



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



## **PROPOSTA DE SISTEMA CONSTRUTIVO MODULAR PARA COBERTURAS USANDO PERFIS TUBULARES**

Autor: **HILDA COTEGIPE PELLICO**

Orientadores: Prof. Dr. Ernani Carlos de Araújo

Prof. Dr. Henor Artur de Souza

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, 20 de Dezembro de 2004

Ao meu pai e minha família, dedico este trabalho

Ao Roberto Lott, meu melhor amigo

## AGRADECIMENTOS

Aos orientadores Hernani Carlos de Araújo e Henor Artur de Souza por compartilharem a realização deste trabalho com competência, dedicação e consideração.

Gratidão extensiva aos professores do Mestrado em Engenharia Civil e à Universidade Federal de Ouro Preto.

Às instituições acadêmicas:

Centro Universitário Izabela Hendrix

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Centro Universitário FUMEC

que confiaram em mim, colaborando e incentivando para que esta realização fosse possível e com carinho especial aos dirigentes dos cursos de arquitetura.

Aos meus colegas de trabalho, pela impagável colaboração e por compartilhar com muito carinho da tarefa empreendida.

Aos meus amigos, por permanecerem fiéis.

De maneira muito especial, aos colegas de mestrado pela solidariedade e imenso carinho.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	iii
SUMÁRIO.....	iv
RELAÇÃO DAS FIGURAS E FOTOGRAFIAS .....	vii
RELAÇÃO DE TABELAS .....	xii
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
CAPITULO I.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização da pesquisa.....	1
1.2 Objetivos.....	6
1.3 Metodologia adotada .....	6
1.4 Estruturação do trabalho.....	7
CAPITULO II.....	9
2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS SISTEMAS UTILIZADOS EM COBERTURAS ..	9
2.1 Primeiros Abrigos.....	10
2.2 Construções em Barro .....	12
2.3 Coberturas em palha .....	15
2.4 Primeiras Tendas .....	16
2.5 Construções em madeira.....	20
2.6 Coberturas em junco .....	23
2.7 As Cúpulas.....	25
CAPÍTULO III .....	34
3 FORMA E ESPAÇO .....	34
3.1 Formas da geometria plana.....	35
3.2 Formas do espaço esférico.....	39
3.3 Primeiros passos em direção ao espaço curvo.....	42
3.4 A influência da mimesis na concepção arquitetônica.....	47
3.5 O número como gerador de formas .....	60
3.5.1 O triângulo.....	62
3.5.2 O quadrado .....	62
3.5.3 Os retângulos estáticos e dinâmicos .....	63

3.5.4	Simetrias pentagonais .....	67
3.5.5	As Formas Curvas .....	69
3.6	Análise de Padrões Naturais .....	75
3.6.1	Simetrias de centro bi ou tridimensionais.....	81
3.6.2	Simetrias que produzem o movimento .....	82
3.6.3	Movimentos e Continuidade.....	84
CAPÍTULO IV .....		88
4	PARAMETRIZAÇÃO DAS FORMAS.....	88
4.1	Sistemas de normalização para projetos de arquitetura.....	88
4.2	Primeiros esforços de padronização .....	89
4.2.1	Série dos Números Normalizados .....	90
4.2.2	Considerações sobre a forma da normalização.....	91
4.2.3	Medidas nominais e medidas diretrizes.....	92
4.3	Linguagem modulada .....	94
4.3.1	Parametrização de formas.....	96
4.4	Análise de sistemas de modulação em projetos .....	103
4.4.1	Igreja Estância Árvore da Vida .....	103
4.4.2	Ginásio infantil do Hospital Sara Lago Norte. ....	107
4.4.3	Reconstrução do Grande Teatro do Palácio das Artes .....	112
CAPÍTULO V .....		119
5	MODELOS RETICULARES.....	119
5.1	Reticulados descritos em um plano .....	119
5.2	Conceito de Homogeneidade.....	120
5.3	Conceito de Densidade .....	121
5.4	Conceito de Dualidade .....	124
5.5	O nó nas estruturas tridimensionais.....	128
CAPÍTULO VI .....		135
6	MODELOS PROPOSTOS .....	135
6.1	Considerações iniciais .....	135
6.2	Modelo 01.....	137
6.2.1	Sistema modular proposto .....	140
6.2.2	Sistema estrutural .....	142
6.3	Projeto 02.....	142

6.3.1	Sistema modular proposto .....	144
6.3.2	Sistema Estrutural.....	146
6.4	Projeto 03.....	146
6.4.1	Sistema modular Proposto.....	147
6.4.2	Sistema estrutural .....	149
6.5	Processo Construtivo .....	149
CAPITULO VII.....		151
7	ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DOS PROJETOS PROPOSTOS.....	151
7.1	Carregamentos considerados .....	151
7.2	Combinações de ações consideradas .....	151
7.3	Análise Tridimensional .....	151
7.4	Projeto 01.....	152
7.4.1	Levantamento de ações do projeto 01 .....	152
7.4.2	Análise estrutural tridimensional do projeto 01 .....	152
7.5	Projeto 02.....	160
7.5.1	Levantamento de Ações do Projeto 02.....	160
7.5.2	Análise Estrutural Tridimensional do Projeto 02 .....	160
7.6	Projeto 03.....	169
7.6.1	Levantamento de Ações do Projeto 03.....	169
7.6.2	Análise Estrutural Tridimensional do Projeto 03 .....	169
7.6.3	Análises dos resultados.....	176
CAPITULO VIII .....		178
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	178
7.7	Livros e catálogos.....	181
7.8	Endereços relacionados (www).....	186
Sistemas de numeração.....		188
A.1	- Estruturação dos sistemas de contar.....	191
A.2	- Proporção áurea.....	195
A.3	- Medidas referenciadas no corpo humano.....	198

## RELAÇÃO DAS FIGURAS E FOTOGRAFIAS

Figura 1-1 – Fotografias de Karl Blossfeldt.....	2
Figura 1-2 – Pilar metálico com dimensões .....	4
Figura 1-3 - Lavatório Público do Parque Keeper’s-Hydeco. Japão.....	5
Figura 2-1 – Caverna natural - Porto Rico. ....	10
Figura 2-2 – Imagens da Capadócia. ....	11
Figura 2-3 – Interior das cavernas da Capadócia. ....	12
Figura 2-4 – Imagens de Banani.....	13
Figura 2-5 –Mesquita Djnne, em Máli. ....	14
Figura 2-6 – Abóbadas de tijolo. ....	14
Figura 2-7 – Cobertura vegetal.....	15
Figura 2-8 – Construções do arquiteto Cláudio Bernardes. ....	16
Figura 2-9 – Tendias. Estrutura dos pórticos e tensor metálico. ....	17
Figura 2-10 – Pórticos das tendias.....	18
Figura 2-11 –Anexo do Schulmberger Facility - Renzo Piano. ....	19
Figura 2-12 – Construções em madeira.....	20
Figura 2-13 – Construções em madeira – arcos. ....	21
Figura 2-14 – Igreja Russa. ....	22
Figura 2-15 – Estrutura de madeira aparelhada.....	22
Figura 2-16 – Mudhif - Região do Iraque meridional. ....	23
Figura 2-17 – Arquitetura Gótica. ....	24
Figura 2-18 – Arquitetura Gótica. ....	25
Figura 2-19 – Cúpula com folhas. ....	26
Figura 2-20 – Cúpulas de barro e pedra. ....	27
Figura 2-21 – Santa Sofia. ....	28
Figura 2-22 – Cenotáfio de Newton. ....	29
Figura 2-23 – Geodésica de Jena.....	30
Figura 2-24 – Estruturas de Coberturas.....	31
Figura 2-25 – Pavilhão dos Estados Unidos em Montreal. ....	32
Figura 3-1 – Representação do espaço curvo e modelo da pseudo-esfera. ....	35
Figura 3-2 – Movimentos do círculo gerando polígonos. ....	37
Figura 3-3 – Esquemas geométricos de divisão do círculo em edifícios históricos.....	38

Figura 3-4 – Sequência de malhas.....	39
Figura 3-5 – Poliedros platônicos.....	40
Figura 3-6 – Poliedros arquimedianos.....	40
Figura 3-7 – Poliedros diversos.....	41
Figura 3-8 – Formas naturais.....	41
Figura 3-9 – Cone e as curvas cônicas. ....	42
Figura 3-10 – Equações de formas planas.....	43
Figura 3-11 – Menino com espelhos. ....	45
Figura 3-12 – Ninhos de animais / tocas. ....	49
Figura 3-13 – Oca com galhos.....	50
Figura 3-14 – Ornamentação de arquitetura africana.....	51
Figura 3-15 – Proporções do corpo humano. ....	52
Figura 3-16 – Sistemas de proporções de algumas obras de arquitetura.....	53
Figura 3-17 – Elementos da arquitetura clássica.....	54
Figura 3-18 – Panteão: interior.....	55
Figura 3-19 – Entalhes Índia e motivos caligráficos.....	56
Figura 3-20 – Teto de Estalactites, Masjed-D Eman, Isfahan, Irã.....	56
Figura 3-21 – Esquemas geométricos naturais.....	58
Figura 3-22 – Olho do Santiago Calatrava.....	59
Figura 3-23 – Aeroporto de Stutgard.....	60
Figura 3-24 – Números poligonais figurados.....	61
Figura 3-25 – Progressão geométrica $\sqrt{2}$ - formas naturais.....	63
Figura 3-26 – Geração do formato padronizado DIN.....	65
Figura 3-27 – Retângulos dinâmicos.....	65
Figura 3-28 – Geometria do retângulo áureo.....	66
Figura 3-29 – Simetrias pentagonais.....	67
Figura 3-30 – Três raízes sagradas.....	68
Figura 3-31 – Gnomom.....	69
Figura 3-32 – Exemplos de simetrias pentâmeras.....	70
Figura 3-33 – Desenhos de Haeckel.....	72
Figura 3-34 – Karl Blossfeldt.....	73
Figura 3-35 – Karl Blossfeldt.....	74
Figura 3-36 – Parametrização do caracol e do chifre.....	75

Figura 3-37 – Expansão de formas orgânicas.....	76
Figura 3-38 – Cactus. ....	76
Figura 3-39 – Simetria de centro. ....	76
Figura 3-40 – Meandro. ....	77
Figura 3-41 – Diagrama meandros. ....	77
Figura 3-42 – Espirais. ....	78
Figura 3-43 – Espirais. ....	78
Figura 3-44 – Ramificações.....	78
Figura 3-45 – Ramificações.....	78
Figura 3-46 – Imagem de fractais.....	79
Figura 3-47 – Imagem de fractais.....	79
Figura 3-48 – Imagem de tramas.....	80
Figura 3-49 – Imagem de tramas.....	80
Figura 3-50 – Esquemas geométricos de organizações formais.....	81
Figura 3-51 – Geometria fractal, Labirinto de Hilbert – 2D. ....	82
Figura 3-52 – Desenhos do Escher. ....	83
Figura 3-53 – Geometria fractal, Labirinto de Hilbert – 3D. ....	83
Figura 3-54 – Superfícies mínimas.....	85
Figura 3-55 – Exemplos dos diversos tipos de parametrização de formas.....	86
Figura 3-56 – Geometrização de flores através da Pseudoesfera. ....	87
Figura 4-1 – Museu Guggenheim de Bilbao .....	95
Figura 4-2 – Linhas de escoamento de uma superfície. ....	96
Figura 4-3 – Exemplos de repartição de superfícies segundo parâmetros cadenciados.....	97
Figura 4-4 – Formas seccionadas por planos de interseção.....	98
Figura 4-5 – Subdivisão de um ovóide, segundo diferentes alinhamentos. ....	99
Figura 4-6 – Superfície topográfica.....	100
Figura 4-7 – Arquitetura de Cláudio Bernardes. ....	101
Figura 4-8 – Encaixes de madeira roliça - Cláudio Bernardes.....	101
Figura 4-9 – Curva de Viviane. ....	102
Figura 4-10 – Espiral Logarítmica. ....	104
Figura 4-11 - Imagens da Estância Arvore da Vida. ....	105
Figura 4-12 - Imagens da Estância Arvore da Vida. ....	106
Figura 4-13 – Seção da estrutura, detalhe da viga e vista aérea do conjunto. ....	109

Figura 4-14 – Montagem da estrutura. ....	110
Figura 4-15 – Proposta de estrutura usando viga treçada tubular .....	111
Figura 4-16 – Imagens do Palácio das Artes após incêndio.....	114
Figura 4-17 – Imagens do Palácio das Artes durante obra.....	115
Figura 4-18 – Imagens do Palácio das Artes após reconstrução .....	116
Figura 4-19 - – Projeto arquitetônico do Palácio da Artes .....	117
Figura 5-1 – Malhas Regulares e Homogêneas com apenas .....	121
Figura 5-2 – Malhas semi-regulares simples.....	122
Figura 5-3 – Semi-regulares duplas.....	123
Figura 5-4 – Semi-Regulares triplas.....	124
Figura 5-5 – Exemplos de malhas duais.....	125
Figura 5-6 – Exemplos em planta e volumetria exemplificando os tipos de tramas selecionados para ilustrarem a proposta. ....	126
Figura 5-7 – Exemplos em planta e volumetria exemplificando os tipos de tramas selecionados para ilustrarem a proposta. ....	127
Figura 5-8 – Modelos de coberturas treçadas com simples ou dupla curvatura.....	128
Figura 5-9 – Sistema Mero – nó e barra e exemplos de volumes geométricos.....	130
Figura 5-10 – Nó Arquétipo. ....	131
Figura 5-11 – Nó Metalnox. ....	132
Figura 5-12 – Centro nacional de Natação. Pequim.....	134
Figura 6-1 – Planta do campus com terreno em destaque .....	136
Figura 6-2 – Rombicuboctaedro.....	137
Figura 6-3 – Planta do restaurante.....	138
Figura 6-4 –Vista da cobertura .....	138
Figura 6-5 – Perspectiva interna.....	139
Figura 6-6 – Elevação frontal .....	140
Figura 6-7 – Perspectiva.....	140
Figura 6-8 – Pilar -Vista Lateral 1 .....	141
Figura 6-9 – Pilar - Vista Lateral 2.....	141
Figura 6-10 – Pilar - Vista Superior .....	141
Figura 6-11 – Pilar - Vista Inferior.....	141
Figura 6-12 – Planta da edificação .....	143
Figura 6-13 – Diagrama e perspectiva da malha utilizada .....	144

Figura 6-14 – Perspectiva da estrutura .....	145
Figura 6-15 – Perspectiva interna da estrutura .....	145
Figura 6-16 – Pilar - vista lateral e superior .....	146
Figura 6-17 – Perspectiva do restaurante .....	147
Figura 6-18 – Malha modular e perspectiva do pilar.....	148
Figura 6-19 – Planta com sistema o sistema modular .....	149
Figura 7-1 – Configuração do módulo de origem da estrutura do Projeto 01 .....	154
Figura 7-2 – Modelagem da estrutura 3D do Projeto 01. ....	154
Figura 7-3 – Carregamento “CP” aplicado na estrutura (kN/m). ....	155
Figura 7-4 – Deslocamentos verticais dos elementos do Projeto 01. ....	157
Figura 7-5 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-90° dos elementos do Projeto 1. ....	158
Figura 7-6 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-0° dos elementos do Projeto 1. ....	158
Figura 7-7 – Modelagem da estrutura 3D do Projeto 02. ....	162
Figura 7-8 – Localização das barras constituintes da estrutura do Projeto 02. ....	163
Figura 7-9 – Carregamento “CV-90°” aplicado na estrutura. ....	164
Figura 7-10 – Deslocamentos verticais dos elementos do Projeto 02. ....	166
Figura 7-11 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-90° dos elementos do Projeto 02 .....	167
Figura 7-12 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-0° dos elementos do Projeto 02. ....	168
Figura 7-13 – Modelagem da estrutura 3D do Projeto Convencional.....	171
Figura 7-14 – Localização das barras constituintes da estrutura do Projeto Convencional. .....	171
Figura 7-15 – Carregamento “CV-90°” aplicado na estrutura. ....	172
Figura 7-16 – Deslocamentos verticais dos elementos do Projeto Convencional.....	174
Figura 7-17 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-90° dos elementos do Projeto Convencional .....	175
Figura 7-18 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-0° dos elementos do Projeto Convencional .....	175

## RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 7-1– Elementos utilizados na análise estrutural do Projeto 01.....	153
Tabela 7-2 - Esforços solicitantes em cada barra do Projeto 01.....	156
Tabela 7-3 – Perfis utilizados para as barras na análise de dimensionamento da estrutura em 3D do Projeto 01.....	156
Tabela 7-4 – Quantitativo de material utilizado no Projeto 01.....	159
Tabela 7-5 – Elementos utilizados na análise estrutural do Projeto 02.....	161
Tabela 7-6 – Esforços solicitantes em cada barra do Projeto 02.....	165
Tabela 7-7– Perfis utilizados para as barras na análise de dimensionamento da estrutura em 3D do Projeto 02.....	165
Tabela 7-8 – Quantitativo de material utilizado no Projeto 02.....	168
Tabela 7-9 – Elementos utilizados na análise estrutural do Projeto Convencional.....	170
Tabela 7-10 – Esforços solicitantes em cada barra do Projeto Convencional.....	173
Tabela 7-11 – Perfis utilizados para as barras na análise de dimensionamento da estrutura em 3D do Projeto 03.....	173
Tabela 7-12 – Quantitativo de material utilizado no Projeto 03. ....	176

## RESUMO

Neste trabalho objetiva-se pesquisar sistemas modulados tridimensionais, do ponto de vista arquitetônico e estrutural, buscando sua discriminação através de modelos teóricos. Devido à larga possibilidade de reunir dados sobre o assunto, o enfoque foi dado ao estudo de sistemas utilizados em coberturas. Para a discriminação dos modelos, buscou-se relacionar processos de equacionamento de formas através da geometria e nesta interface, reunir informações para auxiliar profissionais na etapa de investigação de um projeto. Entre os modelos propostos, foi utilizado como parâmetro de referência, um sistema construtivo convencional mas, considerando-se que além dos sistemas clássicos de se construir estruturas moduladas existem outros modelos igualmente viáveis e possíveis de serem desenvolvidos, investigam-se dois sistemas alternativos e menos usuais comparando-os ao sistema convencional. Assim, após serem analisados alguns modelos geométricos planos e espaciais, foram propostos três sistemas para coberturas onde foram valorizadas ainda a ambientação interna e a linguagem formal da edificação. Para efeito de análise comparativa e dimensionamento dos componentes foi especificado um mesmo perfil tubular cilíndrico. O trabalho analisa finalmente as possibilidades de concepção arquitetônica, decorrentes de sua utilização. Mostra-se que os modelos não usuais componentes propostos são viáveis quando se comparam os parâmetros peso por  $m^2$  e o número de

## ABSTRACT

The purpose of this study is to research three-dimensional modulated systems from an architectonic and structural perspective, making use of constructed theoretical models.

The focus will be set on the study of the systems used in penthouses due to the possibility of easily collect data about this matter.

In order to distinguish the models, we seek to establish relations among the different processes of equating the forms by using geometry and in this interface, gather information to help professionals when they are in the investigation phase of their projects.

We have used a conventional constructed system as our reference pattern. However, we have decided to investigate two other alternative ones, not frequently used but equally feasible.

Therefore, after analyzing some plane and spatial geometric models we have proposed three systems for penthouses where we have also considered the interior atmosphere and the formal language of the building.

We have specified an identical cylindrical-tubular profile in order to measure the components and make the comparative analysis.

Finally, we also examine the possibilities of architectonic conceptions derived from its use. We show that the unconventional models proposed are suitable when we have to compare the weight per square meter with the number of components.

## CAPITULO I

### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 Contextualização da pesquisa

As coberturas expressam de maneira detalhada toda a história das construções desenvolvidas pelo ser humano. Por se tratarem de construções que abrangem desde os sistemas artesanais, empíricos e multiplicando-se em realizações contemporâneas industrializadas ou não, estão presentes em experiências com os mais diversos sistemas construtivos, incluindo construções em concreto armado, pré-moldadas, estrutura metálica, madeira, palha, pele, lona, etc. Em função de serem equacionadas para o perfeito escoamento das águas, são conformadas segundo linhas de declive, levando à concepção das mais variadas formas. Por estarem ligadas conceitualmente ao comportamento das superfícies, apresentam movimentações diversificadas. Pode-se portanto observar que se trata de um campo onde se manifesta maior diversidade de soluções formais, estando presente na manifestação cultural e construtiva dos povos em todas as épocas. Por esta razão, ao estudar sistemas de cobertura pode-se ter uma visão da evolução da arquitetura através dos tempos.

