10 – Padrões mais complexos de divisão de faces de uma esfera.
- Figura 11 – Triangulação de camada dupla e a formação de uma cúpula.
- Figura 12 – Tração e Compressão nas Estruturas Geodésicas
- Figura 13 – A casa Farnsworth de Mies van Der Rohe
- Figura 14 – O Domus de Buckminster Fuller
- Figura 15 – Polígono côncavo e convexo.
- Figura 16 – Os Sólidos Platônicos,
- Figura 17 – Os Sólidos de Arquimedes.
- Figura 18 – Os Poliedros trucados.
- Figura 19 – A Tumba de Atreus.
- Figura 20 – Vista Interna da Tumba de Atreus
- Figura 21 – Vista do Panteon de Adriano
- Figura 22 – A construção da Cúpula do Planetário Zeiss em Jena, na Alemanha.

Figura 23 – Buckminster Fuller e suas publicações.

Figura 24 – A Casa Dimaxyon

Figura 25 – O Banheiro Dimaxyon

Figura 26 – Dimaxyon Car.

Figura 27 – A grande utopia do Domus de Nova York.

Figura 28 – Nós da industria Mero.

Figura 29 – O Sistema de Nós Mero Ball Node.

Figura 30 – O Sistema de Nós Mero Ball Node.

Figura 31 – O Sistema de Nós Mero Ball Node.

Figura 32 – O Sistema de Nós Mero Bowl Node NK.

Figura 33 – O Sistema de Nós Mero Bowl Node NK.

Figura 34 – O Sistema de Nós Mero Bowl Node NK.

Figura 35 – O Sistema de Nós Mero Cilíndricos ZK.

Figura 36 – O Sistema de Nós Mero Cilíndricos ZK.

Figura 37 – O Sistema de Nós Mero Cilíndricos ZK.

Figura 38 – O Sistema de Nós Disk Node TK.

Figura 39 – O Sistema de Nós Disk Node TK.

Figura 40 – O Sistema de Nós Disk Node TK.

Figura 41 – O Sistema de Nós em Bloco BK.

Figura 42 – O Sistema de Nós em Bloco BK.

Figura 43 – O Sistema de Nós em Bloco BK.

Figura 44 – O Sistema de Nós Mailand.

Figura 45 – O Sistema de Nós em Bloco BK.

Figura 46 – O Sistema de Nós Triodetic.

Figura 47 – O Sistema de Nós UniStrut.

Figura 48 – Nós diversos usados em estruturas espaciais.

Figura 49 – O efeito Dimpling e o efeito de Rotação.

Figura 50 – Vista da Biosfera na Ilha de Santa Helena em Montreal.

Figura 51 – O modelo estrutural da Biosfera e seus padrões.

Figura 52 – Os padrões triangulares externos e hexagonais internos.

Figura 53 – Estrutura da Biosfera com padrões triangulares.

Figura 54 – Estrutura da Biosfera com padrões triangulares.

Figura 55 – Cartão postal da Expo 67 em Montreal mostrando a Biosfera

Figura 56 – Biosfera com a pele de fechamento removida

Figura 57 – Vista da Biosfera com a pele de fechamento removida

Figura 58 – Nova entrada e espelho d'água executadas na restauração do pavilhão.

Figura 59 – Vista da pérgola metálica.

Figura 60 – Vista da pérgola metálica.

Figura 61 – Vista desde do nível superior e da passarela em vidro .

Figura 62 – Vista desde do nível superior e da passarela em vidro .

Figura 63 – Vista da tela metálica de sombreamento.

Figura 64 – Vista do nível superior, ao longe o centro de Montreal.

Figura 65 – Nível superior com beiral de sombreamento e áreas de exposição.

Figura 66 – Detalhes das ligações do Domus.

Figura 67 – Detalhes das ligações do Domus.

Figura 68 – Vista Geral do Éden Project.

Figura 69 – Vista Geral do modelo computadorizado.

Figura 70 – Fig.70, Planta Geral do Éden Project.

Figura 71 – O primeiro modelo estrutural.

Figura 72 – A configuração estrutural adotada.

Figura 73 – Matrizes geométricas para a cúpula.

Figura 74 – O Sistema Hex-Net.

Figura 75 – A estrutura Hex-Tri-Hex.

Figura 76 – Vista externa da estrutura Hex-Tri-Hex.

Figura 77 – Vista interna da estrutura Hex-Tri-Hex.

Figura 78 – O interior da estrutura Hex-Tri-Hex.

Figura 79 – A montagem da estrutura Hex-Tri-Hex.

Figura 80 – Os nós das vigas superiores.

Figura 81 – Detalhe da viga superior e seção do nó.

Figura 82 – Detalhe do nó da viga em tubo inferior e diagonais.

Figura 83 – Vista do arco de conexão dos Domus.

Figura 84 – Vista do arco de conexão dos Domus.

Figura 85 – Vista do sistema de suportes.

Figura 86 – Corte esquemático do sistema de ventilação.

Figura 87 – Vista do sistema superior de ventilação.

Figura 88 – Venezianas de ventilação e aquecedores.

Figura 89 – Venezianas de ventilação e aquecedores.

Figura 90 – Os travesseiros de ETFE instalados.

Figura 91 – Os travesseiros de ETFE instalados.

Figura 92 – O sistema de insuflamento de ar.

Figura 93 – A cobertura realizada em painéis de ETFE.

Figura 94 – A cobertura realizada em painéis de ETFE.

Figura 95 – Eden Project em construção.

Figura 96 – Os alpinistas fazendo a manutenção da cúpula.

Figura 97 – Tela do programa WinDome

Figura 98 – Modelagem em 3d produzidas pelo programa Windome

Figura 99 – Tela do Autocad com a modelagem, produzidas pelo programa Windome

Figura 100 – Tela do programa CadreGeo

Figura 101 – Material de divulgação do programa AnSys

Figura 102 – Planta Cortes da UMEA

Figura 103 – Aspectos ambientais do projeto

Figura 104 – Simulação de implantação da UMEA junto ao Parque Municipal, em BH.

Figura 105 – Simulação de implantação da UMEA junto ao Parque Municipal em BH.

Figura 106 – Simulação de implantação da UMEA na Estrada Real, M.G.

Figura 107 – A dobradiça tradicional, duas placas giram em torno de um eixo.

Figura 108 – Nó de três placas, articuladas a barras estruturais.

Figura 109 – Nó de três placas, articuladas a barras estruturais.

Figura 110 – Utilização do sistema proposto para um nó de três e seis placas

Figura 111 – Utilização do sistema proposto para um nó de três e seis placas

Figura 112 – No Cubo, Dodecaedro ou Icosaedro Truncado três barras convergem para cada vértice.

Figura 113 – O giro das placas e tubos.

Figura 114 – O giro das placas e tubos.

Figura 115 – Fotografia do protótipo do Nó Tri-Ortogonal de três folhas

Figura 116 – Fotografia do protótipo do Nó Tri-Ortogonal de três folhas

Figura 117 – Fotografia do protótipo do Nó Tri-Ortogonal de seis folhas.

Figura 118 – Fotografia do protótipo do Nó Tri-Ortogonal de seis folhas.

Figura 119 – Estudo experimental de sistema de triangulação.

Figura 120 – Os eixos lineares de modelagem desenhados no programa Ansys.

Figura 121 – As superfícies geradas a partir dos eixos lineares previamente definidos

Figura 122 – Projeções ortogonais das superfícies trianguladas

Figura 123 – Perspectiva da cúpula com suas superfícies trianguladas.

Figura 124 – Detalhe da modelagem estrutural.

Figura 125 – Os pontos de apoio da cúpula.

Figura 126 – Detalhe da modelagem dos pontos de apoio da cúpula.

Figura 127 – Características do tubo ou barra adotado na estrutura estudada.

Figura 128 – Diagrama dos esforços devido ao vento

Figura 129 – Diagrama da somatória dos esforços devido ao vento e à sobrecarga.

Fig. 130 – Figura mostrando os valores máximo e mínimo da tensão direta axial

Fig. 131 – Figura mostrando os valores de SMAX (tensões combinadas de forças axiais e flexão).

Fig. 132 – Figura mostrando os valores de SMIN (tensões combinadas de forças axiais e flexão).

Fig. 133 – Figura mostrando os valores máximo e mínimo da tensão direta axial

Fig. 134 – Figura mostrando os valores de SMIN (tensões combinadas de forças axiais e flexão).

Fig. 135 – Figura mostrando os valores de SMAX (tensões combinadas de forças axiais e flexão).

Fig. 136 – Figura mostrando os valores máximo e mínimo da tensão direta axial

Fig. 137 – Posição relativa de um nó típico (linhas).

Fig. 138 – Modelagem através de superfícies e sólidos.

Fig. 139 – Detalhe da malha de elementos finitos.

Fig.140 – Condições de Contorno mostrando cargas nodais (vermelho) e deslocamentos impostos iguais a zero nas regiões apoiadas (azul).

Fig. 141 – Região da estrutura para o Caso 3 utilizada para a discretização do nó 138 e barras submetidas a forças de tração (positiva) e compressão (negativa).

Fig. 142 – Modelo deformado (com amplificação) superposto ao modelo indeformado.

Fig. 143 – S1 corresponde às Tensões Principais (máxima tração)

Fig. 145 – SEQV corresponde às Tensões Equivalentes de Von Mises para comparação com a tensão de escoamento.

Fig. 146 – Zoom da figura anterior. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.

Fig. 147 – Zoom da região de descontinuidade do tubo apresentando valores máximos de SEQV corresponde às Tensões Equivalentes de Von Mises para comparação com a tensão de escoamento.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

aprox.	aproximadamente
aC.	Antes de Cristo
cad	computer aided design
cm.	centímetro
Co.	Company
ETFE	etiltetrafluoretileno
Fig.	Figura
g/m <sup>2</sup>	grama por metro quadrado
kg	kilograma
kgf	kilograma força
kgf/m <sup>2</sup>	kilograma força por metro quadrado
m	metro
m <sup>2</sup>	metro quadrado
m <sup>3</sup>	metro cúbico
mm	milímetros
MWh	Mega Watt por hora
N/cm	Newtons por centímetro
Pa	Pascal
Ton.	Toneladas
Tf	toneladas força
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
μm	micro metro

## RESUMO

Os domus e as cúpulas fazem parte da história das estruturas compondo as paisagens construídas desde os tempos antigos e ainda estão presentes na cidade do século XXI através de diversas obras contemporâneas.

As Estruturas Geodésicas, como são hoje conhecidas, ganham novo impulso a partir do advento da revolução industrial e da construção metálica e estão aliadas a uma forma de construir que busca a economia de recursos, a leveza estética e à produção em série, além de buscar, de maneira própria, as lições geométricas e ordenadoras da natureza.

Este estudo pretende avaliar alguns aspectos e exemplos deste sistema construtivo em diferentes momentos da história destacando suas principais características e qualidades, bem como propor, em sua parte final, um projeto específico e um sistema construtivo baseado nas Estruturas Geodésicas.

## **ABSTRACT**

The domes and cupolas are part of the history of the structures composing the constructed landscapes since ancient times and are still present in the XXI century cities through many contemporary buildings.

The Geodesic Structures, as they are known today, got a new impulse since the beginning of the industrial revolution and the metallic construction, and are allied to a building process searching the economy of sources, the esthetic lightness and the series production, as well as recognize the organizing and geometric lessons of nature.

This study intends to evaluate some aspects and examples of this construction system in different moments of the history detaching its main characteristics and qualities, as well as, to propose, in its final part, a specific project and a construction system based on Geodesic Structures.

# **CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.**

## **1.1 APROXIMAÇÕES CONCEITUAIS:**

A chegada do século XXI coloca como urgente a discussão e conscientização das comunidades em torno das questões ambientais, tais como a preservação dos recursos naturais e a sustentabilidade dos diversos meios de produção e dos ambientes construídos.

Os edifícios como testemunhas e agentes da transformação da natureza orgânica em construída participam deste discurso ambiental, quer atuando como agentes de promoção de uma postura ecológicamente adequada e integrada, quer agindo como vilões que prejudicam a permanência de condições ambientais desejáveis e confortáveis em nosso planeta.

A construção metálica sempre participou destes temas ao apresentar o aço como material reciclável e de cada vez de menor custo energético, o que pode ser confirmado numa série de edifícios e projetos que integram de maneira peculiar seus usuários, as condições naturais e a preservação do meio ambiente.

A busca e reconhecimento de Sistemas Construtivos que aliem estas preocupações energéticas e ambientais se fazem necessárias e cruciais neste momento de transformação em que vivemos. Sabemos que a Arquitetura e a Engenharia por si só

não serão capazes de solucionar todas estas questões, mas podem sem dúvida, se aliar à série de ações interdisciplinares que buscam a integração de conhecimentos e ações coerentes na busca de uma sustentabilidade integral do planeta.

A natureza sempre esteve presente como a Grande Mãe trazendo suas múltiplas lições para diversos campos do conhecimento, das ciências às artes, da medicina à filosofia, da agricultura ao habitat.

Após a implantação da Revolução Industrial no século XIX o homem passa por uma euforia da produção onde os fins justificavam os meios, a ânsia de ver os novos sistemas produtivos em operação fazia, muitas vezes, que questões ligadas à eficiência energética, ambiental e de consumo dos meios de produção fossem relegadas a um segundo plano.

Desta forma faz-se necessário, no momento em que vivemos, nos aproximarmos das matrizes que dialogam com as questões fundamentais que são: o reconhecimento e inspiração em lições da natureza, a busca de sistemas leves e de baixo consumo energético, a capacidade de reciclagem e mobilidade das construções, a evolução da mão de obra seja no canteiro de obras ou nas linhas industriais de produção.

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Esta dissertação pretende abordar aspectos diversos das Estruturas Geodésicas que, a partir do começo do século XX, aparecem como alternativa para a geração de espaços construídos, principalmente coberturas em cúpulas, com grande leveza, economia de material e baixo custo energético e de construção.

Esta investigação se dará através do reconhecimento e análise dos fatores geradores deste tipo de estrutura, sejam eles provenientes de exemplos da natureza, da ciência antiga, de obras análogas já construídas, ou das possibilidades oferecidas por alguns programas de computadores disponíveis tanto na área da Arquitetura quanto da Engenharia.

Esta dissertação pretende também, através destas análises, propor, através de um Estudo Preliminar, um Sistema Espacial e Construtivo que faz uso das Estruturas Geodésicas e que explicita o potencial que têm estas construções de agirem como personagens ativos na busca de maior leveza, flexibilidade, e facilidade de produção.

Da mesma forma, este trabalho intenta enfatizar que a Construção Metálica, tendo o aço como elemento principal, mas ao mesmo tempo somado a outros materiais e componentes, aparece como tecnologia adequada à construção de espaços ambientalmente adequados.

### **1.3 – ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho compreende seis capítulos que abordam progressivamente o tema das Estruturas Geodésicas:

O Capítulo 1 apresenta a motivação conceitual deste estudo bem como os objetivos e metas a serem alcançadas e a estrutura de desenvolvimento adotada.

No Capítulo 2 está uma avaliação de alguns dados que a natureza e a matemática nos indica no sentido do desenvolvimento geométrico de estruturas existentes. Neste Capítulo faremos também uma apresentação dos Sólidos Clássicos da Geometria que servem de bases formais para as geodésicas.

O Capítulo 3 apresenta uma breve história de algumas construções que adotaram ou sugeriram no passado o tema das Estruturas Geodésicas, discorre também sobre a contribuição de Buckminster Fuller para o assunto e apresenta uma descrição dos componentes básicos deste tipo de estruturas.

No Capítulo 4 estão apresentadas e descritas mais detalhadamente duas obras notáveis já construídas que utilizam as Estruturas Geodésicas.

O Capítulo 5 faz uma descrição dos softwares utilizados neste estudo e como aparecem como ferramentas de projeto e modelagem arquitetônica tridimensional bem como de análise, pré-dimensionamento estrutural.

O capítulo 6 é dedicado à elaboração de uma proposta projetual, onde são utilizados conceitos e ferramentas pertencentes ao universo tipológico das Estruturas Geodésicas. Os edifícios gerados a partir deste projeto são denominados UMEA, Unidades Móveis de Educação Ambiental, que aliam ao tema das Estruturas Geodésicas uma destinação programática coerente com os conceitos de sustentabilidade.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e análises das possibilidades de utilização dos resultados deste estudo bem como a indicação das dificuldades encontradas e das possibilidades de aperfeiçoamento e desenvolvimento destes conceitos em trabalhos posteriores.

No Capítulo 8 são listadas as referências bibliográficas impressas e disponíveis na internet que auxiliaram e embasaram este estudo.

#### **1.4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A bibliografia específica sobre as Estruturas Geodésicas é bem mais restrita que a dedicada a outros assuntos diversos, mais programáticos ou tipológicos, da arquitetura e da engenharia. O que se encontra geralmente são citações breves e adendos sobre o assunto em publicações que abordam de forma ampla aspectos referentes a estruturas diversas.

A própria bibliografia dedicada às estruturas metálicas costuma não mencionar de forma ampla as construções geodésicas, restringindo-se muitas vezes às estruturas mais absorvidas pelo mercado de construção civil.

A referência principal sobre o assunto e o nome automaticamente associado ao tema é o de Robert Buckminster Fuller, que será citado em várias passagens deste estudo, nascido em Milton, Massachusetts, EUA em 1895 inventor e arquiteto autodidata americano que a partir dos anos 30 do século XX passa a propor uma série de experimentos e artefatos inovadores e a partir dos anos 50 inicia a construção e divulgação das construções geodésicas.

As teorias de Fuller, sobre as Estruturas Geodésicas e diversos outros assuntos, estão nos dois volumes de seu livro 'Synergetics/ Explorações em torno da Geometria do Pensar' (2002), primeiramente publicado em 1975 e ampliado em 1979, onde estão descritas suas idéias sobre uma geometria inspirada nos padrões energéticos e formais da natureza definindo um sistema matemático experimentado não só por abstrações e cálculos mas por experimentações físicas e reais.

Todo o conteúdo destes livros é encontrado atualmente na internet, amplamente ilustrado e com links interativos para cada parágrafo, onde os leitores e estudiosos podem comentar e sugerir novos temas sobre cada um dos itens abordados. A manutenção deste livro/site como também a existência do Instituto Buckminster Fuller, com amplo programa de cursos, publicações, venda de produtos e serviços,

mostra que as idéias do arquiteto permanecem vivas e ativas mesmo depois de sua morte em 1983.

Em Synergetics são importantes as constatações de Fuller de que o mundo é composto de estáveis e elementos finitos baseados no padrão triangular do Tetraedro (fig. 1), a pirâmide equilátera de base triangular. A teoria e o desenvolvimento de teses baseadas no significado geométrico e estrutural dos tetraedros são amplamente desenvolvidos no livro numa série de argumentações e demonstrações.

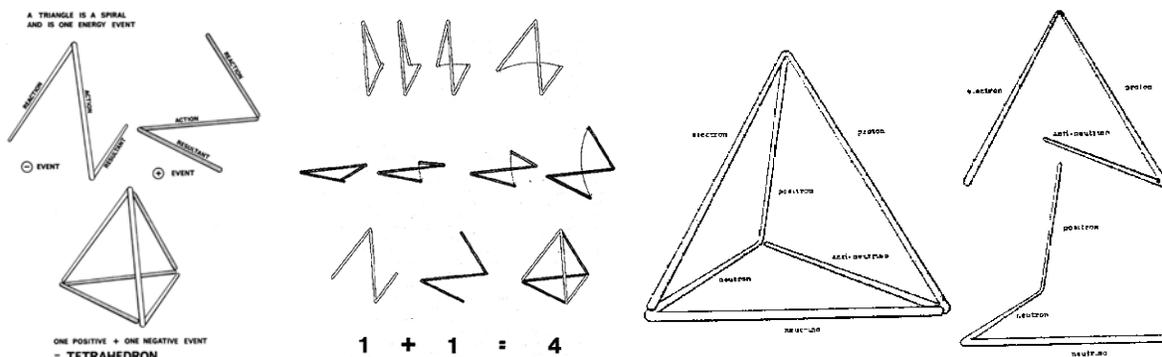


fig. 1. Argumentações de Fuller sobre a teoria do Tetraedro. Fonte: Fuller, 2005

Nestes livros Fuller define Estrutura como um complexo evento energético auto-estabilizado afirmando que uma estrutura é um sistema dinamicamente auto centrado e *estabilizado*, e assim auto localizado, *inerentemente regenerativo* numa associação *constelar* destes quatro elementos básicos onde em suas próprias palavras:

*“Estabilizado, significa invariabilidade angular.*

*Regenerativo*, significa que contém padrões locais de conservação de energia.

*Constelar*, significa um agregamento durável e cosmicamente isolado onde eventos simultâneos mantêm dinamicamente sua inter-relação, como as Macroconstelações da Ursa Maior, Orion e o Cruzeiro do Sul; e microconstelações como os sólidos em geral, granito, queijo, pele, água e o núcleo do átomo.

*Inerentemente*, significa que os princípios de comportamento que o homem descobre são operativos sob determinadas condições em qualquer lugar do Universo.” (Fuller, 2002, tradução nossa)

Outro livro que discorre sobre o assunto das Estruturas Geodésicas é o *Estructuras Para Arquitectos* (1986) de Mario Salvadori e Roberto Heller. Este livro apresenta a questão estrutural de forma ampla dando ênfase aos aspectos qualitativos de utilidade para arquitetos no ato da projeção e da análise das estruturas diversas.

No Capítulo 12 dedicado às Cascas Delgadas (p.186) os autores abordam de forma progressiva o tema partindo do conceito das estruturas que são resistentes por sua forma própria e curvatura. Falam dos aspectos de estabilidade das superfícies de revolução, translação, regradas e de maior complexidade. Abordam as ações de membrana em cúpulas circulares, cilíndricas, em forma de cela, onduladas e de outros tipos. E chegam finalmente ao que chamam de Cúpulas Reticuladas, onde

estão citadas e descritas não só as Estruturas Geodésicas, mas estruturas anteriores e posteriores que ajudaram a definir e evoluir o conceito.

Outro aspecto interessante sobre a bibliografia em torno das Estruturas Geodésicas é a popularização lograda por este sistema estrutural em torno dos anos 1960 e a maneira como estas construções foram abraçadas pelos movimentos de contracultura da época. A partir dos conceitos ecológicos e sustentáveis das cúpulas a vanguarda cultural da época passa a adotar este modelo como uma nova forma de vida aliando esta arquitetura e engenharia alternativa a uma nova maneira de viver e pensar. São conhecidos e amplamente divulgados os exemplos das comunidades hippies (fig. 2) que nos anos 60 se reuniam em locais distantes das cidades a fim de elaborar os conceitos filosóficos e praticar a 'nova consciência'.



fig. 2. Imagem de Drop City. Fonte: <http://www.hippiemuseum.org/dropcity.html>, acesso em 03/04/2006

Um exemplo clássico destas ações é a comunidade de *Drop City* nas proximidades da cidade de Trinidad no estado do Colorado nos Estados Unidos onde artistas e estudantes universitários a partir de 1965 passam a morar em diversas construções que adotavam as Estruturas Geodésicas como modelo principal.

Esta contracultura dos anos 60 gerou uma série de publicações dentre elas o *Dome Builder's Handbook No2*, (1978), de autoria de William Yarnall que aborda de forma prática a construção de Estruturas Geodésicas principalmente para uso doméstico considerando vários materiais como o metal e a madeira até apresentando projetos e detalhes de estruturas já construídas. O livro em seu Capítulo 1 apresenta uma história das geodésicas e como elas chegam à época da publicação com tanta popularidade.

Outro livro que aborda o assunto sob o mesmo aspecto da contracultura dos anos 60 é o *Cobijo*, (1979), organizado por Lloyd Kahn. A publicação analisa a questão do abrigo de forma ampla e cronológica passando por construções pré-históricas, indígenas, alternativas e autóctones, e apresenta um capítulo denominado 'Tercer Libro de las Cupulas' onde mostra com espírito ao mesmo tempo histórico, filosófico e prático a questão das Estruturas Geodésicas ou das cúpulas reticuladas. É amplo o espectro de análise do autor que descreve este tipo de estrutura e como foi experimentada dos gregos aos chineses, dos indígenas a Fuller. Apresenta uma crítica a Fuller por seu excessivo caráter místico e messiânico, negando a ele, com propriedade, o título de inventor do Domus Geodésico.

Numa outra perspectiva analítica o livro *El Significado en Arquitectura*, (1975), organizado por C. Jenks e G. Baird, em um de seus artigos de autoria de Alan Colquhoun denominado 'Tipologia y Método de Diseño' (p.297), contrapõe os métodos de projeto provindo da história da arquitetura, antiga ou recente, que chama de métodos artesanais ou artísticos, aos métodos que abordam a questão de maneira menos tipológica e mais científica. No artigo o autor coloca lado a lado o funcionalismo arquitetônico proposto pelo Movimento Moderno às condutas mais biotécnicas que consideram mais as conquistas da ciência moderna e aí cita a obra de Fuller como exemplo extremo desta doutrina.

Outro artigo completa esta revisão bibliográfica sobre as estruturas Geodésicas, publicado na revista espanhola *Arquitectura Viva*, em seu número 93 (novembro/dezembro 2003) sob o título temático de 'Masa Crítica', aborda a questão das novas tecnologias informáticas e suas influências nos métodos de projeto. No artigo de Mario Carpo intitulado 'La Era del Pliegue' (p. 32) estão abordados os novos métodos de projeto baseados no uso do computador e suas conseqüências formais e tecnológicas no desenvolvimento da 'arquitetura maleável' segundo palavras do autor se referindo às novas arquiteturas de formas livres e onduladas.

Segundo Mario Carpo a evolução da tecnologia projetual informatizada traz para a arquitetura e engenharia novas formalizações e resultados tipológicos até então impossíveis de serem alcançados.

A revista apresenta dentro desta linha de pensamento projetos de autores como Frank Gehry, Peter Cook e Future Systems que colocam novos aspectos na discussão das estruturas geodésicas, e da arquitetura baseada em formas naturais ou orgânicas. Uma das questões colocadas é como o resultado das obras destes autores, podem ser vistos como uma evolução das propostas geodésicas iniciais da primeira metade do século XX.

## **CAPÍTULO 2. MATRIZES NATURAIS E GEOMÉTRICAS.**

### **2.1 - A GEODÉSICA NA NATUREZA E NAS CONSTRUÇÕES**

A palavra Geodésica provém do termo *Geodesia* que é a ciência geológica que trata do tamanho e da forma da terra, aparece no francês como *Geodesie*, no latim novo aparece como *Geodaesia*, e no grego como *Geôdaisia*, significando divisão da terra, onde geo significa terra e daiesthai significa dividir.

Na prática define-se como uma linha Geodésica a que define o menor segmento entre dois pontos pertencentes à superfície de uma esfera. O termo Estrutura Geodésica é utilizado em diversas áreas do conhecimento como Topografia, Cartografia ou Geografia. De forma geral é usado para definir uma rede de pontos localizados sobre uma superfície não obrigatoriamente plana.

Neste estudo Estrutura Geodésica é aquela trama composta por polígonos planos diversos onde a interseção das linhas retas destes polígonos, ou seus vértices, coincidem com uma superfície esférica ou oval.

Uma Superfície ou Estrutura Geodésica pode estar composta apenas por polígonos regulares planos como triângulos ou quadrados, onde as linhas têm a mesma dimensão, ou também por polígonos irregulares de diferentes conformações, e

mesmo não planos ou espaciais, gerando superfícies e tramas estruturais muito mais complexas com duas ou mais camadas.

Quando se toma, por exemplo, a conhecida superfície do globo terrestre pode-se definir uma Estrutura Geodésica através da ligação dos pontos de interseção entre os meridianos e paralelos imaginários desta esfera. Neste caso estas linhas diferem entre si em dimensão de acordo com a posição definida para cada um destes meridianos e paralelos.

Segundo Salvadori (1986, p.218) Uma cúpula semi-esférica composta por barras correspondentes às linhas dos meridianos e dos paralelos, se considerada estruturalmente apresenta as barras dos meridianos comprimidas de cima até abaixo e tem as barras paralelas tracionadas ou comprimidas dependendo do valor do ângulo de abertura.

Como serão apresentadas adiante, as conhecidas cúpulas de Zeiss-Dywidag e de Schendler adotam este sistema de linhas paralelas e de meridianos e se caracterizam por não conferir a mesma dimensão a todas as barras componentes da estrutura.

Uma superfície esférica pode também ser decomposta em múltiplos triângulos que apresentarão forças não paralelas onde as cargas locais são distribuídas através de sua área utilizando toda a estrutura. Estes Domus podem ser proporcionalmente mais finos e leves que a casca de um ovo de galinha incorporando o princípio de

‘fazer mais com menos’ ao abrigar o maior volume de espaço interior através da menor superfície externa de material empregado o que é em si um poderoso conceito quando se fala de economia de custos e energia. Quando o diâmetro desta esfera é multiplicado por dois, sua área interna quadruplica e o volume é oito vezes maior. Assim um Domus (fig.3) pode, com menor superfície de cobertura, funcionar como um eficiente abrigo.