Do ponto de vista do comportamento estrutural, a cobertura oferece também um vasto ambiente onde se pode equacionar maior diversidade possível de sistemas construtivos quer sejam eles mistos ou utilizando um só tipo de material. Em geral têm um comportamento mais autônomo, facilitando o equacionamento de suas cargas. Isto torna possível uma avaliação mais ampla quanto ao aspecto do comportamento versus forma, tema mais atraente para o estudo pretendido. O conhecimento da geometria de uma forma pode levar à compreensão de seus atributos físicos e de seu equacionamento matemático. Este conhecimento auxilia a dimensioná-la e a ordenar suas partes, quando transformadas em uma construção. A medida e o número são o que determina a ordenação nas obras e nas maneiras de realizá-las. Para a estruturação de um sistema de medidas é indispensável uma consideração histórico-evolutiva do seu processo. Portanto, antes de tecer considerações sobre as formas e suas proporções, deve-se observar como os números se constituíram e suas relações familiares. É de fundamental importância observar as famílias numéricas e como estão organizadas. Subsidiadas por sistemas numéricos de ordenação, as formas são lidas através de suas

proporções. As formas aleatórias são infinitas. Mas as mais interessantes são as formas que seguem regras de conformação e que por isso têm um comportamento estrutural previsível e analisável. Abstratamente, no caso de equacionamento de formas bi ou tridimensionais, pode-se dizer: “parametrizáveis”.

No século 13, Tomás de Aquino formulou essa verdade fundamental da estética: “Os sentidos se deleitam com coisas devidamente proporcionadas.” Estava traduzindo a relação direta e muitas vezes mensurável que existe entre a beleza e a matemática, relação que se aplica tanto ao belo da natureza como à arte do homem. Aparentemente nada há na natureza suficientemente pequeno ou insignificante, para não merecer uma agradável simetria, como se evidencia na Figura 1-1.

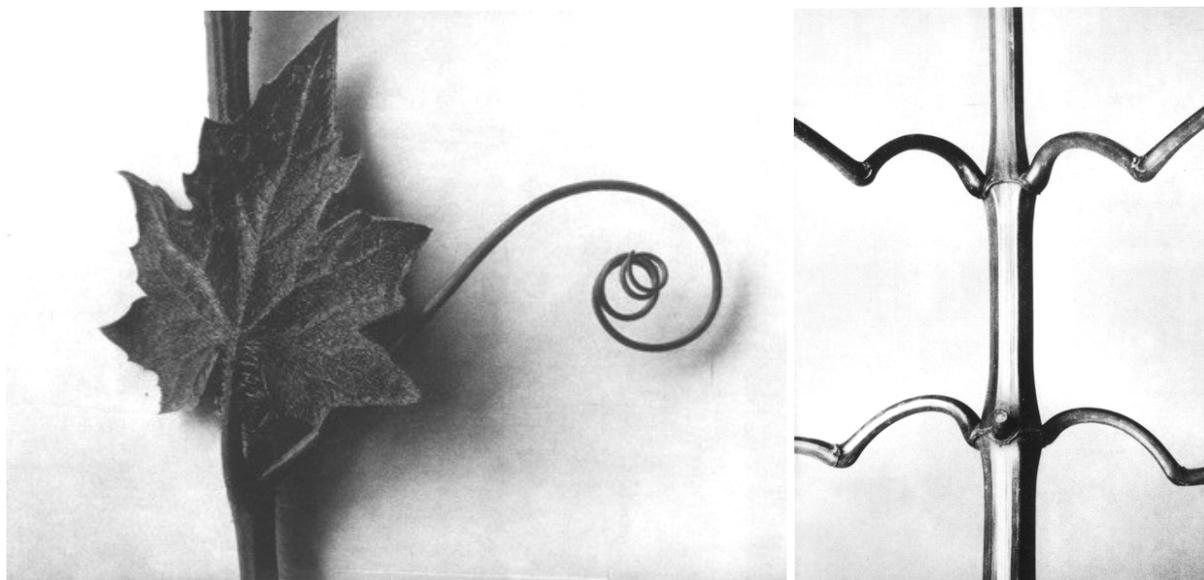


Figura 1-1 – Fotografias de Karl Blossfeldt.

Fonte: RIEMSCHEIDER (1993).

Quanto ao homem – notável exemplo de simetria – parece reagir instintiva e positivamente às formas que seguem regras geométricas rígidas, tanto no que vê ao seu redor como em sua própria criação, arte ou arquitetura. Como a natureza criou as figuras geométricas básicas e as complexas, as criações do homem são inevitavelmente imitativas. A grande contribuição do artista, principalmente no campo da arquitetura, tem sido a imaginação com que combina essas diversas formas. É importante ainda fazer uma reflexão sobre os processos de construção das formas na arquitetura, sua importância simbólica, seus parâmetros construtivos, seu comportamento estrutural, sua linguagem e função.

Recentemente, a maior mudança na concepção das formas em arquitetura ocorreu na maior utilização das formas curvas, das linhas diagonais e volumes inclinados, viabilizando configurações mais livres divergindo dos volumes convencionais tão utilizados na arquitetura clássica ou no modernismo. Embora os volumes prismáticos continuem sendo preferenciais na concepção dos arquitetos, a eles foram incorporados outros, dotados de movimento. Mesmo que o movimento sempre tenha estado presente nas construções em geral, como se pode ver nas obras de Antoni Gaudí, Eero Saarinen, Le Corbusier, Oscar Niemeyer e os mais contemporâneos Frank Gehry e Santiago Calatrava, para o arquiteto, a mudança se reflete nas novas possibilidades de obter informações para o equacionamento das mais diversas formas.

A partir da parametrização de formas tridimensionais, tornou-se possível obter suas dimensões em real grandeza sem recorrer aos sistemas projetivos convencionais estabelecidos na geometria descritiva dos planos ortogonais  $\pi_0$ ,  $\pi_1$  e  $\pi_2$ . A transferência de informações diretamente ao sistema produtivo possibilitou o equacionamento e a materialização de uma nova linguagem construtiva. Além da possibilidade de se medir diagonais em real grandeza, independentemente do sentido ou valor de sua declividade, as curvas também podem ser desenhadas através de equações algébricas. A revolução que foi iniciada no século 18 com o equacionamento das curvas tridimensionais decorrente dos estudos da geometria diferencial, e uma nova concepção do espaço como um ambiente curvo, contemporaneamente está se materializando nas obras de arquitetura em função de novos meios de representação e de visualização das formas. As “novas” formas que na realidade sempre existiram na natureza, são cada vez mais possíveis de serem experimentadas construtivamente. Na Figura 1-2, vêem-se as linhas estruturais em diagonal de um pilar metálico, cujas dimensões podem ser obtidas selecionando-se diretamente a barra. Na Figura 1-3 mostra-se um banheiro público que foi equacionado pelo movimento de uma fita envolvendo um cilindro e constitui um edifício de representação complexa por não ter planos ortogonais ou paralelos entre si.

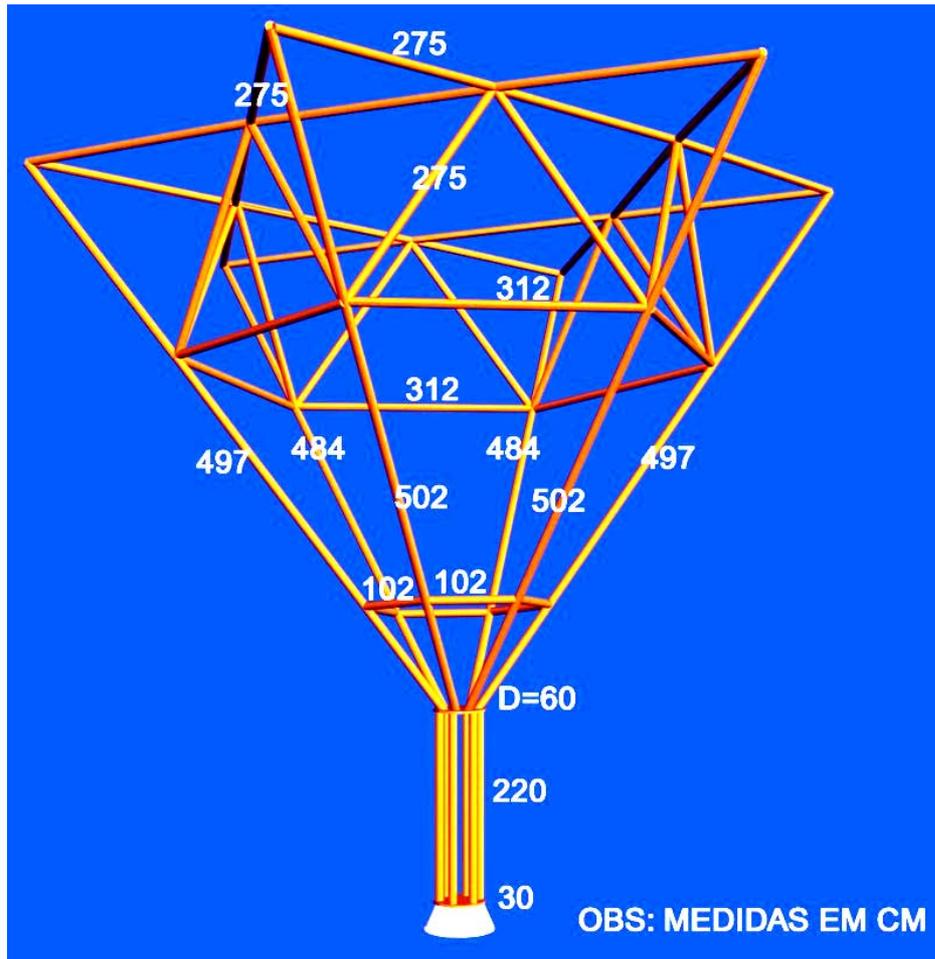


Figura 1-2 – Pilar metálico com dimensões

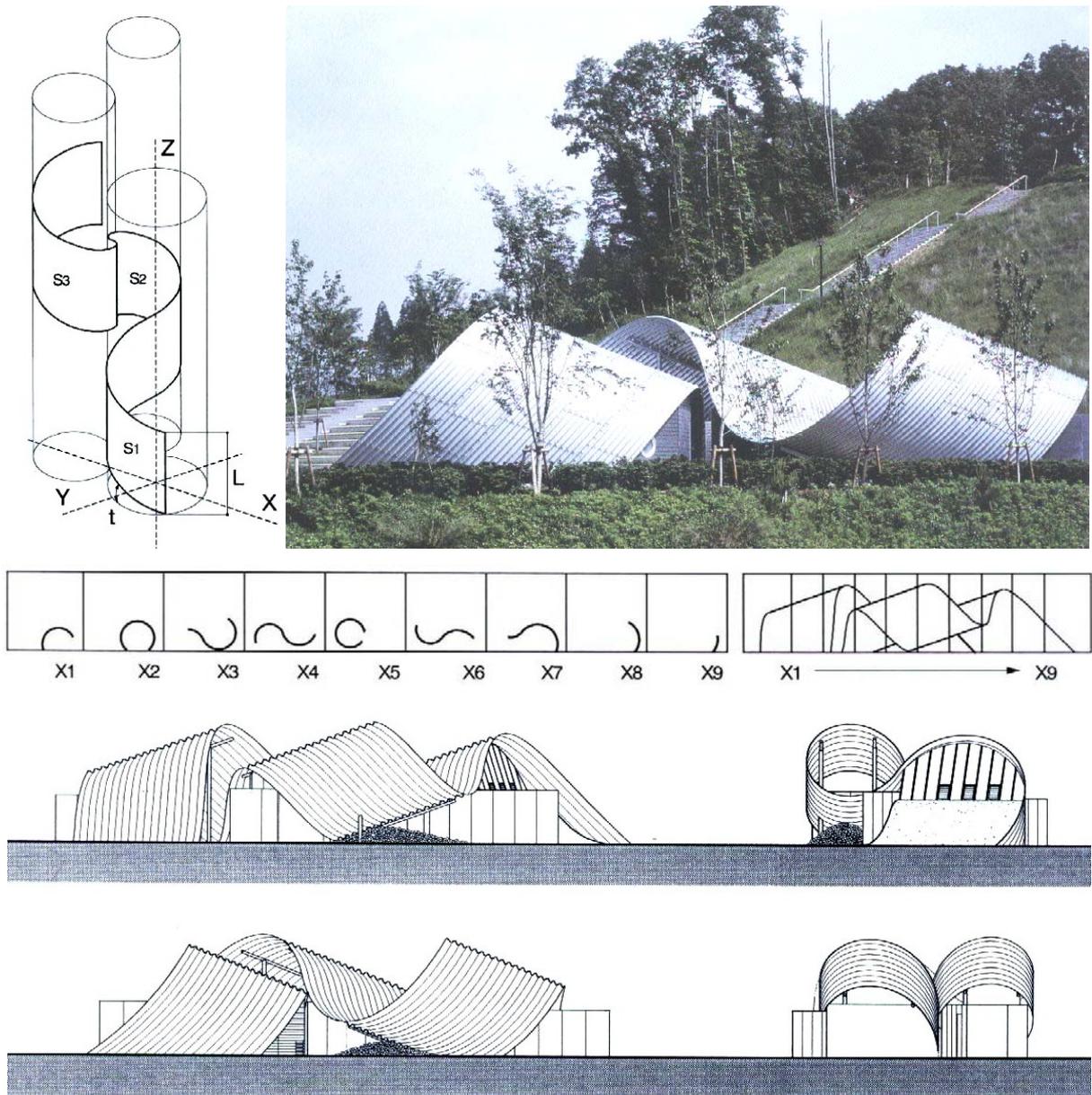


Figura 1-3 - Lavatório Público do Parque Keeper's-Hydeo. Japão.

Fonte: LYALL (2002).

Uma síntese dos parâmetros que regem e classificam os diversos tipos de formas tem como objetivo organizar informações já divulgadas por muitos, mas que muitas vezes são encontradas em diferentes fontes e serão úteis para o equacionamento de um projeto.

Além da investigação das relações geométricas desses arranjos (proporção, ângulos internos, tipo de curvatura), foram observadas possibilidades de solução formal para os sistemas construtivos mais utilizados, reunindo assim informações para auxiliar profissionais na etapa de investigação de um projeto e colaborando para o equacionamento geométrico da

forma proposta. Além dos sistemas clássicos de se construir estruturas moduladas e espaciais existem outros modelos possíveis de serem desenvolvidos, muitas vezes a partir de figuras geométricas comuns, como o triângulo, o hexágono, e o octógono, mas até então raramente utilizados. São exemplos viáveis tanto do ponto de vista teórico do cálculo, como da execução, e a tempo registrados na literatura específica.

## **1.2 Objetivos**

Tendo como objetivo mais amplo tecer considerações sobre as interfaces entre a geometria e arquitetura, este trabalho dedica-se a estudar conformações tridimensionais para coberturas, organizados em modelos modulados. O estudo é desenvolvido através da discriminação de modelos teóricos, analisando-se aspectos do seu desempenho estrutural e quanto à ambientação que podem proporcionar. Devido à larga possibilidade de reunir dados sobre tal assunto, o enfoque foi dado ao estudo de sistemas utilizados em coberturas. Desse modo para se alcançar o objetivo geral desenvolve-se as seguintes etapas específicas:

- levantamento histórico de sistemas construtivos utilizados em coberturas;
- estudo relacionando o espaço pretendido e as formas adequadas;
- estudo das tipologias de formas utilizadas em projetos;
- estudo do sistema de normalização do processo construtivo;
- propostas de três modelos de sistemas de cobertura;
- avaliação comparativa destas propostas.

## **1.3 Metodologia adotada**

A metodologia do trabalho envolveu inicialmente uma pesquisa bibliográfica reunindo tipologias construtivas desenvolvidas através da história e que fundamentam os diversos sistemas hoje utilizados pelos os arquitetos. Estes sistemas não estão ligados apenas a expressões de caráter cultural, mas foram sendo apropriados de maneira universal permitindo uma ampla liberdade de expressão para os arquitetos contemporâneos.

Observando como as construções vieram sendo concebidas com um crescente apoio da técnica e da cultura construtiva, foram estabelecidos conceitos teóricos de ordem tipológica

para uma melhor compreensão das formas utilizadas. Definindo conceitos geométricos para representação e construção matemática de uma forma, pode-se ter maior facilidade no equacionamento de um projeto colaborando na experiência fluente e contínua que o homem tem com a arte de construir.

Tendo em vista a grande influência que estes conceitos podem exercer na definição de um sistema modular, buscou-se sintetizar conceitos pertinentes ao assunto “coordenação modular”.

#### **1.4 Estruturação do trabalho**

No capítulo I apresenta-se de forma sucinta, os principais aspectos a serem desenvolvidos no trabalho discorrendo sobre o assunto em análise apresentando a justificativa da sua escolha e os seus objetivos.

No capítulo II apresenta-se um panorama dos diversos sistemas construtivos e sua evolução histórica aliando-se a eles a cognição das formas utilizadas.

No capítulo III trata-se da mimesis e sua influência na concepção das formas criadas pelo homem nas artes e principalmente na arquitetura. Fundamenta-se nas tipologias diferenciadas das formas naturais e sua transposição para a linguagem arquitetônica. Apresenta-se o trabalho de observadores da natureza, tais como M. C. Escher e Ernst Haeckel, seus trabalhos de documentação e equacionamento das diversas tipologias existentes e da sua própria geometrização. Discute-se ainda, formas e espaço e elegem-se as principais entidades que organizam os fundamentos da geometria plana, onde se espelham os princípios geradores dos objetos tridimensionais.

No capítulo IV trata-se do número, elemento ordenador de todas as formas, da organização dos sistemas numéricos desenvolvidos através dos tempos e das decisões que levaram à sua progressiva normalização. Trata-se, ainda, das principais considerações a serem feitas para a concepção de um projeto, tendo como objetivo a caracterização tipológica dos seus componentes através da coordenação modular. Fundamenta-se na parametrização de superfícies bi e tridimensionais e seu equacionamento, buscando-se elucidar o seu sentido

construtivo. São mencionadas as linhas curvas tridimensionais que equacionam intercessões entre formas diversas. Estes elementos são considerados ferramentas indispensáveis para se equacionar um sistema construtivo. Estudam-se alguns projetos edificados focalizando suas características geométricas e o sistema modular utilizado.

No capítulo V estudam-se os modelos reticulares. Este capítulo tem um caráter propositivo por incluir modelos de resolução equacionadas em sistemas tridimensionais. Trata-se ainda dos principais tipos de ligação utilizados, por serem determinantes na geometria e proporção dos sistemas, e exemplificam-se as possibilidades de sua aplicação em modelos teóricos e projetos.

No capítulo VI, estão apresentados três modelos estruturais para cobertura, utilizando-se sistemas tubulares. Descrevem-se o módulo estrutural e o sistema construtivo utilizado. Foram observados os aspectos da padronização e racionalização das propostas. Para uma comparação do comportamento estrutural dos três modelos apresentados, foi utilizado o mesmo perfil tubular nos três modelos.

No capítulo VII trata-se da verificação do sistema estrutural dos três modelos propostos e seu desempenho quanto ao peso, estabilidade, resistência, e listagem comparativa dos seus elementos. Apresenta-se uma análise dos resultados obtidos.

No capítulo VIII apresentam-se as conclusões do trabalho a partir da análise dos parâmetros equacionados anteriormente e dos sistemas estruturais propostos, comentando os aspectos satisfatórios da investigação feita e os que poderiam ser mais aprofundados através de trabalhos futuros para os quais são apresentadas sugestões.

## CAPITULO II

### 2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS SISTEMAS UTILIZADOS EM COBERTURAS

Os principais conceitos que devem fundamentar o estudo das coberturas estão referenciados à uma recapitulação das maneiras de se construir e como se estruturaram através dos costumes que por sua vez relacionam lugar e cultura. Por isso é importante relatar sobre o desenvolvimento dos sistemas construtivos e as soluções formais adotadas. Sendo a matemática o instrumento para o equacionamento das formas, torna-se importante relembrar conceitos da ordem do conhecimento comum, mas que estão fragmentados em ambientes muito amplos. A geometria está presente no espaço construído e todos eles podem ser descritos por ela. Portanto, a forma e seus ordenadores os números, são também objetos de análise. Para se observar as tendências das construções contemporâneas deve-se rever os conceitos de espaço e as variações geométricas que neles ocorrem. Quem melhor os descrevem são as formas da natureza. Para se estabelecer dimensões em uma construção é necessário contemplar o conceito de escala e este parâmetro se referencia às dimensões do corpo humano e suas proporções. Desta maneira, foi importante comentar estas referências também.

O Homem primitivo viveu sob as árvores e as estrelas, mas em algum momento encontrou ou improvisou um abrigo. Naquela época os caçadores e os pescadores buscaram naturalmente um abrigo nas cavernas e estas constituíram as primeiras moradias humanas. Aqueles que trabalhavam na terra se abrigaram sob as copas das árvores de onde apareceram as choças ou cabanas de ramos e barro. Os pastores, em trânsito, se cobriram de peles e ao ergue-las sobre um mastro criaram as tendas.

A alteração das condições climáticas, expansão agrícola e demográfica, e o aparecimento das ferramentas em metal modificaram as demandas para o abrigo do homem primitivo. A resposta aos materiais, ao clima e às condições locais provoca o aparecimento de um mundo construtivo diverso: agricultores neolíticos que a partir dos seus alojamentos circulares de terra, desenvolveram as primeiras construções em madeira, nômades do deserto com suas tendas de pelo de cabra e usando os camelos como meio de transportá-las, cidades de barro que refletem uma visão do universo e posteriormente, as mansões de madeira na

Europa e na América. Entretanto nos tempos mais antigos o homem utilizou-se basicamente as cavernas.

## 2.1 Primeiros Abrigos

As cavernas sempre abrigaram o homem e outros animais (Figura 2-1). Além das cavernas naturais, existem outras talhadas pelo homem em rochas, de resultados espetaculares. Ao contrário das construções convencionais onde o espaço se constitui através de adição, e agregação de materiais, estes abrigos se formaram por processos subtrativos.

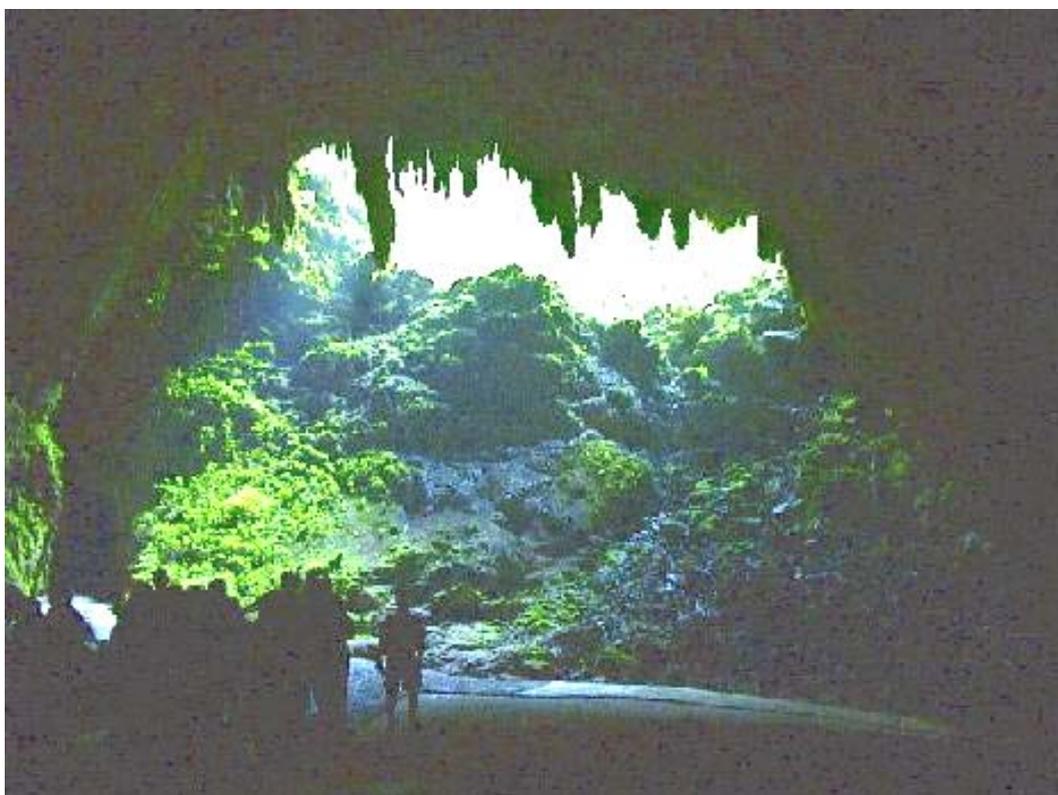


Figura 2-1 – Caverna natural - Porto Rico.

Fonte: [www.cs.rit.edu/~ncs/PuertoRico/cave/](http://www.cs.rit.edu/~ncs/PuertoRico/cave/)

No planalto central da Turquia, localiza-se a região denominada Capadócia (Figura 2-2) formada por cones de pedra e é considerada uma das maravilhas do planeta e segundo OLIVER in COBIJO (1979) foi reconhecida pela UNESCO desde 1978 como patrimônio mundial da humanidade. No interior dos seus cones de pedra com até 30 metros de altura, as cavidades criadas pelos seus habitantes através dos tempos estendem-se ainda por dezenas de metros pelo interior da terra para formar verdadeiras cidades subterrâneas. O relevo singular

da Capadócia foi esculpido por dois vulcões: o monte Argeu, de 3.916 metros de altura, e o Hasan Dagui, de 3.268 metros. As lavas desses dois gigantes formaram planícies de solo maleável e poroso. Com o tempo, a erosão provocada por vento, sol e chuva desgastou as superfícies mais frágeis, enquanto as rochas mais duras resistiam para dar origem às formações rochosas que se vêem hoje. Segundo o ATLAS: Prodígios da Natureza (1995), desde a pré-história, vários povos se sucederam na ocupação desses labirintos subterrâneos: hititas (a partir de 2500 a C), persas (até a libertação por Alexandre o Grande em 334 a.C.), Império Romano-Bizantino e comunidades de cristãos. Devido à facilidade de se escavar a pedra vulcânica, era melhor cavar, que construir. Os capadócios escavaram cidades inteiras, com edifícios de até 90 metros de profundidade e outros de 16 pavimentos de altura. Duas cidades, uma delas alojando 20.000 pessoas, estão conectadas por um túnel de 10 km. Observando-se estas cavidades, vê-se a presença de superfícies curvas que se convertem do teto em movimento contínuo com as paredes enquanto os pisos se adaptam aos desníveis em movimentos curvos e sobem também em direção ao teto (Figura 2-3). Para equacionar as primeiras formas construídas, o homem tentou imitar a curvatura da abóbada celeste e utilizou a plasticidade e a docilidade do barro em construções onde não se distinguem tetos ou paredes.



Figura 2-2 – Imagens da Capadócia.

Fonte: MATÍNEZ (1992).

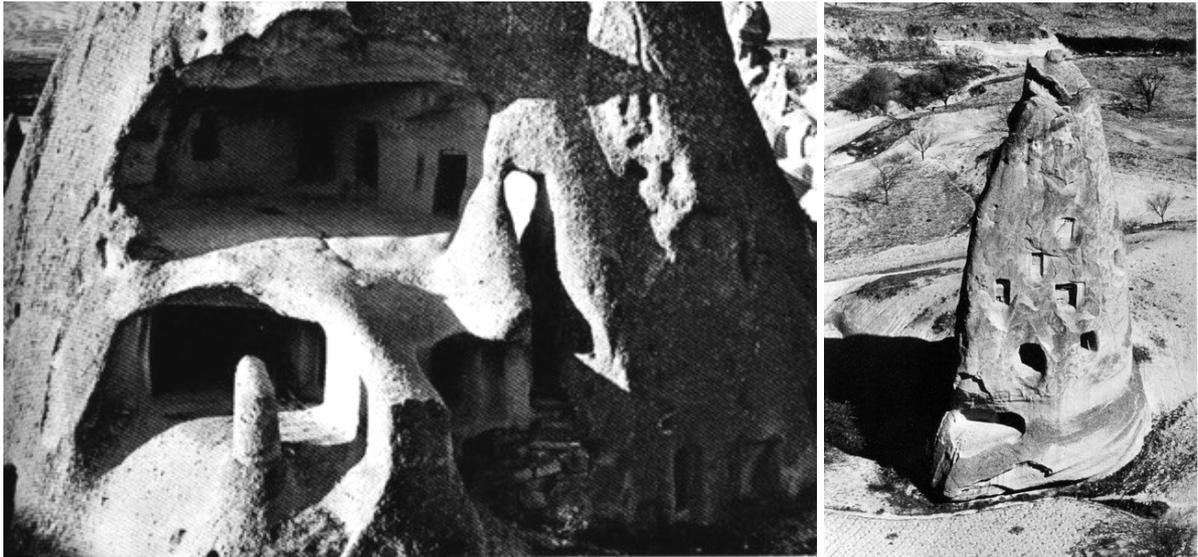


Figura 2-3 – Interior das cavernas da Capadócia.

Fonte: GALIANO (1979).

## 2.2 Construções em Barro

Amassada com pequenos punhados de palha ou pelos de camelo, modelada à mão ou posta na fôrma, crua ou cozida, a terra, maleável ao toque, com sua cor quente e tons alaranjados, foi um dos primeiros materiais usados pelo homem. Jericó, uma das cidades mais antigas, foi construída com tijolos, há 8.000 anos. Casebres humildes com formas arredondadas ou grandes palácios ricamente decorados, as moradias de barro ainda são largamente encontradas na África e nos Países Árabes. Material que conserva o frescor no verão e o calor no inverno, a argila, ainda predomina nas construções, inclusive no Brasil pelo uso predominante do tijolo na construção civil.

Na região da Ásia e norte da África encontram-se abrigos construídos em taipa, além das cúpulas e abóbadas em adobe ou tijolos em barro cozido. No caso da taipa, a utilização da madeira, ramos e barro, completa-se com a palha ou esterco como elementos aglutinantes. A região do planalto Bandiagara, ao sul de Máli, na África, onde se desenvolveu a cultura dogon, apresenta o aspecto de uma cidade cenográfica e que abriga uma população de 250.000 dogons (Figura 2-4). Este povo que habita a savana sudoeste da curva do rio Níger se distribui em aproximadamente 700 aldeias dispostas ao longo de 200 km. A madeira é utilizada para se construir tetos e planos de pavimentos. Apesar dos tetos planos os ambientes

são frequentemente cobertos com cones adicionais de palha. Este sistema é semelhante ao sistema de construções verticalizadas com lajes planas e andares múltiplos



Figura 2-4 – Imagens de Banani.

Fonte: GALIANO (1979).

A beleza e a técnica originária dos sistemas curvos de cobertura residem na sua simplicidade. As cúpulas e as abóbadas aparecem nos alojamentos sedentários feitos de terra, pedra e alvenaria. A mesquita de Djenne também em Mália, tem contrafortes regulares com projeções em pináculos, semelhantes a gigantes cupinzeiros. Segundo GLANCEY, (2001), foi construída no século XIV, reconstruída no século passado e desde então vem sendo renovada constantemente. (Figura 2-5).

Posteriormente, por influência dos romanos houve o aparecimento dos ladrilhos ou tijolos de adobe e argila. Na África, algumas abóbadas são construídas em módulos de aproximadamente 3 x 5 m e no prazo de dois dias (Figura 2-6). Estas construções são estruturadas através de sua própria massa e seu interior se assemelha aos ambientes subtrativos da Capadócia.



Figura 2-5 –Mesquita Djnne, em Máli.

Fonte: GANCEY (1995).

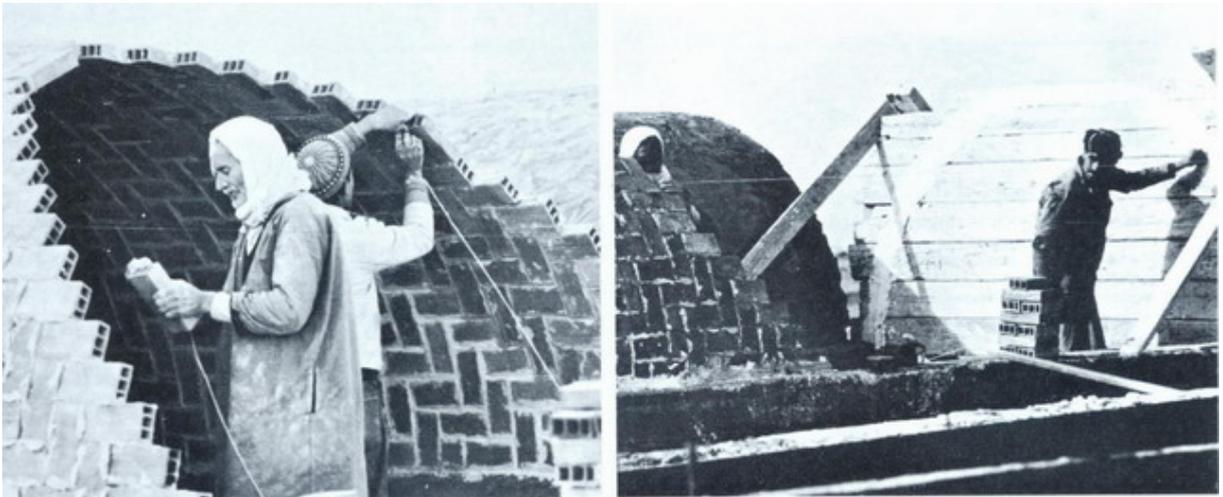


Figura 2-6 – Abóbadas de tijolo.

Fonte: GALIANO (1979).

A arquitetura de caráter massivo predomina nas construções das cidades e quase sempre compartilha como componente de outras construções que utilizam sistemas construtivos mistos. Seu maior representante é o concreto armado com sua excelente plasticidade. Os tijolos de argila, fabricados industrialmente, têm também preferência como elemento de fechamento. Entretanto as coberturas muitas vezes buscavam uma leveza e uma ventilação que foram proporcionadas pelos materiais orgânicos tal como a palha.

### 2.3 Coberturas em palha

As coberturas de palha são talvez as mais utilizadas no mundo, entretanto são praticamente desconhecidas na América do Norte. Apesar de ser um material de lenta elaboração e altamente combustível, podem constituir uma cobertura ventilada, impermeável e biodegradável. Os materiais apropriados são talos, ramos e folhas de palmeira (Figura 2-7).



Figura 2-7 – Cobertura vegetal.

Fonte: GALIANO (1979).

Este tipo de construção tem como principais características, leveza e a utilização de processos artesanais. Utilizam peças estruturais em madeira roliça (seção circular) ou bambu com sistemas de encaixes ou amarrações feitas em cipó ou cordas tecidas com fibras. Este sistema é ainda utilizado, principalmente em construções com madeira imunizada e pode proporcionar a construção de grandes vãos como se vê nos quiosques que constituem espaços

públicos como restaurantes e ainda espaços residenciais. As estruturas metálicas de sistemas tubulares fazem uso de junções semelhantes às articulações destas peças por terem seção igualmente circular. Ambas se espelham à estrutura geométrica das árvores (Figura 2-8). Para os habitantes do deserto, o uso da madeira oferecia dificuldades e tornou-se portanto necessário o deslocamento constante em busca da renovação dos meios de sobrevivência. Diante da dificuldade de obtenção de matéria prima, idealizaram-se abrigos que pudessem ser transportados.



Figura 2-8 – Construções do arquiteto Cláudio Bernardes.  
Exemplos de junções em madeira roliça. Fonte: BEIRÃO (1999).

## 2.4 Primeiras Tendas

A tenda nômade tensionada que pode ser vista desde o Tibet até o Atlântico, constituem típicos abrigos unifamiliares. Sua construção é modular e seu tamanho limitado pela capacidade de carga do camelo familiar (que juntamente com a cabra proporciona o pêlo com o qual se tece a cobertura). Geralmente, suas dimensões ficam em torno de 7 x 13 metros e peso de aproximadamente 700 kg. A unidade modular da tenda é uma tira de 60 cm de largura tecida pelas mulheres e comprimento equivalente ao da tenda. Completam a cobertura,

aproximadamente dez destas tiras atadas juntas formando um reforçado esqueleto de tiras tensoras, presas aos mastros e cravadas com estacas ao chão. É competência dos homens a execução desta montagem (Figura 2-9).

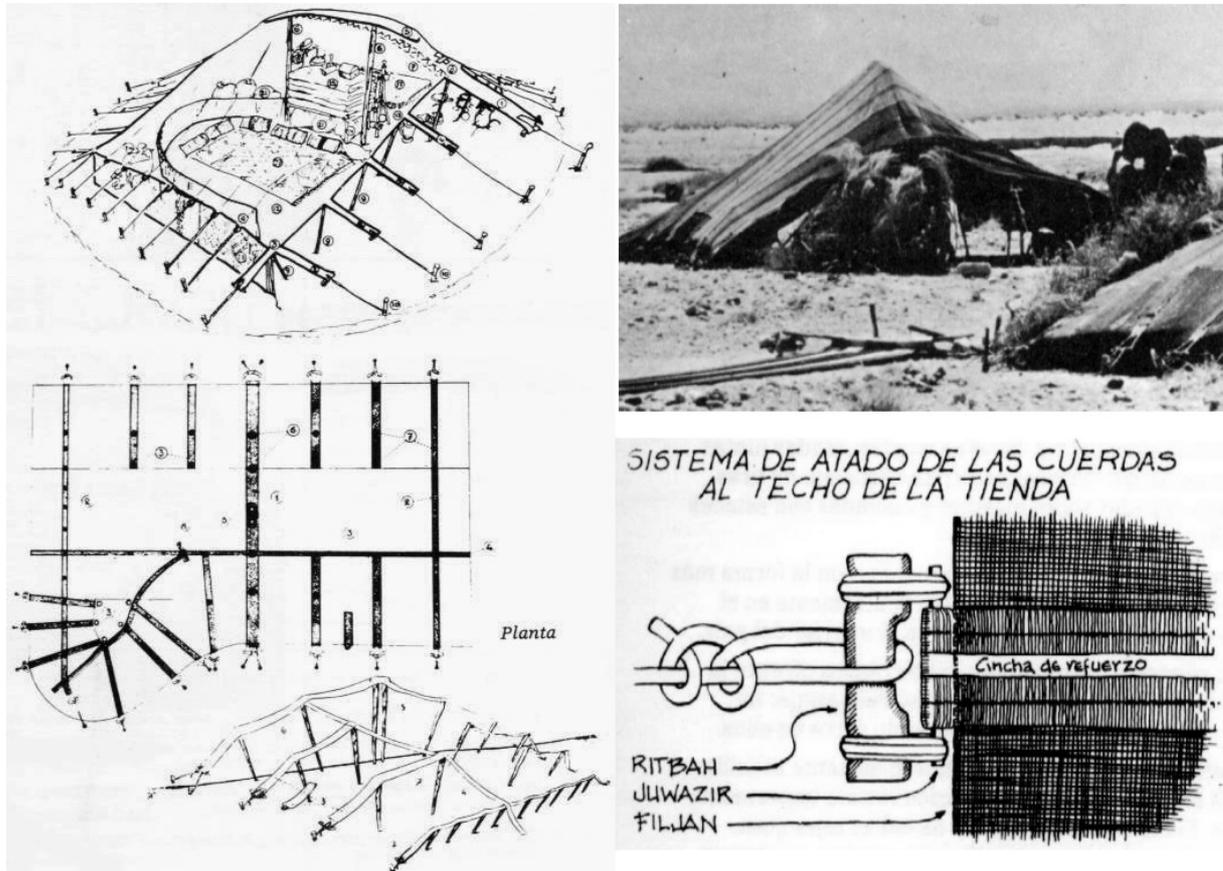


Figura 2-9 – Tendias. Estrutura dos pórticos e tensor metálico.

Fonte: GALIANO (1979).

As tendias de pelo de cabra falam por si mesmas com seus tecidos de lã, seda e linho, levadas através do deserto pelos israelitas. Desenvolvidas pelos pastores, são a apoteose deste tipo de abrigo. Segundo STOREK em COBIJO (1979) os Tuaregues têm grande estima pelas suas tendias de pele e as mantêm ricamente decoradas. As mulheres se esmeram para dotá-las de rara beleza. Também os beduínos do deserto da Arábia, que pela escassez de pastos eram obrigados a se deslocar continuamente, construíram tendias com um sistema simples e adaptável, tendo como elemento principal um grande retângulo de cobertura feito com tecido de pelo de cabra ou lã de ovelha. A união entre os mastros com tirantes cria um sistema que atua como pórticos tridimensionais aos quais se fixam cortinas de larguras variáveis (Figura 2-10). No perímetro externo, existem dois tipos de cortinas: uma exterior e outra interior. A

cortina exterior funciona como um fechamento e as interiores como elemento de ambientação. Outras cortinas internas servem como divisórias e organizam a tenda em áreas de homens, mulheres e outras múltiplas divisões posicionando-se ao longo de seus tirantes de corda.