Fuller defendia que a estrutura de um Domus esférico pode se transformar em uma eficiente atmosfera interior para a ocupação humana uma vez que o ar e a energia circulam sem obstrução o que promove uma natural ventilação e aquecimento. Abrigos geodésicos têm sido construídos em diferentes cantos do planeta e têm-se mostrado eficientes em diferentes climas e temperaturas.

Ainda segundo Fuller (2002) o Domus é energeticamente eficiente por diversas razões:

- 1) O decréscimo da área superficial demanda menos materiais de construção.
- 2) A exposição ao frio no inverno e ao calor no verão decresce porque sendo esférico há menor área superficial por unidade de volume por estrutura.
- 3) O interior côncavo cria um fluxo de ar natural que permite que o ar quente ou frio flua uniformemente através do Domus.
- 4) Turbulências externas de vento são minimizadas porque este vento que contribui para aquecer ou esfriar perde força em torno do

Domus, por efeito aerodinâmico.

5) Os Domus funcionam como um grande ponto refletor, refletindo e concentrando a temperatura interior, evitando a perda de calor radiante nos climas mais frios.

A economia anual de energia, no que diz respeito a aquecimento e ventilação de um Domus construído nos EUA, é de 30% a menos em relação a uma construção retilínea de acordo com a Oregon Dome Co. o que é bastante significativo.

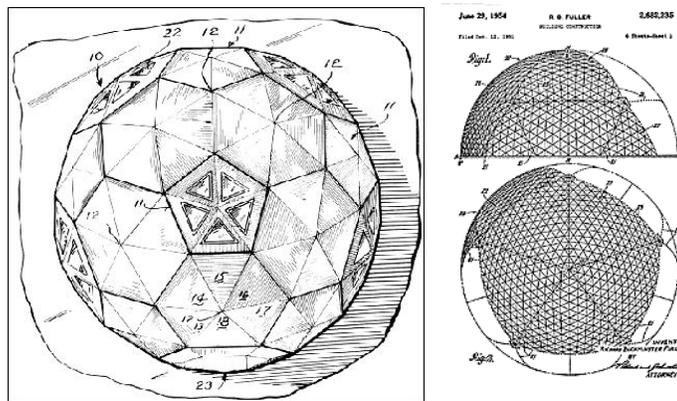


fig. 3. Desenhos de patente por Fuller. Fonte: Fuller, 2005

### 2.1.1 – O Conceito de Frequência nas Geodésicas

Domus e Esferas Geodésicas aparecem em diferentes Frequências. A Frequência de um Domus está relacionada com o número de triângulos no qual sua superfície está subdividida.

O website *Geodesics Unlimited* (2006) explica que as bases poliédricas de uma superfície geodésica podem ser divididas ou mapeadas em padrões planos, ou

faces, que serão a célula básica da estrutura. Pode-se fazer uma análise, a partir da figura de um icosaedro, das possibilidades de divisões ou dos padrões de faces que podem ser usados, ou seja, a freqüência de cada uma destas faces.

A Triangulação de Freqüência 2 (fig. 4) é a mais simples onde cada face do triângulo é dividida ao meio e cada ponto médio é unido aos próximos.

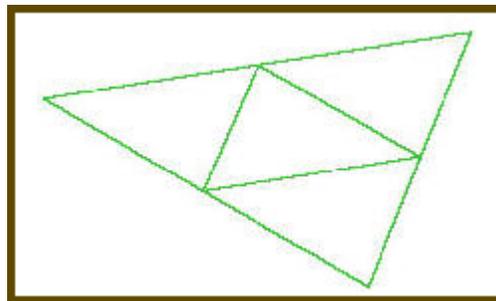


Fig. 4. Triangulação de Freqüência 2. Fonte: <http://www.geodesics-unlimited.com/index.htm>, acesso em 05/04/2006

Na triangulação de Freqüência 3 (fig. 5) cada face do triângulo é dividida em três segmentos.

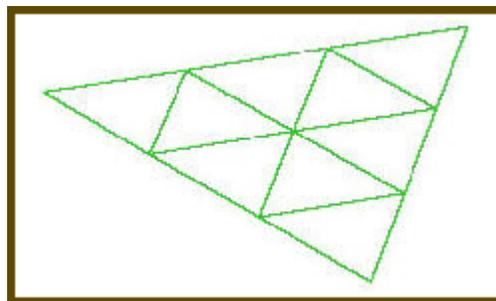


Fig. 5. Triangulação de Freqüência 3. Fonte: <http://www.geodesics-unlimited.com/index.htm>, acesso em 05/04/2006

Subseqüentemente na triangulação de freqüência 6 (fig. 6) cada face do triângulo é subdividida em seis segmentos.

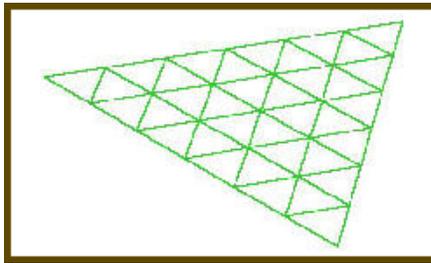


Fig. 6. Triangulação de Freqüência 6. Fonte: <http://www.geodesics-unlimited.com/index.htm>, acesso em 05/04/2006

Na ilustração a seguir (fig. 7) a imagem anterior é projetada na superfície de uma esfera e cria o triângulo geodésico gerando o padrão de um icosaedro.

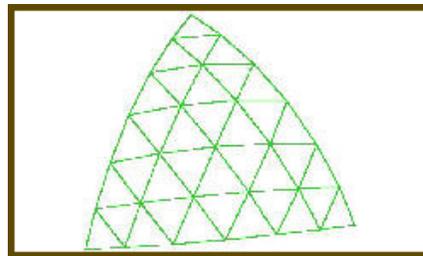


Fig. 7. Triangulação de Freqüência 6 projetada sobre as faces de uma esfera. Fonte: <http://www.geodesics-unlimited.com/index.htm>, acesso em 05/04/2006

Outros padrões podem ser adotados (fig. 8, fig. 9 e fig. 10) com variações no tamanho do triângulo que é mapeado como a primeira divisão de um triângulo proveniente de um icosaedro, ou a divisão em forma de estrela em um pentágono plano contido num dodecaedro; ou ainda um padrão ainda mais complexo onde o domus resultante se apresenta ondulado.

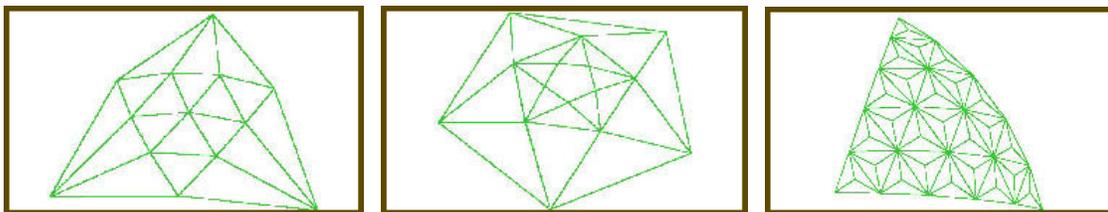


Fig. 8, Fig. 9 e Fig. 10, Padrões mais complexos de divisão de faces de uma esfera. Fonte: <http://www.geodesics-unlimited.com/index.htm>, acesso em 05/04/2006

A superfície da esfera também pode ser dividida e posteriormente estruturada em faces de camadas duplas (fig. 11), ou double layer faces. Nas figuras seguintes estão uma face de camadas dupla a partir de uma divisão triangulada, a mesma forma projetada na superfície esférica e a formação de uma cúpula através da união de cinco destas superfícies.

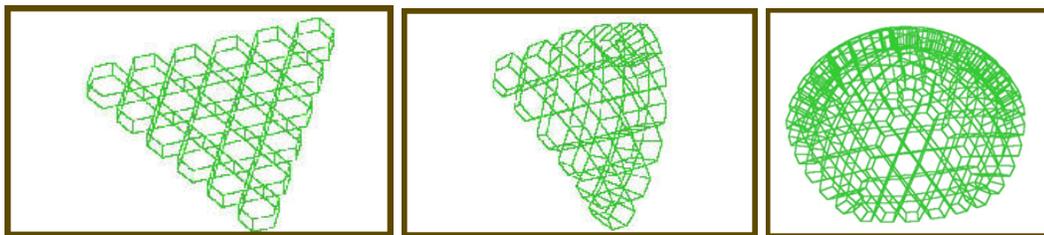


Fig. 11. Triangulação de camada dupla e a formação de uma cúpula.  
Fonte: <http://www.geodesics-unlimited.com/index.htm>, acesso em 05/04/2006 <http://www.grunch.net/synergetics/domes/domegeo.html>

Quanto maior for a frequência for um Domus significa que este é um Domus de alta Frequência, e que ele tem mais componentes triangulares e tem a sua curvatura mais suave se aproximando da aparência da esfera.

## 2.2 – SISTEMAS GEOMÉTRICOS DE ORDENAÇÃO

### 2.2.1 – O Triângulo Como Módulo Básico

Em seu livro Synergetics, Fuller (2002) afirma que:

“O triângulo é o único polígono auto estabilizado e que tudo que é reconhecível no Universo como um Padrão é identificavelmente um Padrão

anteriormente visto, e o triângulo persiste como um padrão constante. Quaisquer outros padrões conhecidos são inerentemente reconhecíveis apenas pela virtude de sua integridade estrutural triangular onde estrutura significa uma omnitriangulação. O triângulo é pura estrutura. O que não for auto-regenerativamente estabilizado não é uma estrutura. Este reconhecimento é tão dependente na triangulação como é o conhecimento original. Apenas padrões estruturados triangularmente são padrões regenerativos e a estruturação triangular é um padrão de integridade em si.”

(Fuller, 2002, tradução nossa)

Uma das maneiras que Buckminster Fuller descreve a diferença de resistência entre o retângulo e triângulo é quando aplicamos uma força em cada uma das estruturas geométricas. O retângulo dobra mostrando-se instável enquanto o triângulo resiste à pressão (fig. 12), demonstrando-se duas vezes mais forte e resistente. Este simples princípio dirigiu seus estudos no sentido de criar uma nova tipologia arquitetônica, o Domus Geodésico, baseado na idéia de projetar e construir fazendo-se ‘mais com menos’, o que ele chamou em suas teorias de Efemerização.

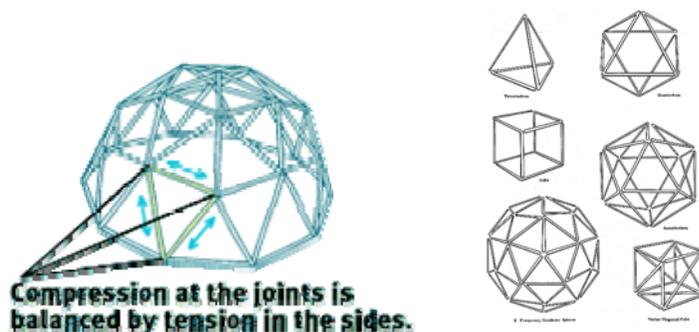


Fig. 12. Tração e Compressão nas Estruturas Geodésicas. Fonte: Fuller, 2005

Uma possível comparação pode ser feita aqui entre Fuller e Mies Van der Rohe, (fig. 13) arquiteto definitivamente reconhecido como um dos mestres do século XX, que afirmava também que 'menos é mais' ou 'less is more'.



Fig. 13. A casa Farnsworth, 1942 de Mies van Der Rohe e o Domus de Buckminster Fuller, dois aspectos do 'Less is More'  
Fonte: Fuller, 2005

Os argumentos de Mies; que também gerou um procedimento construtivo e estético importante e até hoje adotado na construção; se baseiam na incorporação pela arquitetura e engenharia, da cultura modernista, cubista que gerou posteriormente o minimalismo, onde qualquer tipo de acessório e ornamento deveria ser evitado no sentido de uma maior coerência industrial.

As verdades trazidas por Mies da cultura artística e do momento inicial de um século XX que se transformava, Fuller trazia da natureza, de uma gravidade e estruturação orgânica entre os componentes de um mundo vivo e em constante interação biológica.

## 2.2.2 – Os Sólidos Clássicos

O conhecimento dos poliedros da matemática se faz importante neste estudo pois é a partir deles que tomarão forma as construções baseadas na combinação de polígonos regulares ou não. A observação destes sólidos nos ajuda a realizar as necessidades funcionais e geométricas dos nós de ligação, ou pontos de convergência, das arestas ou barras e a forma final da figuras construídas já conhecidas e descritas pela matemática.

Os sólidos apresentados a seguir são chamados de Sólidos Clássicos pois são conhecidos e descritos desde a antiguidade, respectivamente por Platão e Arquimedes..

### 2.2.2.1 – Os Sólidos Platônicos

Os Sólidos Platônicos, também conhecidos como Sólidos ou Poliedros Regulares, são os Poliedros Convexos (fig. 15) de faces equivalentes compostas por Polígonos regulares convexos.

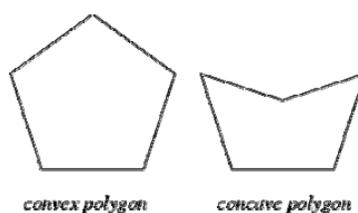


Fig. 15. Polígono côncavo e convexo. Fonte: MathWorld 2005.

Segundo descrito e ilustrado no website MathWorld (2005) existem cinco destes sólidos, ou sejam: O Cubo, com seis faces; o Dodecaedro, com doze faces; o Icosaedro com vinte faces, o Octaedro com oito faces e o Tetraedro com quatro, como primeiro mencionado por Euclides em seu livro 'Elementos'.

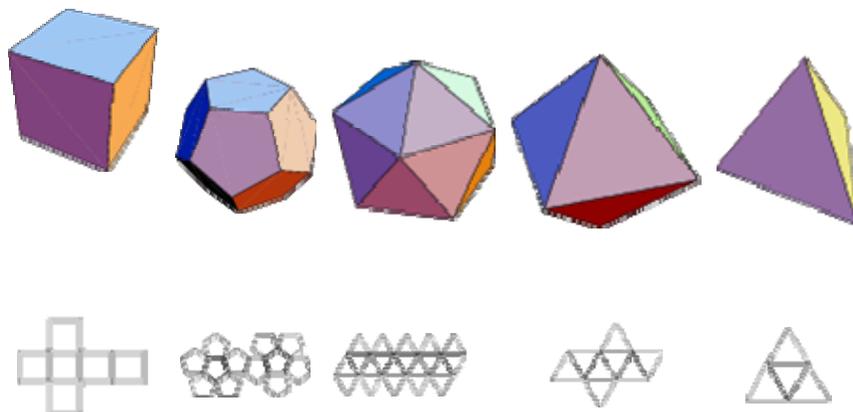


Fig. 16. Os Sólidos Platônicos, respectivamente: Cubo, Dodecaedro, Icosaedro, Octaedro e Tetraedro e seus desenvolvimentos no plano. Fonte: MathWorld, <http://mathworld.wolfram.com/PlatonicSolid.html> , acesso em 28/06/2006.

Os Sólidos Platônicos (fig. 16) são também chamados de 'Figuras Cóslicas' e já eram conhecidos na Grécia Antiga quando foram descritos por Platão em 350 aC relacionando o tetraedro com o elemento fogo, o cubo com a terra, o icosaedro com a água, o octaedro com o ar e o dodecaedro com a matéria que compõe as constelações.

Se  $P$  é um poliedro congruente (convexo) de faces poligonais regulares e congruentes, então os seguintes enunciados são equivalentes:

1. Os vértices de  $P$  estão contidos em uma esfera
2. Todos os ângulos diédricos são iguais
3. Todas as figuras-vertices são polígonos regulares

4. Todos os ângulos dos sólidos são equivalentes
5. Todos os vértices estão circundados pelo mesmo número de faces

Se considerarmos um sólido platônico e unirmos os pontos centrais de faces adjacentes, obtemos um novo Sólido Platônico. Estes dois sólidos dizem-se *duais* um do outro.

Os poliedros duais aos sólidos platônicos podem ser divididos em 3 grupos:

Tetraedro é dual de si próprio; o Cubo e o Octaedro são duais inversos, ou seja, o cubo tem como dual o octaedro e vice-versa; e da mesma forma o Dodecaedro e Icosaedro são duais Inversos.

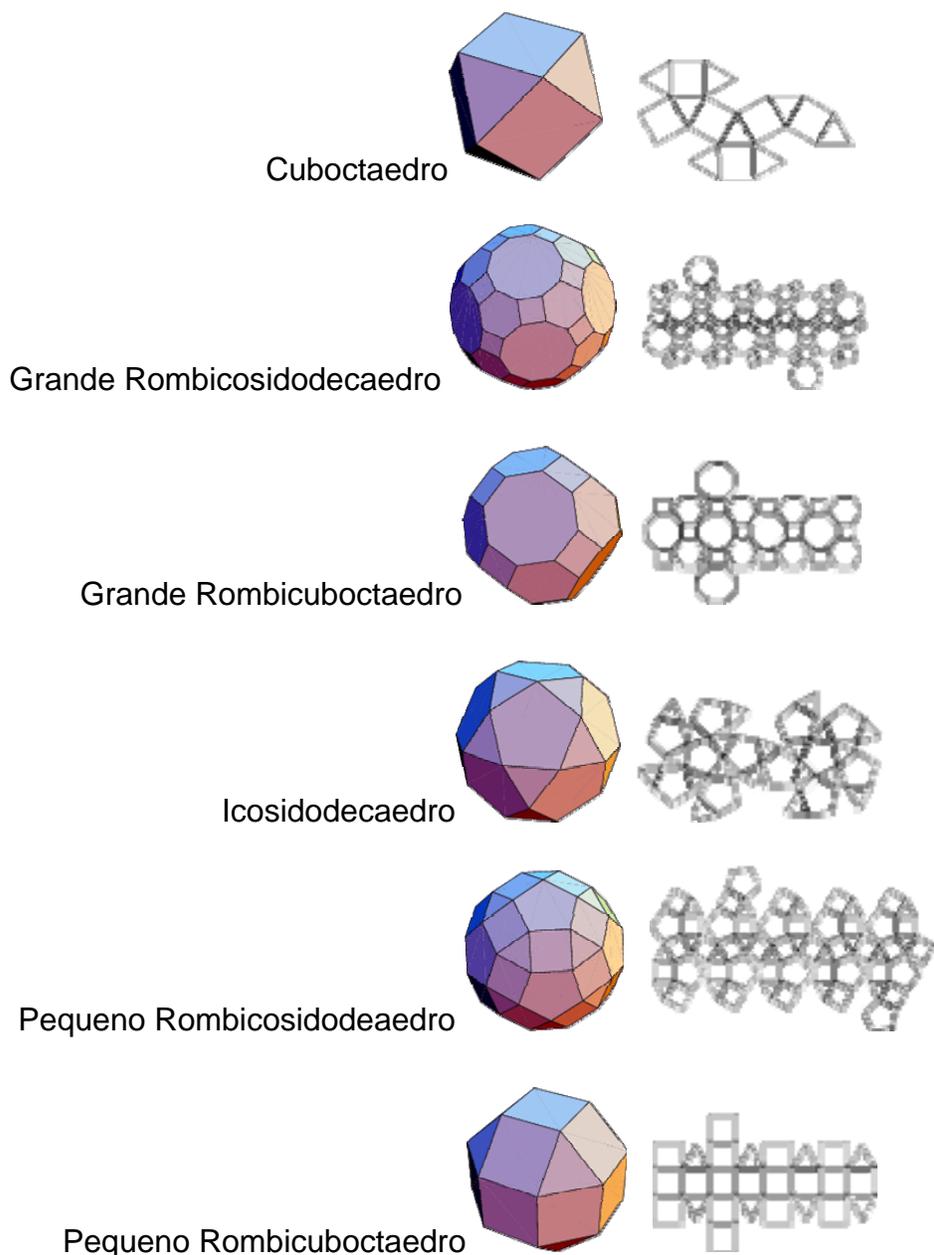
#### **2.2.2.2 – Os Sólidos de Arquimedes**

Os treze sólidos de Arquimedes (fig. 17) são Políedros Convexos que têm um arranjo similar aos Políedros Regulares Convexos, mas que apresentam dois ou mais tipos diferentes de faces, que não se interceptam, organizadas de mesma maneira em cada vértice com todos os lados de mesma dimensão.

A característica chave dos sólidos de Arquimedes é que cada face é um polígono regular e, em volta de cada vértice, os mesmos polígonos aparecem na mesma seqüência. Dois ou mais polígonos diferentes aparecem em cada sólido de Arquimedes, ao contrário dos sólidos Platônicos, onde cada um contém somente um tipo de polígono.

Os duais de Arquimedes constituem um grupo interessante de novos poliedros, nos quais todas as faces são idênticas, mas existem dois ou mais tipos de vértices. Isto é verificado porque nos sólidos originais de Arquimedes cada vértice é idêntico, mas têm dois ou mais tipos de faces diferentes.

Estes Sólidos estão ilustrados nas figuras a seguir:



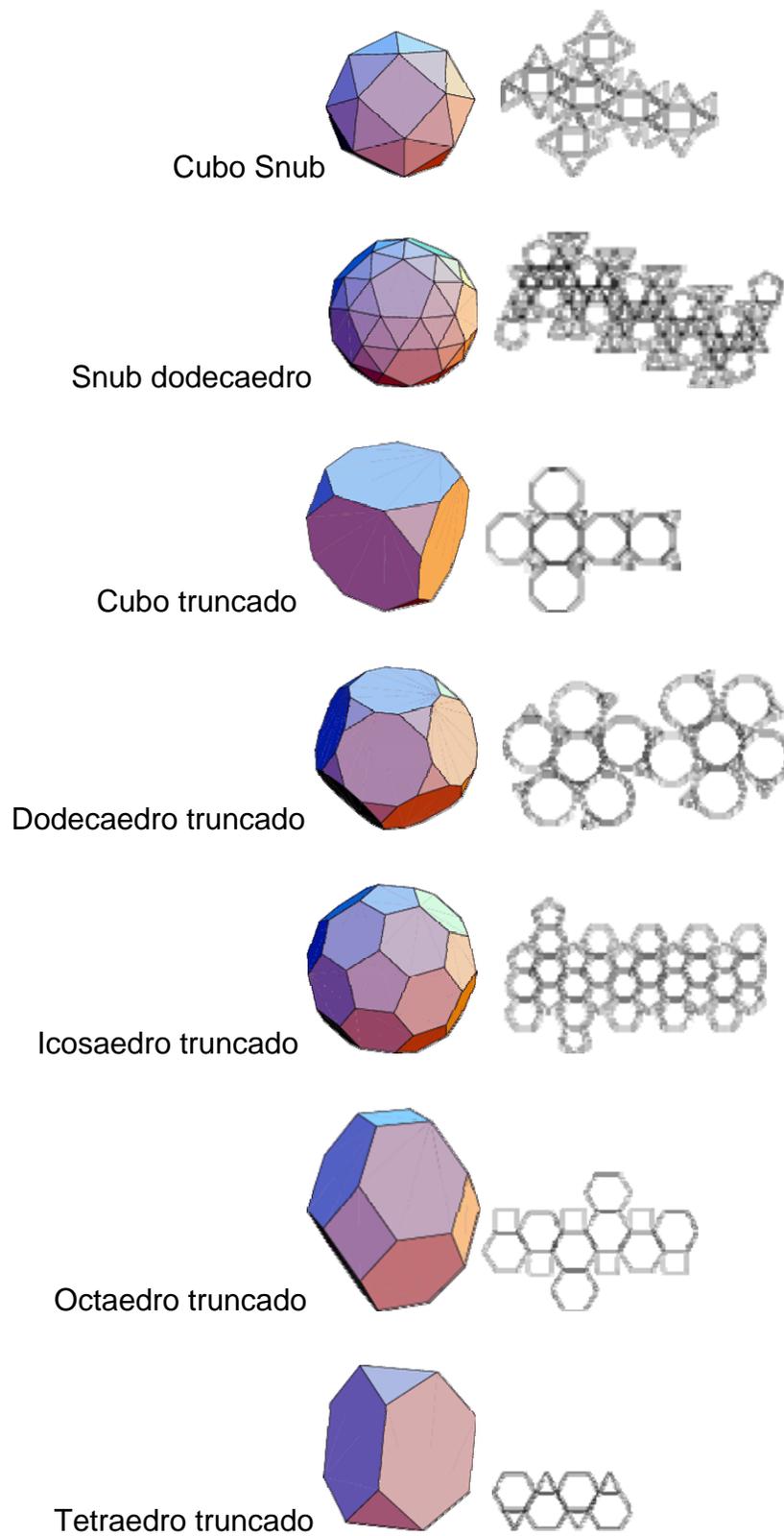


Fig. 17. Os Sólidos de Arquimedes. Fonte: MathWorld, <http://mathworld.wolfram.com/PlatonicSolid.html> , acesso em 28/06/2006.

Truncagem (fig. 18) é a remoção de partes dos Sólidos deixando um conjunto de planos igualmente simétricos. A figura a seguir ilustra a Truncagem em cada um dos cinco Sólidos Platônicos, gerando em alguns casos os Sólidos de Arquimedes.

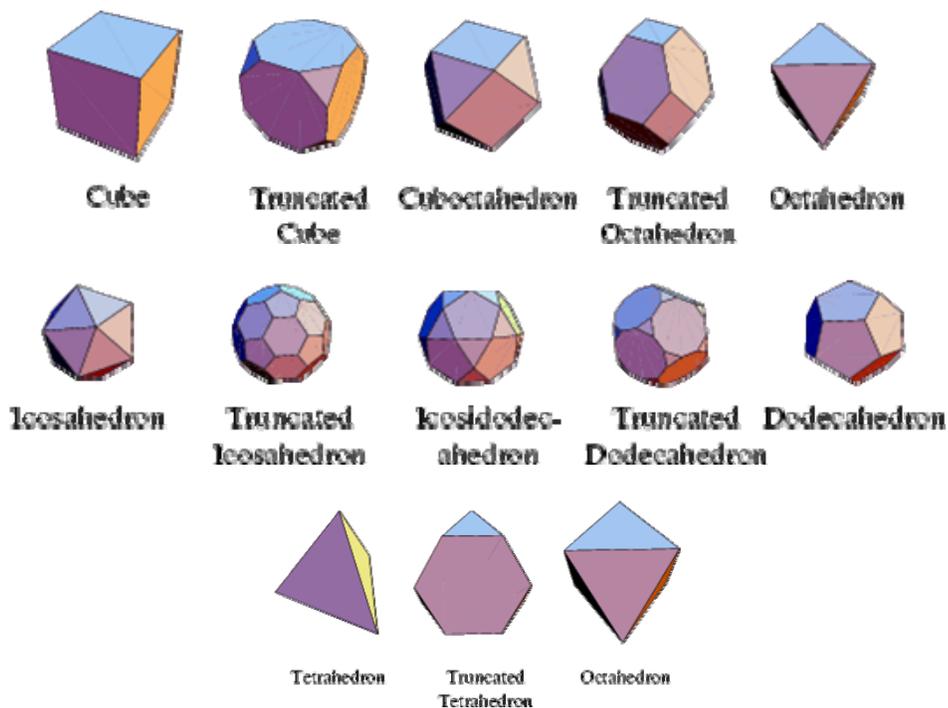


Fig. 18. Os Poliedros trucados. Fonte: MathWorld, <http://mathworld.wolfram.com/PlatonicSolid.html> , acesso em 28/06/2006.

## CAPÍTULO 3.

# A GEODÉSICA COMO SISTEMA CONSTRUTIVO

### 3.1 – CÚPULAS HISTÓRICAS

Segundo Yarnall (1978, p.10) antes de existirem as Estruturas Geodésicas o mundo primitivo já conhecia a construção das cúpulas circulares ou Domus. No começo do segundo milênio por volta de 1300 aC a arte de construção com pedra já estava evoluída como podemos ver na construção da Tumba de Atreus em Micenas (fig. 19) na Grécia com diâmetros de 16,00 m em sua base. Este tipo de construção pode ser chamada de 'falso domus' e é executada através da colocação de anéis de pedras sobrepostos a partir da fundação que vão sucessivamente diminuindo em diâmetro até alcançar o topo onde é colocada a última pedra (fig. 20). A Tumba de Atreus foi coberta na época de sua construção por uma pequena montanha de terra o que ajudou na sua preservação até os dias atuais.