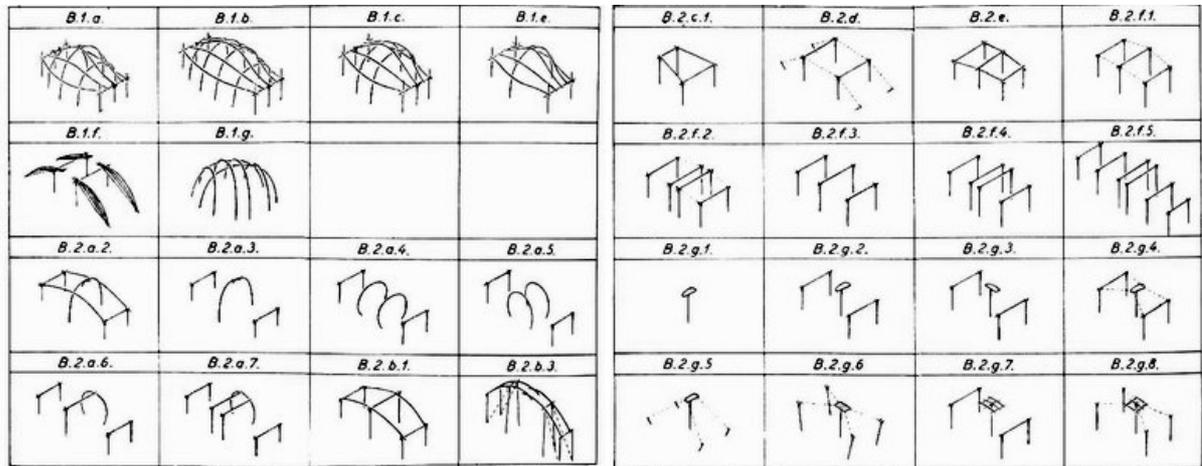


Figura 2-10 – Pórticos das tendas.

Fonte: GALIANO (1979).

Observando as tendas dos Tuaregues e Beduínos, pode-se perceber estruturas posicionadas em sistemas reticulares ortogonais que utilizam pórticos, aliados a membranas tracionadas. Este sistema de cobertura evoluiu com a utilização de componentes metálicos tais como cabos de aço substituindo as tiras tensoras artesanais e pilares de aço substituindo os pórticos de madeira. As superfícies de pele evoluíram para lonas sintéticas de alta resistência e durabilidade (Figura 2-11). Entretanto, em locais onde houvesse facilidades para utilização da madeira e que foram ocupados por agricultores, a madeira foi o material mais utilizado nas construções e principalmente prestou-se à modelagem dos mais diversos componentes de uma construção.

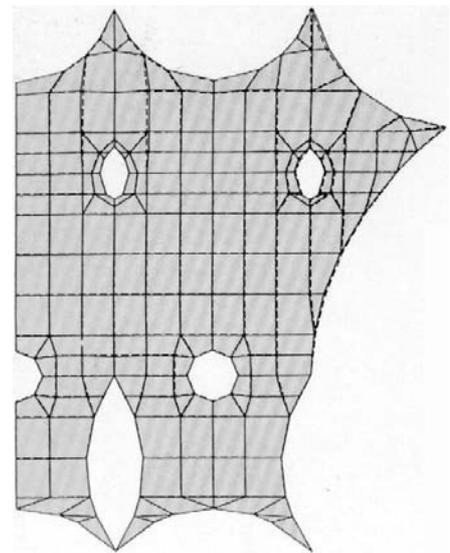
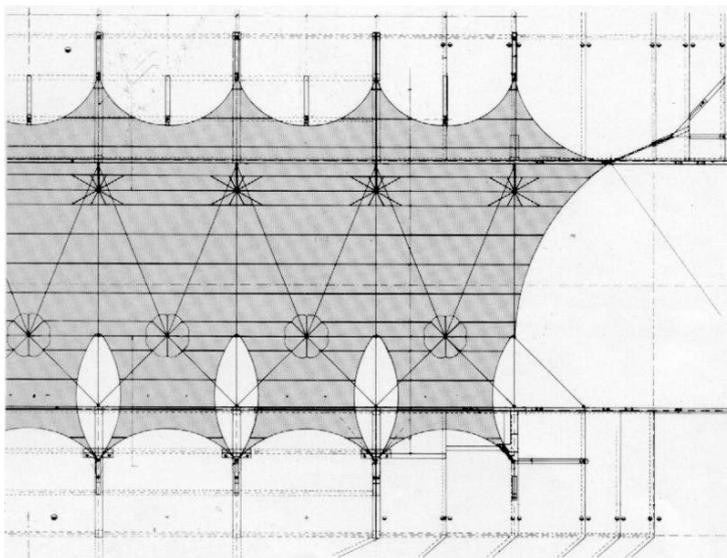
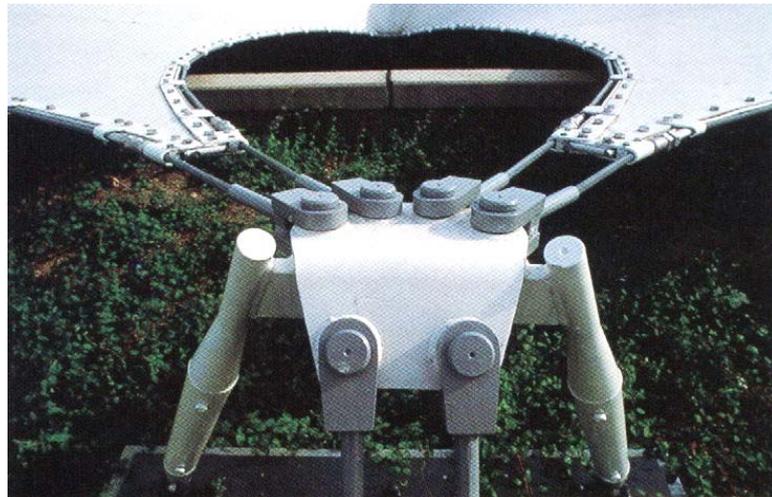


Figura 2-11 –Anexo do Schulmberger Facility - Renzo Piano.

Fonte: YOSHIDA (1989).

## 2.5 Construções em madeira

Nas construções primitivas de madeira, as paredes não se diferenciavam do teto. Segundo EASTON em COBIJO (1979) o sistema era constituído por troncos de árvores fincados no chão e suas pontas eram queimadas para evitar o apodrecimento (Figura 2-12). Eram articulados por cima e sustentados nos extremos com pés direitos arqueados. Os vértices de cada par se uniam através de uma viga cumeeira para apoio horizontal. Eram estruturas trianguladas em forma de triângulo isósceles que na Inglaterra deram origem a um tipo de construção contraventada. O sistema era simples: pilares e vigas se curvando frente a frente e interligados por uma peça-tirante na horizontal. Essas construções com aspecto de barco invertido, tinham às vezes fechamentos inclinados e eram baixas internamente. Progressivamente as construções evoluíam para uma volumetria cada vez maior, com os tirantes se prolongando sobre a base dos arcos, conectando-se a ela através de esteios que passaram a assumir alturas cada vez maiores (Figura 2-13). Com o aumento da altura da base, pouco a pouco o sistema passou a uma estrutura mais avançada, com a cobertura se distinguindo das paredes o que possibilitou uma maior diversidade formal.

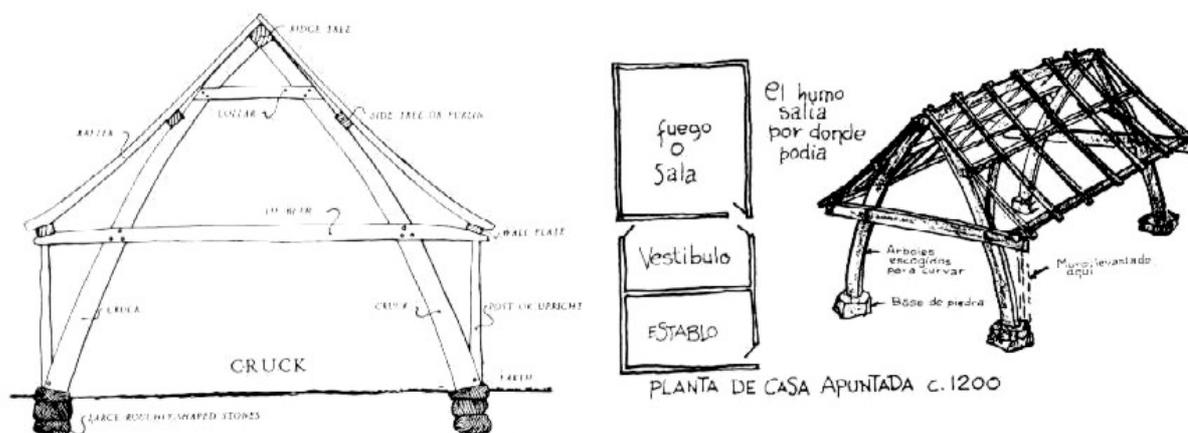


Figura 2-12 – Construções em madeira.

Fonte: GALIANO (1979).

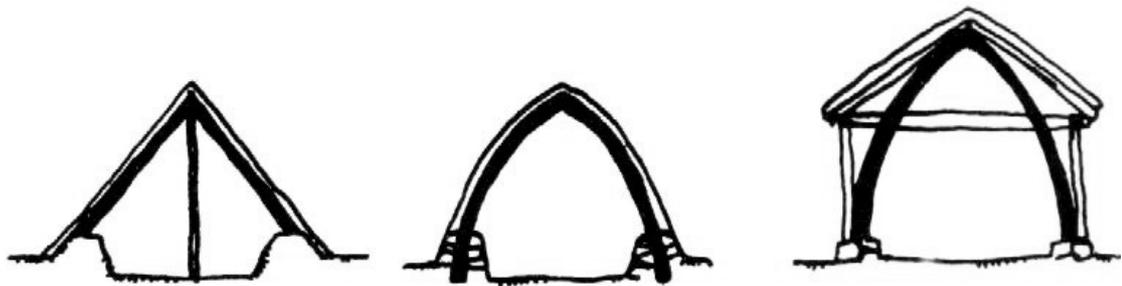


Figura 2-13 – Construções em madeira – arcos.

Fonte: GALIANO (1979).

De acordo com WELSCH em COBIJO (1979) no norte da Rússia existem numerosas edificações antigas de madeira, destacando-se igrejas e silos, em sua maioria obra de artesãos anônimos. Uma das estruturas mais espetaculares é a que se encontra em Kizhi, pequena ilha no lago de Onega. Ali, refletida na água, ergue-se a magnífica Igreja da Transfiguração (Figura 2-14). Posteriormente, peças maciças passaram a ser aparelhadas e utilizadas em vãos modulares deixando-se espaços vazios entre os planos de fechamento que foram duplicados. Este espaço interno pode ser utilizado para distribuição de tubulações e outros acessórios necessários à construção. A madeira estrutural foi posteriormente substituída por perfis metálicos. Para os planos de fechamento, as possibilidades foram ampliadas com a utilização de materiais como placas de gesso, cimento, vinil concreto celular, e outros (Figura 2-15).

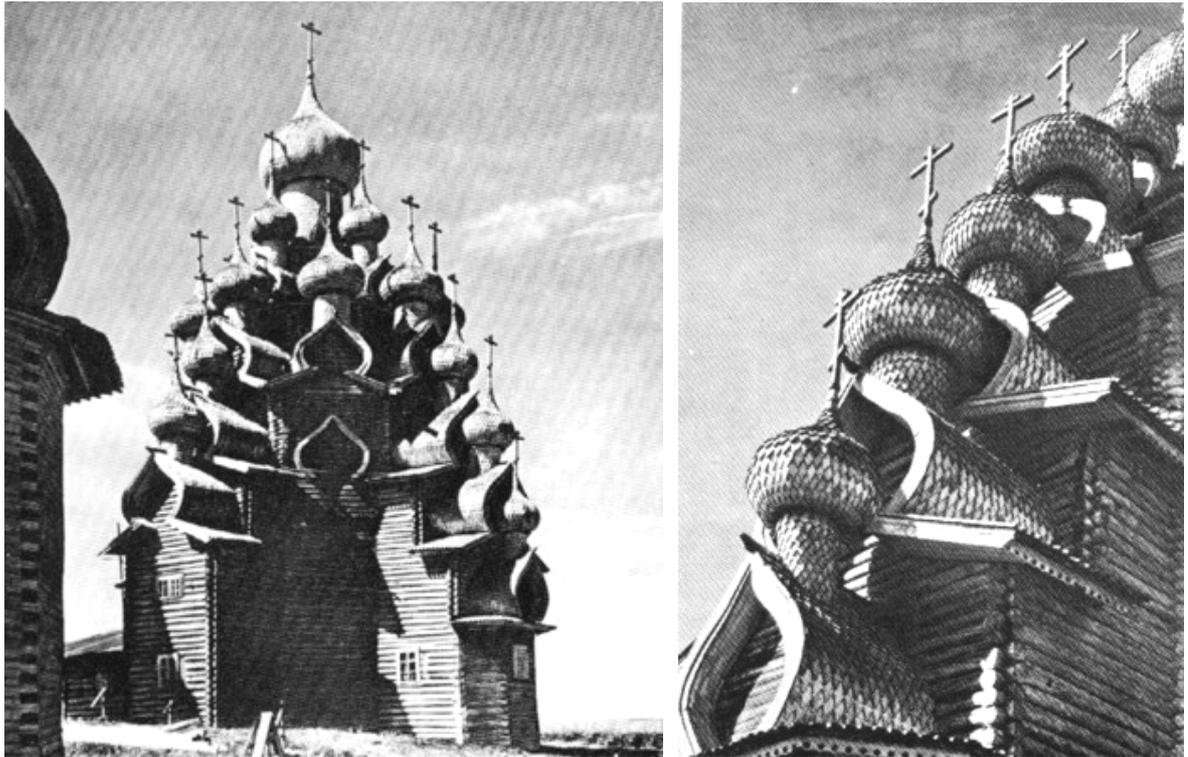


Figura 2-14 – Igreja Russa.

Fonte: GALIANO (1979).



Figura 2-15 – Estrutura de madeira aparelhada.

Fonte: MARCHAND (1995).

Nas margens alagáveis dos rios locais preferidos pela vegetação palustre, o junco foi utilizado em feixes para que se conseguisse maior resistência nos elementos de sustentação.

## 2.6 Coberturas em junco

O junco foi muito empregado em diversas áreas rurais do mundo para armações de paredes e coberturas. Embora sua durabilidade seja menor, é um bom isolante, fácil de trabalhar e de rápido crescimento, não necessitando ser plantado e nem de adaptações antes de ser utilizado.

Na Figura 2-16 mostra-se um edifício que está construído na região do Iraque meridional. Sua técnica data de 6.000 anos atrás e foi construído com um tipo de junco gigante que cresce na região do baixo Tigre e Eufrates até 7 metros de altura. Depois de cortados, são agrupados em feixes e fixados ao chão em duas fileiras paralelas. Enquanto isso, vários homens mantêm os feixes curvados unindo suas extremidades duas a duas. Em seguida se coloca uma armadura horizontal e sobre elas, esteiras.

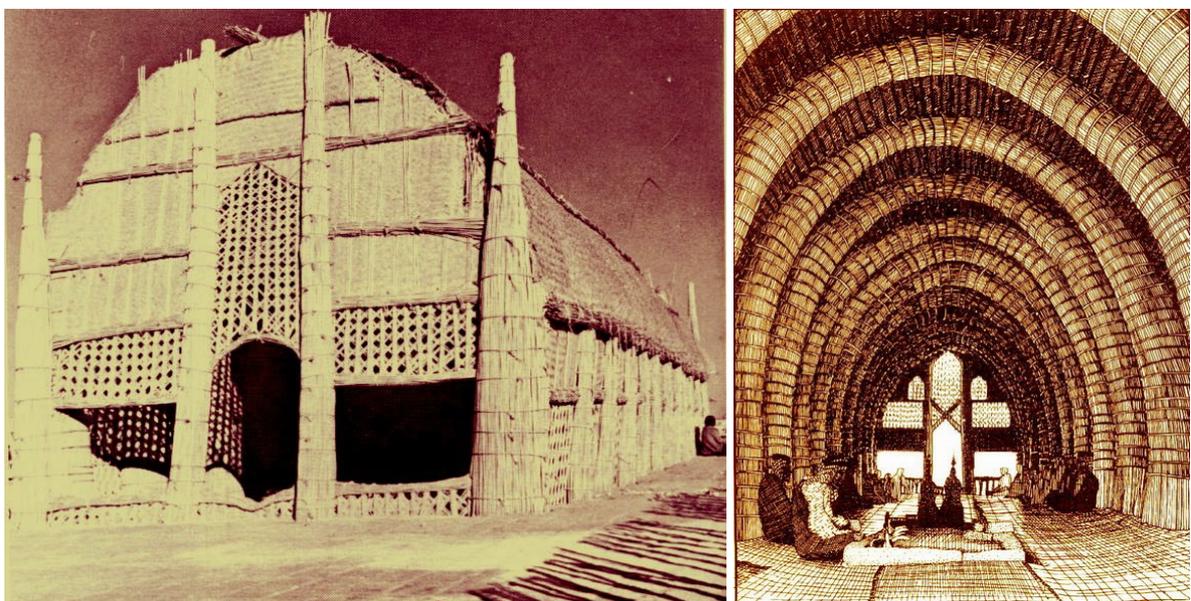


Figura 2-16 – Mudhif - Região do Iraque meridional.

Fonte: GALIANO (1979).

Sentado no interior de uma construção como esta (denominada *mudhif*), tem-se a sensação de encontrar-se em uma catedral gótica, ilusão reforçada pelo teto nervurado e as

janelas de esteira nas duas extremidades através das quais penetram raios de luz no seu interior sombrio. O rico efeito produzido pelas texturas, se deve inteiramente ao comportamento estrutural da construção. Historicamente, estas construções foram importantes por terem sugerido a utilização da forma parabólica em arcos de tijolo. Segundo GLANCEY (2.000), mais tarde foram feitos em pedras em inúmeras construções góticas, começando pela Catedral de Beauvais na França iniciada em 1220 e culminando em 1515 com a capela do King's College na Inglaterra onde as curvas se tornaram mais próximas do arco abatido, dando maior ênfase à verticalidade dos pilares e à textura delicada de sua cobertura (Figura 2-17).

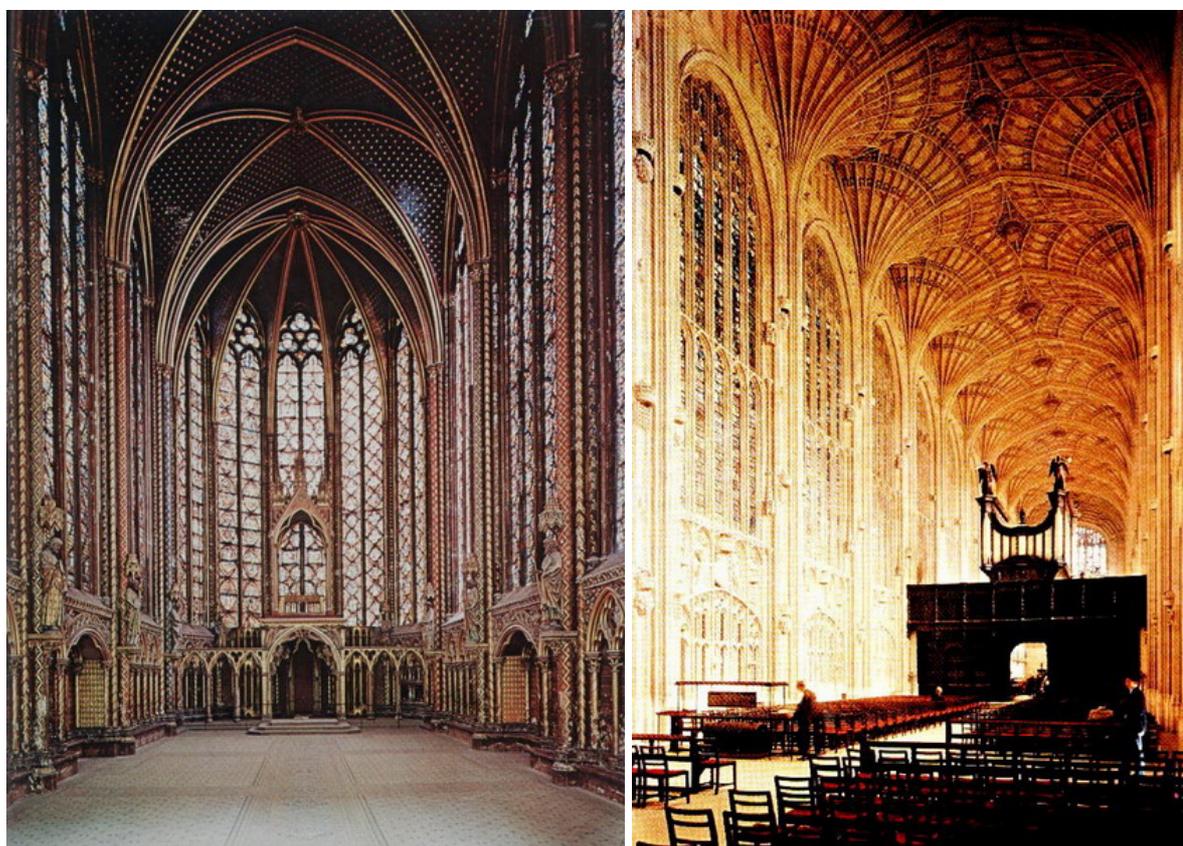


Figura 2-17 – Arquitetura Gótica.

Saint Chapelle (Paris) e Capela do Kings College. (Cambridge). Fonte: GLANCEY (2001).

Segundo ZERBST (1991), o arquiteto espanhol Antoni Gaudi, utilizou arcos parabólicos em alvenaria de tijolo e pedras. Na década de 80 do século XIX, projetou o Colégio da Companhia de Santa Tereza de Ávila onde utilizou arcos catenários cuja forma já havia experimentado anteriormente em obras tais como o Palácio Güell e a casa Vicens. Na Figura 2-18, apresenta-se os corredores do primeiro piso que rodeiam o pátio interno do

colégio e captam a luz do exterior. As paredes claras produzem um efeito de resplendor. A elegância e ausência de matéria proporcionada pela forma dos arcos parabólicos, também estão presentes nas construções contemporâneas e principalmente nas estruturas metálicas onde a esbeltez faz parte dos principais quesitos para um desempenho satisfatório. Um exemplo desta analogia está nas obras de Santiago Calatrava como a apresentada na Figura 2-18. Mas entre as formas utilizadas nas construções nenhuma teve maior importância que a forma esférica.



Figura 2-18 – Arquitetura Gótica.

Colégio Teresiano, de Antoni Gaudí em Barcelona. Fonte: ZERBST (1991)

BCE Gallery e Heritage Square em Toronto de Santiago Calatrava. Fonte: JODIDIO (1997).

## 2.7 As Cúpulas

A forma esférica constitui a seqüência e a materialização das investigações sobre as construções edificadas ao longo da história da arquitetura. Sempre esteve presente a necessidade de reproduzir o espaço esférico, entre os sistemas utilizados em coberturas. Os primeiros abrigos dos homens, antes mesmo que dispusesse de ferramentas metálicas para o

corte da madeira ou da pedra, eram constituídos de pequenas cúpulas de galhos trançados e cobertos com folhas, palhas ou peles de animal (Figura 2-19).



Figura 2-19 – Cúpula com folhas.

Fonte: MARCHAND (1995).

Os alojamentos circulares com apoios centrais evoluíram a partir de pequenas cúpulas até adquirirem formas mais retilíneas no advento da agricultura. Quando as sociedades nômades desenvolveram ferramentas e adquiriram conhecimento de uma diversidade maior de materiais apareceram dois novos tipos de construções esféricas: a de madeira, com elaborado sistema estrutural e resultante da experiência adquirida com a construção de barcos e a de tijolo ou pedra empregada para usos diversos como abrigos, celeiros e outros fins que geraram edifícios monumentais como igrejas, conventos e construções de uso público. Com a invenção do cimento pelos engenheiros romanos surge um quarto tipo de construção cupular: a monolítica de cimento com a qual se cobrem os enormes banhos e edifícios públicos da Roma imperial (Figura 2-20).

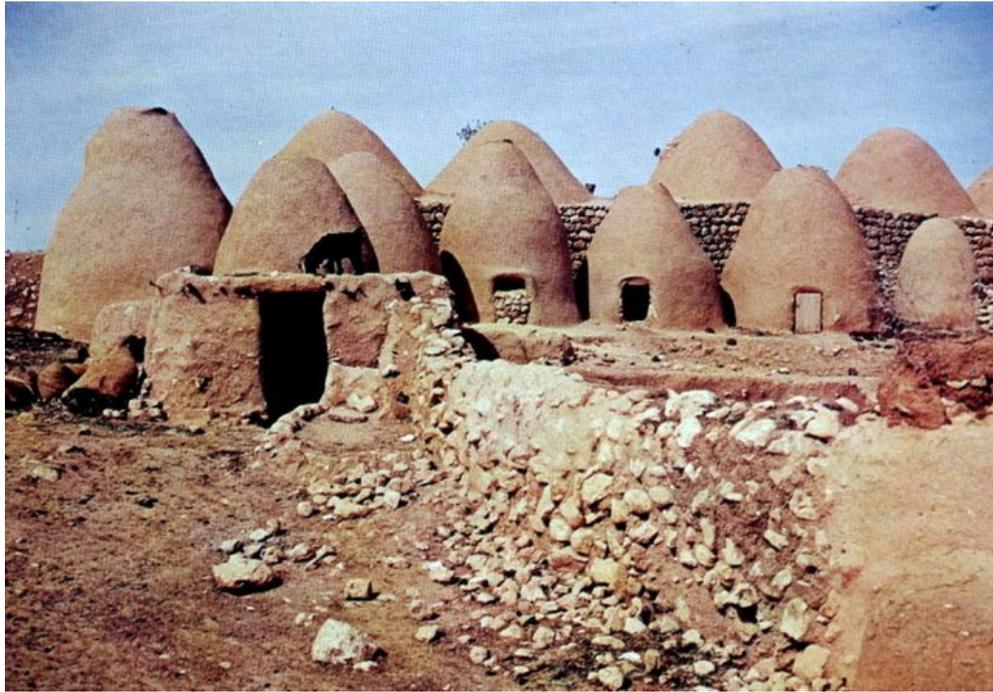


Figura 2-20 – Cúpulas de barro e pedra.

Fonte: GALIANO (1979).

As cúpulas, com o seu sistema de iluminação por lanternins zenitais, e as suas relações estruturais de apoio nas paredes e nas pilastras cobriam inicialmente, espaços de formato circular mas relacionaram-se posteriormente com a estrutura do quadrado e do cubo. Do ponto de vista da volumetria externa, a cúpula sempre evidenciou sua presença, dominando a composição dos edifícios (Figura 2-21).

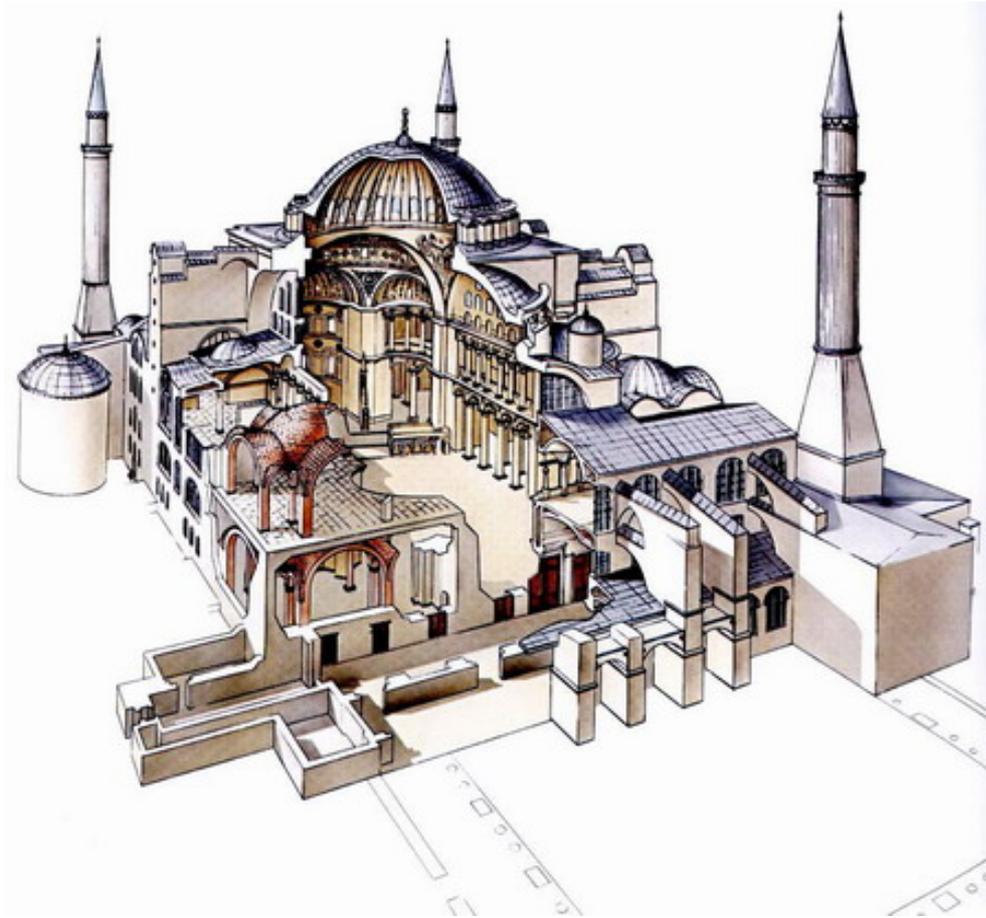


Figura 2-21 – Santa Sofia.

Ilustração .Fonte: MANSELL (1980).

Fotografia Fonte: GLANCEY (2001).

O sólido esférico como elemento predominante e não como elemento secundário começa a surgir com resultados significativos na composição nos finais do século XVIII e nos princípios do século XIX. Segundo GÖSSEL (1991), em 1784, a forma da cúpula é pela primeira vez tomada como uma esfera e encaixada em um embasamento cilíndrico, no projeto do monumento a Newton, de E. L. Boullée (Figura 2-22). Este efeito plástico é dado por uma estrutura modular de dois níveis, ou seja, permite a leitura natural da esfera, e passando uma sensação de estabilidade.

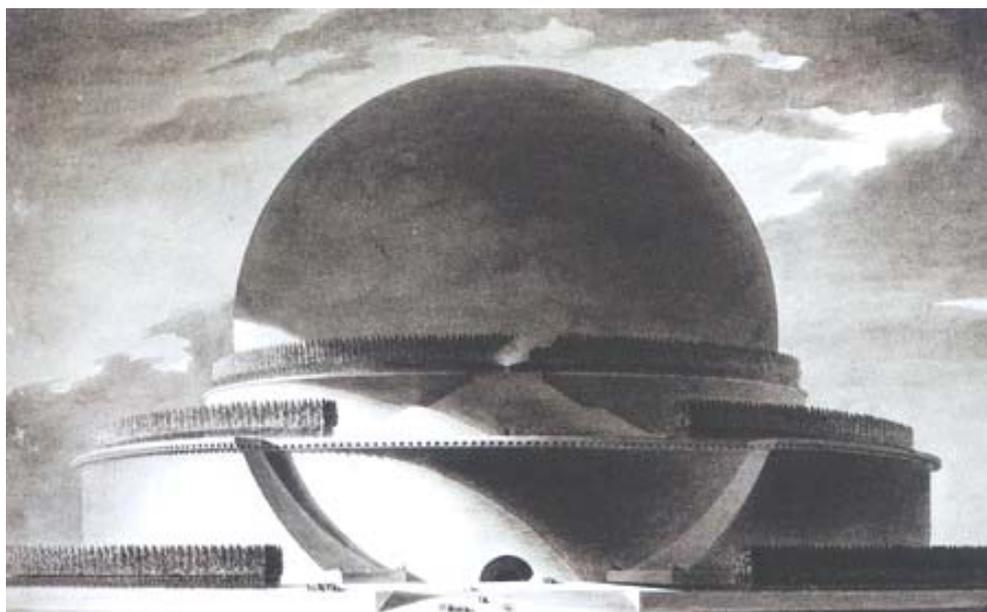


Figura 2-22 – Cenotáfio de Newton.

Fonte: GOSSEL (1991).

Já no início do século XX, foi construído um quinto e mais recente tipo de cúpula. Em 1922, Bauersfeld construiu em Jena, Alemanha, a primeira cúpula geodésica: (linha geodésica: linha mais curta entre dois pontos sobre uma superfície curva). Segundo OLIVER, em COBIJO (1979), ela era: “um setor de esfera baseado na subdivisão do poliedro de vinte lados, o icosaedro, com estrutura em barras de aço recoberta de uma fina capa de concreto (relação entre espessura e diâmetro semelhante à casca de um ovo)”. Esta foi a primeira estrutura laminar construída no mundo, concebida para ser um planetário (Figura 2-23).



Figura 2-23 – Geodésica de Jena.

Fonte: GALIANO (1979).

A técnica que busca vencer grandes vãos com painéis modulares de espessura mínimas seria utilizada depois em grande escala por Felix Candela e Píer Luigi Nervi (Figura 2-24). Estas estruturas foram possíveis graças à revolução industrial, às ferramentas mecânicas e aos novos materiais de construção. As novas cúpulas têm base matemática e são construídas mediante uso de barras lineares conectadas pelas extremidades e fechadas por painéis unidos segundo seus lados. A forma poliédrica utilizada em Jena já era conhecida na Ásia durante séculos, para cestos, chapéus e utensílios de pesca. E, segundo OLIVER em COBIJO (1979), em agosto de 1923, pela primeira vez o firmamento aparecia reproduzido com todo seu brilho, na cúpula de Jena. O efeito das estrelas, e os deslocamentos dos planetas no interior da cúpula foram tão impressionantes que até seus construtores ficaram assombrados. Evidentemente o mesmo aconteceu com os espectadores e os jornais falaram da “Maravilha de Jena”.

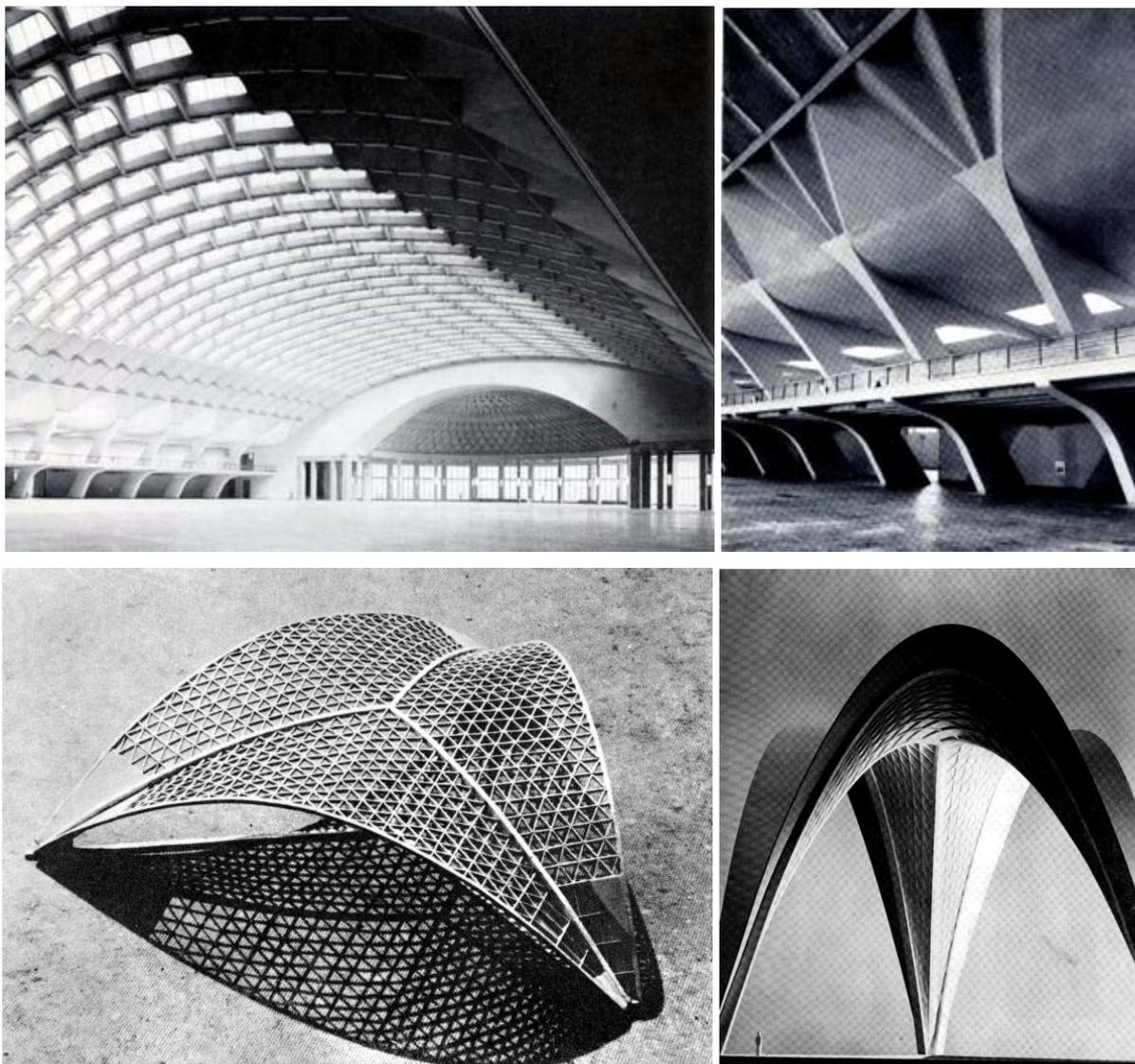


Figura 2-24 – Estruturas de Coberturas.

Pavilhão de Exposições em Turim e Modelos Estruturais – Nervi.

Fonte: HUXTABLE (1960).

Ainda, segundo OLIVER em COBIJO (1979), trinta anos depois da construção da geodésica de Jena e após um considerável desenvolvimento no estudo das cúpulas, Buckminster Fuller patenteava o mesmo princípio do icosaedro subdividido nos Estados Unidos onde construiu diversos modelos e as denominou cúpulas geodésicas. Fuller popularizou suas cúpulas como um importante avanço na tecnologia das construções e como a estrutura mais eficaz já inventada. Uma ampla esfera de vidro e aço com 80 metros de diâmetro e revestimento em acrílico, com a estrutura modular constituída inicialmente de hexágonos e pentágonos, constituiu a base para a concepção do Pavilhão dos Estados Unidos em Montreal no ano de 1969 (Figura 2-25). A cúpula geodésica é formada por módulos

triangulares e articula-se em todas as direções, sem deixar espaços residuais. O agrupamento de módulos triangulares inscreve-se em uma esfera e sua organização torna-se semelhante à das colméias naturais. Para possibilitar uma montagem rápida e conseguir uma repartição igualitária das tensões, as barras e os discos dos nós devem ser extraordinariamente precisos, o que veio a resultar no emprego de sistemas óticos para o desenho das peças.



Figura 2-25 – Pavilhão dos Estados Unidos em Montreal.

Fonte: GOSSEL (1991).

Nas conferências que pronunciava por todo o mundo nos anos cinquenta e sessenta, Fuller popularizou suas cúpulas como um importante avanço da tecnologia das construções e como a estrutura mais eficaz já inventada. Fuller aspirava a produção em série dos seus componentes, entretanto as cúpulas produzidas por sua fábrica jamais se popularizaram talvez devido a problemas de impermeabilização ou dificuldades para a subdivisão do espaço interno e posteriores reformas. A vantagem inicial de menor consumo de material, se perde ante estes inconvenientes sem esquecer que o custo da cúpula significaria apenas 20% do custo total da construção.

Estava entretanto inaugurado o processo de construção de formas curvas pelo processo de triangulação da sua superfície e a esfera deixou de ser a única forma a ser parametrizada segundo suas linhas geodésicas. Outras formas passaram a ser equacionadas, incluindo-se aí as superfícies com apenas um sentido de curvatura como o cilindro e o cone. Quando estas superfícies foram equacionadas segundo planos diferentes sejam paralelos ou concêntricos, estava criado o conceito de “treliças espaciais”.

Baseadas nos diversos sistemas construtivos desenvolvidos através dos tempos pode-se observar que os diversos tipos de formas de construir estão relacionados aos materiais disponíveis e às tradições culturais de cada região. Aos processos inicialmente empíricos foram sendo incorporadas informações técnicas que permitiram não só a diversificação dos materiais utilizados, mas também uma evolução no entendimento das formas permitindo assim o enriquecimento na qualidade do espaço e na linguagem construtiva. Mas foram sem dúvida as idéias provenientes de uma nova visão do conceito de espaço que introduziram as maiores mudanças na concepção das formas.