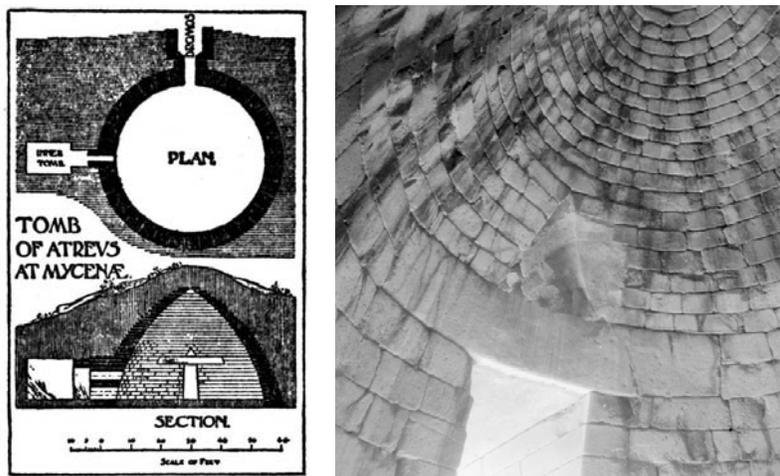


Fig. 19. A Tumba de Atreus. Fonte: <http://www.legolas.org/gallery/historicaltemples/aa1.jpg.html>, em 31/03/2006  
Fig. 20. Vista Interna da Tumba de Atreus . Fonte <http://poinikastas.csad.ox.ac.uk/introduction.shtml>, em 31/03/2006

Posteriormente alguns domus construídos com tijolos podem ser considerados os primeiros 'verdadeiros domus' onde a face dos tijolos era levemente inclinada para cima ao mesmo tempo que eram projetados para dentro. Os antigos construtores romanos usaram concreto para moldar as grandes cúpulas de suas termas e edifícios públicos. A princípio as camadas de tijolos eram revestidas com argila como um capeamento que auxiliava na estabilidade. Posteriormente este revestimento foi suprimido e com a evolução da tecnologia do concreto as construções apenas precisavam de uma espécie de um madeiramento de suporte enquanto eram montadas.

Uma das cúpulas mais notáveis construída pelos romanos foi o Panteon de Adriano (fig. 21) erguido sobre as ruínas do Panteon de Agripa de 27 aC e destruído por incêndio em 80 aC. Para esta nova obra Agripa convidou o conhecido arquiteto do século I Apolodoro de Damasco que concluiu a obra em 128 aC. A configuração final apresenta diâmetro da base de 43,3m, um óculo para iluminação no topo da cúpula de 8,92m de diâmetro e apoiado por 8 colunas. As dimensões desta notável obra só foram superadas na renascença.



Fig. 21. Vista do Panteon de Adriano. Fonte: <http://www.archys.com/panteon-agripa.html> em 31/03/2006

O Panteon Romano apresenta uma base mais espessa e pesada que a parte superior da cúpula que são ocas em intervalos regulares o que reduz consideravelmente o seu peso.

Conforme destaca Kahn (1979, p.84) a primeira Estrutura Geodésica propriamente dita foi construída no século XX e foi a Cúpula para o Planetário da indústria ótica Zeiss concluída em 1922 na cidade de Jena, na Alemanha (fig. 22).



Fig. 22. A construção da Cúpula do Planetário Zeiss em Jena, na Alemanha. Fonte: Kahn, 1979.

Esta cúpula composta por 8000 barras de aço tinha o vão de 25 metros e foi coberta por uma camada de concreto de 6cm de espessura. A idéia que a gerou foi uma consequência da invenção do Projetor Planetário por parte de Walter Bauersfield.

A princípio a idéia para os Planetários era a de uma cúpula giratória com os corpos celestes iluminados que se movimentariam à medida que a cúpula girasse.

Bauersfield em sua invenção transfere o mecanismo de rotação para uma série de projetores giratórios que enviariam as imagens do firmamento sobre a superfície de uma cúpula hemisférica imóvel de dimensões superiores às inicialmente imaginadas. O interior da cúpula, em cujo centro se colocariam os projetores, estaria em completa escuridão e as imagens dos corpos celestes seriam percebidas na superfície interna lisa e branca da cúpula, por uma platéia assentada no interior do espaço.

Este sistema de cobertura e projetor ótico ficou conhecido como o sistema Zeiss Dywidag e foi adotado em várias construções de planetários, na Europa e Estados Unidos. Participaram do projeto os arquitetos Johannes Schreiter e Hans Schlag e a construção ficou a cargo de firma Dyckerhoff & Widmann de Nurnberg.

### **3.2 – A CONTRIBUIÇÃO DE BUCKMINSTER FULLER**

Na primeira metade do século XX, o mundo ocidental, e principalmente os Estados Unidos da América viviam uma relação de amor e ódio com a tecnologia e o desenvolvimento a ser conseguido a qualquer preço. A experiência das duas guerras mundiais e os efeitos preocupantes da guerra fria colocava uma série de mentes pensantes em alerta, em busca de novos caminhos que revisassem as novas descobertas e avanços científicos e industriais, e que propusessem uma nova ética e uma nova maneira de pensar a natureza, a ciência e a indústria.

Neste cenário surge a pessoa de Richard Buckminster Fuller, já citado anteriormente, autodidata, engenheiro, arquiteto, filósofo e inventor. Ele acreditava que apenas a compreensão da Tecnologia num sentido mais profundo permitiria às pessoas uma forma adequada para uma conduta individual coerente e para a eventual 'salvação da Sociedade' como costumava dizer num misto de didatismo profético e um forte senso prático de divulgação e comunicação de suas idéias (fig. 23).

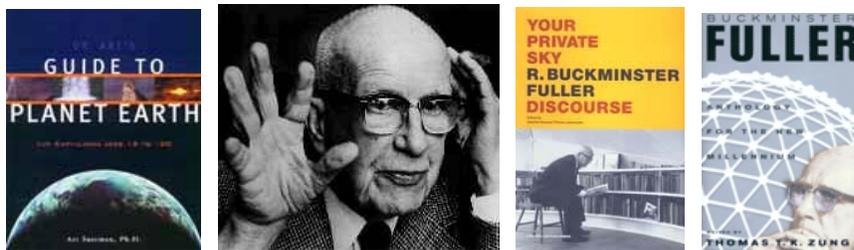


Fig. 23. Buckminster Fuller e suas publicações. Fonte: Fuller, 2005

Fuller propunha uma maneira de pensar que unia a arte e a ciência buscando nessa fusão um terceiro caminho que levasse os tecnólogos a pensar como os Poetas e os Artistas no sentido de mudar a percepção que as pessoas tinham do planeta Terra. Pela primeira vez surge o termo Design Science para descrever a nova maneira de agir e projetar onde a efetiva aplicação dos princípios da ciência para um Design consciente do nosso ambiente global faria que as finitas reservas da Terra encontrassem as necessidades do ser humano sem corromper os processos ecológicos do Planeta.

Alguns inventos de Fuller nos mostram a habilidade de seu gênio empreendedor e provocador. Dentre estes artefatos são conhecidos as propostas da casa Dymaxion,

(fig. 24) dos anos 30 onde vários conceitos de conservação de energia e uso coerente dos espaços e materiais já estavam presentes. Ele propôs também na mesma época o Banheiro Dymaxyon (fig. 25), um kit sanitário em plástico injetado que poderia ser acoplado a construções existentes trazendo uma serie de vantagens ergonômicas e sanitárias e propondo economia e a não poluição da água.

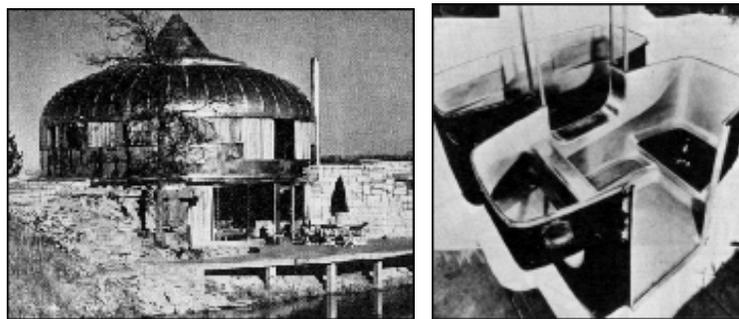


Fig. 24 e Fig 25 A Casa e o Banheiro Dimaxyon. Fonte: Fuller, 2005

Outra proposta foi o automóvel Dymaxion (fig. 26) que era uma espécie de veículo bastante leve, veloz e ágil que transportaria até 11 pessoas com considerável economia de produção e de combustível.

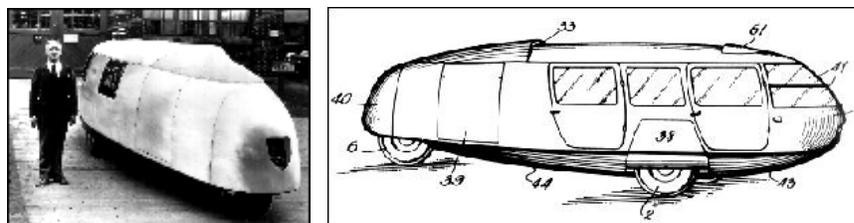


Fig. 26. Dimaxyon Car: Fonte: Fuller, 2005

Mas o nome de Buckminster Fuller está definitivamente associado aos Domus Geodésicos, tema a que se dedicou por grande parte de sua vida chegando a

construir grande número deles. A ampla divulgação conseguida através do senso de marketing de Fuller fez com que estas estruturas ganhassem grande popularidade e passassem a ser vistas e produzidas em diversas localidades e países.

Fuller resgata a idéia já existente dos Domus e alia a ela o tom filosófico e messiânico de seu discurso, conseguindo clientes e mobilizando a sociedade em torno da nova idéia. Seu nome é freqüentemente e erroneamente citado como o inventor dos Domus Geodésico, que é uma idéia que já vinha se desenvolvendo através de experiências anteriores, mas certamente a divulgação promovida por Fuller foi crucial para a aceitação e evolução destas estruturas.

O modelo dos Domus Geodésicos levou Fuller a propor as Megaestruturas onde estas leves cúpulas propostas ganhariam maiores dimensões e passariam a cobrir grandes áreas urbanas numa proposta de controle ambiental, climático e energético, trazendo ao interior destas calotas um microclima próprio. É bastante famosa a imagem utópica da grande cúpula geodésica sobre Nova York (fig. 27), provocante proposta que desafia as fronteiras que o pensamento inventor pode alcançar, onde a superfície da cúpula ficaria suspensa pela pressão interna do ar.



Fig. 27. A grande utopia do Domus de Nova York. Fonte: Fuller, 2005

### **3.3 – COMPONENTES DO SISTEMA CONSTRUTIVO GEODÉSICO**

O sistema construtivo de uma Estrutura Geodésica é composto basicamente por três elementos principais: os Nós, as Barras e o Sistema de Cobertura, no caso de uma estrutura Fechada.

Aliam-se a estes três itens principais diversos outros tais como: os sistemas de fixação ao solo ou fundações; os sistemas de ventilação, acessos e aberturas; os diversos elementos internos de apoio que completam os espaços internos e permitem a utilização da construção, tais como espaços destinados a sanitários e outras instalações hidráulicas, e também as divisórias e fechamentos internos.

Neste estudo nos deteremos na análise dos três primeiros itens que compõem o sistema entendendo que são os mais específicos das construções geodésicas.

#### **3.3.1 – Os Nós**

Os vértices de uma Estrutura Geodésica são chamados de Nós e são os pontos mais vulneráveis e especiais do sistema (fig. 28). Os nós recebem os esforços de compressão proveniente das barras podendo trabalhar articulados ou não. Numa Estrutura Geodésica ideal os nós não transferem esforços de momento às barras o que promove a estabilidade do sistema.

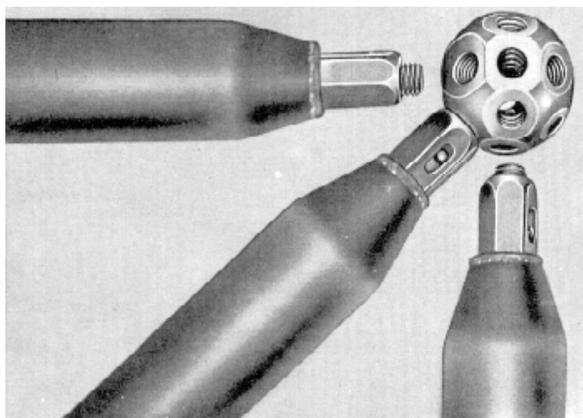
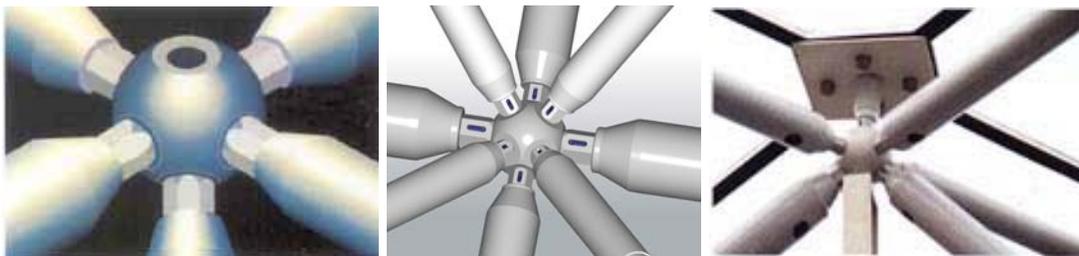


Fig. 28. Nós da indústria Mero. Fonte <http://www.mero-tsk.de/index.php?id=89&L=1> , acesso em 23/06/2006

A indústria alemã Mero TKS tem estudado profundamente o assunto e tem desenvolvido esta tecnologia se apresentando como uma das principais fornecedoras de Estruturas Geodésicas, Domus e Cúpulas para diversos usos. O website (2006) da empresa apresenta a sua gama de produtos bem como pesquisas, estudos de cunho acadêmico e desenvolvimento de novas tecnologias.

Neste website está apresentada a linha sistemas de nós estruturais desenvolvidos pela empresa que são:

### **Sistema Ball Node**



Figs. 29, 30 e 31. O Sistema de Nós Mero Ball Node. Fonte <http://www.mero-tsk.de/index.php?id=89&L=1> , acesso em 23/06/2006

Foi o primeiro sistema (fig. 29, fig. 30 e fig. 31) da Mero para estruturas espaciais pré fabricadas oferecendo até os dias de hoje grande versatilidade de aplicações. Como em outras estruturas espaciais os esforços são aplicados nos nós e as barras distribuem esforços de compressão e as forças de tração.

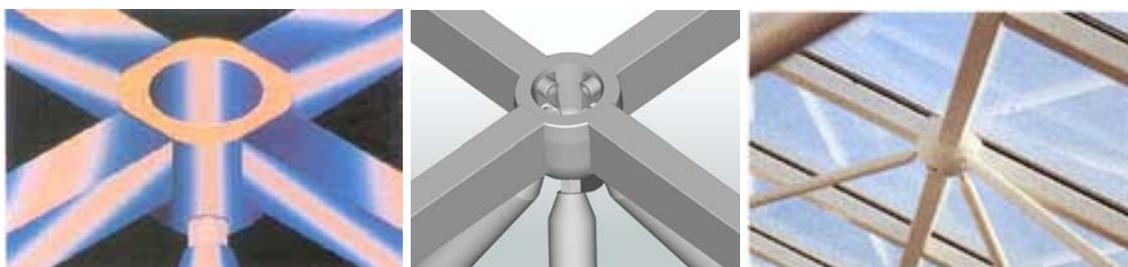
A geometria final da estrutura e os comprimentos das barras podem variar de acordo com as especificidades dos projetos. Os nós são perfurados de maneira a corresponder aos ângulos requeridos pelas barras e permitir outros pontos de fixação se necessário, cada nó pode receber até 18 pontos de fixação para barras e com conexões articuladas através de pinos.

Sistema utilizado em estruturas de uma ou mais camadas (Single or multi-layered)

Onde os vãos podem variar de 6,00 a 200,00 metros.

Os revestimentos de cobertura ou esquadrias são fixados aos nós usando peças metálicas secundárias se necessárias.

### **Sistema Bowl Node NK**



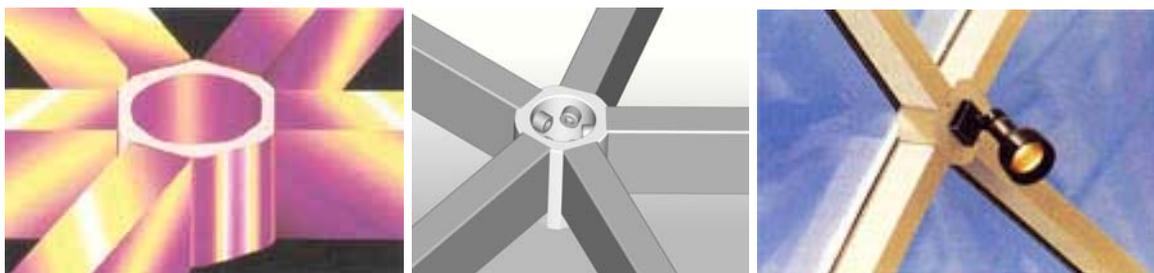
Figs. 32, 33 e 34, O Sistema de Nós Mero Bowl Node NK. Fonte <http://www.mero-tsk.de/index.php?id=89&L=1> , acesso em 23/06/2006

Este sistema (fig. 32, fig. 33 e fig34) foi desenvolvido para estruturas planas de duas camadas (double layer) ou estruturas curvas onde os revestimentos ou esquadrias são fixados diretamente no topo das barras e com conexões articuladas através de pinos.

Usado para estruturas planas ou curvas e geralmente para grandes vãos, pode ser usado conjuntamente com outros nós de sistema Mero.

As barras superiores têm um perfil único conectados ao sistema de nós.

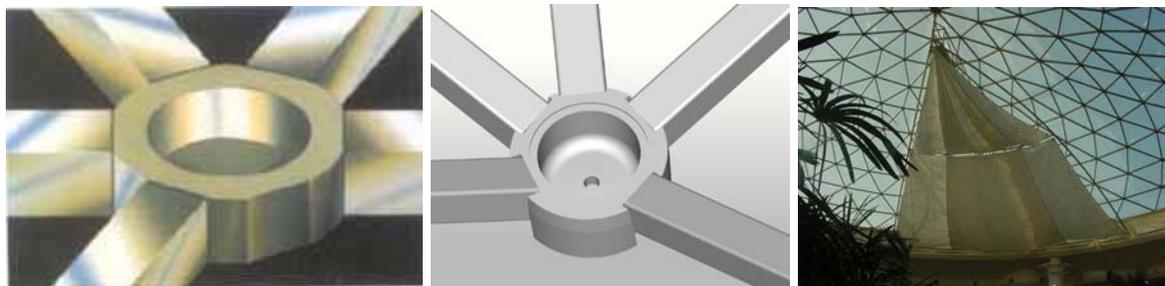
### **Sistema Cylinder Node ZK**



Figs. 35, 36 e 37, O Sistema de Nós Mero Cilíndricos ZK. Fonte <http://www.mero-tsk.de/index.php?id=89&L=1> , acesso em 23/06/2006

Sistema (fig. 35, fig. 36 e fig. 37) desenvolvido para estruturas planas ou de curvatura simples ou dupla com geometria superficial triangular ou quadrangular, com vãos pequenos ou médios. As malhas quadradas ou trapezoidais são formadas por conexões resistentes à flexão e oferecem grande eficiência técnica e visual nos sistemas de fechamento.

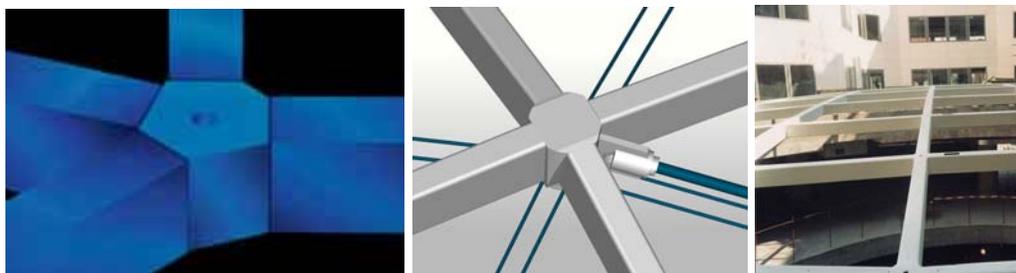
## Sistema Disc Node TK



Figs. 38, 39 e 40, O Sistema de Nós Mero Disk Node TK. Fonte <http://www.mero-tsk.de/index.php?id=89&L=1> , acesso em 23/06/2006

O sistema de Nós em Disco (fig. 38, fig. 39 e fig. 40) foi desenvolvido para curvaturas simples ou duplas com geometria superficial triangular em estruturas de uma camada (single layer) e com conexões articuladas através de pinos. Os fechamentos e revestimentos são fixados aos nós e o sistema é usado para vãos pequenos e médios.

## Sistema Block Node BK



Figs. 41, 42 e 43, O Sistema de Nós em Bloco BK. Fonte <http://www.mero-tsk.de/index.php?id=89&L=1> , acesso em 23/06/2006

Sistema usado para estruturas de uma ou mais camadas que apresentam grandes mudanças nas inclinações como os sheds (fig. 41, fig. 42 e fig. 43). O nó é produzido

por material compacto e podem ser moldados individualmente de acordo com a geometria da estrutura.

O nó e a estrutura de suporte apresentam uma certa complexidade enquanto as barras são simples tubos ocos de seção retangular ou quadrada que são parafusados a consoles e a um feixe de parafusos.

### **Sistema Nó Mailand**



Figs. 44 e 45, O Sistema de Nós Mailand. Fonte <http://www.mero-tsk.de/index.php?id=89&L=1> , acesso em 23/06/2006

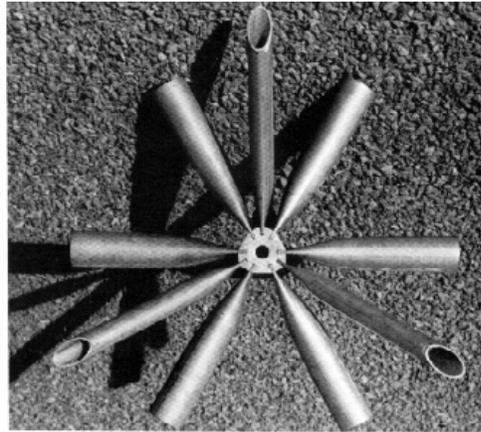
Sistema desenvolvido especialmente para o Pavilhão de Feiras de Milão na Itália projetado pelo arquiteto Maximiliano Fuksas (fig. 44 e fig. 45) e adequado para estruturas de uma camada e seções delgadas.

Resistente a grandes curvaturas, e com conexões articuladas através de pinos.

Adequado para estruturas de formas livres.

## Outros Sistemas

Existem ainda outros sistemas de execução dos nós para Estruturas Geodésicas baseados na experiência de outras empresas ou no desenvolvimento espontâneo de soluções nem sempre aliados a uma patente ou fornecedor.



Figs. 46, O Sistema de Nós Triodetic Fonte <http://www.mero-tsk.de/index.php?id=89&L=1> , acesso em 23/06/2006

O nó do Sistema Triodetic (fig. 46) é composto por um duplo anel ligado por placas axiais nas quais são parafusadas as diversas barras que convergem para cada um destes nós. Neste caso as barras são amassadas em sua extremidade para maior aderência no parafusamento o que teoricamente compromete sua resistência inicial devido à redução da área da seção comprometendo o momento de inércia original do tubo circular que pode ser de aço ou alumínio.

A Triodetic Inc. é uma empresa norte americana com vasta experiência e gama de obras em diversos países, e é especializada na construção de domus, esferas e cascas que utilizam as estruturas espaciais geodésicas disponibilizando através da

internet (2006) seu portfolio de obras e diversas explicações técnicas e comerciais dos processos de projeto e construção.

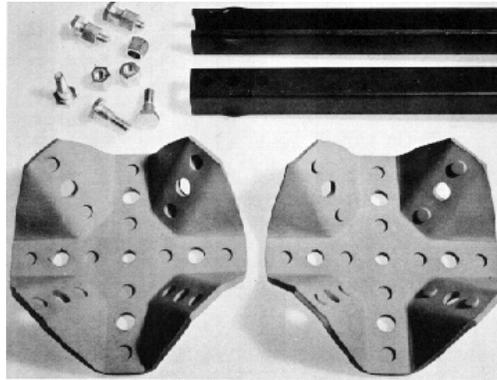


Fig. 47, O Sistema de Nós UniStrut Fonte <http://www.mero-tsk.de/index.php?id=89&L=1> , acesso em 23/06/2006

Outro Sistema da empresa Unistrut (fig. 47) apresenta o nó composto por peça em chapa metálica estampada com perfurações diversas que permitem a ancoragem de tubos cortados axialmente e parafusados aos orifícios da chapa formando um conjunto articulado.

Silva (1999, p14) descreve ainda em sua dissertação de mestrado apresentada na UFOP outros modelos de nós utilizados em estruturas espaciais (fig. 48). Como o nó Oktaplatte composto por sistemas de tubos soldados. O nó de Sarton, bastante utilizado no Brasil, é caracterizado pelo amassamento das barras em suas extremidades gerando uma superfície plana que é atravessada por um parafuso com porca. O nó de Wuppermann, muito usado em abóbadas modulares em que todas as barras são do mesmo comprimento, onde concorrem seis barras unidas através de parafusos e porcas. O nó composto por chapas cruzadas que pode promover a

ligação de até doze barras. O nó de Makowski com disco metálico, utilizado em cúpulas de malha plana.

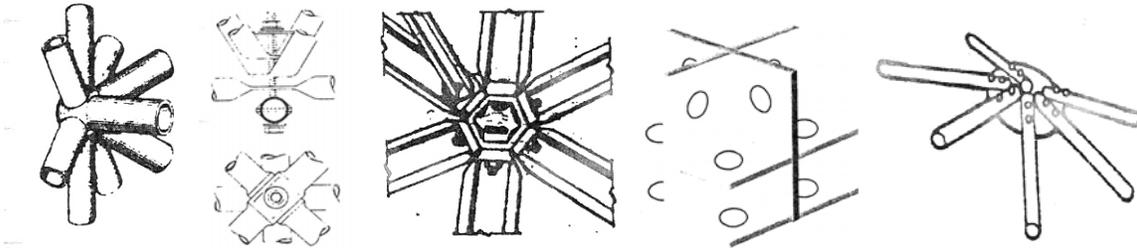


Fig. 48, Nós diversos usados em estruturas espaciais, respectivamente: O nó Oktaplatte, o nó de Sarton, o nó de Wuppermann, o nó de chapas cruzadas e o nó de Makowski. Fonte: Silva, 1999.

### Efeitos Particulares dos Nós

Os nós podem apresentar alguns problemas no caso de cúpulas com frequências muito elevadas. O mais comum deles é o "flop" ou "dimpling" (fig. 49), que ocorre quando o nó inverte sua posição, ficando para dentro da esfera. Isso acontece porque os vértices da geodésica são como vértices de pequenas pirâmides, logo, quanto maior a frequência utilizada, menor serão os comprimentos das barras, assim como a altura de tais pirâmides, o que facilita a ocorrência do flop. Este efeito é também descrito por Fuller no livro *Sinergics* onde o denomina de efeito Dimpling.

Os nós também podem sofrer um pequeno giro promovendo um efeito de rotação, (fig. 49) caso as barras concêntricas não se encontrem exatamente num mesmo ponto. Tal efeito promove pequenos momentos de segunda ordem. Isso se dá porque o nó tende a girar até encontrar a posição de equilíbrio. Se as barras não estiverem perfeitamente ligadas, a estrutura formada já não será mais um triângulo,

mas uma figura de seis lados, o que pode tornar a geodésica levemente e teoricamente instável.

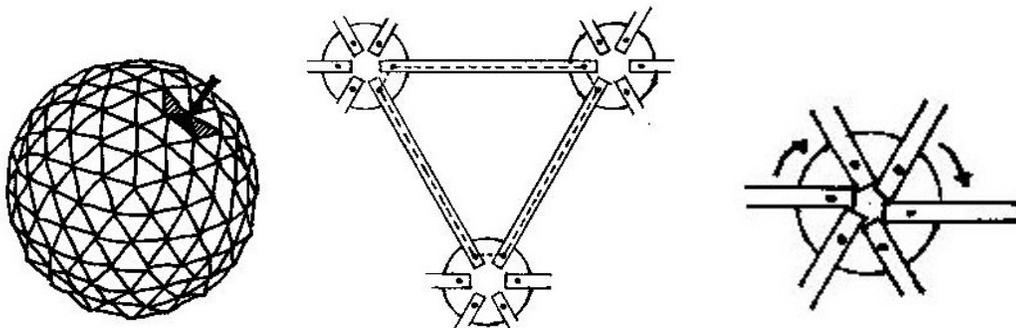


Fig. 49. O efeito Dimpling, descrito por Fuller Fonte <http://www.mero-tsk.de/index.php?id=89&L=1> , acesso em 23/06/2006 e o efeito de Rotação a partir de barras concêntricas que não se tocam. Fonte <http://www.mero-tsk.de/index.php?id=89&L=1> , acesso em 23/06/2006

### 3.3.2 – As Barras

As barras funcionam como os elementos componentes e definidores das células estruturais que convergem aos nós e a eles são fixados. As barras de uma estrutura geodésica podem ser executadas em tubos metálicos redondos ou quadrados, ou em perfis leves abertos, ou mesmo em materiais pouco convencionais como bambu e em alguns casos experimentais até em outros tipos de madeira ou tubos de papel.

Estas barras recebem os esforços axiais de tração e compressão e os transmitem para os nós. As barras podem estar travadas em relação aos nós ou não dependendo do tipo de articulação que define a estrutura geodésica em questão. Quando os nós estão travados as barras apresentam momentos localizados nestes nós. Quando os nós estão articulados as barras apresentam apenas esforços axiais.

As estruturas geodésicas podem apresentar as barras dispostas em um plano esférico único onde as barras estão posicionadas na superfície da cúpula, são as estruturas conhecidas como single layer ou de camadas única. O outro tipo conhecido de composição estrutural geodésica é aquele chamado de estrutura tipo double layer, ou de dupla camada. Neste caso as barras estão articuladas em dois planos ligados entre si formando poliedros estruturais. O tipo mais conhecido destas estruturas tipo double layer é aquele onde as barras formam tetraedros piramidais que articulados entre si conferem grande rigidez à estrutura.

### **3.3.3 – As Coberturas em ETFE**

Dentre os diversos materiais que podem compor o sistema de fechamento das cúpulas geodésicas os Fluorpolímeros são os materiais mais recentes e adequados a este tipo de utilização por sua leveza e baixo custo ambiental. Os Fluorpolímeros usados atualmente em construção incluem os PTFE, ETFE, TFA/PFA, THV, FEP que são mais conhecidos por suas marcas como Teflon, Hostaflon, Polyflon, Toyoflon or Tedlar.

São materiais extremamente resistentes aos ataques químicos e biológicos e também à exposição continuada às condições atmosféricas e aos raios ultra-violeta. É desnecessário qualquer tipo de revestimento para preservar a manta destes materiais que funcionam como uma superfície à prova d'água. Estas mantas consistem de uma combinação de duas substâncias de Fluorpolímeros, uma para o tecido e outras para o revestimento. Tendo em vista a força máxima de ruptura das

membranas de ETFE (aprox.1,200 N/cm), seu peso 250 g/m<sup>2</sup>) e a pequena resistência dos orifícios de parafusamento este material deve ser usado em pequenos vãos ou em interiores.

O Coated ETFE é translúcido promovendo uma iluminação difusa o que pode ser conferido na Sede da Daimler-Chrysler Design em Sindelfingen onde a permeabilidade da luz através da manta de THV-coated ETFE chega a 90%, um valor não obtido por nenhuma outra manta translúcida.

O fato das mantas de Fluorpropileno poderem ser combinadas com diversos outros materiais com grande flexibilidade e maleabilidade faz com que este material apresente um grande potencial no campo da construção das estruturas geodésicas revestidas com membranas translúcidas.

## **CAPÍTULO 4.**

### **DUAS ESTRUTURAS GEODÉSICAS NOTÁVEIS**

No sentido de exemplificar o sistema construtivo aqui estudado com obras de reconhecimento internacional e trazer um caráter informativo a este estudo são apresentadas duas construções que adotam a Estrutura Geodésica como fator determinante na definição da construção e da imagem final do edifício.

A primeira é a estrutura conhecida como Biosfera, a realização mais conhecida e divulgada de Buckminster Fuller para a feira de Montreal em 1967. A descrição desta obra neste trabalho aborda prioritariamente os seus aspectos programáticos e de utilização, o impacto causado na época, e como a adoção do sistema construtivo geodésico influenciou na leitura que os usuário tiveram da construção.

A segunda construção Geodésica a ser apresentada é o Éden Project de autoria do arquiteto inglês Nicholas Grimshaw, construída em 2001 em Cornwall no norte da Inglaterra e pode ser considerada a maior geodésica em superfície até data de sua construção.

No texto relativo a este projeto estão listados, além de seus dados programáticos e de utilização, diversos itens construtivos que como aspectos fundamentais devem ser atentamente cuidados na construção de uma estrutura geodésica seja da dimensão do Eden Project, como em cúpulas de escalas mais reduzidas.

Ambas as construções são cada uma à sua maneira um marco da arquitetura e da engenharia para o momento em que foram construídas e certamente permanecerão na história por sua ousadia e precisão conceitual e tecnológica.

#### **4.1 – BIOSFERA, PAVILHÃO EXPO MONTREAL 1967.**

Segundo Boake (2005) o pavilhão dos Estados Unidos na feira internacional EXPO 1967 na ilha de Sainte-Hélène em Montreal, Canada, foi o Domus Geodésico projetado por Buckminster Fuller e apresentava altura de aproximadamente 20 andares (fig. 50).

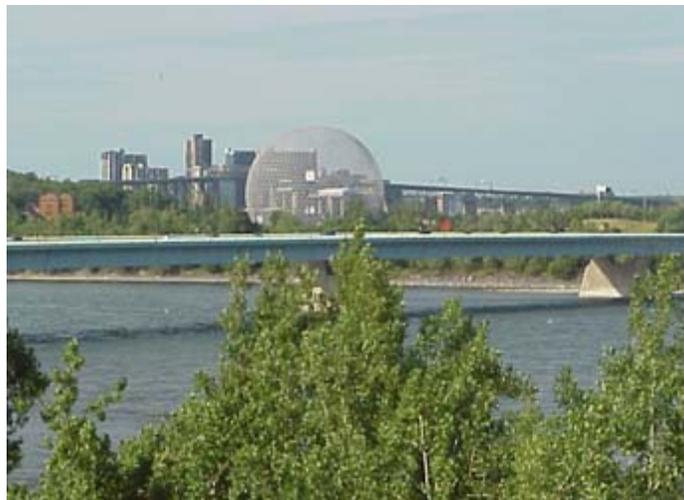


Fig. 50, Vista da Biosfera na Ilha de Santa Helena em Montreal, Canadá. Fonte: Boake, 2005

Como em outros Domus de Fuller foi empregado um modulo estrutural tri-dimensional apresentando um triangulo na face externa e um hexágono no lado interno curvado para se ajustar a um arco dado (fig. 51). Estes elementos estavam distanciados um metro na base e se aproximavam à medida que a edificação ganha

altura (fig. 52). A estrutura completa foi fechada por 1900 painéis moldados em acrílico.



Fig. 51, O modelo estrutural da Biosfera com padrões triangulares externos e hexagonais internos Fonte: Boake, 2005

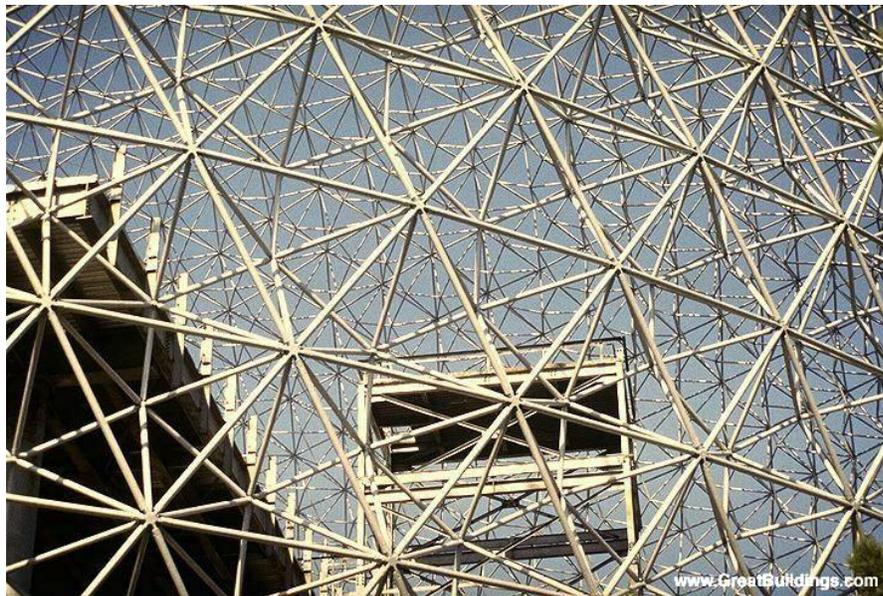
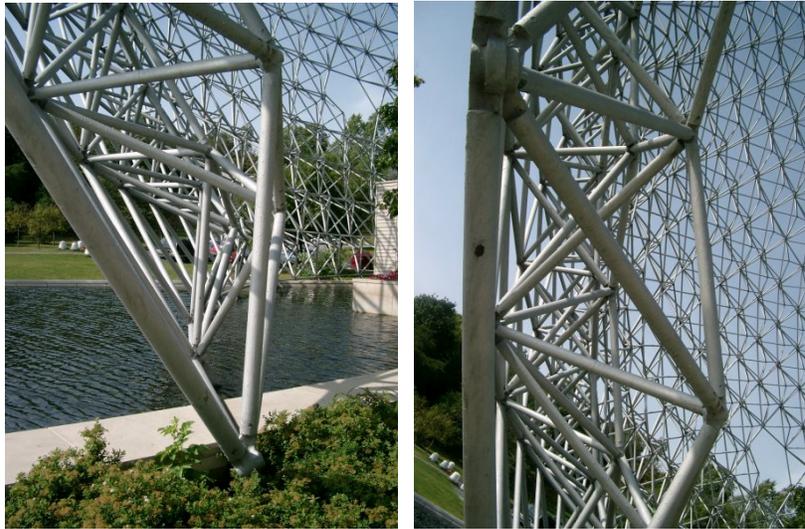


Fig. 52, Os padrões triangulares externos e hexagonais internos. Fonte: Great Buildings.com



Figs. 53 e 54, O modelo estrutural da Biosfera com padrões triangulares externos e hexagonais internos Fonte: Boake, 2005

Estes elementos conectados distribuem o peso da estrutura por toda a superfície externa até tocar o solo (fig. 53 e fig. 54). Para evitar a forma usual da meia esfera que provocaria uma aparência achatada o pavilhão foi projetado na forma de  $\frac{3}{4}$  da esfera.

Este foi o mais complicado dos Domus de Fuller e usava um elaborado sistema de telas de sombreamento retráteis, a fim de controlar a insolação e temperatura interna, que eram operadas por computador de acordo com o giro solar e permitiam a 'respiração' do edifício. O sistema não funcionou perfeitamente na ocasião talvez por estar avançado demais para a época.

Este foi o Pavilhão mais popular da EXPO 67 e recebeu cerca de 11 milhões de pessoas em seis meses. A construção é famosa até hoje não só por sua forma, mas também pelo conteúdo apresentado ao mesmo tempo popular e sofisticado. Além de

sua forma marcante o pavilhão era o único trespassado pelos trilhos do mini-trem que circulava por toda a Expo (fig. 55).

Os sete curadores da exposição conhecidos como Cambridge Seven, decidiram focar a mostra na Cultura Americana e na conquista do espaço exterior sob o tema de 'América Criativa'. Baseados na premissa que não faria sentido provar a superioridade da tecnologia americana, já evidente no caso, os curadores organizaram o conteúdo em quatro unidades temáticas.

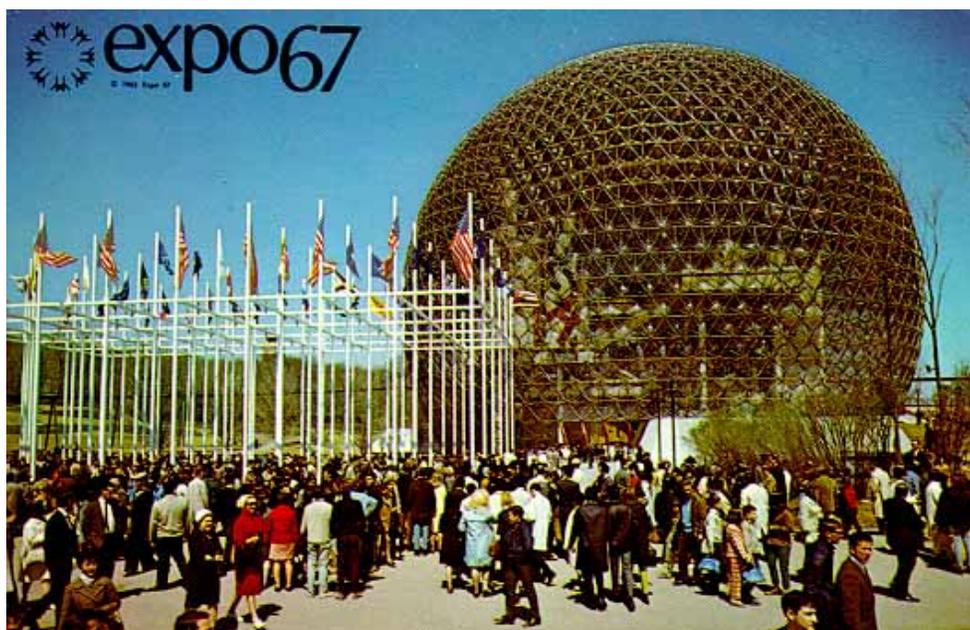


Fig. 55, Cartão postal da Expo 67 em Montreal mostrando a Biosfera, fonte: Stanton, 1997

A primeira parte chamada de 'O Espírito Americano' apresentava centenas de artefatos da arte popular juntando produtos artesanais e industriais. Neste setor estavam itens como, arte plumária indígena, santos em madeira de origem hispano-americana, trabalhos em retalhos feitos em New England, itens sobre a conquista do Oeste, coleção de bonecas Ann antigas, instrumentos musicais, e material de

campanhas presidenciais; materiais até então entendidos como frívolos, de mal gosto e iconoclastas que chocaram muitos visitantes mas deliciaram o grande público e os críticos quebrando barreiras entre arte erudita e popular e se tornando um procedimento comum em museologia apesar de ousado para a época.

O setor seguinte da mostra era alcançado através da maior escada rolante até então construída com 40 metros na plataforma chamada 'Destino Lua' que ilustrava o ambicioso programa Apollo que acabou por levar o homem à lua em julho de 1969. Este setor mostrava cápsulas espaciais reais como a Freedom Seven Mercury usada por Alan B. Shepard in 1961 e a Gemini VII, grandes maquetes de satélites, foguetes e paraquedas penduradas ao teto do pavilhão e uma convincente reprodução da paisagem lunar onde a vida no espaço era apresentada através de vestimentas, equipamentos e alimentos usados pelos astronautas. Esta foi rapidamente reconhecida como a parte mais popular do pavilhão.

Depois da aventura vinha a cultura. A próxima seção intitulada 'A Pintura Americana' continha 23 grandes telas de artistas reconhecidos nos anos 60 e comissionados pelo curador Alan Solomon. Dentre os artistas estavam James Rosenquist, Claes Oldenburg, Andy Warhol, Jasper Johns, Jim Dine, Ellsworth Kelly, Barnett Newman, Robert Rauschenberg e Roy Lichtenstein. Os trabalhos iam do expressionismo abstrato, op, pop e arte geométrica e alguns figuram entre os principais exemplos da arte contemporânea daquela época.

A Quarta e última seção era devotada ao cinema americano, e em particular a Hollywood, a 'máquina dos sonhos', num misto de informação e entretenimento.

Fotos gigantes mostravam atores e atrizes de Mary Pickford a Marlon Brando e três telas passavam trechos de musicais, cenas de amor e trechos de atores em filmes famosos como Orson Wells em 'Cidadão Kane' e Vivien Leigh com Scarlett O'Hara em 'O Vento Levou'.

Ao contrário do padrão de outras feiras mundiais anteriores à EXPO 67, onde um monumento era construído para simbolizar o evento e exemplificar o desenvolvimento tecnológico da época, como a Torre Eiffel de 1889 em Paris e o Atomium de 1958 em Bruxelas, os organizadores da feira de Montreal não queriam um símbolo desta ordem e conceberam o evento no sentido de celebrar a colaboração e entendimento entre os povos em vez exibir conquistas industriais e tecnológicas. Quase 40 anos depois a Biosfera de Buckminster Fuller sobreviveu ao teste do tempo e se transformou, através de seu poder evocativo, numa ilustração eloqüente da intenção de unir tecnologia e natureza. Ela é um símbolo vivo do Homem e seu Mundo, que capturou a imaginação de milhões de visitantes e ainda está lá restaurada por Eric Gauthier confirmando o status de Montreal como uma cidade internacional.



Figs. 56 e 57, Vista da Biosphere com a pele de fechamento removida. Fonte: Boake, 2005  
fotos de Terri Meyer Boake B.E.S. B.Arch. M.Arch. Associate Professor School of Architecture University of Waterloo



Fig. 58, Nova entrada e espelho d'água executadas na restauração do pavilhão. Fonte: Boake, 2005.



Figs. 59 e 60, Vistas da pérgola metálica. Fonte: Boake, 2005



Figs. 61 e 62, Vista desde do nível superior e da passarela em vidro . Fonte: Boake, 2005



Fig. 63, Vista da tela metálica de sombreamento. Fonte: Boake, 2005



Figs. 64 e 65, Vista do nível superior, ao longe o centro de Montreal e passarela e beiral de sombreamento na fachada sul com espaços de exposição internos. Fonte: Boake, 2005.



Figs. 66 e 67, Detalhes das ligações do Domus. Fonte: Boake, 2005

Atualmente a Biosfera de Montreal é um museu interativo que trabalha no sentido de despertar a consciência a respeito do ecossistema dos Grandes Lagos e do rio Saint-Lawrence (fig. 56 até fig. 67). Em função de sua arquitetura específica o consumo de energia é substancialmente reduzido. A combinação de sistemas geotérmicos e tecnologias de ponta produz uma impressionante eficiência energética. Comparados com as opções elétricas convencionais, o sistema geotérmico promove uma redução no consumo de energia de 459 MWh ou 21% anuais o que é significativo considerando o uso extensivo de janelas na construção e o clima nórdico do Canadá.

## **4.2 – EDEN PROJECT**

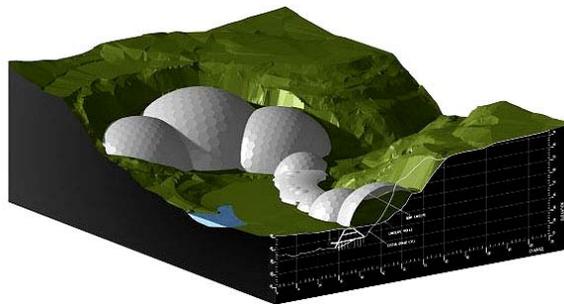
### **4.2.1 – Descrição do Eden Project**

Conforme artigo de Knebel, Sanchez-Alvarez e Zimmerman (2005), disponibilizado no website da indústria Mero, o complexo conhecido como Eden Project está localizado em St. Austell, Cornwall, Inglaterra e foi projetado pelo arquiteto Nicholas Grimshaw com a obra concluída em 2001.

Trata-se da maior estufa já construída no mundo, e consiste em um jardim botânico e parque temático, uma completa apresentação da bio-diversidade global e da interdependência entre vida humana e meio ambiente.

Encapsulado em bolhas translúcidas climatizadas é um centro de educação construído dentro de uma antiga área de mineração de caulim, criando um micro-clima protegido pela disposição do complexo abaixo do nível dos terrenos vizinhos (fig. 68 e fig. 69).

As enormes estufas (Biomás) abrigam inúmeras espécies vegetais provenientes da Amazônia, África, Malásia, USA, do Mediterrâneo, Chile, Himalaia e Australásia, distribuídas em dois espaços climatizados, criando respectivamente as atmosferas Úmida Tropical - representando um ambiente de floresta tropical, e Morno Temperado - simulando condições mediterrâneas (fig. 70).



Figs. 68 e 69, Vista Geral do Éden Project e seu modelo computadorizado. Fonte: Knebel 2005 e Metalica 2004.

O gigantesco empreendimento demandou a criação de um modelo computadorizado da antiga mina e requereu a movimentação de 850.000m<sup>3</sup> de terra para dar lugar às estufas e às várias vias de acesso, áreas de estacionamento, complexos sistemas de drenagem, estabilização de declives e rotas de acesso para visitantes. As fundações

que seguem os sinuosos contornos servem de apoio às estruturas leves de aço tubular das cúpulas geodésicas que estão interligadas por arcos.

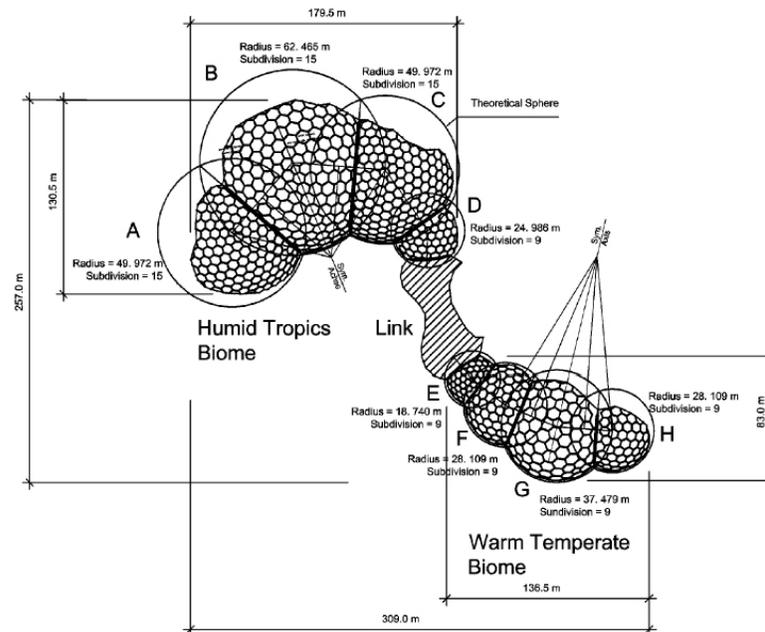


Fig.70, Planta Geral do Éden Project. Fonte: Knebel 2005

A maior das cúpulas tem 100m de diâmetro e 45m de altura. O módulo hexagonal é capaz de variações adaptáveis à topografia do terreno. A estrutura de aço utilizada, é composta de elementos estruturais tubulares e sistema de conectores padronizados, seu peso total não supera as 1.000 toneladas, é altamente eficiente e facilmente transportável.

Esta estrutura tem o fechamento dos módulos estruturais executados em painéis de ETFE transparente, formando almofadas de ar, proporcionando uma grande redução de peso comparando-se com uma possível execução em vidro, reduzindo os custos com transporte e facilitando a montagem.

As esferas possuem diâmetros diferentes, para atender tanto à topografia quanto às exigências de espaço internas, e a forma resultante dá a impressão de um organismo biomórfico. A sinergia entre arquitetura e paisagem é fundamental para entender a filosofia do Projeto Éden.

Assim o Centro de Visitantes, um edifício com forma de arco achatado cuja cobertura em grama reforça a noção que a área externa também faz parte do conjunto, cria a integração entre os dois conjuntos de esferas. Esta estrutura central comporta os serviços, restaurante e espaço para exposições.

O Projeto Éden é a maior cobertura transparente autoportante do mundo, cobrindo uma área aproximada de 23.000m<sup>2</sup> com painéis hexagonais individuais de até 80m<sup>2</sup> (diâmetros que variam de 6 até 8 m) entre os quais 232 painéis são controlados por computador e operáveis para ventilação.

#### **4.2.2 Geometria e Conceito Estrutural**

A primeira proposta feita pelo arquiteto e calculista similar à estação Waterloo de Londres, projeto também de Grimshaw, com a estrutura metálica arqueada se mostrou muito pesada e onerosa, com excesso de peças metálicas e vidro no fechamento transparente da cobertura (fig. 71 e fig. 72).



Fig. 71 e 72, O primeiro modelo estrutural e a configuração adotada. Fonte: Knebel 2005

A segunda idéia foi baseada numa estrutura em Domus em duas camadas com geometria hexagonal e se mostrou mais apropriada, mais fácil de ser adaptada ao terreno, mais leve e com menos componentes metálicos. Para a cobertura foram escolhidos travesseiros transparentes de ETFE cheios de ar cujo pequeno peso propiciou uma estrutura bastante leve.

Os Domus do Eden Project são superfícies geodésicas uma vez que toda a superfície pode ser contida no interior de uma grande esfera. A partir do conhecimento dos Sólidos Platônicos sabemos que o icosaedro é um poliedro regular com 20 faces iguais que são triângulos regulares. Um dodecaedro é também um polígono regular com doze faces idênticas que são pentágonos regulares.

Dodecaedro e Icosaedro são sólidos duais entre si. Se os pontos médios de faces adjacentes de um poliedro são conectados com linhas o corpo resultante é dual ao outro volume e vice-versa. Pode-se notar que os dois poliedros duais têm um centro

comum quando posicionados concentricamente numa esfera circunscrita. Assim uma rede geodésica pode ser obtida projetando-se ou mapeando-se de uma maneira prevista as faces relativas dos poliedros duais na superfície de uma esfera.

A rede estrutural do domus do Éden Project consiste de duas redes esféricas e concêntricas com a diferença entre os raios, ou a profundidade estrutural predefinida. As redes internas e externas são interconectadas por um jogo de linhas diagonais dando origem a uma trama esférica de duas camadas com comportamento tri-dimensional. A trama externa é uma rede hexagonal enquanto, chamada de Hex-Net (fig. 74), enquanto a rede interna é composta por triângulos e hexágonos e chamada conseqüentemente de Tri-Hex-Net (fig. 75 até fig. 79).

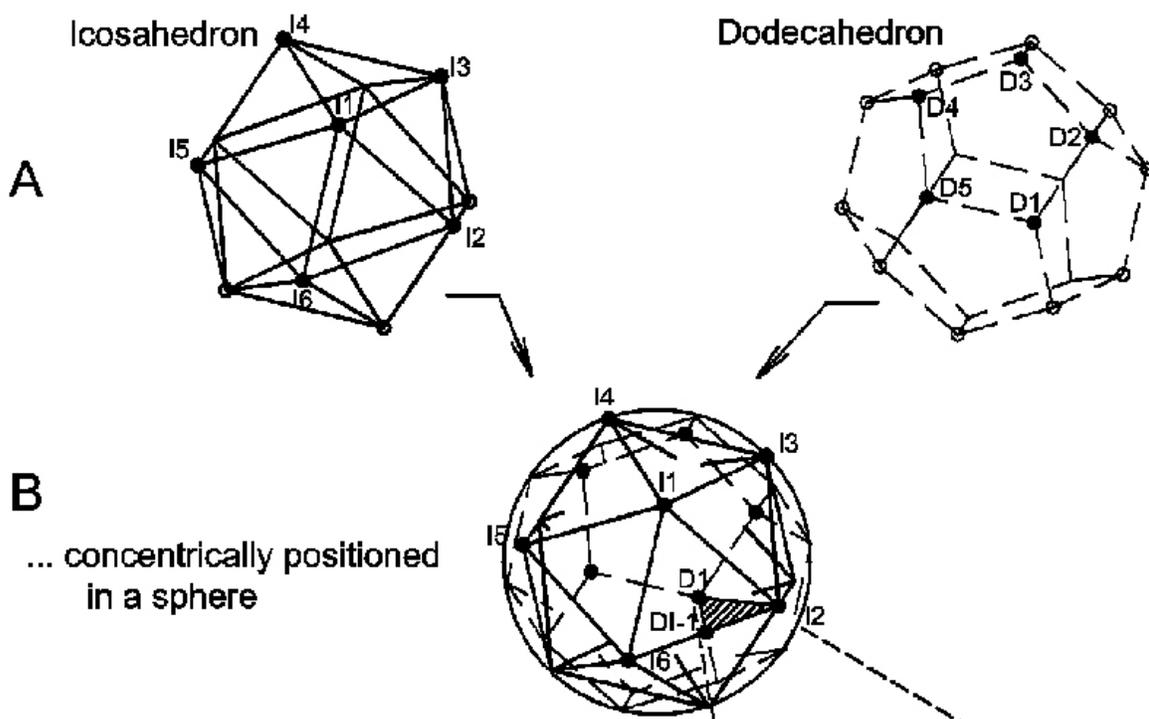


Fig. 73, Matrizes geométricas para a cúpula. Fonte: Knebel 2005

Os passos para a geração a geometria do Éden Project que é uma rede dodeca-ico são mostrados nas figuras anteriores:

De forma a gerar a rede dodeca-ico os dois poliedros são colocados como duais em relação ao centro da esfera. Os cantos ou vértices do icosaedro na trama resultante podem ser reconhecidos por sua simetria pentagonal e se correspondem com os pontos médios das faces do dodecaedro (fig. 73).

Na figura um triângulo chamado 'característico' é definido pelo ponto I2 do icosaedro, o ponto D1 do dodecaedro e o ponto médio do canto do icosaedro DI 1' projetado na superfície da esfera (fig. 74).

Esta região de superfície triangular é a menor parte simétrica de toda a trama esférica e conhecida como LCD (lowest-common-denominator) o menor denominador comum triângulo. Através deste procedimento é possível dividir a esfera em 120 mínimas partes simétricas. A real especificação das propriedades geométricas e conectivas da trama completa pode ser reduzida a este triângulo mínimo.

Nos Domus do Éden os hexágonos foram obtidos pela omissão de certos elementos desta rede de triângulos mínimos. A completa trama hexagonal foi subseqüentemente gerada pelas reflexões e rotações na superfície da esfera da mínima malha dos triângulos característicos.