## CAPÍTULO III

### 3 FORMA E ESPAÇO

À medida que o homem foi mudando sua concepção do mundo, sua arquitetura também foi influenciada. Com o desenvolvimento das idéias científicas sobre o espaço e o tempo, foi demonstrado que as propriedades do espaço infinito não se expressam apenas pela geometria de euclidiana. A partir do final do século XVIII, começaram a aparecer novas idéias que vieram contestar a concepção do espaço como infinito e plano. Segundo BERGAMINI (1964) deve-se inicialmente a Gauss e posteriormente ao seu discípulo Bernhard Riemann e ao russo Nikolai Lobachevski o equacionamento destas idéias.

Fundamentados nos princípios básicos da tridimensionalidade, pode-se conceber categorias diversas de espaços. O espaço euclidiano, concebido como plano e de curvatura zero, onde os fundamentos da geometria clássica são perfeitamente equacionáveis, deixou de ser uma verdade absoluta. Entretanto, por se referenciar ao âmbito da escala humana, seus conceitos são perfeitamente aplicáveis ao nosso cotidiano. No espaço plano, linhas paralelas nunca se encontram, os ângulos internos de um triângulo somam  $180^\circ$  e a menor distância entre dois pontos é uma linha reta. Oferece princípios redutores para a estruturação das formas pois é desprovido de movimento. Suas verdades são eternas. Presta-se perfeitamente para o equacionamento da matéria inerte e estabeleceu um referencial para que se pudesse equacionar a geometria de outros tipos de espaço onde o movimento influencia o comportamento das formas. É um espaço aberto e de volume infinito.

Entretanto, sabe-se que é possível voar em linha reta e voltar no ponto de partida e portanto pode-se perceber que uma curva cujo raio seja suficientemente grande pode causar sensação de se tratar de uma reta. Desta maneira, os matemáticos conceberam a existência do espaço curvo, começando pelo espaço esférico que possui curvatura positiva e constante e o espaço hiperbólico de curvatura negativa e constante. No espaço esférico, linhas paralelas convergem. É um espaço fechado e de volume finito. No espaço hiperbólico, linhas paralelas divergem. É um espaço aberto e tem volume infinito. Nos espaços curvos (esférico e hiperbólico) o caminho mais curto entre dois pontos é uma linha curva e os ângulos internos

de um triângulo variam quando este se movimentar, podendo não somar  $180^\circ$  como na geometria plana (Figura 3-1).

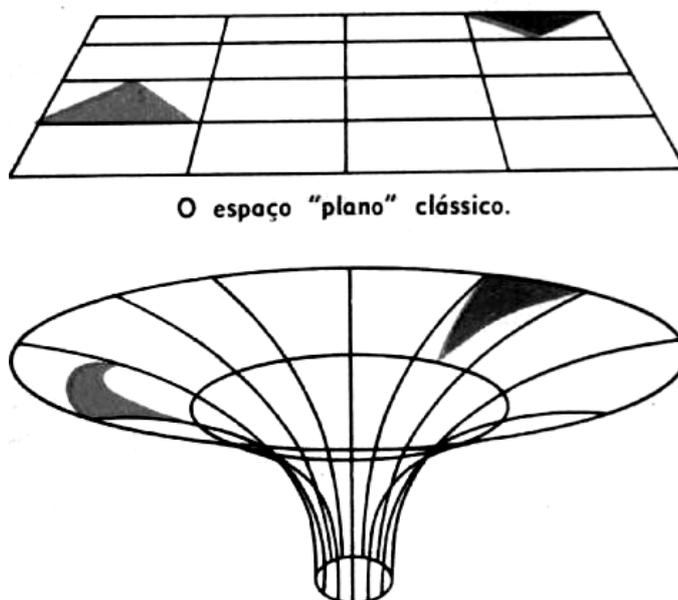


Figura 3-1 – Representação do espaço curvo e modelo da pseudo-esfera.

Fonte: BERGAMINI (1964).

Neste novo ambiente, foram delineados alguns princípios ligados à medição de linhas ou superfícies curvas o que se denominou “geometria diferencial”. O desenvolvimento desses conceitos tornou possível fazer medições em espaços de qualquer curvatura e de qualquer número de dimensões. A concepção do espaço curvo influenciou os conceitos de gravidade, de massa e de energia culminando com a teoria da relatividade, desenvolvida por Einstein que veio estabelecer uma nova visão para todo o comportamento do universo.

### 3.1 Formas da geometria plana

São poucas as formas geométricas básicas das quais se compõe toda a diversidade da estrutura do universo. Cada uma delas é dotada de propriedades únicas e detém um simbolismo que permaneceu imutável ao longo da história humana. Todas essas formas podem ser produzidas por meio de régua e compasso. Sua constituição é definida por proporções notáveis. Representam idéias, conceitos, e sua construção não exige nenhuma medição ocorrendo inclusive nas formas naturais, nos reinos orgânico e inorgânico.

Talvez o círculo tenha sido o símbolo mais antigo desenhado pela raça humana. Simples de ser executado, é uma forma cotidiana encontrada em vários exemplos de formas da natureza. É vista nos céus como os discos do sol e da lua. As construções primitivas, fossem elas temporárias ou permanentes, eram circulares em sua grande maioria. Desde os círculos de pedras megalíticas até as igrejas e os templos redondos, a forma circular imitou a redondeza do horizonte visível, fazendo de cada construção, um pequeno mundo em si mesmo. Ao se vislumbrar um círculo, percebe-se que dele ecoam os princípios de completude, homogeneidade e equilíbrio. É a figura matriz que pode gerar todas as outras figuras geométricas regulares. De forma simples e elegante, o círculo se movimenta progressivamente gerando o *vésica piscis*, o triângulo equilátero, o quadrado, o hexágono, o pentágono e demais polígonos regulares. Proporções especiais relacionam todas estas figuras entre si. Observando os sistemas de organização que o círculo proporciona, pode-se pressupor estes fundamentos da geometria como sendo uma metáfora da ordem universal.

O “*Vésica Piscis*” é aquela figura que se produz quando dois círculos de raios iguais são desenhados, de maneira que o centro de um seja pertencente ao perímetro do outro. Por sua posição fundamental na geometria, simboliza a origem da vida, e da diversidade. Esta forma pode ser observada no disco lunar quando em suas fases, relaciona-se com a sombra projetada pela terra. Os círculos sobrepostos proporcionam excelente representação de uma célula ou de qualquer outra unidade no processo de se tornar dual. Representa ainda o conceito da semente que gradativamente se expande gerando a multiplicidade, já que todos os polígonos regulares podem ser desenhados a partir de movimentos sucessivos do círculo. Como filhos primogênitos do círculo, os polígonos se organizaram para providenciar a estruturação do universo formal existente (Figura 3-2).

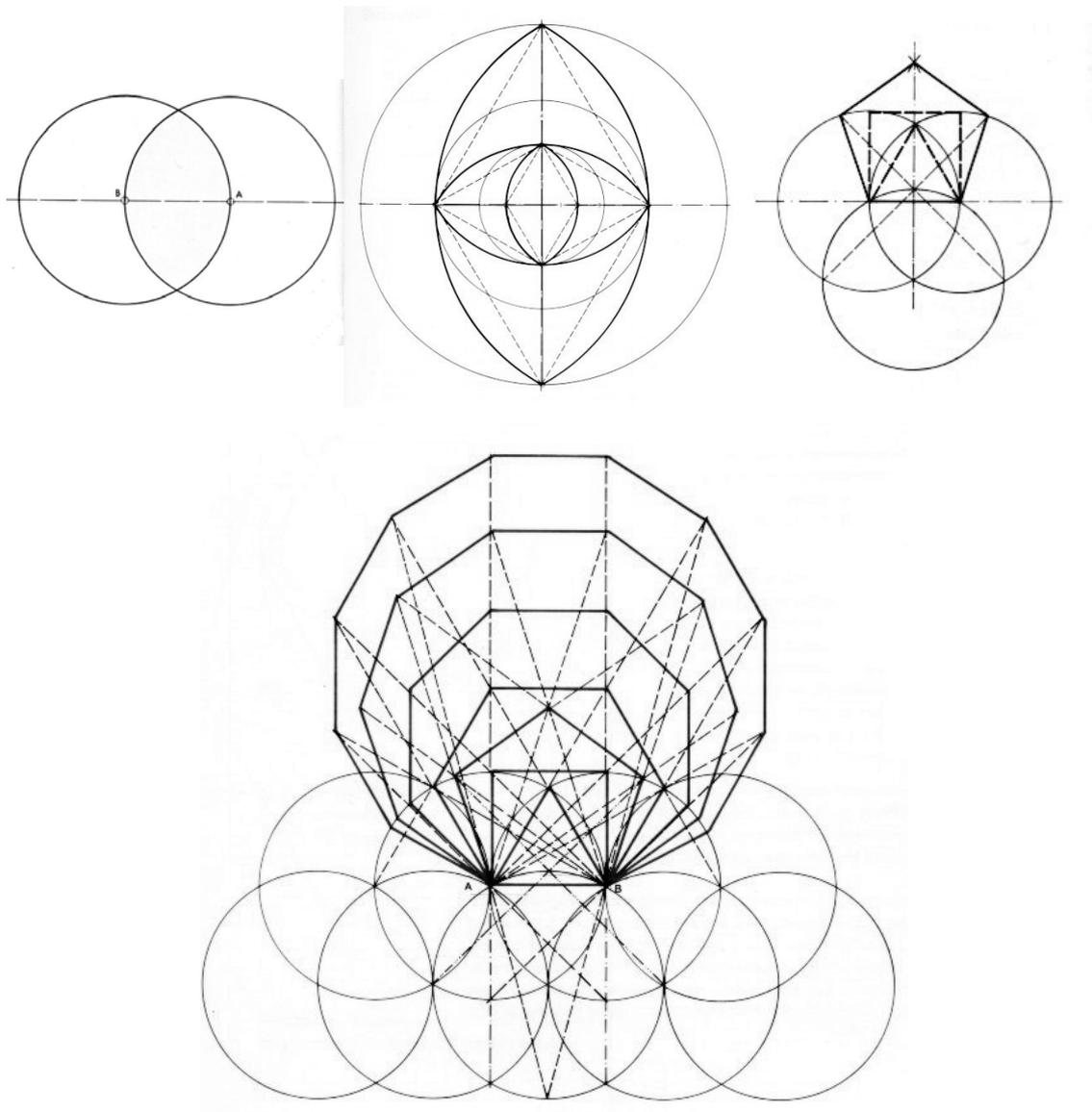


Figura 3-2 – Movimentos do círculo gerando polígonos.

Fonte: LAWLOR (1996).

As entidades geométricas mais utilizadas na construção das formas em geral são polígonos, definidos segundo GHYKA (1953), como:

“O conjunto formado por  $n$  pontos situado em um mesmo plano e ligado por retas que os unem de dois em dois, de tal maneira que nenhuma das retas passe por mais de dois deles, é um polígono completo que tem  $n$  vértices e  $n(n-1)/2$  lados.”

Os polígonos que são inscritíveis em uma circunferência e têm ângulos iguais em seus vértices e seus lados iguais, são chamados regulares. O processo de construir polígonos

regulares circunscritos em um círculo, dado seu raio, sempre foi utilizado para definir relações geométricas nos traçados da composição arquitetônica. Entre os polígonos regulares, o triângulo equilátero, o quadrado, o octógono e com menos frequência o decágono são juntamente com o retângulo os elementos essenciais dos traçados arquitetônicos em todos os tempos.

Investigações a respeito das proporções de monumentos e edifícios históricos, mostram estar fundamentadas na geometria do círculo. As principais figuras regulares a que se recorria para dar proporções e para servir de escala de medidas, eram os polígonos obtidos pela utilização de números diferenciados de eixos tendo como base divisões regulares da circunferência como se mostra na Figura 3-3.

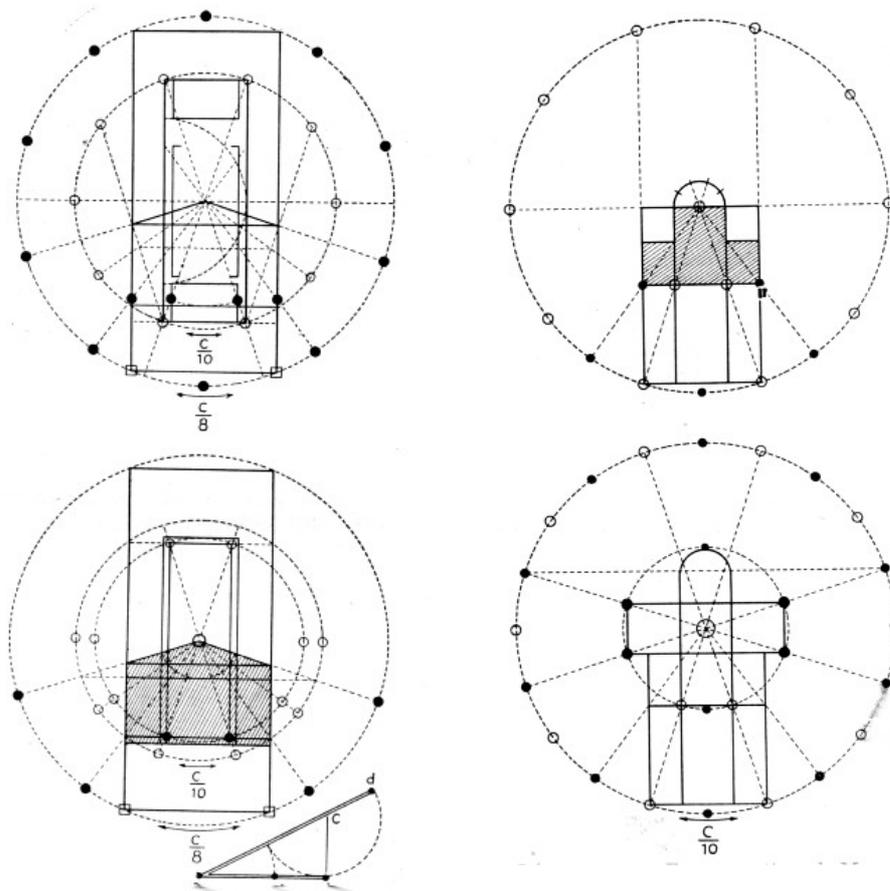


Figura 3-3 – Esquemas geométricos de divisão do círculo em edifícios históricos.

Fonte: GHYKA (1953).

Estas formas constituem ainda os principais sistemas reticulares regulares e semi-regulares que podem preencher um plano, sem deixar espaços vazios (Figura 3-4).

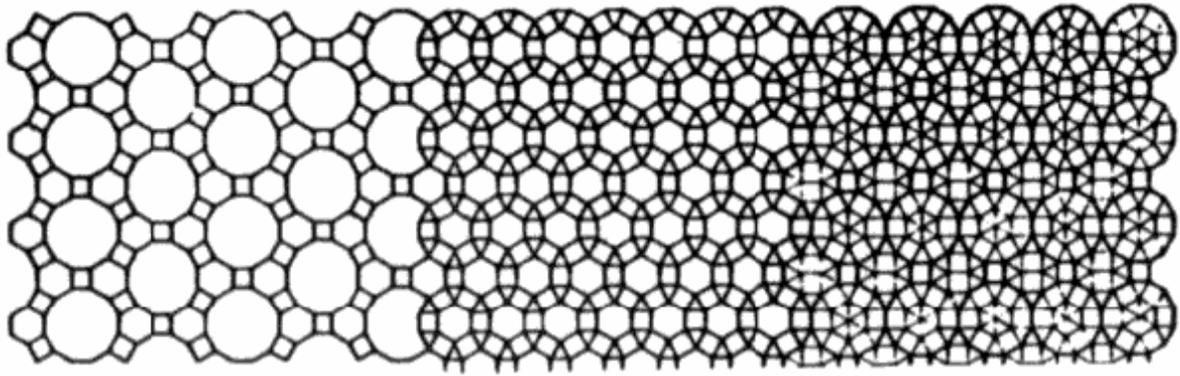


Figura 3-4 – Seqüência de malhas.

Fonte: MUNARI (1968).

### 3.2 Formas do espaço esférico

As principais entidades derivadas das simetrias do círculo, não ocorrem apenas nas organizações bidimensionais, mas também no espaço constituindo simetrias tridimensionais que resultam da equipartição da superfície esférica. As relações geométricas destas entidades tridimensionais podem ser esquematizadas pela geometria do espaço esférico onde a centralidade se torna mais contundente por estabelecer relações tridimensionais em suas proporções. Para elas, ficam transferidas as principais propriedades geométricas da esfera ou seja, menor relação conteúdo/envoltório, maior numero de eixos de simetria e fácil equacionamento construtivo e geométrico. Neste caso, o triângulo equilátero, o quadrado e o pentágono, são os únicos polígonos regulares a constituírem volumes poliédricos cujas faces são todas iguais e constituídas por polígonos regulares, sendo inscritíveis em uma esfera. Segundo BERGAMINI (1964) são eles os denominados sólidos platônicos por terem sido divulgados por Platão, embora já conhecidos anteriormente pelos matemáticos da antiguidade

Os sólidos platônicos são apenas cinco: o tetraedro, com quatro faces triangulares (triângulos equiláteros), o hexaedro ou cubo com seis faces quadrangulares, o octaedro com oito faces triangulares (equiláteros), o dodecaedro com doze faces pentagonais e finalmente o icosaedro com vinte faces constituídas por triângulos equiláteros. Posteriormente, Arquimedes normalizou classes descendentes destes sólidos, dividindo suas arestas em duas e três partes iguais através de truncagens, gerando formas poliédricas com dois ou três tipos de faces e ainda inscritíveis na esfera. Suas faces são constituídas por polígonos regulares, possuindo

entretanto mais de um tipo de face. Estes poliedros foram nomeados Arquimedianos (Figura 3-5 e 3.6).

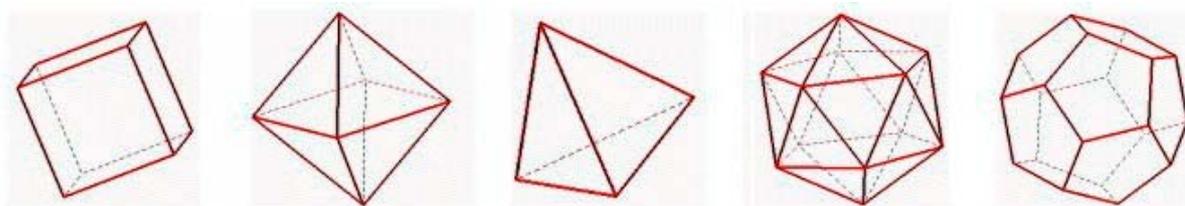


Figura 3-5 – Poliedros platônicos.

Fonte: Incyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables. 2004

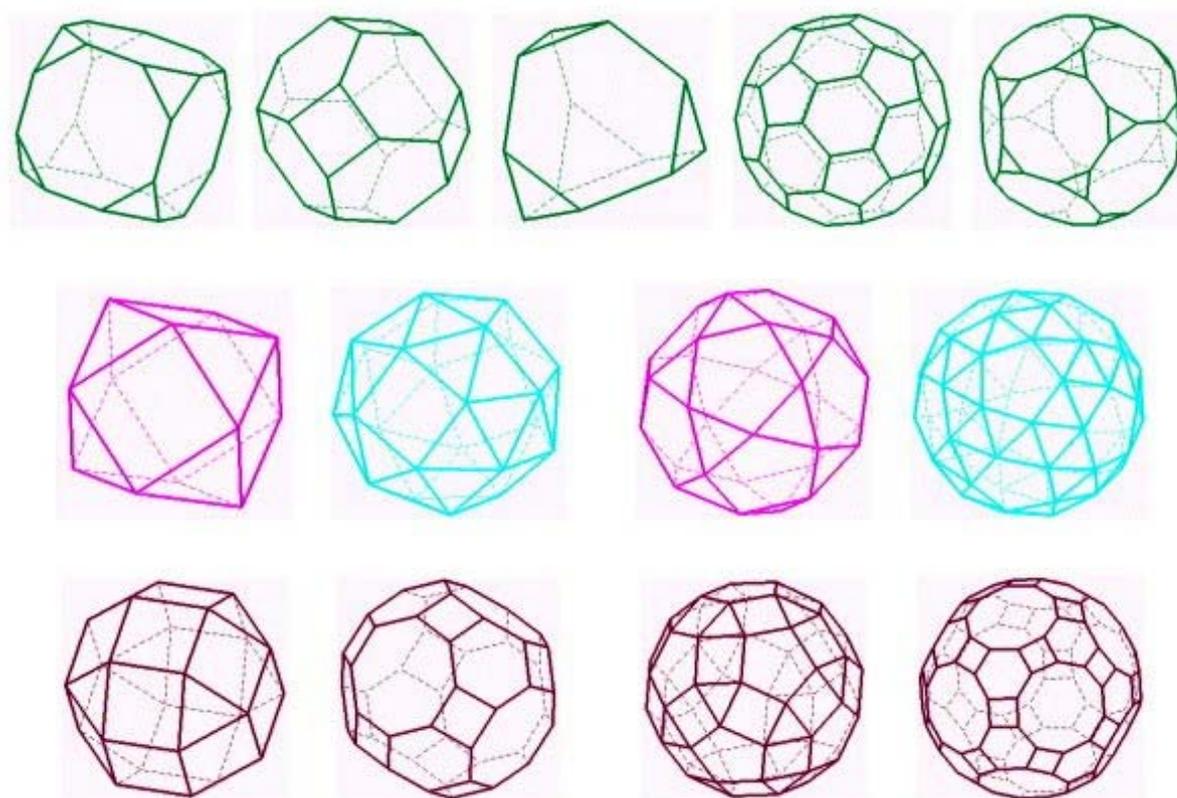


Figura 3-6 – Poliedros arquimedianos.