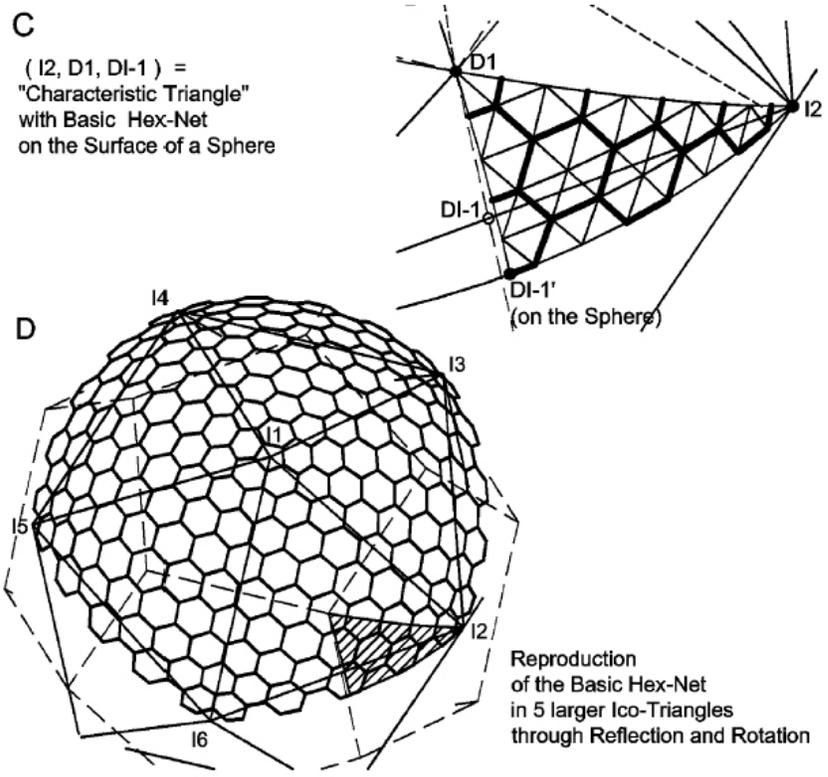


Fig. 74, O Sistema Hex-Net. Fonte: Knebel 2005



Fig. 75, A estrutura Hex-Tri-Hex. Fonte: Knebel 2005.



Fig. 76 e 77, A estrutura Hex-Tri-Hex. Fonte: Metálica 2004.



Fig. 78, O interior da estrutura Hex-Tri-Hex. Fonte: Metálica 2004.



Fig. 79, A montagem da estrutura Hex-Tri-Hex. Fonte: Metálica 2004.

Depois do design final da geometria o cálculo estrutural passou a ser executado. A geometria foi transferida para um modelo estrutural 3d, e os cálculos foram feitos no programa RSTAB baseado na teoria de 2ª ordem. Os elementos superiores e os arcos funcionam como vigas, os elementos inferiores e diagonais foram modelados como treliças. O carregamento principal considerado foi devido à neve. As análises comprovaram a estabilidade da estrutura mesmo com o colapso de alguns membros. As mudanças de temperatura usualmente não são críticas para estruturas de domus porque eles podem expandir livremente na direção radial. Os domus foram construídos sem juntas de dilatação.

### **4.2.3 – Componentes do Sistema Construtivo do Éden Project**

#### **4.2.3.1 – O Nó de Conexão**

Os principais parâmetros para as conexões das vigas superiores foram:

- Conexão rígida para 3 tubos com diâmetro de 193mm
- Conexão articulada para 3 membros diagonais
- Rápida e fácil manipulação
- Mínima tolerância
- Nenhuma soldagem lateral
- Possibilidade de fixação de corda para acesso externo
- Boa imagem arquitetônica



Fig.80, Os nós das vigas superiores. Fonte: Knebel 2005.

Chegou-se a um modelo de nó a partir da evolução do tipo usado pela MERO onde a superfície circular e retangular são unidos por parafusos (fig. 80).

O topo desta conexão está alinhado com os tubos de forma que a cobertura pudesse ser posta por cima. O nó é feito de ferro fundido (GGG40) e pesa em torno de 40kg.

O diâmetro de cada um dos 1100 nós é de 400mm e a espessura da parede é 40mm. Cada nó foi cortado e perfurado por máquinas computadorizadas, ou controle numérico computadorizado, com tolerância mínima (fig. 81).

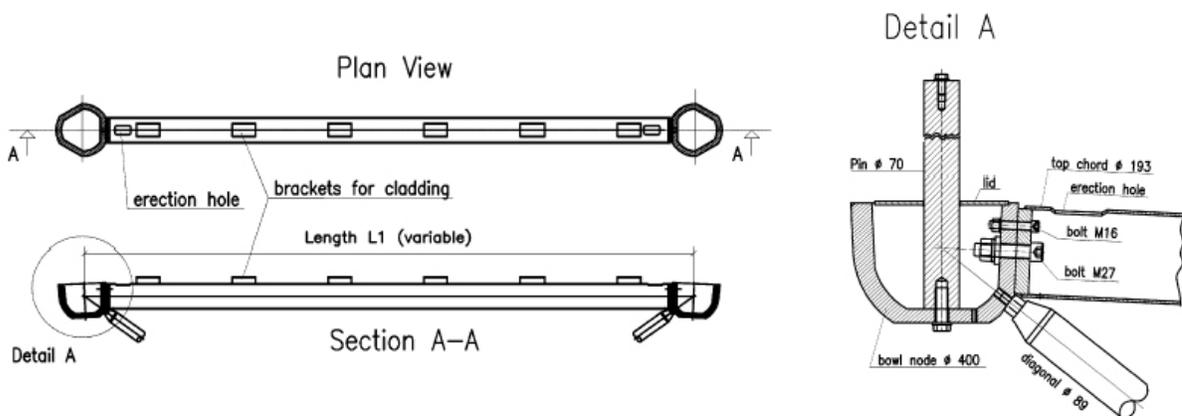


Fig. 81, Planta, Seção e Detalhe da viga superior e seção do nó. Fonte: Knebel 2005.

#### **4.2.3.2 – As Vigas Superiores**

O projeto das vigas superiores (top cords beams) resultou num tubo de 193,7mm de diâmetro. De forma a gerar a mesma conexão com os nós, todas estas vigas de topo são do mesmo diâmetro, mas com diferentes espessuras de paredes de acordo com as forças e comprimentos de flambagem.

Desde que todos os ângulos geométricos necessários para a montagem estão nos nós, os finais das vigas superiores são cortados retangularmente o que promove rapidez e facilita sua manufatura. Em cada terminação uma chapa de arremate é soldada e no topo da viga é feito um furo de montagem. Parafusos pró-tendidos de alta resistência (M27 e M36) na conexão da viga com o nó. Um parafuso adicional M16 foi usado para fixar a viga na posição correta e transferir os momentos de torção. No topo das vigas pequenos suportes foram soldados para suportar o quadro de alumínio da cobertura.

#### **4.2.3.3 – As Vigas Inferiores e as Diagonais**

A viga inferior em tubo e as diagonais são feitas com o conhecido Sistema MERO Space Frame (fig. 82). A análise de esforços indicou uma espessura entre 76,1mm e 168,3mm.



Fig. 82, Detalhe do nó da viga em tubo inferior e diagonais. Fonte: Knebel 2005.

De acordo com os padrões BS Standarts o comprimento de flambagem foi limitado a 180. A conexão na camada inferior são nós clássicos da MERO que proporcionam rápida e fácil montagem da estrutura.

#### **4.2.3.4 – Os Arcos**

Ao longo da interseção dos Domus uma viga treliçada triangular (fig. 83 e fig.84) é colocada com o vão superior a 100m na maior delas. A seção dos arcos medem 219,1mm na viga superior e 159mm nas duas vigas inferiores e 101,6mm nas diagonais. As vigas de topo e base são arqueadas. Para manufatura as vigas-arco eram divididas em três partes e montadas no canteiro de obras. Os arcos se apóiam em suportes articulados em pesadas fundações de concreto.



Fig. 83 e 84, Vista do arco de conexão dos Domus. Fonte: Knebel 2005 e Metálica 2004.

No topo do tubo de 219mm uma peça de 10mm de aço foi fixada para funcionar como calha. Os arcos de conexão são integrados com o topo e base dos Domus não interrompendo a unidade de sua imagem.

#### 4.2.3.5 – Os Suportes

Um ponto desafiador foi o projeto do sistema de suportes. Por causa das fundações variáveis ao longo de 800m lineares, cada um dos 187 pontos de suporte são diferentes. Estes suportes também são feitos com tubos de 193mm cada e soldados entre si (fig. 85).

A viga superior de conexão e as diagonais são parafusadas uma a outra. As chapas de base são fixadas à fundação através de parafusos de ancoragem M27 e M36 e as forças horizontais são transferidas através de blocos de cisalhamento.



Fig. 85, Vista do sistema de suportes. Fonte: Knebel 2005.

#### 4.2.3.6 – Portas e Venezianas

Para se conseguir o clima tropical no interior dos Domus um sistema especial de ventilação teve que ser usado (fig. 86).

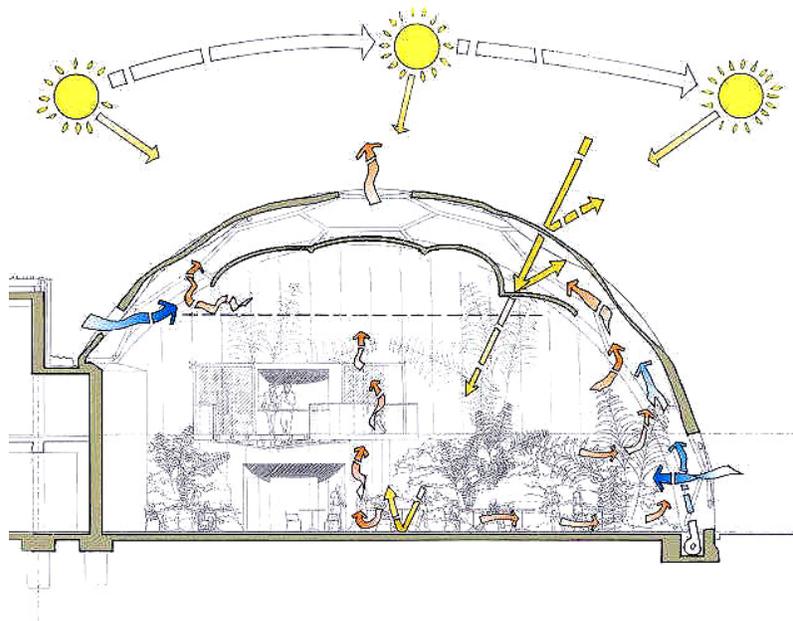


Fig. 86, Corte esquemático do sistema de ventilação. Fonte: Metálica 2004.

As aberturas necessárias ao fluxo de ar foram determinadas por Ove Arup & partners, London. As aberturas de ventilação estão no topo de cada um dos 8 Domus (fig. 87). Os 5 hexágonos em torno do pentágono superior foram divididos em 3 triângulos de forma que cada Domus tivesse 30 aberturas comandadas por controle remoto. Estas janelas também contêm os colchões triangulares de cobertura com ar interno.



Fig. 87, Vista do sistema superior de ventilação. Fonte: Metálica 2004.

A subestrutura consiste de seções retangulares ocas de 140x70cm. Para a entrada de ar janelas em lamelas de vidro aparecem na base do Domus. O ar quente pode ser soprado no interior do Domus através do uso de aquecedores (fig. 88 e fig. 89). Cada Domus tem apenas portas para manutenção e saídas de emergência. O acesso de visitantes é sempre e apenas pela construção central de ligação. Os Domus têm uma passarela superior para manutenção.



Fig. 88 e 89, Venezianas de ventilação e aquecedores . Fonte: Knebel 2005 e Metálica 2004.

#### 4.2.3.7 – Fabricação

A maioria da estrutura metálica foi fabricada na fábrica MERO em Wuerzburg na Alemanha. Apenas os arcos e os pontos de suporte foram fabricados em outros locais. A fabricação das vigas e dos nós contaram com ajuda de máquinas computadorizadas. As placas de terminação e os suportes da viga superior foram soldados a mão. Cada elemento ou nó tem seu número próprio que permaneceu durante as fases de projeto, fabricação e montagem.

Para proteção contra corrosão os elementos metálicos foram galvanizados. Os arcos foram galvanizados na França, que tem os maiores galvanizadores da Europa, devido sua grande dimensão. Os nós de conexão foram feitos de ferro fundido GGG40 e também galvanizados. Com uma inspeção geral a cada dois anos a estrutura foi projetada para não receber manutenção em 30 anos.

#### 4.2.3.8 – Revestimento

Os mais de 800 elementos hexagonais são revestidos com travesseiros de folhas de ETFE (ethiltetrafluoretireno) transparente cheios de ar (fig. 90 e fig. 91). O material básico tem a espessura entre 50 $\mu$ m a 200 $\mu$ m com uma largura de 1,50m.



Figs. 90 e 91, Os travesseiros de ETFE instalados. Fonte: Knebel 2005.

O material em folhas foi cortado e soldado. O travesseira é formado por 3 camadas do material. A camada do topo e base conformam o travesseiro e recebem os esforços. A camada interna tem a função de reforçar o controle da temperatura e dividir o espaço de ar em caso de escapes. Em áreas de fortes ventos locais e sucções a superfície externa dos travesseiros foram reforçadas com duas camadas da folha.

Os travesseiros foram ligados a uma moldura de alumínio e fixados nas vigas superiores.



Fig. 92, O sistema de insuflamento de ar. Fonte: Knebel 2005.

Cada travesseiro é ligado a um sistema de aeração (fig. 92). A pressão dentro dos travesseiros é de cerca de 300 Pa. A altura máxima do travesseiro inflado é de 10 a 15% de sua extensão máxima.

O material ETFE tem sido usado por mais de 20 anos. É extremamente leve e transparente. A superfície é lisa e suave de forma que a sujeira externa é lavada pela chuva. Travesseiros com a dimensão dos do Éden Project nunca tinham sido executada anteriormente (fig. 93 e fig. 94).



Figs. 93 e 94, A cobertura realizada em painéis de ETFE. Fonte: Metálica 2004.

Vários estudos e testes foram feitos, alguns em modelos de escala 1:1, entre os fabricantes da MERO os calculistas da Ove Arup e os fornecedores das folhas de ETFE da Foiltec de Bremen. Os resultados permitiram que alguns travesseiros tivessem vãos de até 11,00m. em áreas de solicitações maiores devido ao peso de neve, como nos arcos, foram usados cabos auxiliares. Após a fase de projeto cada um dos 800 travesseiros foi calculado, cortado e fabricado. As calhas entre os Domus foram executadas por partes de alumínio insulado e cobertas pela folha de ETFE na parte externa.

A água da chuva é recolhida e usada nas plantas no interior dos Biomass. Toda a superfície da cobertura é mantida por operários através de cordas fixadas a pinos de aço ligados a cada nó da estrutura.

#### **4.2.3.9 – Construção**

A construção da estrutura metálica começou em 1999. Os Movimentos de terra e os 858m lineares de fundações foram executadas por empresa especializada. As fundações têm 2,00m de largura e 1,5m de altura e está apoiada em colunas de 12m de comprimento perfuradas no terreno. Para a montagem da estrutura usou-se o maior andaime já visto com lugar no livro Guinness dos recordes (fig. 95). A maioria dos hexágonos são ligados em terra e içados por guindastes e então parafusados uns aos outros.



Fig. 95, Eden Project em construção. Fonte: Metálica 2004.

As peças pré-fabricadas dos arcos tinham 13m de comprimento e eram também acopladas no andaime e soldadas in loco. O andaime foi removido após a montagem da estrutura. A instalação dos travesseiros de ETFE foi feita por escaladores quando aconteciam paralelamente os serviços de terra no interior dos Biomas. O revestimento foi concluído na data estimada em setembro de 2000 de forma que os Biomas puderam ser aquecidos e o plantio pode começar durante o inverno. O Eden Project abriu as portas para o público em março de 2001 (fig. 96).

#### **4.2.3.10 – Ficha Técnica do Édén Project**

Local: Saint Austell, Cornwall, Inglaterra

Superfície Total: 39540 m<sup>2</sup>

Peso total do aço utilizado: 700 ton.

Total comprimento de todas as vigas: 36000m

Peso do aço por área: menos que 24kgf/m<sup>2</sup>

Área do maior hexágono: 80m<sup>2</sup> e vão de 11m

Diâmetro do maior Domus (B): 125m

Área total coberta: 23000m<sup>2</sup>

projeto arquitetônico: Nicholas Grimshaw & Partners Ltd, London

engenharia estrutural: Anthony Hunt Associates

construção: Alfred McAlpine Construction

construção: Sir Robert McAlpine

estrutura de aço: Mero GmbH & Co. KG

membranes: Foiltec Verarbeitung von Folien und Textilien GmbH

engenharia: Ove Arup & Partners



Fig. 96, Os alpinistas fazendo a manutenção da cúpula. Fonte: Metálica 2004.

## **CAPÍTULO 5.**

### **SOFTWARES DE MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS GEODÉSICAS, UTILIZADOS NESTE ESTUDO.**

#### **5.1 – SOFTWARES PARA O PROJETO ARQUITETONICO**

Os softwares de desenho arquitetônico da família dos CADs, ou Computer Aided Design, são hábeis não somente no desenho técnico bidimensional mas na modelagem tridimensional de superfícies planas e de revolução. Estes desenhos tridimensionais podem ser conseguidos em softwares como Autocad, 3d Max, Form Z e Sketch Up entre outros.

Em se tratando da geração de superfícies geodésicas estes softwares acima citados apresentam algumas limitações quanto à variedade de possibilidades triangulação de uma superfície curva previamente modelada. Estas modelagens visam em sua maioria a renderização de superfícies lisas, brilhantes ou não, apresentando poucas possibilidades de controle total das triangulações como tamanho das barras, ângulos dos nós ou figuras poligonais celulares, variações fundamentais no estudo e modelagem de estruturas geodésicas.

Existem softwares específicos para a modelagem de superfícies geodésicas que apresentam uma gama maior de controles para a modelagem tridimensional tais

como a definição da figura poliédrica e seu numero de faces, a freqüência da figura gerada ou a deformação da base circular em elíptica.

Estes softwares são encontrados na internet podendo ser baixados como shareware e utilizados livremente e produzem arquivos de desenhos em 3d de extensão .dwg ou .dxf que podem ser abertos em autocad (fig. 99) para que sejam trabalhados como base de uma estrutura geodésica em projeto.

O Windome (fig. 97, fig. 98) é um destes programas e através dele foi gerado a base geométrica para o projeto da UMEA apresentado posteriormente.

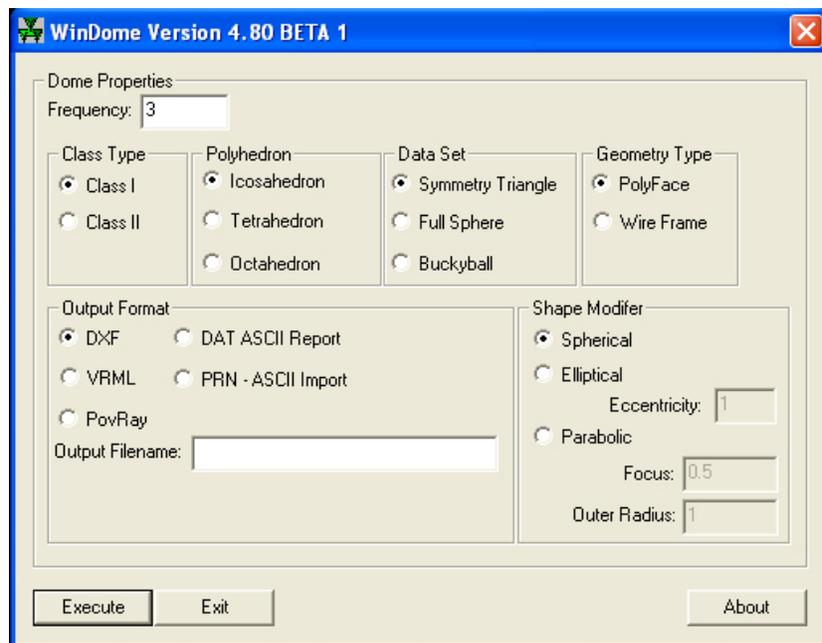


Fig 97. Tela do programa WinDome, com os controles, entre outros, das figuras poliédricas, a freqüência, o tipo de geometria, e a definição de forma esférica ou elíptica. Fonte: Imagem colhida pelo autor, 2006.

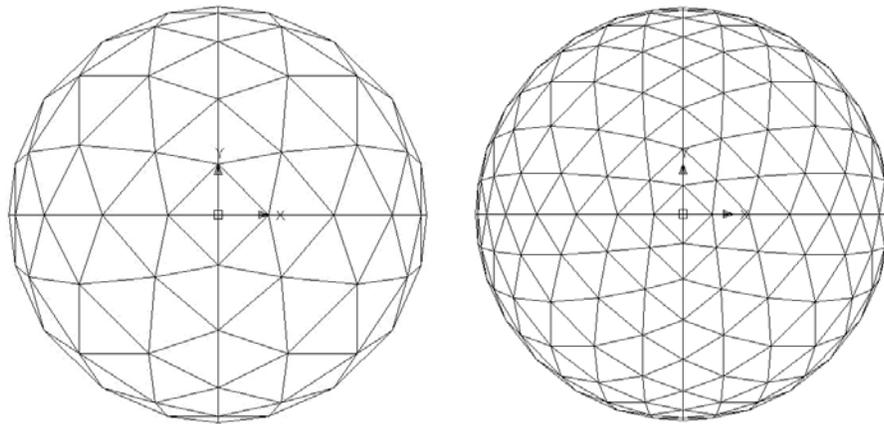


Fig. 98, Modelagem em 3d, esferas com base em um octaedro com freqüências 5 e 8 respectivamente produzidas pelo programa Windome . Fonte: Imagem colhida pelo autor, 2006.

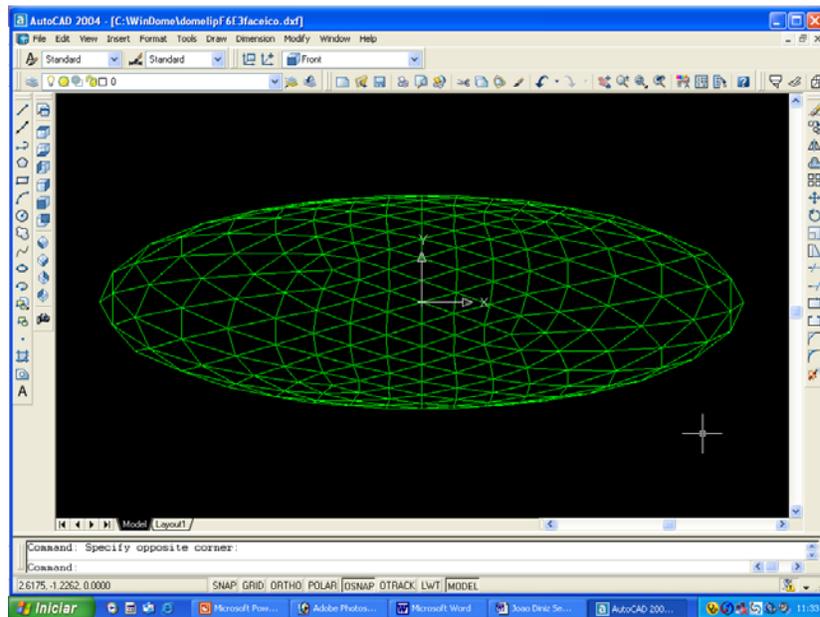


Fig. 99, Tela do Autocad com a modelagem em 3d, produzidas e exportada pelo programa Windome, da superfície de base elíptica que gerou o projeto da UMEA, apresentado a seguir . Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

O CadreGeo5.0 é outro software que desenha e modela superfícies geodésicas tridimensionais e apresenta mais recursos que o Windome tais como cálculo dos ângulos nos nós e nas barras, numeração e marcação dos nós, maior possibilidade de variação de comandos, cores, fontes e figuras básicas (fig. 100). Este programa gera figuras sólidas e tipo wireframe e exporta os resultados em arquivos DXF para

programas tipo CAD ou programas de análise estrutural baseados em elementos finitos.

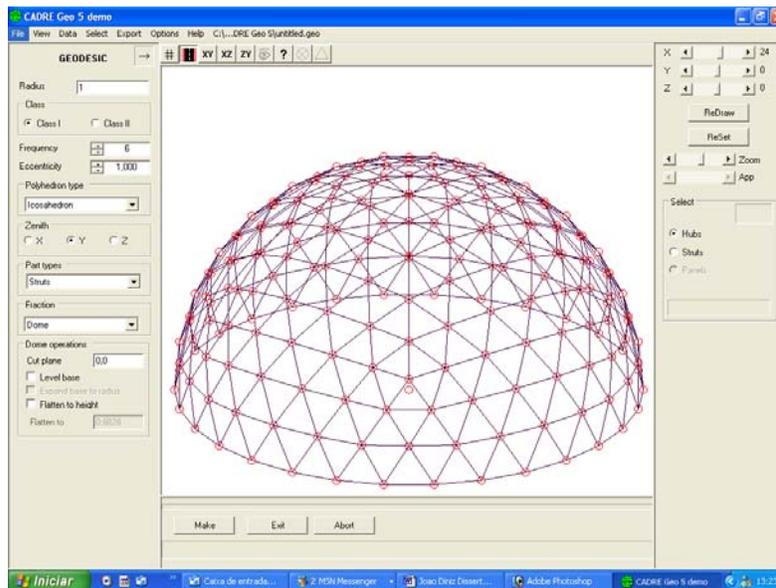


Fig. 100, Tela do programa CadreGeo, com os controles, entre outros, das figuras poliédricas, a frequência, o tipo de geometria, e a definição de forma esférica ou elíptica. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.

## 5.2 – O PROGRAMA ANSYS, PARA MODELAGEM, ANALISE ESTRUTURAL E PRÉ-DIMENSIONAMENTO

O ANSYS (ANalysis SYStem) é um programa de análise pelo Método dos Elementos Finitos diversos tipos de formas e estruturas não somente ligadas à arquitetura e engenharia, mas às indústrias automobilística, aeroespacial, à medicina, odontologia e diversas outras áreas da tecnologia e ciência (fig. 101).

O Método dos Elementos Finitos, em resumo, propõem a discretização ou subdivisão de um problema de difícil análise global em  $n$  partes menos complexas que por sua

vez têm uma solução conhecida. Uma estrutura teoricamente tem infinitas partes e os Elementos Finitos são justamente a divisão desta estrutura em um número conhecido de partes analisáveis a partir das quais poderá ser analisada, projetada e construída.

Cabe aqui fazer um paralelo entre este método dos Elementos Finitos e as Estruturas Geodésicas que formalmente apresentam-se já discretizadas em módulos espaciais ou células estruturais apresentando-se como um 'problema construtivo' com uma solução em si mesmo já indicada ou sugerida. Não é por acaso que diversas estruturas da natureza apresentam em sua forma visível estas superfícies já subdivididas ou trianguladas, o que aproxima as geodésicas destas formas naturais e orgânicas com sua forma própria de entendimento e resolução.

O programa AnSys permite que se atinja objetivos valiosos no projeto de uma estrutura como o desenho de um modelo virtual tridimensional de uma forma, estrutura ou construção a ser projetada e analisada, ou permite ainda que um modelo desta natureza seja transferido através de outro programa de desenho CAD.

Este programa numa etapa posterior gera, automaticamente, diversas malhas de elementos finitos a partir de linhas superfícies e / ou sólidos pertencentes à modelagem anterior. A variação destas malhas de elementos finitos permite que a estrutura em questão seja projetada da melhor forma. Este atributo da possibilidade de variação das malhas superficiais faz do Ansys uma ferramenta muito mais

eficiente do que os outros programas CAD na triangulação ou subdivisão de superfícies diversas.

O AnSys permite ainda, como em outros programas de cálculo estrutural a aplicação das condições de contorno de uma estrutura tais como deslocamentos, rotações e carregamentos, sobre as malhas previamente modeladas.

Aplicadas estas condições de contorno o programa estuda as respostas físicas na estrutura, tais como, níveis de tensões e deformações, temperaturas ou campos eletromagnéticos.

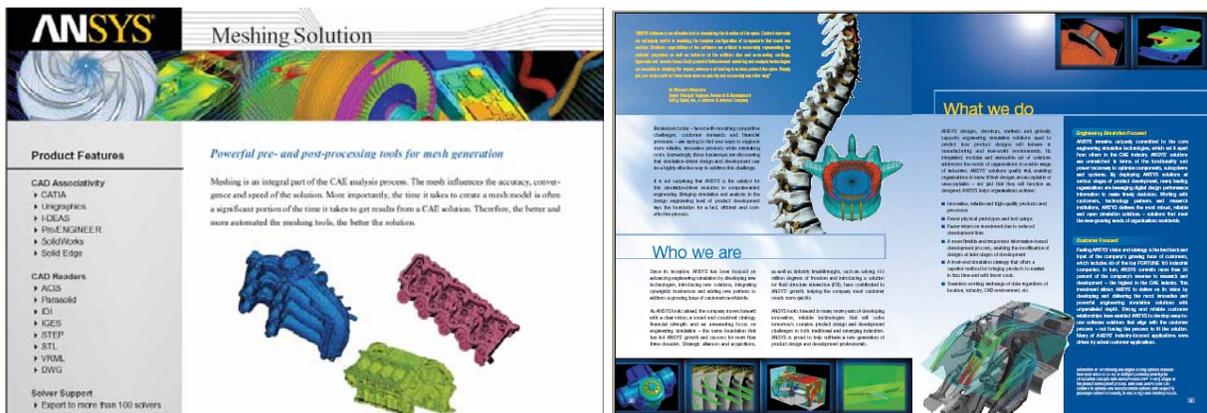


Fig. 101, Material de divulgação do programa AnSys. Fonte: [www.ansys.com](http://www.ansys.com), acesso em 25/07/2006.