Fonte: Incyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables. 2004

A parametrização da superfície esférica propõe as mais variadas configurações poliédricas e são largamente utilizadas na concepção de objetos com finalidades técnicas ou artísticas. Aparecem ainda em profusão na simetria das formas naturais (Figura 3-7 e 3.8)

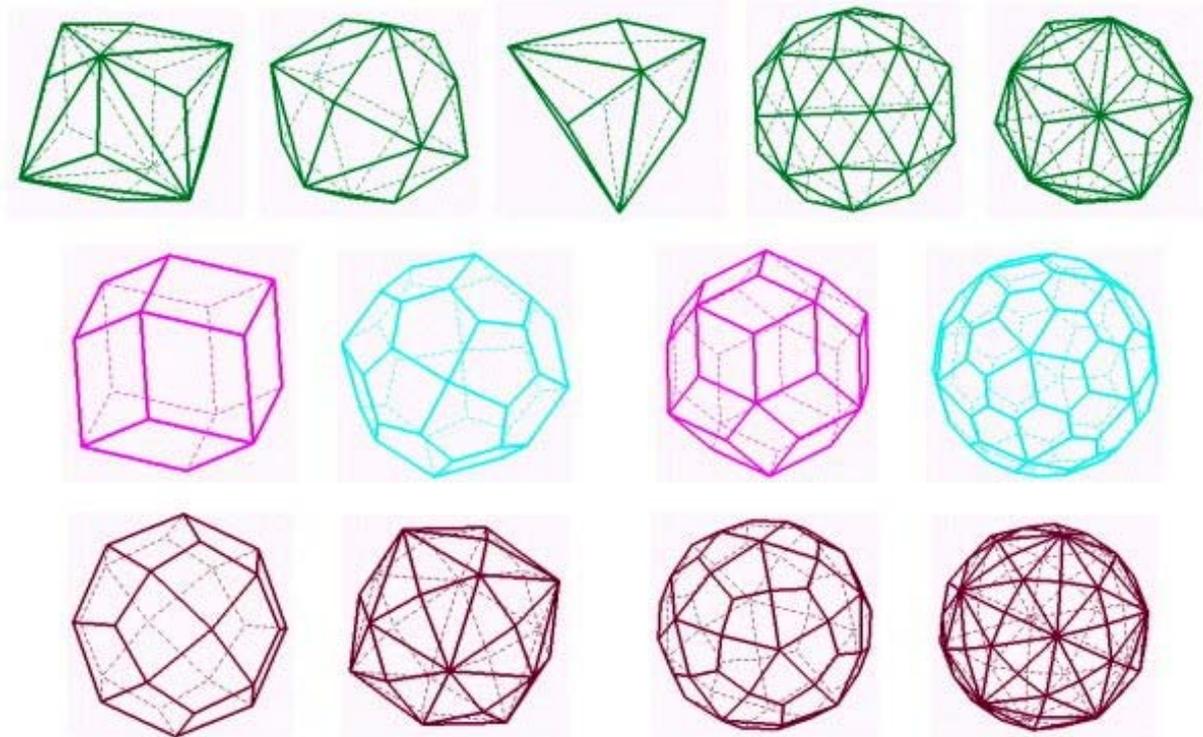


Figura 3-7 – Poliedros diversos.

Fonte: Incyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables. 2004



Figura 3-8 – Formas naturais.

Fonte: NEILL (1993).

Além dos volumes prismáticos em cuja família estão os poliedros, os movimentos do círculo no espaço podem gerar outros volumes curvos tais como o cilindro e o cone em cuja superfície podem ser delineadas as mais diversas linhas e formas. Percorrendo estas superfícies, linhas curvas ou geodésicas podem descrever diversos caminhos que são

equacionados apenas pela geometria diferencial porque analisam as formas através de considerações pontuais e têm no movimento a sua expressão. Segundo BERGAMINI (1964) a compreensão e o equacionamento das linhas curvas, deve-se inicialmente a matemáticos como Apolônio e Arquimedes que conceituaram as curvas cônicas, as espirais, as ovais, etc. (Figura 3-9).



Figura 3-9 – Cone e as curvas cônicas.

Fonte: BERGAMINI (1964).

### 3.3 Primeiros passos em direção ao espaço curvo

É muito importante se destacar a revolução iniciada pelo francês René Descartes em 1616, com uma filosofia inédita tirada da matemática: a geometria analítica. Com o conceito de coordenadas, com o qual lançou sua geometria analítica, Descartes deu a todos os matemáticos de então e da posteridade um meio novo e estimulante de encarar as informações matemáticas. Graças à geometria analítica, toda equação pode ser convertida em figura geométrica e toda figura geométrica em equação. Mostrou, por exemplo que todas as equações do segundo grau, quando traçadas como pontos ligados uns aos outros podem configurar linhas retas, círculos, elipses ou parábolas (Figura 3-10).

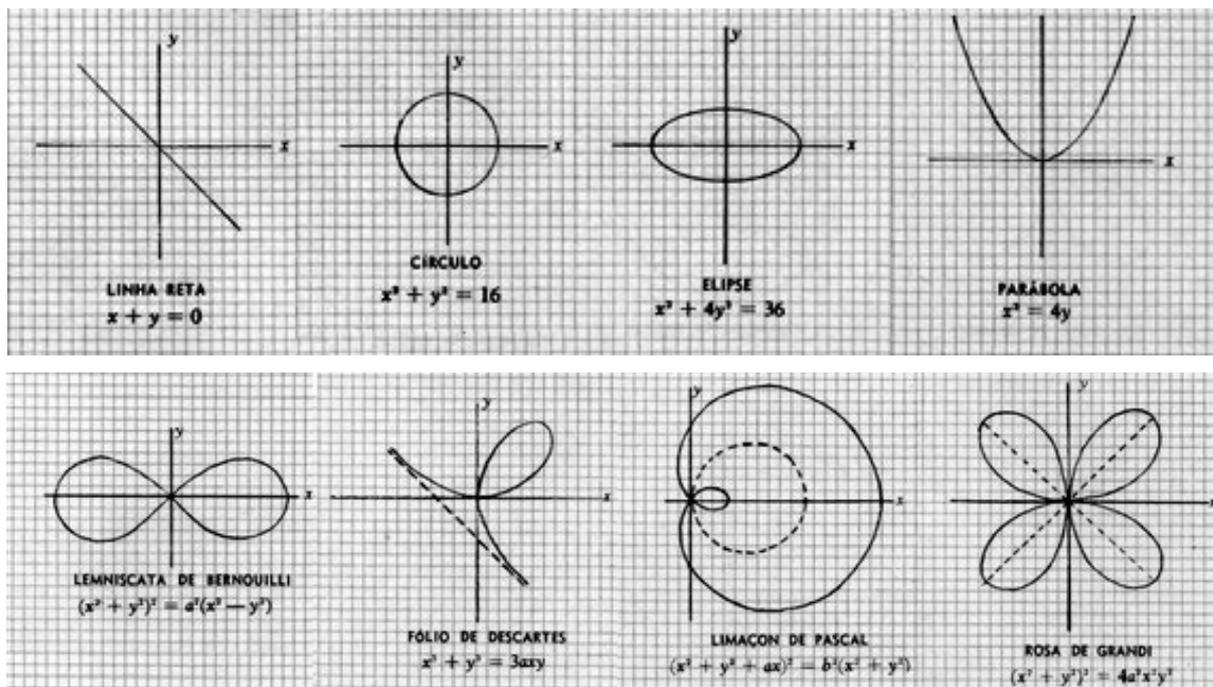


Figura 3-10 – Equações de formas planas.

Fonte: BERGAMINI (1964).

Descartes demonstrou que cada classe de equações revela novo conjunto de curvas. O desenvolvimento do sistema cartesiano permitiu o traçado de curvas logarítmicas tais como  $y = \log x$ , com a mesma facilidade que relações trigonométricas do tipo  $y = \sin x$ . Permitindo que tais equações sejam apresentadas em linhas e pontos visíveis, o gráfico cartesiano na realidade capturou e domesticou as relações variáveis entre quantidades interligadas. Além de lançar a idéia de variáveis e funções e ampliar o escopo dos conhecimentos matemáticos da antiguidade, a contribuição básica do sistema cartesiano para a matemática foi de natureza filosófica. Permitindo grande variação de pontos de vista, deu origem à liberdade matemática atualmente conhecida como “análise”. O geômetra também pode percorrer longos encadeamentos de raciocínio com velocidade surpreendente, apenas manipulando suas figuras geométricas sob a forma de equações.

Para todas as aplicações concretas, cada variação ou movimento da natureza pode ser encarado sob a forma dupla de equação ou curva. Mais importante do que isso, o cientista experimental pode usar gráficos para converter todas as inter-relações e flutuações que mede a natureza em conjunto de números que se representam no papel.

Mas embora o processo de variação seja inevitável e vital para compreender as leis da natureza, é difícil de analisar. Sendo um processo contínuo, não apresenta um ponto fácil no qual o raciocínio possa fixar-se. BERGAMINI (1964) comenta que durante séculos, este fato desconcertou os matemáticos. Foram feitas algumas tentativas para se estabelecer a matemática do movimento. Os gregos assim procederam quando imaginaram as curvas como traçadas por pontos móveis e quando analisaram linhas curvas instante por instante, pela técnica de cortá-las em segmentos infinitesimalmente pequenos. Descartes fez isso, quando concebeu os termos de uma equação como funções entre variáveis e principalmente quando sugeriu um meio de traçar imagens gráficas de situações e relações fluidas. No conjunto porém o mundo da matemática continuava povoado por formas e números que permaneciam absolutamente imóveis.

BERGAMINI (1964) referencia que em 1665 e 1666, Isaac Newton produziu então uma elucubração maravilhosa atualmente denominada cálculo, que pela primeira vez permitiu aos matemáticos a análise dos movimentos e mudanças. Combinou a técnica dos gregos, com o sistema de gráficos de Descartes, a fim de chegar aos infinitésimos. O cálculo mostrou tão rapidamente a sua eficácia, que ao fim de poucos anos seu criador o utilizava para elaborar as leis dos movimentos e da gravitação. O conceito fundamental do cálculo é a “convergência para um limite”, com a idéia de que um valor desconhecido pode ser medido por aproximações que se tornam cada vez menores, até atingirem um valor satisfatoriamente “preciso”. Na. Figura 3-11 mostram-se as imagens cada vez menores do menino refletidas no espelho que se repetem seguidamente até o infinito mas jamais se reduzem a um ponto. Este conceito de convergência é usado no cálculo, para atribuir valores definidos a quantidades imensuráveis



Figura 3-11 – Menino com espelhos.

Fonte: BERGAMINI (1964).

Com as novas teorias da geometria diferencial, surgem novos caminhos para a análise e o conhecimento das curvas. Segundo CONSIGLIERI (1994), inicialmente, as deformações da matéria foram estudadas pelo matemático William Clifford, e são a base para definição das novas características dos espaços e das formas. Dentro deste enfoque pode-se afirmar que tanto o espaço como as formas estão em um contínuo movimento e sujeitos às leis gerais de uma nova leitura geométrica: o conceito nomeado “deformação”. Clifford relacionou estas deformações com processos de representação cartográficos, onde se usa como processo de representação as curvas de nível. Hoje este processo é aplicado nos desenhos de automóveis.

Vistas como um atributo do espaço e das formas as deformações foram estudadas também por Hooke que as definiu como um ato relativo à carga ou esforço que se imprime à matéria. Um século mais tarde, o físico Young as relacionou com os conceitos de elasticidade dos materiais a que chamou “Módulo de Young”. A partir destas noções foi equacionada uma nova maneira de idealizar a geometria das formas: a topologia, que se tornou bastante útil para uma nova lógica arquitetônica. CONSIGLIERI (1994) comenta:

“Kandinsky considerava que no universo formal, as curvas se delineiam com movimentos ligados à linguagem da empatia e constituem parte desta ciência e que no espaço pode ser percebida como uma linha reta, um percurso lógico. As qualidades da linha curva correspondem pois à expressividade do modelado, dirigindo-se para a esquerda ou direita, na horizontal ou vertical e seguindo os impulsos de sua própria espessura. O espaço curvo é determinado então pela flexão da matéria e delimitado pelas curvas e as suas direções, que conduzem as forças de compressão, determinando a elegância da superfície. Este equilíbrio dinâmico é dado pelo equilíbrio natural das forças atuantes, que se movimentam segundo linhas funiculares ou catenárias. As tensões provocadas pelo peso próprio são absorvidas pela massa, ou seja, pela própria matéria cujas formas se apresentam contínuas.”

Assim, para a topologia a superfície pode não ser plana nem conter uma linha reta: procura sim, linhas e superfícies contínuas, liga os espaços exteriores aos interiores nem sempre definindo os seus limites. São também superfícies de membranas ou teias, todas elas em tensão. Não se relacionam com as volumetrias de equilíbrio isostático, mas sim revelam os movimentos. As cargas geradas pelos seus pesos. conduzem os esforços através das superfícies ou arestas encurvadas e dinâmicas.

O equacionamento das curvas tridimensionais e superfícies não planas tornou-se possível através da geometria diferencial e têm sido objeto de estudos há mais de 200 anos, entretanto seu uso para a representação e produção das formas em arquitetura tem acontecido apenas recentemente, pelo gradativo acesso dos arquitetos como criadores e dos engenheiros e a indústria da construção, aos programas de informática. Apesar das dificuldades decorrentes do seu caráter expressivo e liberto, projetar formas curvas pode levar ao encontro dos princípios que regem as formas vivas: a economia de material pela conformação segundo o movimento natural das cargas. Torna-se necessário entretanto, maiores esforços para o equacionamento e produção dos seus componentes que passam e ter maior diversidade de

formas ou tamanhos quebrando os preceitos tão decantados e rigorosos da construção industrializada.

Esta evolução da linguagem da arquitetura certamente influencia os processos de produção uma vez que os objetos modernos são produzidos em série, por máquinas, todos iguais. Segundo ORCIUOLI (2004):

“A substituição do artesanato pela indústria padronizou as formas que antes, por razões técnicas não poderiam ser idênticas. Em termos de economia moderna, um objeto só é viável se produzido em escala industrial. Com o advento da informática, assistimos a uma superação desta lógica reducionista. As novas tecnologias e os processos de manufatura dentro de entornos digitais estão fazendo surgir uma nova indústria, em que a estandardização deixa de ter tanta relevância”

Entretanto, mesmo os sistemas digitais são equacionados por rigorosos princípios de ordenação geométricos. Apenas a rapidez do equacionamento das idéias propostas torna-se maior. Além das idéias, são os números que fundamentam a construção das diversas formas. Percorrendo os caminhos da estruturação do pensamento humano através dos números, pode-se observar um paralelo nessa lógica cognitiva.

### **3.4 A influência da mimesis na concepção arquitetônica**

Nessa seção, trata-se da mimesis e sua influência na concepção das formas criadas pelo homem nas artes e principalmente na arquitetura. Fundamenta-se nas tipologias diferenciadas das formas naturais e sua transposição para a linguagem arquitetônica. Apresenta o trabalho de observadores da natureza, seu trabalho de documentação e equacionamento das diversas tipologias existentes e muitas vezes da sua própria geometrização.

Ao contrário das outras artes contemporâneas que em geral ainda não conquistaram a aceitação do homem contemporâneo, a arquitetura moderna conseguiu plenamente a aceitação do homem comum que vê nela a materialização de seus anseios de progresso e a imagem de um futuro compreensível. Atingiu, portanto a situação de veículo para a expressão dos valores mais importantes da civilização ocidental e deixou de ter características de arte contestatória

das quais estava imbuído nos seus primórdios durante a chamada “fase heróica”. Dois aspectos apontam para uma relação positiva com a sociedade que lhe dá origem: sua oficialização e sua popularização. Nada semelhante à aceitação da arquitetura se deu com as outras artes modernas. Qualquer reconhecimento que porventura tenham recebido se deve acima de tudo, aos esforços de uma elite intelectual interessada, e não uma resposta espontânea como no caso da arquitetura. Das muitas razões que podem ser arroladas para justificar essa discrepância, interessa particularmente abordar uma, que está talvez no âmago da questão e que é muito pouco estudada com referência à arquitetura. Trata-se da mimesis.

Nas artes a mimesis ou imitação da natureza dispõe de uma vasta bibliografia. Na arquitetura discute-se a possibilidade de sua existência, e poucos autores tratam do assunto. O fato de ser conceituada como uma atividade técnica, com a finalidade utilitária de abrigar o homem e suas atividades não esgota o que ela encerra, mas ao contrário, é o início daquilo que vem a ser o seu verdadeiro sentido. A arquitetura teve exatamente a sua utilidade sublinhada e expandida: a funcionalidade passou a ser a força moral que distingue uma obra moderna boa de uma ruim. É sobre a funcionalidade - construtiva, técnica, operacional, social, psicológica, que repousam os fundamentos da revolução da arquitetura moderna. Teoricamente é em seu nome que se deu esse corte conceitual e prático que foi certamente um dos mais drásticos de toda a história da arquitetura.

O primeiro sinal dessa revolução foi o implacável combate à ornamentação naturalista que caracterizava, nas suas mais diversas formas, a arquitetura do passado. Neste ponto, então, existe uma concordância da arquitetura com as outras artes. Também aqui se deu um rompimento com a mimesis tal como definida por Platão, figurativa, ornamental, só que a arquitetura teria sido salva da derrocada em virtude de sua natureza ambígua, apelando para a ênfase de seu aspecto técnico. Mas o naturalismo puro e simples não é a única forma da mimesis. Além dele existem mais duas formas de imitação que, junto com o naturalismo, dão origem a três aspectos miméticos. São elas as de Aristóteles para quem a mimesis é a representação da essência das coisas e a de Demócrito, que a define como sendo a representação dos atos da natureza. A mimesis pode, portanto, ser: naturalista, tipológica ou estrutural.

Os animais constroem seus ninhos por instinto. Cada espécie segue um padrão predeterminado, buscando apenas uma situação favorável. O homem, instintivamente, procura

ou constrói um abrigo, mas não se pode dizer que exista uma forma que lhe seja mais adequada ou propícia que outras. Dependendo da ocasião ele escolhe a que mais lhe convém, e sua escolha é ditada por um sem número de fatores: pelo terreno, pela matéria-prima disponível, pelas condições climáticas, etc. O homem primitivo observou os ninhos de certas aves, a configuração de certas plantas, e os usou como modelos naturais na construção de seus primeiros abrigos que foram, portanto, resultado de uma qualidade essencialmente humana: a capacidade de observar e de racionalizar o que está sendo observado, transferindo sua utilidade para outro contexto. (Figura 3-12 e Figura 3-13).