Estes atributos têm sido importantes na minimização do uso de protótipos uma vez que estas respostas físicas têm sido aplicadas pelo programa não só em construções e estruturas, mas num grande número de peças industriais, mobiliário, próteses e diversos outros produtos.

## **CAPÍTULO 6. PROPOSIÇÃO PROJETUAL:**

### **UMEA: Unidades Móveis de Educação Ambiental**

No intuito de transformar o presente estudo e dissertação num projeto baseado nas Estruturas Geodésicas, foi desenvolvida uma proposta de sistema construtivo utilizando materiais e tecnologias disponíveis no Brasil que demonstre as potencialidades deste sistema estrutural visando a viabilização construtiva das idéias estudadas.

Acompanhado esta proposta construtiva está também uma destinação programática e de utilização prática da cúpula/edifício estudada dotando este projeto de significado ambiental e ecológico através do desenvolvimento de um programa arquitetônico ligado a atividades de educação ambiental o que fará da estrutura e do espaço projetado um ponto de divulgação e fomento de consciência em torno da sustentabilidade dos meios de produção e da ecologia em suas diversas facetas.

Assim este estudo e projeto aliam à pesquisa construtiva e tecnológica um dado de utilização didática que trará ao espaço proposto significado no sentido de divulgação da Construção Metálica aliando-a a atividades de divulgação e preservação dos ambientes naturais e construídos de nosso dia a dia.

A idéia é que as Unidades Móveis de Educação Ambiental, as UMEAs a serem propostas, ocupem espaços importantes das cidades ou ambientes naturais onde

possam ser notadas e visitadas e após cumprido seu papel de divulgação e debate de determinadas questões possam ser desmontadas e transportadas a outra localidade onde poderão, através de equipe de apoio e material de divulgação, iniciar novo trabalho em interação com a comunidade.

As atividades a serem desenvolvidas e material a ser exposto em cada uma das UMEAs deverão ser desenvolvidos com a colaboração de profissionais ligados às áreas ambientais, biológicas, hídricas, artísticas e outras não fazendo parte desta etapa de nosso estudo e dissertação.

## **6.1 – PROGRAMA ARQUITETÔNICO E CARACTERÍSTICAS ESPACIAIS**

A estrutura Geodésica define em si uma grande cúpula sob a qual serão desenvolvidas as atividades do programa arquitetônico. A fim de dotar o espaço de maior flexibilidade possível, foram definidos como cômodos fechados apenas os estritamente necessários que aparecem como setores de apoio ao funcionamento das UMEAs cujo programa de utilização será:

- Espaço Aberto para Exposições, Debates e Apresentações
- Arena para apresentações e comunicações
- Sanitários masculino e feminino
- Pequena área administrativa
- Área para café e copa
- Depósito

As UMEAs estarão locadas sobre piso elevado de concreto ou deck de madeira que regularizarão possíveis desníveis dos terrenos em que estejam implantadas.

As plantas e cortes esquemáticos estão apresentados nas figuras a seguir:

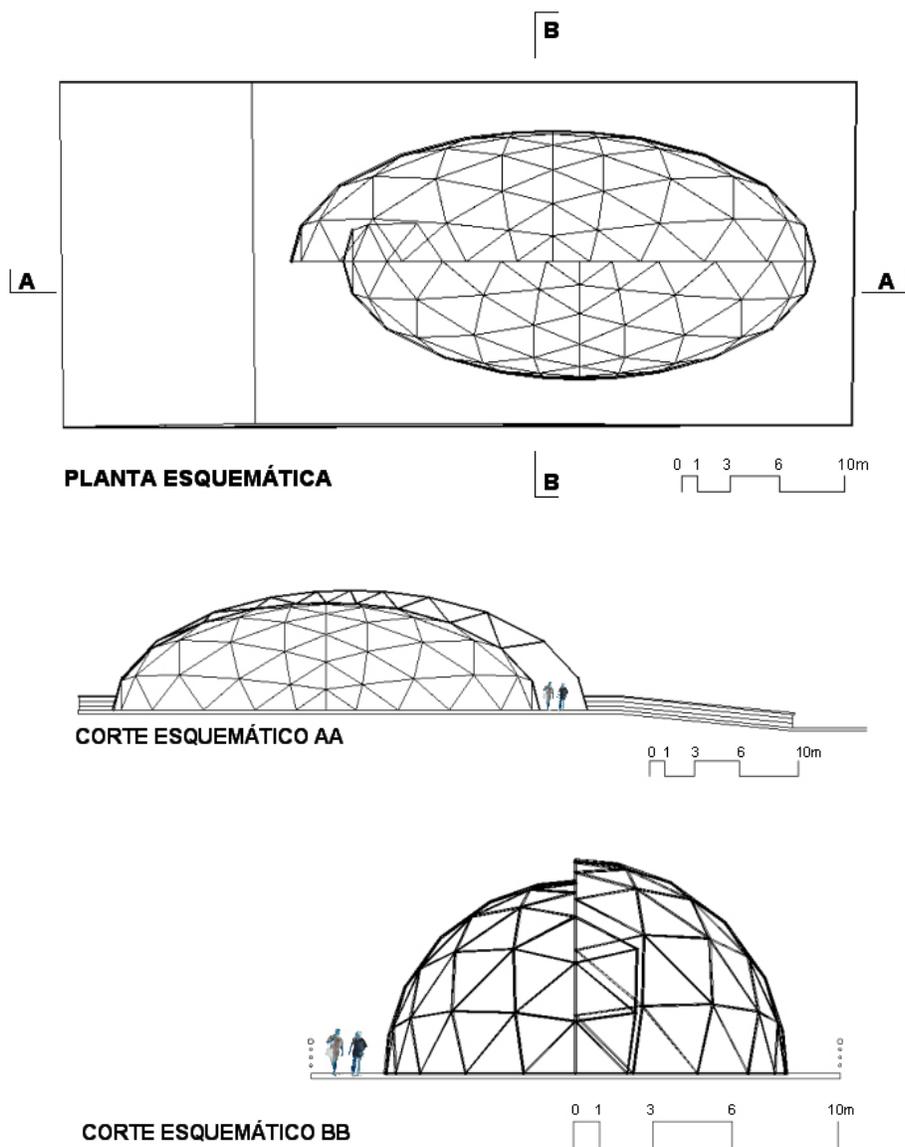


Fig. 102,Planta e Cortes esquemáticos da UMEA. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.

As metragens das áreas destinadas a cada um destes espaços poderão variar de acordo com diferentes demandas e tipo de utilização.

O projeto aqui apresentado apresenta forma elíptica inserida em um retângulo de 32,00 x 16,00 metros, com área aproximada de 400,00 m<sup>2</sup>, e altura máxima de 8,00 metros, a área total da superfície de cobertura é de 676,00 m<sup>2</sup> (fig. 102).

Como aspectos gerais do espaço a ser gerado é necessário que este ofereça uma boa performance ambiental apresentando correta orientação solar, iluminação e ventilação natural ou artificial, tratamento correto de resíduos, fontes naturais de energia, além de marcante presença nos locais onde estejam montados (fig. 103).

O funcionamento de tais Unidades acontecerá patrocinado pelas empresas de componentes construtivos utilizados e/ou por instituições ou eventos interessados na divulgação de programas e informações ambientais, ou outro tipo de utilização que possa acontecer naquele espaço.

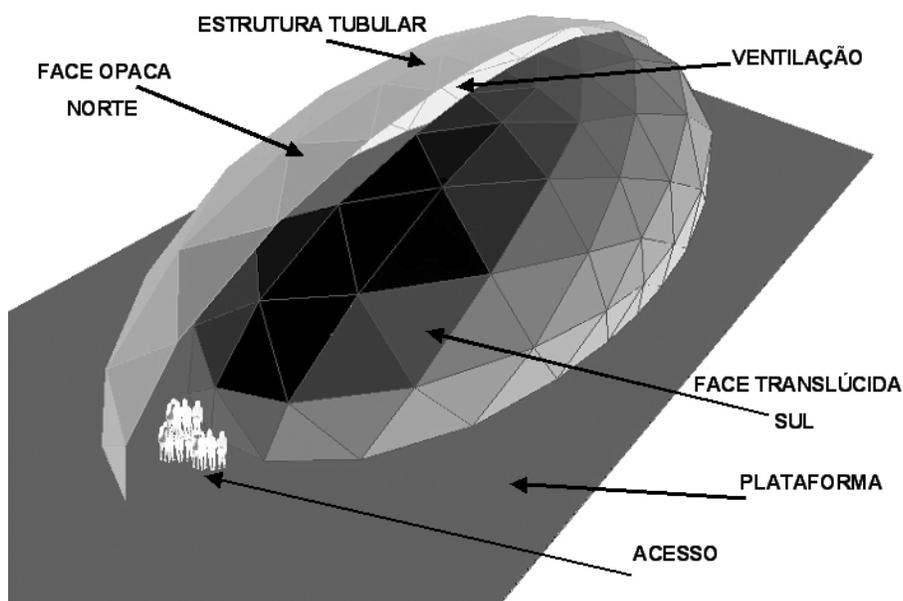


Fig 103. Aspectos ambientais do projeto. Fonte: imagem produzida pelo autor 2005.

A proposta em questão difere da conhecida esfera associada ao Domus Geodésico tradicional, investigando outras possibilidades formais, construtivas e estruturais proporcionadas pelo sistema, gerando uma pesquisa morfológica de diferenciadas possibilidades. A ruptura da tradicional esfera, forma fechada em si, favorece também possibilidades de ventilação natural através de rasgos e aberturas zenitais.

## **6.2 – PROSPECÇÕES EXPERIMENTAIS**

Na intenção de demonstrar a flexibilidade, presença e potencial comunicativo das UMEAs este estudo propõe duas implantações que são igualmente simbólicas e sinalizadoras das preocupações ambientais junto aos ecossistemas urbanos e rurais.

A primeira prospecção ou implantação proposta estará vinculada à preservação dos recursos hídricos no ambiente urbano e está pensada de forma a se integrar e complementar o 'Boulevard do Rio Arrudas' criado em 2005 e construído em 2006 em Belo Horizonte' obra de forte significado paisagístico e ambiental no centro da cidade. A UMEA estará localizada no limite sul deste boulevard linear sobre a calha do rio, junto ao Parque Municipal se integrando ao mesmo tempo à área verde do parque e à massa de edifícios existentes, próxima à área do projeto HBH Habitar o Centro de Belo Horizonte, proposto pela escola de Arquitetura da UFMG. Sobre o rio poluído a UMEA discutirá as possibilidades da conservação e purificação da água no meio urbano. Será previsto um rasgo no piso da edificação para que os usuários possam tomar simbolicamente consciência da situação do rio (fig. 104 e fig. 105).



Fig 104. Simulação de implantação da UMEA junto ao Parque Municipal, em BH. Fonte: imagem produzida pelo autor 2006.



Fig. 105. Simulação de implantação da UMEA junto ao Parque Municipal em BH, sobre a canal do rio Arrudas, para discutir o futura da Água no planeta Terra. Fonte: imagem produzida pelo autor 2006.

A segunda prospecção estará em algum local da Estrada Real (fig. 106), conhecido e importante programa turístico da região sudeste do Brasil envolvendo os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Nesta prospecção as UMEAs discutirão e mostrarão material relativo à biodiversidade da região em que estarão implantadas, bem como aspectos históricos, culturais, divulgar a produção local de artesanato, os conhecimentos da culinária e registros das manifestações do folclore. Estas unidades poderão abrigar ainda estufas de plantas, borboletário e espaço de ensino e discussões diversas.



Fig. 106. Simulação de implantação da UMEA na Estrada Real, para informar e discutir os aspectos ambientais da região, M. G. Fonte: imagem produzida pelo autor 2006.

### 6.3 – COMPONENTES DO SISTEMA CONSTRUTIVO

Do ponto de vista tecnológico e interagindo com os projetos anteriormente apresentados, alguns itens são importantes na definição de nosso sistema construtivo e deverão neste estudo e/ou futuramente, ao longo dos desdobramentos possíveis e da execução do Projeto, serem detalhados, dimensionados e especificados, ou sejam:

- os tubos ou barras metálicas específicas, seus tipos e dimensões
- o sistema de nós de ligação dos tubos
- os sistemas de fechamento translúcidos e opacos
- as esquadrias especiais de acesso e ventilação
- o sistema de piso e plataforma de implantação e fixação ao solo
- a definição do sistema de fechamento dos ambientes internos de apoio que compõem o programa arquitetônico.

No escopo desta dissertação será feito um estudo mais aprofundado dos nós de articulação das barras da estrutura que são os componentes específicos mais característicos das Estruturas Geodésicas. Pelas características buscadas na definição deste elemento articulador estes nós são chamados de Nós Tri-Ortogonais, como veremos a seguir.

### 6.3.1 – Os Nós Tri-Ortogonais

Uma característica dos nós estudados é que promovem a movimentação das barras estruturais, na maioria das vezes, em apenas um plano do conjunto, não possibilitando a movimentação livre em todas as direções o que seria desejável quando se busca a composição de formas livres, permitindo que as barras sejam montadas e fixadas em qualquer direção dos eixos x, y e z.

O nó aqui proposto funciona desta forma tri-ortogonal, ou seja, permite esta desejada movimentação e giro das barras em relação aos três eixos espaciais.

Desta forma a proposta para este sistema de nós se inspira na tradicional dobradiça de duas 'folhas' (fig.107) expandindo suas possibilidades através do incremento do número destas 'folhas' ou placas giratórias.

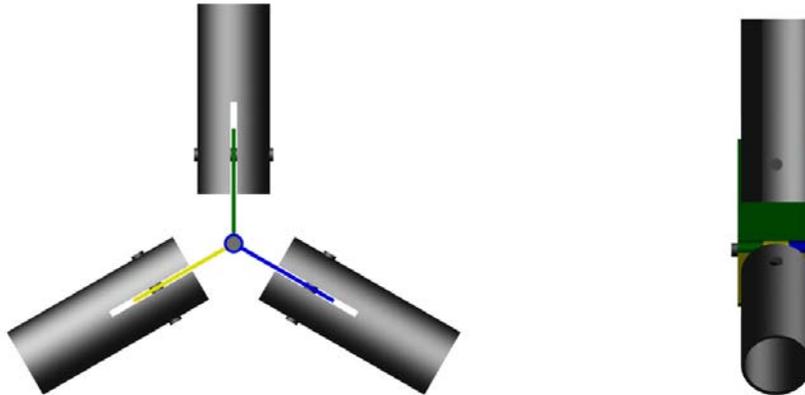


Fig. 107, A dobradiça tradicional, duas placas ou 'folhas' giram em torno de um eixo.

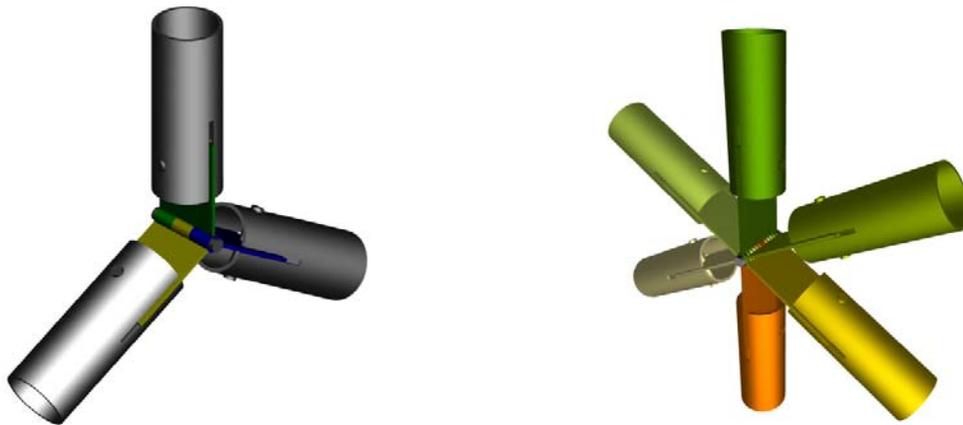
Fonte [www.alertareflet.com.br/outros.htm](http://www.alertareflet.com.br/outros.htm), acesso em 28/06/2006

O sistema de nós aqui proposto acrescenta o número de placas à idéia da tradicional dobradiça, podendo conter 3, (fig. 108, fig. 109, fig. 110, fig. 115 e fig. 116) 4, 5, 6

(fig. 111, fig. 117 e fig. 118) ou mais placas ou folhas dependendo da quantidade de barras necessárias para a conformação de determinado poliedro geodésico (fig. 112).



Figs. 108 e 109, Modelagem em computador da proposta para o nó de três placas, articuladas a barras estruturais, vistas frontal e lateral. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.



Figs. 110 e 111, Utilização do sistema proposto para um nó de três e seis placas. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.

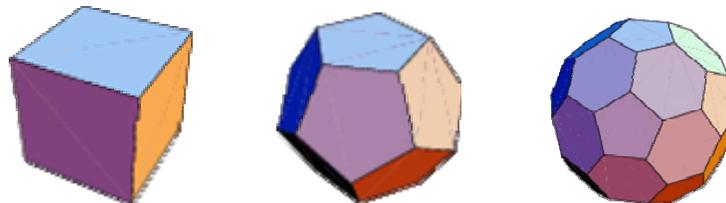
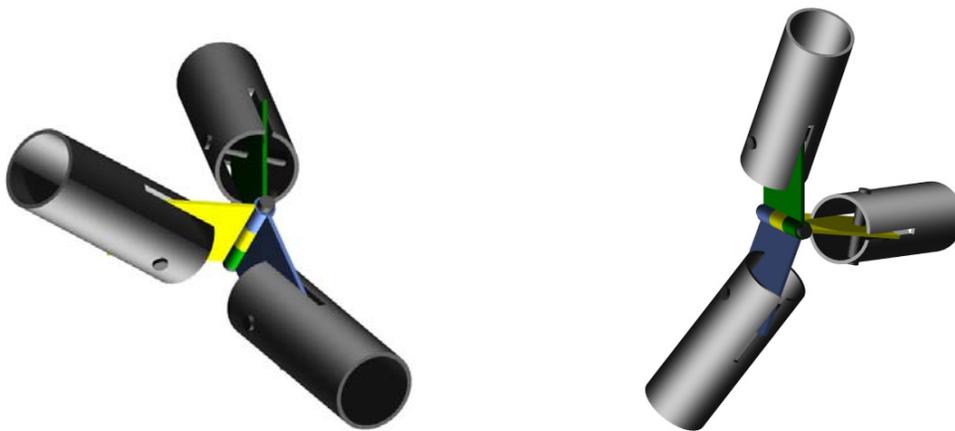


Fig. 112. No Cubo, Dodecaedro ou Icosaedro Truncado três barras convergem para cada vértice, na construção de cúpulas baseadas nestes poliedros seriam usados nós de três placas. Fonte: MathWorld, <http://mathworld.wolfram.com/PlatonicSolid.html> , acesso em 28/06/2006.

O giro das placas em torno do eixo da dobradiça é completado pelo giro dos tubos ou barras estruturais em torno do parafuso de articulação que trespassa a placa da dobradiça promovendo a articulação tri-ortogonal em todas as direções do espaço (fig. 113 e fig. 114). Numa estratégia de montagem da estrutura baseada neste sistema os ângulos das placas da dobradiça poderiam ser fixados previamente e a partir daí seriam parafusados os tubos, ou ainda, os tubos de diferentes tamanhos ligados aos nós com dobradiça em giro livre entrariam em equilíbrio.



Figs.113 e 114. Modelagem em computador mostrando que placas giram livremente em torno do eixo da dobradiça e os tubos giram livremente em torno do parafuso de articulação que trespassa a placa. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.



Figs.115 e 116. Fotografia do protótipo do Nó Tri-Ortogonal de três folhas Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.



Figs.117 e 118. Fotografia do protótipo do Nó Tri-Ortogonal de seis folhas Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.

## 6.4 – AVALIAÇÕES ESTRUTURAIS

### 6.4.1 – Modelagem e Triangulação

Os softwares de modelagem e análise estrutural, como o Ansys, podem gerar diferentes estudos de triangulação de uma casca ou qualquer outra forma livre modelada, e posteriormente calcular os ângulos no espaço entre as diversas barras, o que seria seguido na montagem previa dos nós e de toda a estrutura.

Para a análise estrutural da cúpula anteriormente proposta e descrita através deste programa Ansys tomou-se como primeiro passo, a modelagem da superfície em questão. Este modelo tridimensional pode ser exportado de algum programa de desenho da família CAD, mas neste caso optou-se por refazer a modelagem diretamente no programa.

Este programa tem a capacidade de gerar triangulações diversas em diferentes modelagens, como, por exemplo, nas quatro figuras abaixo onde um método aleatório de triangulação foi proposto (free mesh). A fim de investigar as possibilidades de modelagem e triangulação do programa foram estudadas outros sistemas de triangulação da superfície da cobertura da UMEA, diferindo da imagem da cúpula apresentada anteriormente e gerada pelo já citado programa WinDome, desenvolvida em AutoCad e renderizada no programa 3dMax.

A princípio foi produzida uma modelagem da cúpula (fig. 119) e uma triangulação 'aleatória' (free mesh) no sentido de investigação das possibilidades do Ansys, que gerou as figuras a seguir:

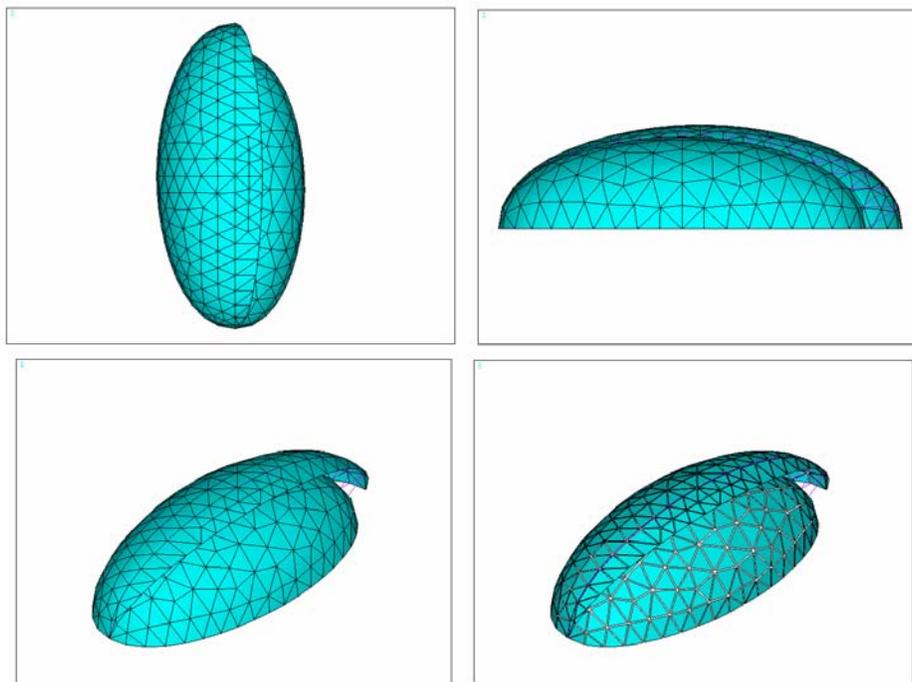


Fig. 119. Estudo preliminar de sistema de triangulação, sistema free mesh, feito pelo programa Ansys para a superfície da cúpula UMEA anteriormente apresentada. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.

Porém, para a análise estrutural que se procedeu foram definidos sobre a modelagem superficial anterior eixos lineares longitudinais iniciais, coincidentes em planta e se cruzando em forma de cruz no centro da figura. Outro sistema de eixos poderia ter sido proposto nesta etapa como, por exemplo, eixos centrais e simétricos em cada uma das duas partes das cúpulas (fig. 120).

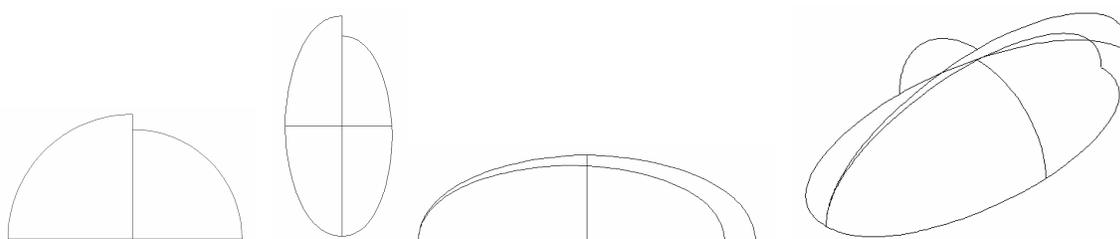


Fig. 120, Os eixos lineares de modelagem desenhados no programa Ansys. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

Estes eixos são as linhas que dão origem às superfícies das duas partes componentes da cúpula em questão gerando os planos de fechamentos externos e definindo a tridimensionalidade da figura. As figuras anteriores e seguintes mostram as elevações, planta e perspectiva dos eixos geradores e respectivamente das superfícies produzidas (fig. 120).

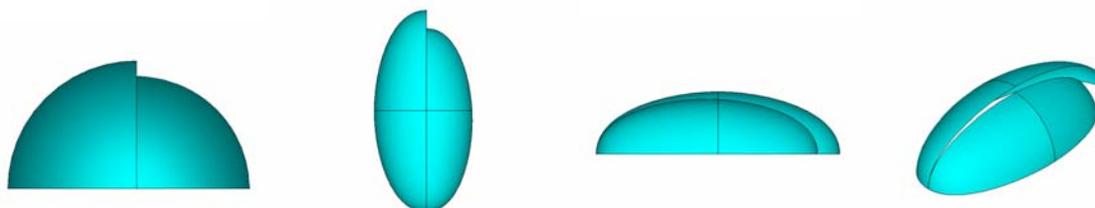


Fig. 121, As superfícies geradas a partir dos eixos lineares previamente definidos. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

O próximo passo é a triangulação destas superfícies geradas onde serão conformados os elementos poligonais e estruturais da cúpula estudada (fig. 122, fig. 123 e fig. 124).

Considerando que a cúpula deva apresentar características que viabilizem sua construção optou-se por definir como critério para este processo de triangulação que as barras que passariam a compor a estrutura não tivessem seu comprimento linear maior que dois metros, aproximando ao máximo desta medida.

Mais uma vez outros critérios poderiam ter sido adotados nesta etapa da análise como, por exemplo, fixar o ângulo entre as barras na região dos nós ou fixar as áreas dos polígonos gerados.

As superfícies previamente definidas são assim subdivididas em elementos triangulares diferenciados, compostos por barras e membranas ou placas que serão executadas em materiais opacos na face norte como chapa metálica com camada interna de espuma termoacustica, e material translúcido como placas de ETFE ou policarbonato na face sul da construção.

As barras transmitem axialmente os esforços para os nós da estrutura. As membranas ou placas são superfícies resistentes à tração e compressão, mas não resistentes à flexão, estão articuladas nos nós transmitindo forças nos eixos x, y e z; mas não transmitindo momento ou flexão.

Assim a figura da cúpula e a triangulação que será submetida à avaliação estrutural apresentou a seguinte forma:

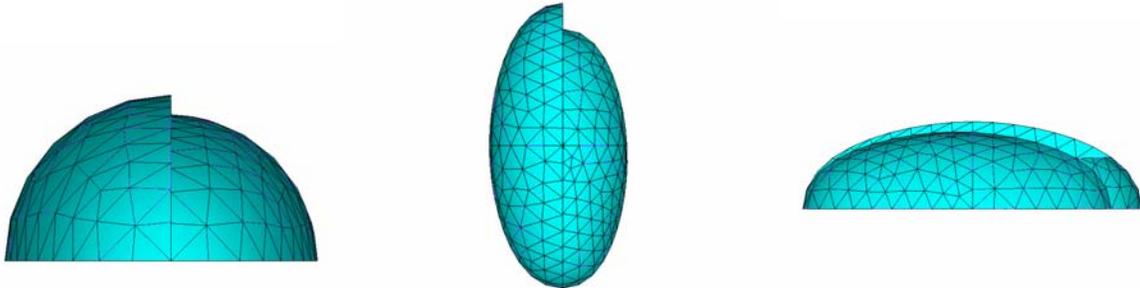


Fig. 122, Projeções ortogonais das superfícies trianguladas, sistema 'mapped mesh'.

Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

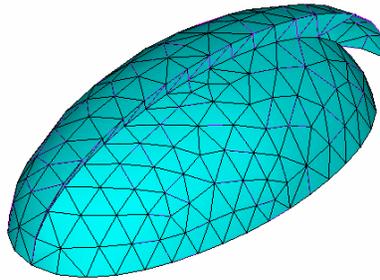


Fig. 123, Perspectiva da cúpula com suas superfícies trianguladas através do programa Ansys.

Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.

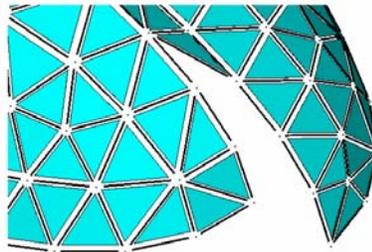


Fig. 124, Detalhe da modelagem estrutural mostrando a entrada da cúpula e o encontro das barras.

Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

Na figura a seguir estão os pontos de fixação da cúpula (fig. 125) ao solo onde os nós estão restritos nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  e os apoios são simples e articulados não engastados e as barras horizontais não estão sujeitas a esforços funcionando apenas como delimitação e fechamento inferior da estrutura (fig. 126).

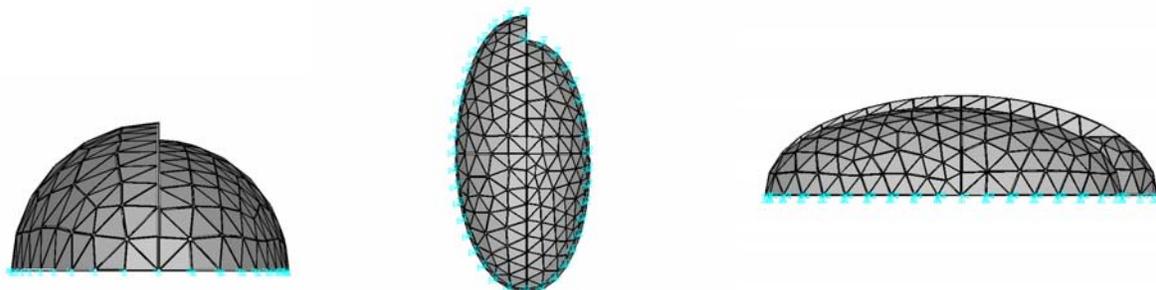


Fig. 125, Os pontos de apoio da cúpula. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

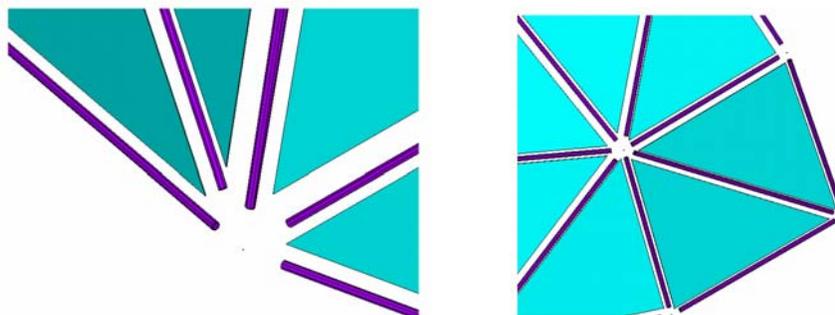


Fig. 126, Detalhe da modelagem dos pontos de apoio da cúpula, as barras horizontais, paralelas ao solo não estão sujeitas a esforços. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

#### 6.4.2 – Definição das Barras

No tubo adotado (fig. 127) para o estudo estrutural da cúpula anteriormente modelada foram adotadas unidades do Sistema Internacional (SI). Nesse tipo de análise utilizando-se como material o aço para as barras estruturais optou-se por utilizar as unidades N e mm ou Newton e milímetros. Na figura abaixo estão listadas:

a área útil do tubo, os momentos de inércia ( $I_{yy}$ ,  $I_{yz}$  e  $I_{zz}$ ), as constantes de torção e coordenadas dos centros de gravidade e cisalhamento. Trata-se do um tubo com costura pertencente à norma SAE-1020 com raio externo  $X_{out} = 24,15\text{mm}$  e  $X_{int} = 20,45\text{ mm}$ , espessura da parede  $t = 3,7\text{ mm}$ , índice de esbeltez  $\lambda = 130$ , comprimento máximo das barras = 2000 mm, aço com módulo de elasticidade  $E = 200.000\text{ N/mm}^2$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$ , densidade de norma de  $785000\text{ N/m}^3$  e limite de escoamento  $f_y \geq 200\text{MPa}$ .

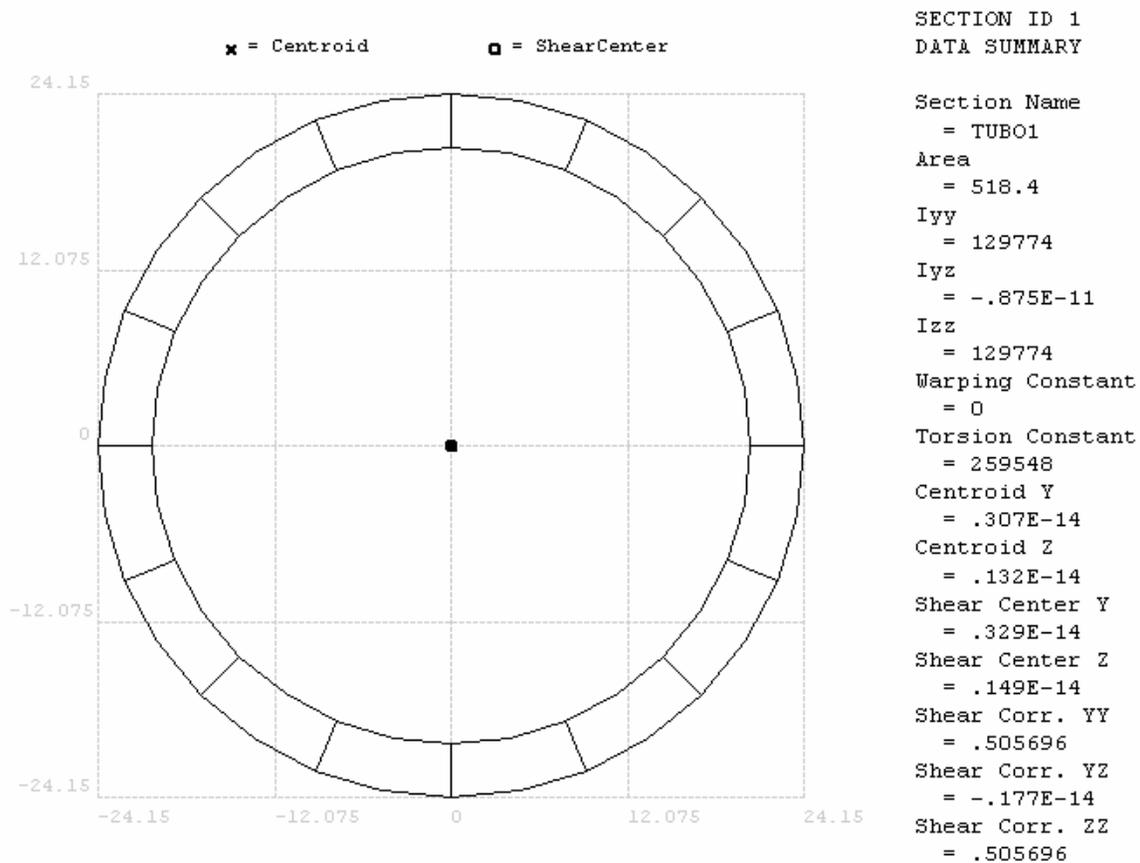


Fig. 127, Características do tubo ou barra adotado na estrutura estudada. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

### 6.4.3 – Carregamentos

A seguir foram definidas as hipóteses de carregamento para a análise do comportamento da estrutura:

#### 1º carregamento:

Peso próprio das barras: gerado pelo programa a partir da modelagem e dos dados fornecidos.  $\Sigma_{pp}(\text{tubos}) = 4,7 \text{ tf}$

#### 2º carregamento:

Cobertura: considerando que a área coberta da cúpula é de 400,00m<sup>2</sup> e que os materiais de fechamento são, conformes ilustrados em figura anterior; na face sul material transparente tipo policarbonato ou membrana de ETFE e na face norte chapa metálica com camada de espuma termoacústica; definiu-se como carregamento devido à cobertura:  $pp(\text{cobertura}) = 5 \text{ kgf} / \text{m}^2$

Nós de ligação: definiu-se também como carregamento adicional pela presença dos nós de ligação das barras da estrutura incluída na sobrecarga:  $sc = 25 \text{ kgf} / \text{m}^2$ .

Onde  $\Sigma(pp + sc) = 30 \text{ kgf/m}^2$

#### 3º carregamento:

Efeito de Vento (fig. 128 e fig. 129), considerando uma situação menos favorável com ventos da esquerda para a direita, incidindo no lado da cúpula com maior área, o lado maior apresenta pressão e o lado menor apresenta sucção, produzindo cargas nodais equivalentes. Cálculos feitos considerando a localização da estrutura no estado de Minas Gerais, o coeficiente de forma e as normas definem as cargas totais como:

$F1(\text{esq}) = 9910,00 \text{ kgf}$  e  $F2(\text{dir}) = 4000,00 \text{ kgf}$

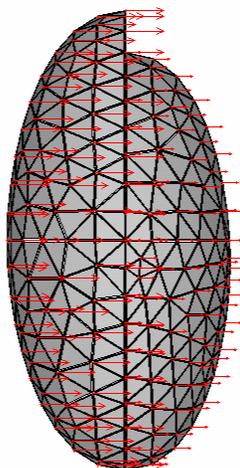


Fig. 128, Figura dos esforços devido ao vento, produzindo pressão do lado esquerdo e sucção do lado direito da estrutura.  
Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

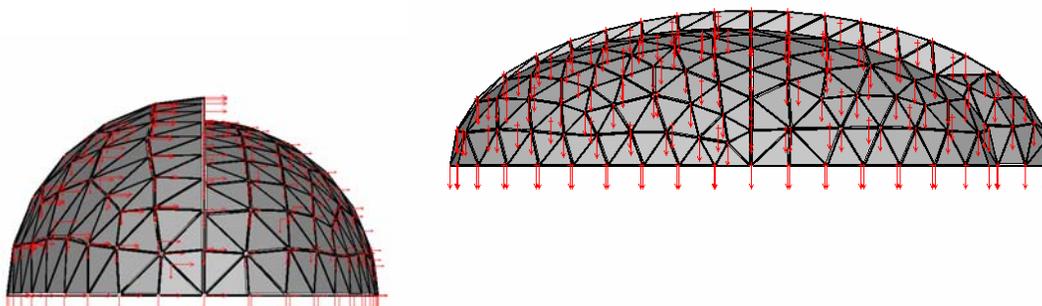


Fig. 129, Figura mostrando a somatória dos esforços devido ao vento e à sobrecarga.  
Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

#### 6.4.4 – Resultados

Para a avaliação do modelo anterior foram consideradas 3 hipóteses de avaliação:

**Caso 1:** Nós completamente travados, análise linear estática (fig. 130, fig. 131 e fig. 132).

**Caso 2:** Nós articulados em torno do eixo local y (articulação entre a placa da dobradiça e a barra estrutural,  $M_y=0$ ), análise linear estática (fig. 133, fig. 134 e fig. 135).

**Caso 3:** Nós completamente articulados (articulação entre a placa da dobradiça e a barra estrutural,  $M_y=0$ ; e articulação no eixo da 'dobradiça' do nó,  $M_z=0$ ), análise estática não linear (fig. 136).

Para os casos citados foram analisados os resultados referentes às seguintes variáveis:

**DMX**(mm) = deslocamento máximo global (em milímetros)

**SDIR**(MPa) = Tensão direta axial (tração e/ou compressão, em mega pascal)

**SMIN** (Mpa) = Tensão combinada mínima de compressão (forças axiais e momentos fletores)

**SMAX** (Mpa) = Tensão combinada máxima de tração (forças axiais e momentos fletores)

<b>VARIÁVEIS</b>	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>
<b>DMX</b> (mm)	12	18	23
<b>SDIR</b> (MPa)	-49 / 36	-71 / 50	-80 / 62
<b>SMIN</b> (Mpa)	-130 / 33	-101 / 39	=SDIR, sem mom.
<b>SMAX</b> (Mpa)	-44 / 127	-68 / 77	=SDIR, sem mom.

Da tabela anterior pode-se concluir que:

A estrutura mais rígida (caso 1) apresenta menores deslocamentos que os demais casos, porém, apresenta níveis de tensões mais elevados, provocados pelos efeitos adicionais de flexão (momentos).

Por outro lado, o caso 3 apresenta níveis de tensões axiais (SDIR) maiores, necessitando, no entanto, de uma análise de segunda ordem (análise geometricamente não linear com a aplicação do carregamento em vários passos) para atingir a convergência de resultados sem apresentar hipostaticidade interna da estrutura.

A partir da definição destes parâmetros anteriores o programa Ansys versão 5.7 forneceu resultados descritos acima que podem ser visualizados nas figuras a seguir:

### CASO 1:

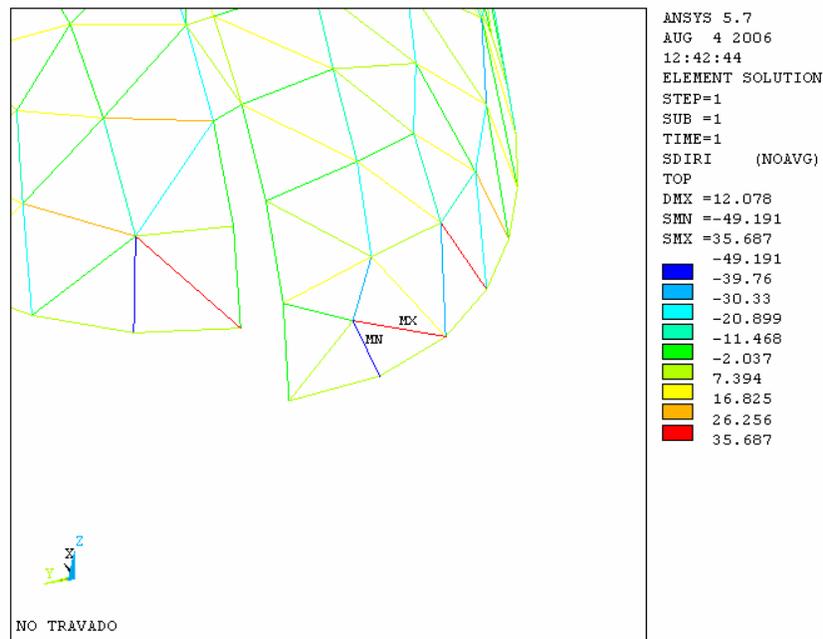


Fig. 130, Figura mostrando os valores máximo e mínimo da tensão direta axial (SDIR)  
Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

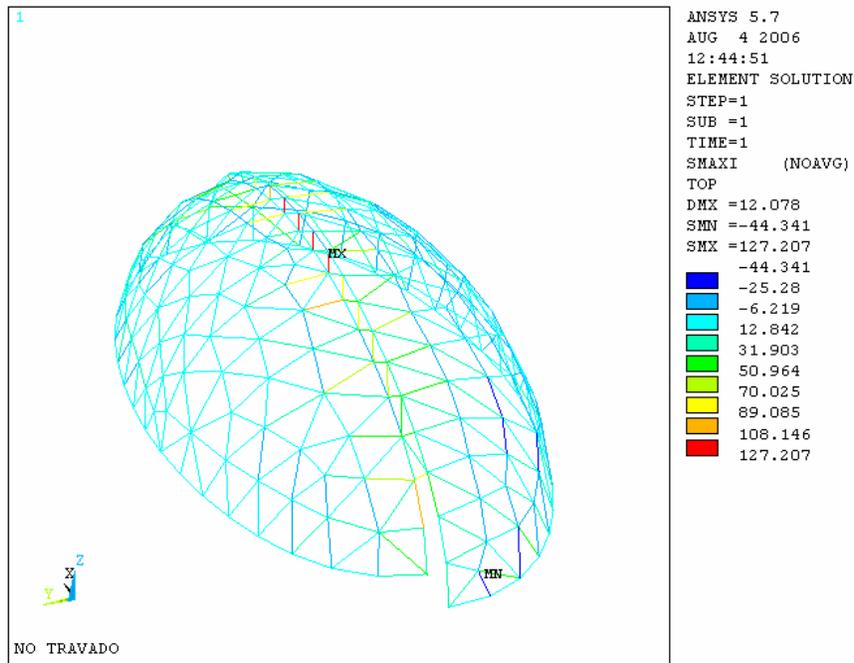


Fig. 131, Figura mostrando os valores de SMAX (tensões combinadas de forças axiais e flexão).  
 Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

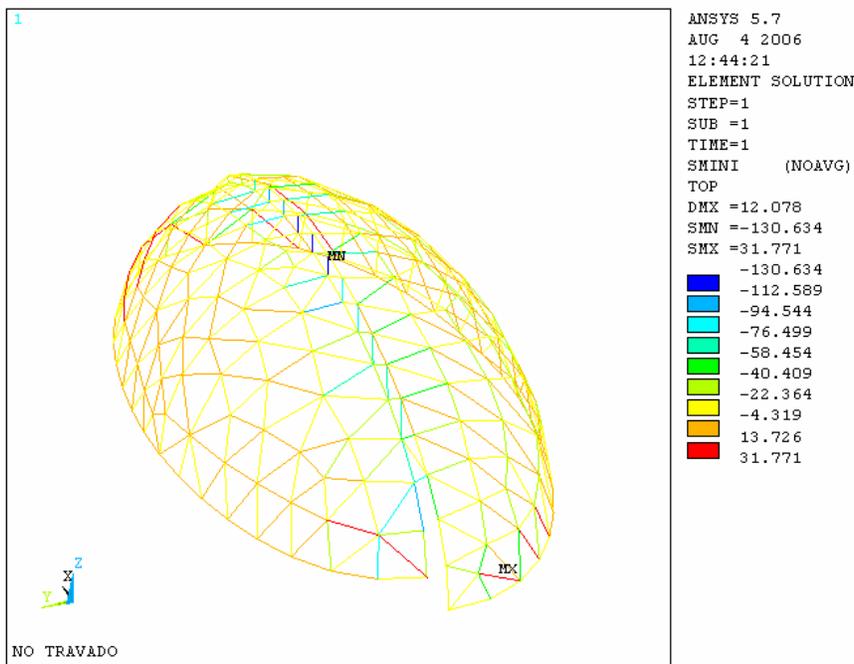


Fig. 132, Figura mostrando os valores de SMIN (tensões combinadas de forças axiais e flexão).  
 Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

CASO 2:

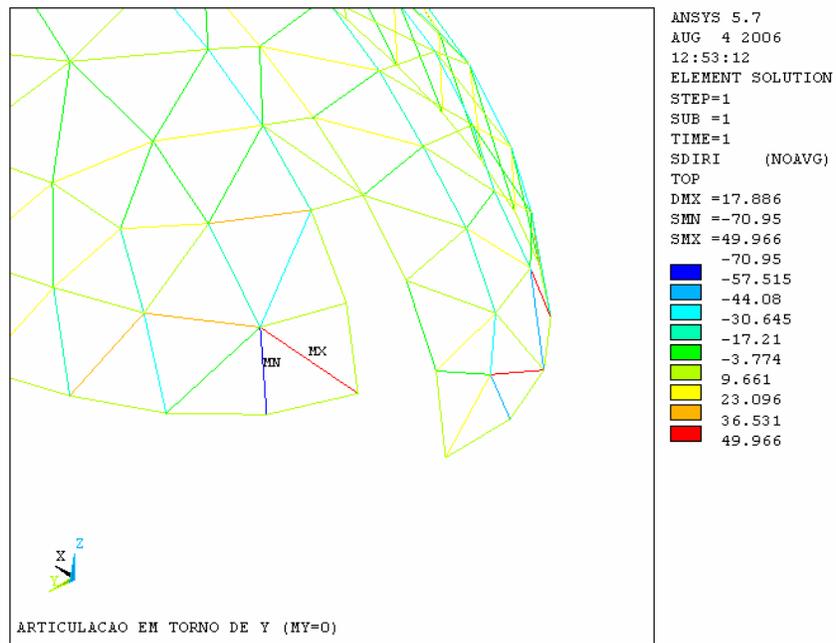


Fig. 133, Figura mostrando os valores máximo e mínimo da tensão direta axial (SDIR).  
 Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

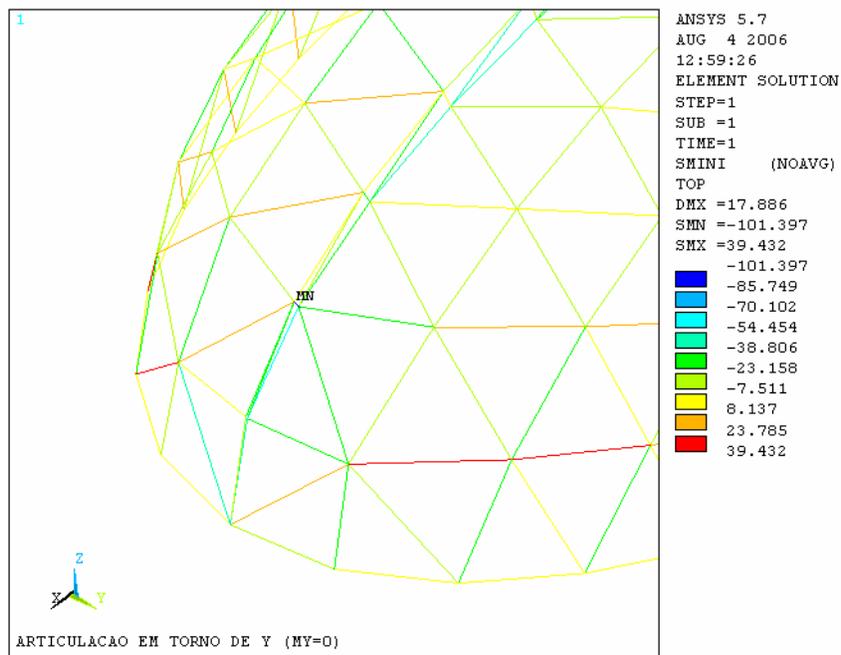


Fig. 134, Figura mostrando os valores de SMIN (tensões combinadas de forças axiais e flexão).  
 Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

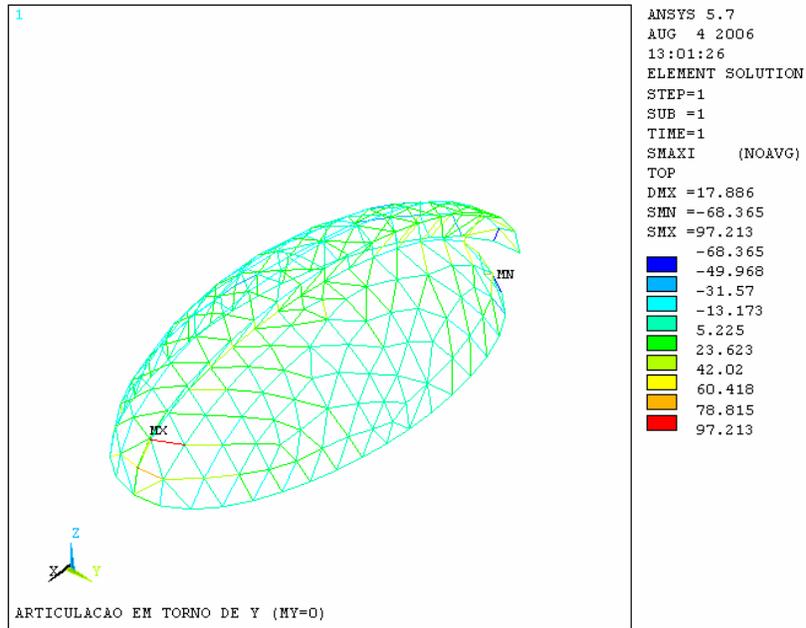


Fig. 135, Figura mostrando os valores de SMAX (tensões combinadas de forças axiais e flexão).  
 Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

CASO 3:

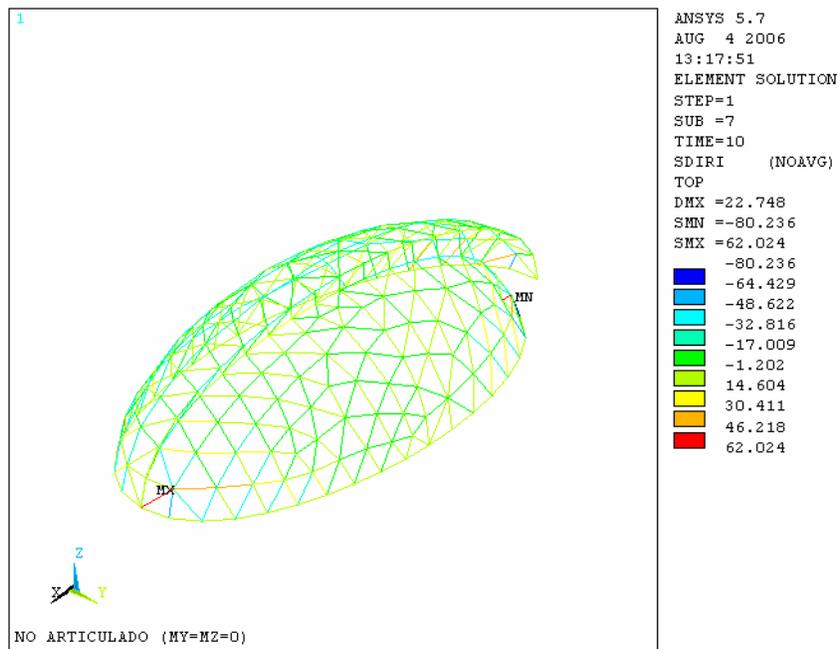


Fig. 136, Figura mostrando os valores máximo e mínimo da tensão direta axial (SDIRI)  
 Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

### 6.4.5 – Discretização do Nó

Considerando que os nós a serem utilizados não se enquadram em nenhum padrão comercial disponível optou-se por uma análise tridimensional localizada dos mesmos (para o caso de um nó de seis placas, com a conexão de seis tubos), a fim de avaliar-se os níveis de tensões localizadas. Para tanto o nó foi modelado através de superfícies de cascas com as respectivas espessuras e volumes contendo elementos sólidos que simulam as ligações e articulações aparafusadas (fig. 137 até fig. 147). A seguir serão mostradas figuras representativas deste processo:

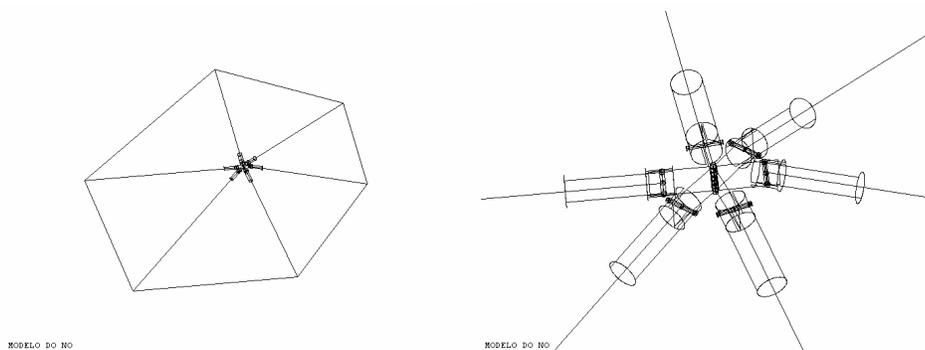


Fig. 137, Posição relativa de um nó típico (linhas). Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

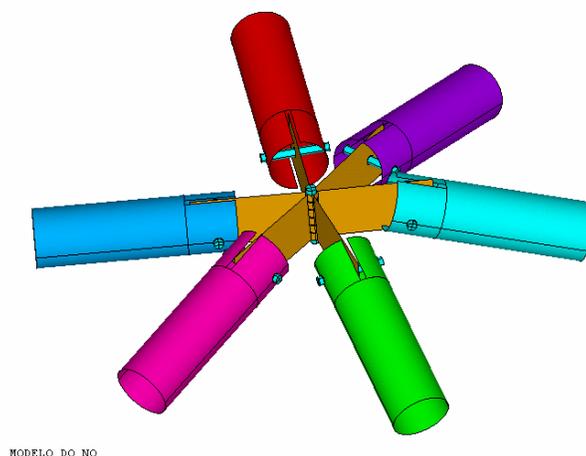


Fig. 138, Modelagem através de superfícies e sólidos. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

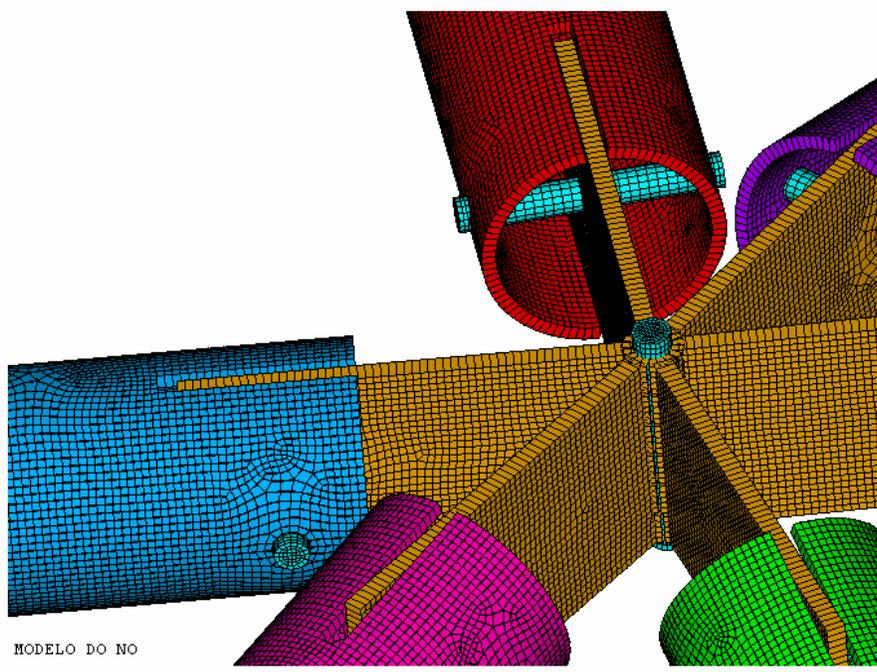


Fig. 139, Detalhe da malha em elementos finitos. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

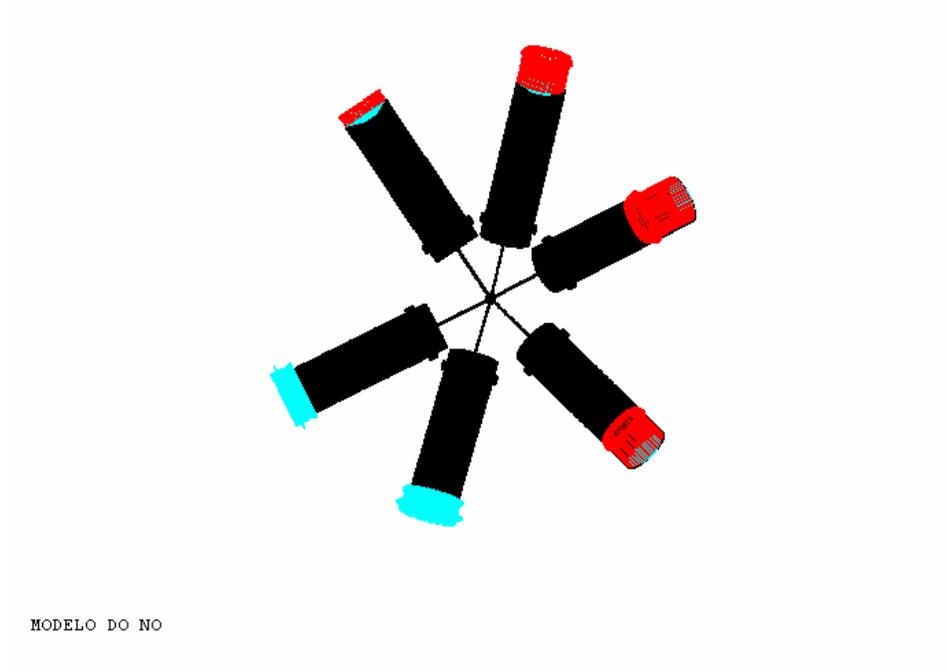


Fig. 140, Condições de Contorno mostrando cargas nodais (vermelho) e deslocamentos impostos iguais a zero nas regiões apoiadas (azul). Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

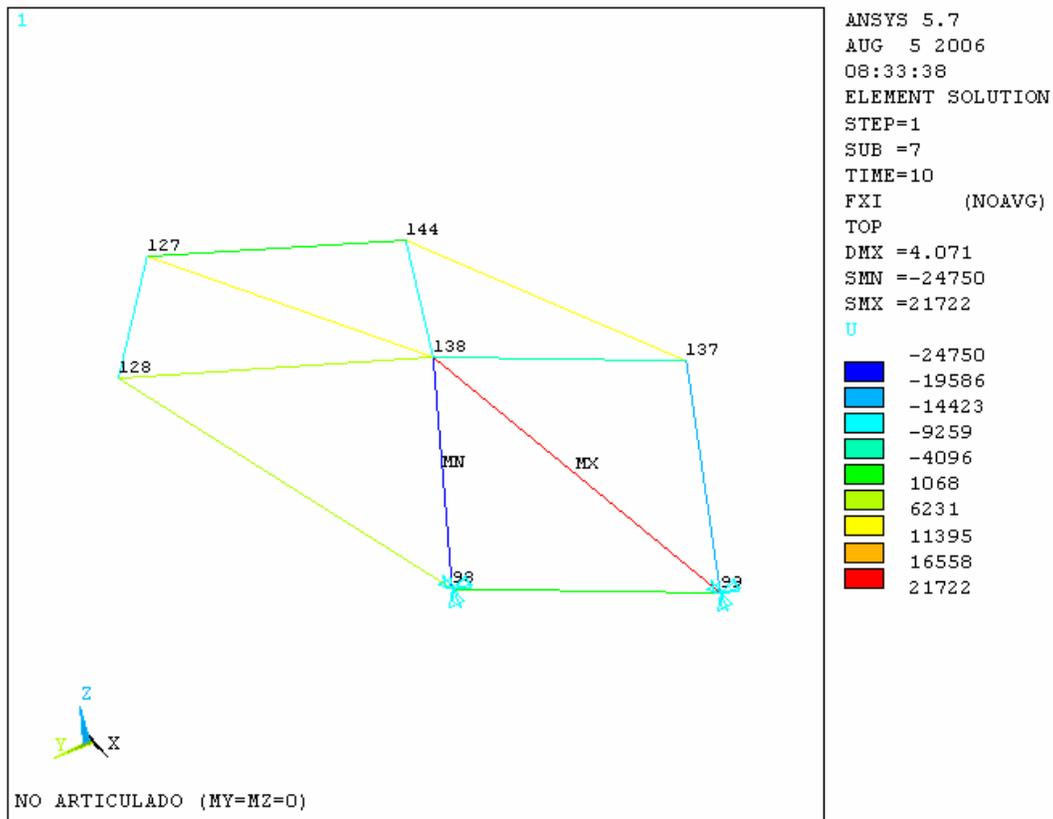


Fig. 141, Região da estrutura para o Caso 3 utilizada para a discretização do nó 138 e barras submetidas a forças de tração (positiva) e compressão (negativa). Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

A seguir estão listados dados quantitativos utilizados no modelo do nó, gerados originalmente pelo programa Ansys:

MODEL INFORMATION

Solid model summary:

	Largest Number	Number Defined	Number Selected
Keypoints . . . . .	403	402	402
Lines . . . . .	703	703	703
Areas . . . . .	387	387	387
Volumes . . . . .	100	100	100

Finite element model summary:

	Largest Number	Number Defined	Number Selected
Nodes . . . . .	83794	83794	83794
Elements. . . . .	79471	79471	79471
Element types . . . . .	2	2	n.a.
Real constant sets. . . . .	7	7	n.a.
Material property sets. . . . .	1	1	n.a.
Coupling. . . . .	36	24	n.a.
Constraint equations. . . . .	0	0	n.a.
Master DOFs . . . . .	0	0	n.a.
Dynamic gap conditions. . . . .	0	0	n.a.

As figuras seguintes ilustram os resultados obtidos:

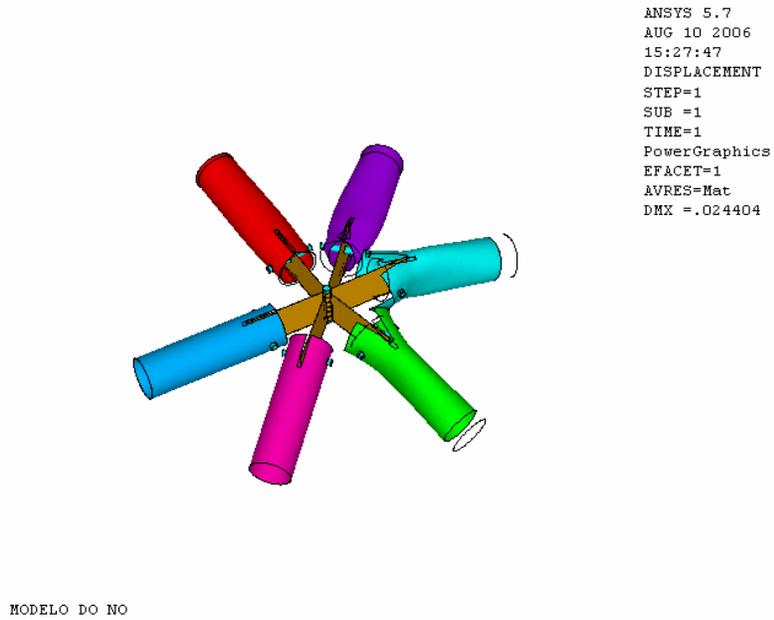


Fig. 142, Modelo deformado (com amplificação) superposto ao modelo indeformado. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

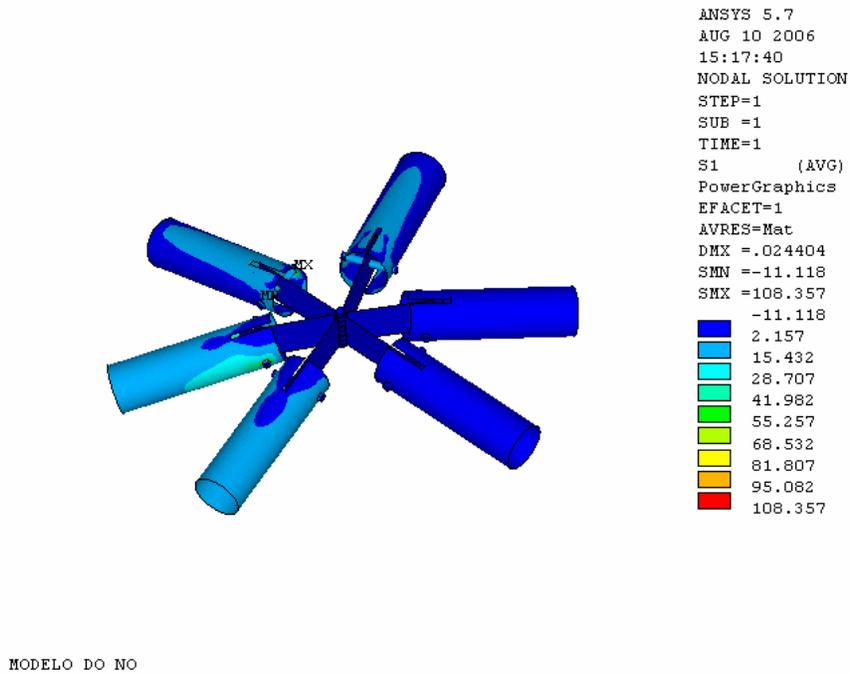


Fig. 143, S1 corresponde às Tensões Principais (máxima tração). Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

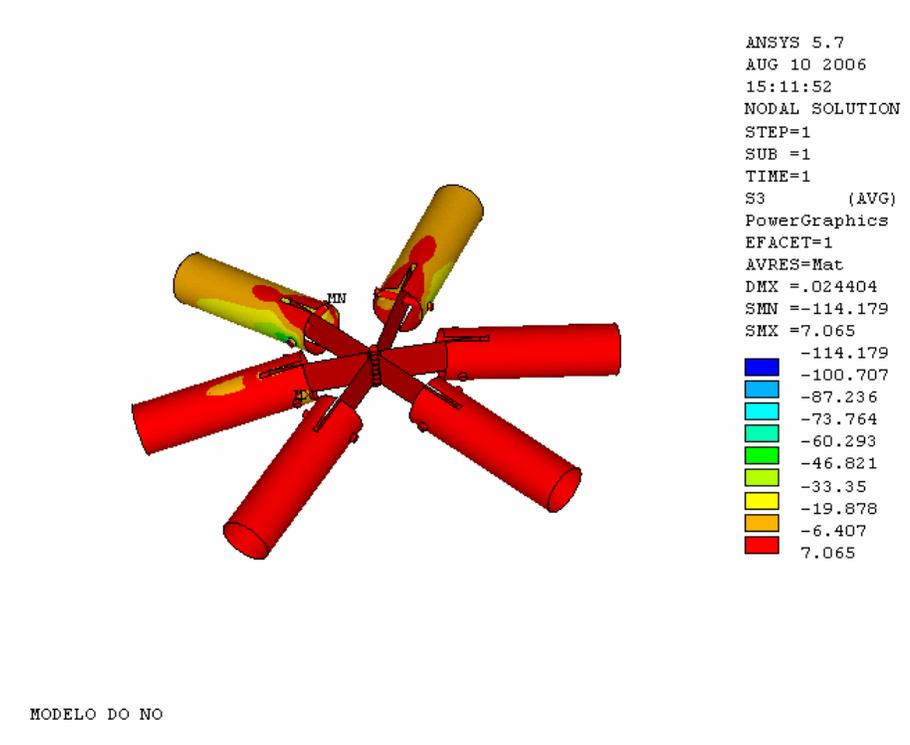


Fig. 144, S3 corresponde às Tensões Principais (máxima compressão). Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006

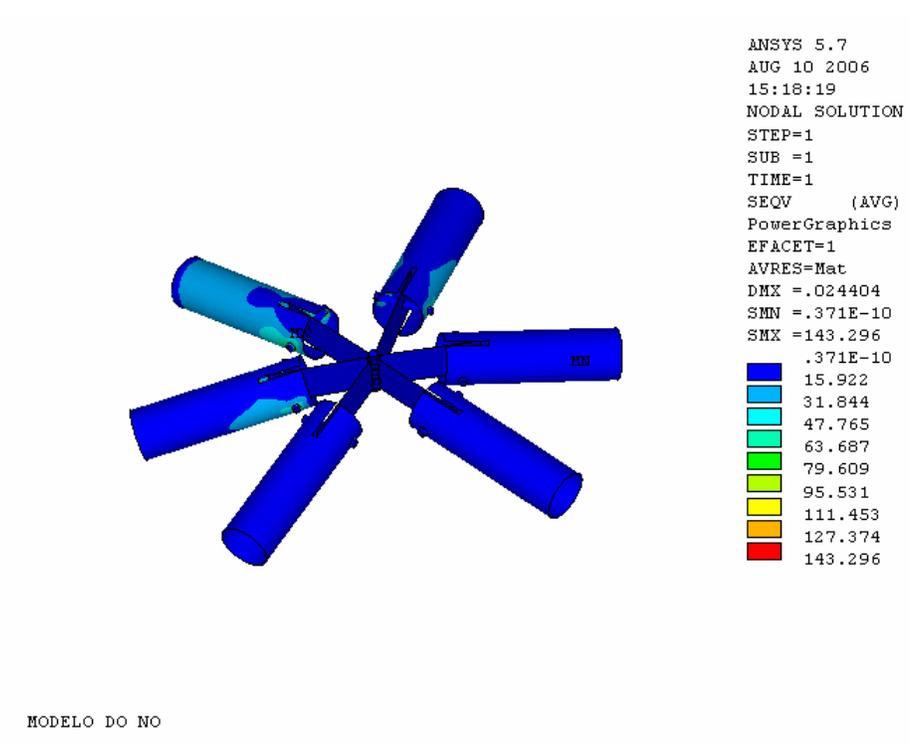


Fig. 145, SEQV corresponde às Tensões Equivalentes de Von Mises para comparação com a tensão de escoamento (143MPa<<200Mpa) . Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.

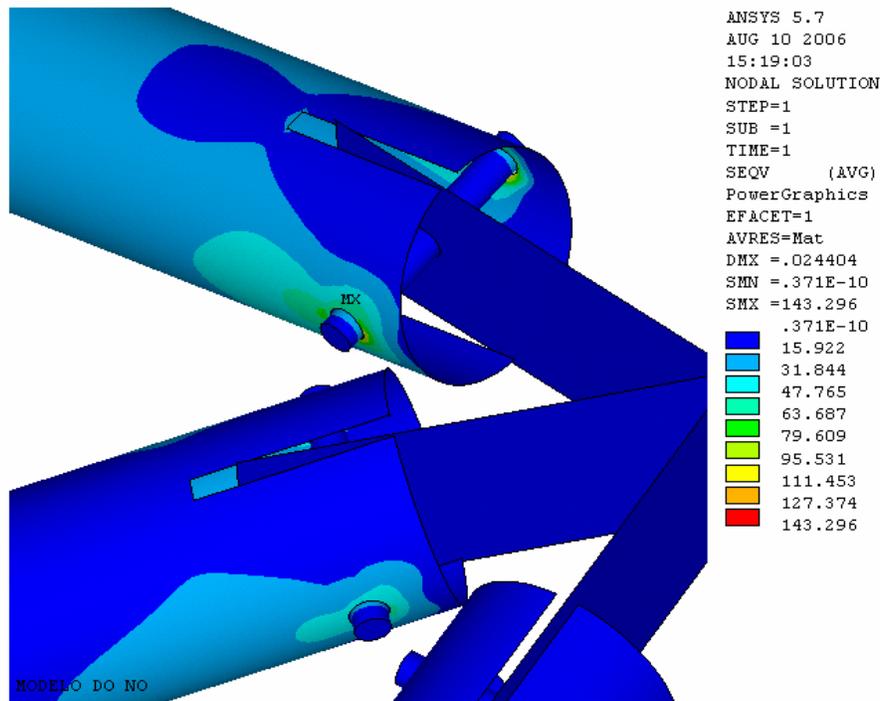


Fig. 146, zoom da figura anterior. Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.

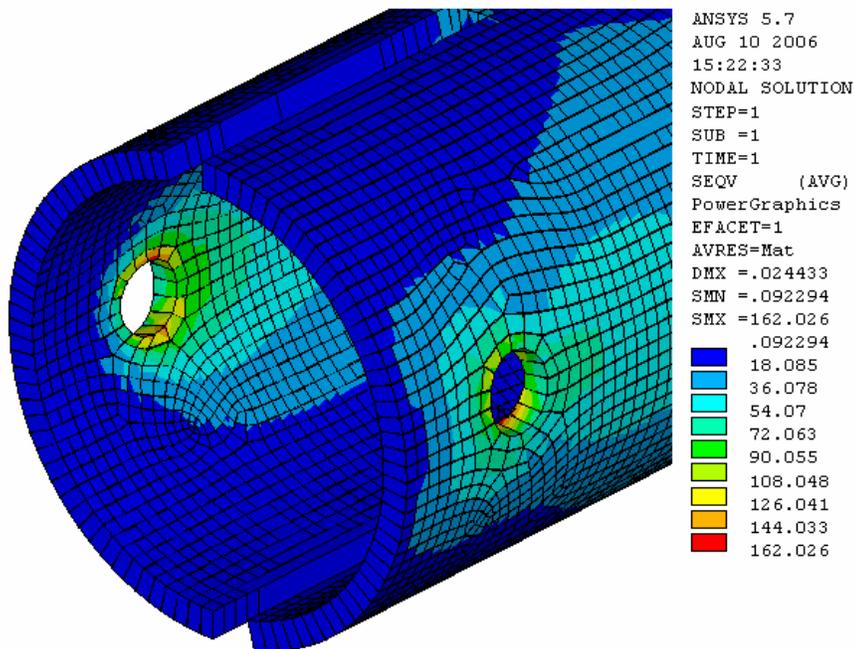


Fig. 147, Zoom da região de descontinuidade do tubo apresentando valores máximos de SEQV corresponde às Tensões Equivalentes de Von Misses para comparação com a tensão de escoamento ( $143\text{MPa} \ll 200\text{MPa}$ ). Fonte: Imagem produzida pelo autor, 2006.

## **CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES.**

Uma constatação feita ainda no início deste estudo é que o material bibliográfico sobre as Estruturas Geodésicas é bastante limitado, aparecendo este sistema construtivo como um coadjuvante pouco importante em publicações sobre estruturas e/ou construções diversas.

O grande interesse inicial em relação a este tipo de estrutura, entre os anos 50 e 70 do século XX, foi minimizado posteriormente, fazendo que as pesquisas e realizações com outros tipos de estrutura fossem mais freqüentemente divulgadas.

Por outro lado pode-se afirmar que as Estruturas Geodésicas são um amplo campo para estudos e desenvolvimento de futuros projetos ligados, tanto a aspectos arquitetônicos que exploram as diversas tipologias e aplicações, quanto à questão tecnológica e industrial de cálculo e produção. Na verdade este é um território de estudos onde a arquitetura e a engenharia não podem se afastar uma da outra, chegando a ser complementares e quase coincidentes as buscas e os resultados efetuados por cada uma destas disciplinas.

Quanto às proposições que podem ser feitas em torno deste tipo de construção entendemos que podem variar entre estruturas moduladas e bastante racionalizadas onde todas as barras e elementos estruturais são iguais ou apresentar articulações

com maiores variações onde estes elementos não são obrigatoriamente repetitivos ou modulares.

Do ponto de vista específico deste estudo alguns desdobramentos ficam sugeridos e poderiam ser tema de futuros estudos e pesquisas:

O primeiro seria um amplo levantamento histórico das cúpulas, domus ou estruturas geodésicas que desde o passado deram início a este tipo de construção e que chegaram até os dias de hoje indicando varias possibilidades de desenvolvimento tipológico e tecnológico.

O aparecimento na segunda metade do século XX dos computadores, dos programas de modelagem e de cálculo estrutural deu um novo fôlego a estes estudos indicando que as estruturas inspiradas nas formas da natureza, como no caso das geodésicas, têm nestes novos softwares uma poderosa ferramenta de desenho e de análise.

Um segundo ponto de desenvolvimento mais ligado à cúpula estudada, o projeto denominado UMEA, numa relação específica aos nós propostos e prototipados, seria a simulação e checagem de suas resistências e deformações em um laboratório de estruturas onde poderiam ser confirmadas e confrontadas as conclusões numéricas e de comportamento físico conseguidas através da análise computacional.

Os resultados numéricos anteriormente apresentados através da simulação computacional referem-se a uma análise preliminar que mostra a viabilidade deste tipo de construção e estrutura.

Nesse caso não foi realizado qualquer tipo de verificação de dimensionamento através de normas de perfis dobrados e laminados (NBR 8800/86). Mas mesmo assim pode-se constatar que os resultados de deslocamentos e tensões apresentam níveis compatíveis com o material empregado.

Outro aspecto que fica sugerido através deste estudo é que seja desenvolvido em forma de projeto executivo as informações necessárias para que possa ser oferecida às comunidades a edificação das UMEAs que a partir da viabilização projetual e construtiva poderiam cumprir o seu papel pedagógico funcionando como pólo de informação, de divulgação de questões relativas a questões de preservação do meio ambiente e de divulgação consciente e sustentável da construção metálica.

Os aspectos a serem abordados neste desenvolvimento do projeto das UMEAs, como já sugeridos no item 6.3, seriam os detalhamentos dos sistemas de fechamento, proposição para piso e fundações, definição e detalhamento dos cômodos internos de apoio tais como núcleos sanitários, copa, espaço administrativo e projetos complementares ligados às instalações hidrossanitárias, elétricas, de iluminação, lógica e ventilação.

Ainda no sentido de avançar nos estudos aqui iniciados se faz necessária a experimentação prática do funcionamento dos nós e seus acoplamentos às barras em formas diversas através de várias formas de estruturas utilizáveis ou artísticas que testem a eficácia dos nós prototipados seu potencial técnico e plástico na geração de estruturas de formas livres indicando possibilidades e formas para a arquitetura, a engenharia e a escultura com ênfase estrutural.

Para tanto seria importante a união com outros pesquisadores, arquitetos, engenheiros, artistas e industriais numa cadeia interdisciplinar onde as experiências de cada setor seriam discutidas, projetadas, executadas e avaliadas num ciclo contínuo de questionamentos e descobertas.

## CAPÍTULO 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

BIOSPHERE. The Sphere. Montreal 2005. Disponível em:

<http://biosphere.ec.gc.ca/site.asp?l=en&menu=a&dossier=/&page=default>

Acesso em 02 Jul. 2005

BHIPERCENTRO. Pesquisa de Uso e Ocupação de Imóveis. Belo Horizonte:

Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, 2002.

BOAKE, Terri Meyer . Biosphere, U.S. Pavilion, Expo 67. Watreloo, 2005. Disponível

em: [http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty\\_projects/terri/expo67.html](http://www.architecture.uwaterloo.ca/faculty_projects/terri/expo67.html).

Acesso em 02 Jul. 2005.

BUCHANAN, Peter. Del alojamiento moderno al hogar deseado. In: Arquitectura Viva

n. 56 Madrid, 1995.

BUCKMINSTER FULLER INSTITUTE. Domes. New York 2005. Disponível em:

<http://www.bfi.org/domes/>. Acesso em; 02 jul. 2005.

CARPO, Mario. La Era del Pliegue. In: Arquitectura Viva n 93. Madrid, 2003.

COLQUHOUN, Alan, Tipologia y Método de Diseño. In: El Significado en

Arquitectura. org. C. Jenks e G. Baird. Madrid, H. Blume Ediciones, 1975.

CONVERTEX, Website Institucional, Obing, Alemanha, 2006. Disponível em: <http://www.covertex.de/home/index.php?lan=eng>. Acesso em 23/06/2006.

DESERT DOMES. Disponível em: <http://www.desertdomes.com/index.html>, acesso em 11/04/2006.

EDEN PROJECT. Website Oficial. Disponível em: <http://www.edenproject.com>  
Acesso em 03 jul. 2005.

\_\_\_\_\_. Keith's Website. Disponível em: <http://www.eden-project.co.uk>  
Acesso em: 03 jul. 2005.

FISHER, Robert E. Architectural Engineering, New Structures. New York: McGraw-Hill, 1964.

FULLER, R. Buckminster. Synergetics, Explorations on the Geometry of Thinking. New York, 2002. Disponível em:  
<http://www.rwgrayprojects.com/synergetics/synergetics.html>.  
Acesso em 02 jul. 2005

\_\_\_\_\_. Thinking Out Loud / The American Masters. The American Broadcasting Corporation, 2005. Disponível em: <http://www.thirteen.org/bucky/dome.html>.  
Acesso em: 02 jul. 2005

GEODESIC UNLIMITED. The Theory of the Geodesic Dome. Disponível em:

<http://www.geodesics-unlimited.com/index.htm>. Acesso em 05/04/2006

GOLDEN NUMBER.NET. The Golden Section in Nature. 2005

Disponível em: <http://goldennumber.net/nature2.htm>. Acesso em: 02 jul. 2005

GRIMSHAW, Nicolas. Structure, Space, Skin. Londres, Phaidon, 1993.

KAHN, Lloyd, editor. Cobijo. Madrid, H. Blume Ediciones, 1979.

KNEBEL, Klaus; SANCHES-ALVAREZ, Jaime; ZIMMERMANN, Stefan; MERO Gmbh & Co. The Structural Making of the Eden Domes. Würzburg, Alemanha, 2005.

Disponível em:

[http://www.mero.de/bausysteme/downloads/artikel/eden\\_project\\_e.pdf](http://www.mero.de/bausysteme/downloads/artikel/eden_project_e.pdf).

Acesso em 02 jul. 2005.

MALLARD, Maria Lúcia et al. Habitar Belo Horizonte: Ocupando o Centro. Belo Horizonte: FUNDEP-EAUFMG-PRJ-HBH, 2003. (Plano de Trabalho)

METÁLICA. The Eden Project, São Paulo 2004. Disponível em:

[http://www.metalica.com.br/pg\\_dinamica/bin/pg\\_dinamica.php?id\\_pag=738](http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=738) Acesso em 02 jul. 2005.

MATHWORLD. Platonic Solids. Wolfram Research Inc. 2005. Disponível em:

<http://mathworld.wolfram.com/PlatonicSolid.html>. Acesso em: 02 Jul. 2005

\_\_\_\_\_. Archimedean Solids. Wolfram Research Inc. 2005. Disponível em:

<http://mathworld.wolfram.com/PlatonicSolid.html> Acesso em: 02 Jul. 2005.

MERO BAUSYSTEME. Spaceframes, Würburg, Alemanha, 2005.

Disponível em: <http://www.mero.de/bausysteme/pages/englisch/index.html>

Acesso em 02 jul. 2005.

HERTZBERGER, Herman. Lições de Arquitetura. São Paulo: Martins Fontes, 1999.

LERNER, Jaime. Acupuntura Urbana. Rio de Janeiro: Record, 2003.

PONTES, Mateus M. Reocupação dos centros urbanos degradados com Habitações de Interesse Social: um estudo sobre modelos de assentamento. Belo Horizonte: UFMG Núcleo de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2004 (Seminário de Dissertação)

REBELLO, Yopanan C. P. A Concepção Estrutural e a Arquitetura. São Paulo: Zigurate Editora. 2000.

SALVADORI, Mario; HELLER, Robert. Estructuras para Arquitectos. Madrid: Kliczokowski Publisher, 1986.

SILVA, Kepler Cavalcante, Análise Teórico-Experimental de Barras Comprimidas em Estruturas Metálicas Espaciais. Ouro Preto: UFOP / Dissertação de Mestrado, 1999.

SNELSON, Kenneth. Structure & Tensegrity. New York 2005.

Disponível em: <http://www.kennethsnelson.net/icons/struc.htm> .

Acesso em: 02 Jul. 2005.

STANTON, Jeffrey. Expo 1967, Architecture. Montreal 1997. Disponível em:

<http://naid.sppsr.ucla.edu/expo67/map-docs/architecture.htm>

acesso em 15 jun. 2005.

TAYSSOT, Georges. Habits/Habitus/Habitat. In: Presents and Futures, Architectures in Cities. Barcelona: Col.legi d'Arquitectes de Catalunya, 1996.

TRIODETICS, Website Institucional. Usa, 2006.

Disponível em: <http://www.triodetic.com/english.html> . Acesso em 23/06/2006.

UMER, Kirbe. Synergetics on the Web . Disponível em:

<http://www.grunch.net/synergetics/domes/domegeo.html>, acesso em:

11/04/2006.

YARNALL, Willian. Dome Builder's Handbook No. 2. Philadelphia. Running Press,  
1978.