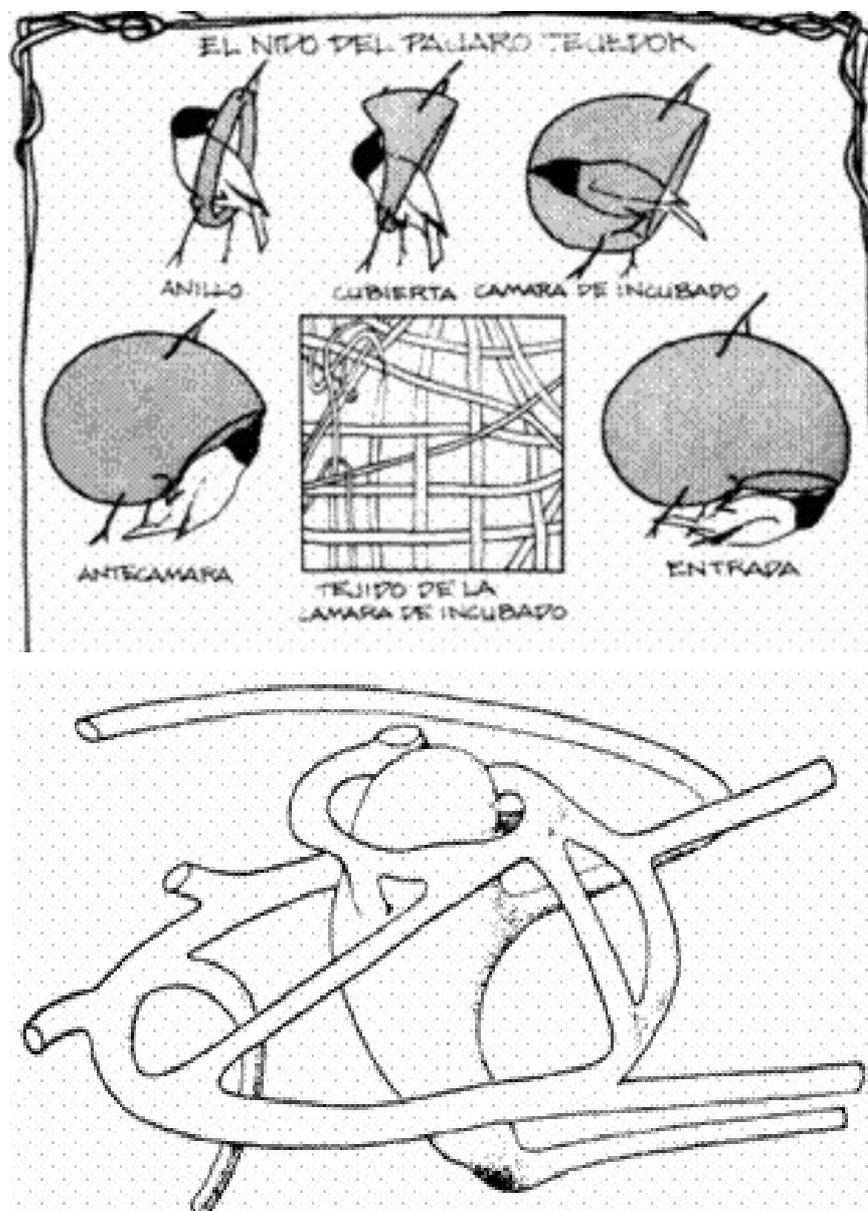


Figura 3-12 – Ninhos de animais / tocas.

onte: GALIANO (1979).



Figura 3-13 – Oca com galhos.

Fonte: GALIANO (1979).

Mas a obra resultante dessa apropriação não assumia apenas o seu caráter utilitário, técnico, vazio de conteúdo simbólico. Um dos recursos para dotá-la de sentido terá sido, certamente, a arte, que remediava a pobreza da construção. Surgiu, assim, a ornamentação (Figura 3-14). Mas esse enfeitamento da construção na escala da ornamentação era, por si só, insuficiente para expressar as elaboradas teorias científicas sobre o cosmos que o homem queria presentes de uma forma mais intrínseca em suas construções. Para isto precisou emprestar um novo sentido à composição do prédio como um todo, segundo CZAJKOWSKI (1984):

“Os egípcios concebiam a terra como um grande plano cujo teto era sustentado nos quatro cantos por quatro imensos pilares. O templo egípcio era uma recriação desta imagem: o piso representava o solo; as colunas, os pilares aludidos; e o teto, o céu. Cada um desses elementos era decorado apropriadamente. Os que estavam mais próximos do piso recebiam uma ornamentação vegetal, como as bases das colunas, que eram esculpidas como se estivessem envolvidas por folhas, e a faixa mais baixa das paredes, adornada com caules de lótus ou papiro, entre os quais era comumente representada a fauna local. O teto era pintado de azul e semeado de estrelas amarelas. Os sucessivos enclaves e espaços do templo tinham a forma retangular e seu tamanho decrescia na razão direta de sua proximidade ao santuário. O acesso a

esses espaços sucessivos também era facultado segundo a proximidade social do indivíduo ao deus. A axialidade, a ortogonalidade, da construção refletia a situação geográfica do Egito, atravessado de sul a norte pelo Nilo e de leste a oeste pelo sol. O templo era dividido pelo caminho processional em duas partes, como o mundo o era pelo percurso do sol.”



Figura 3-14 – Ornamentação de arquitetura africana.

Fonte: MARCHAND (1995).

Esse tipo de simbologia, essa manifestação da tessitura do universo, se faz presente com grande frequência na arquitetura. Assim, da relativamente simples transposição descrita acima, onde cada parte do prédio se justifica através de sua correspondência a um elemento cósmico, foi possível passar as correspondências mais abstratas, buscando fazer com que a harmonia que supostamente preside a todos os aspectos do universo se faça também presente na arquitetura. O primeiro passo nessa direção foi o de usar proporções observadas na natureza, como as que existem entre os membros do corpo humano (Figura 3-15).

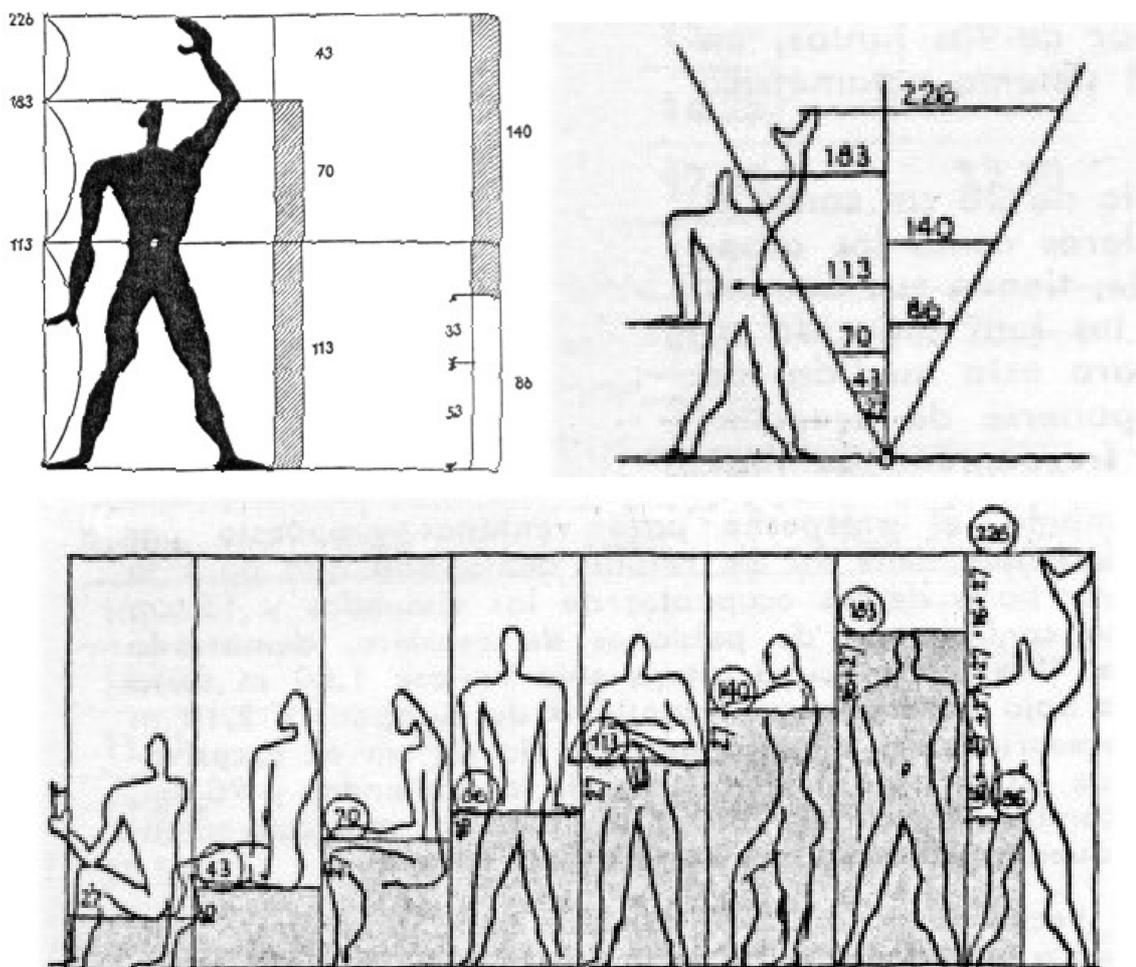


Figura 3-15 – Proporções do corpo humano.

Fonte: NEUFERT (1977).

O dimensionamento dos elementos da construção de acordo com essas proporções fazia com que a obra se inscrevesse no sistema harmônico universal. E a razão desse proporcionamento, permitia que se falasse do caráter de um determinado estilo: da virilidade do dórico, onde o diâmetro da base da coluna corresponde a  $1/6$  de sua altura, relação que, segundo Vitruvius, foi inspirada na proporção entre o pé e a altura de um guerreiro grego, ou da feminilidade do jônico, e assim por diante. O uso de regras de proporções, que evoluiu para o de traçados reguladores, foi decorrência de uma necessidade crescente de controlar o imponderável e de garantir, pela racionalidade, a propriedade da obra. É o mesmo sentimento que presidiu ao surgimento da ornamentação, mas cada vez mais sofisticado.

Que estas considerações não só passaram pela cabeça dos filósofos mas se fizeram presentes na arquitetura – de forma mais ou menos esotérica, dependendo da época e da

cultura – provam os numerosos estudos sobre o assunto. Na Figura 3-16, apresenta-se o esquema geométrico do Pequeno templo de Minerva Médica e o Panteon de Roma.

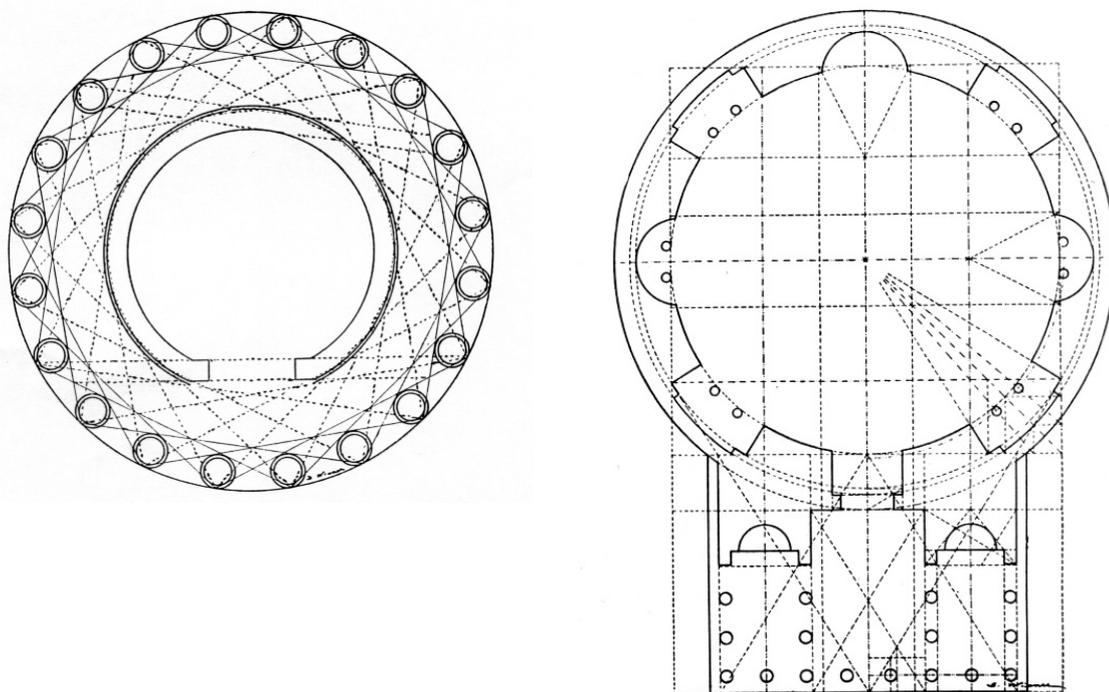


Figura 3-16 – Sistemas de proporções de algumas obras de arquitetura.

Fonte: GHYKA (1953).

Basicamente a arquitetura moderna condena a imitação naturalista, ao condenar a ornamentação, e apóia as duas outras tradições miméticas: a estrutural, pela geometrização, e a aristotélica, pela tipologização.

Le Corbusier dedicou quase toda a sua vida prática ao estabelecimento de cânones que conduzissem o arquiteto a bom termo através dos perigos da irracionalidade. Para tanto inventou um sistema de proporções baseado no segmento áureo e no corpo humano, e tentou fazer de cada projeto seu um modelo tipológico definitivo – quase biológico – para a função considerada. E isto não só do ponto de vista do funcionamento da obra, mas também do ponto de vista construtivo e estrutural – técnico, portanto.

Delineados os caminhos da mimesis através da arquitetura, parece que seria útil elaborar um pouco mais essa relação, enfatizando os elementos construtivos da obra arquitetônica que são relevantes a esta discussão: seu aspecto técnico ou construtivo, sua composição e sua ornamentação. Aparentemente existe uma relação preferencial entre cada

um desses três elementos e as três possibilidades miméticas. A mimesis naturalista se expressa através da ornamentação, a tipológica na construção e a estrutural na composição. Exemplificando a conjunção equilibrada desses fatores pode-se citar o classicismo, tradição arquitetônica greco-romana. É no classicismo, e daí sua importância continuada, que a mimesis é mais legível em suas três naturezas.

Construtivamente o Classicismo tem um sistema visual fácil de compreender, com cada elemento expressando sua função tectônica. De sua derivação formal da construção em madeira, conserva daquela técnica a clareza estrutural aditiva (ao contrário, por exemplo, da construção em adobe, muito mais plástica e monolítica). Compositivamente, o Classicismo apresenta uma harmonia óbvia, um proporcionamento e uma relação entre partes que é agradável à razão. Ornamentalmente, tem quantidade suficiente de motivos naturalistas para amaciar a racionalidade dos outros dois aspectos. É por esta característica que o classicismo se presta excepcionalmente bem como referencial para o estudo da mimesis na arquitetura (Figura 3-17)

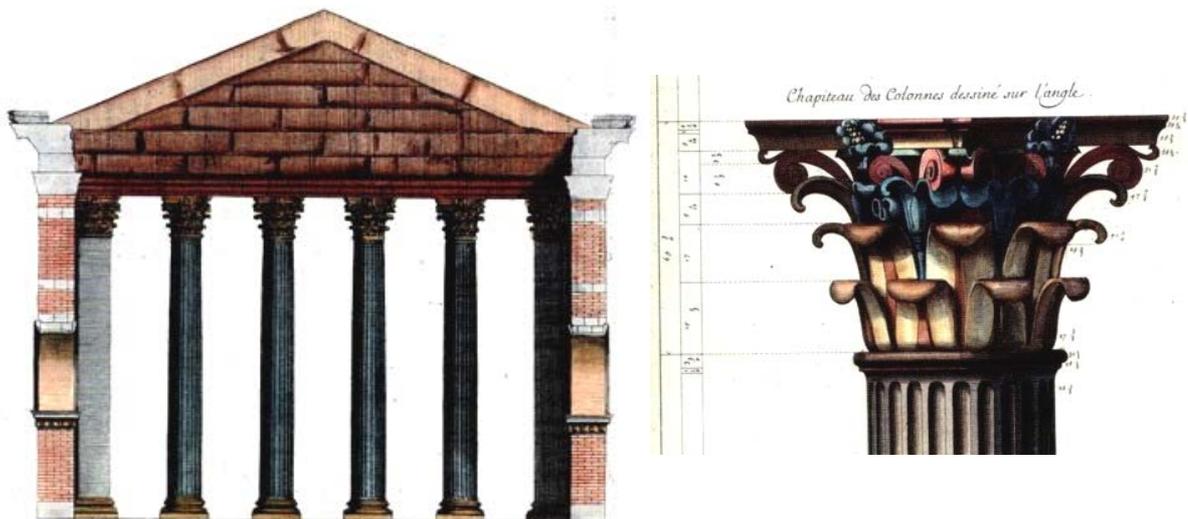


Figura 3-17 – Elementos da arquitetura clássica.

Fonte: BROCKHAUS, (1957).

Diferentemente dos gregos, os romanos desenvolveram construções baseadas nas formas curvas. Conduziram as cargas através de arcos e o teto conformava-se segundo cúpulas e abóbadas. O sistema construtivo baseava-se na justaposição de pequenos elementos que são os tijolos, utilizando elementos de agregação entre as partes para que funcionassem como um único bloco ou forma. O aperfeiçoamento destes elementos de agregação, conduziu

à criação do cimento e conseqüentemente do concreto. Com sua plasticidade, o concreto permitiu o aperfeiçoamento construtivo e a utilização de vãos cada vez mais ousados. Entretanto, a ornamentação das construções romanas é da ordem geométrica, visando um melhor desempenho dos elementos construtivos, ou seja, a marcação de arestas ou linhas de definição dos volumes assim como reentrâncias ou relevos foram utilizados como maneira de criar enrijecimento da própria forma e como ornamentação, visando portanto uma dupla finalidade. Na Figura 3-18, vê-se o interior do Panteão em Roma e pode-se observar linhas geodésicas definindo elementos estruturais da construção.

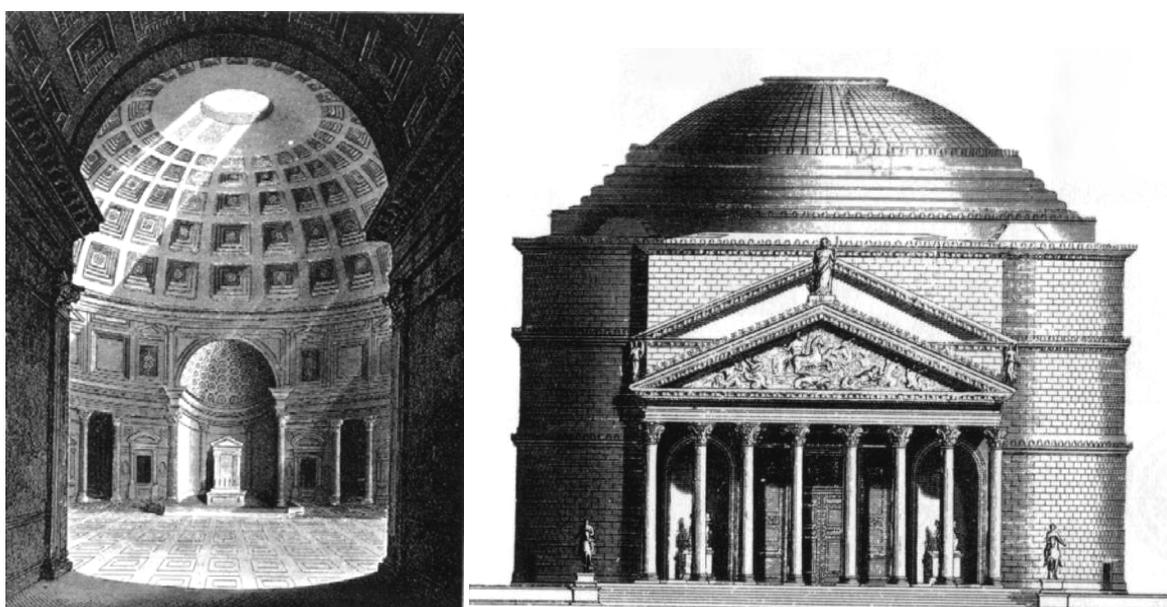


Figura 3-18 – Panteão: interior.

Fonte: BROCKHAUS, (1957).

Na arquitetura islâmica, os arcos são ogivais, os domos em bulbo e as paredes ornamentadas com entalhes, pinturas, incrustações ou mosaicos. Como a arte figurativa não é permitida no Islã, os edifícios são ornamentados com motivos geométricos, caligráficos e vegetais. Mesmo elementos com origens naturalistas, como folhas, são estilizados até tornarem-se irreconhecíveis. (Figura 3-19 e Figura 3-20).



Figura 3-19 – Entalhes Índia e motivos caligráficos.

Fonte: GLANCEY (2001).

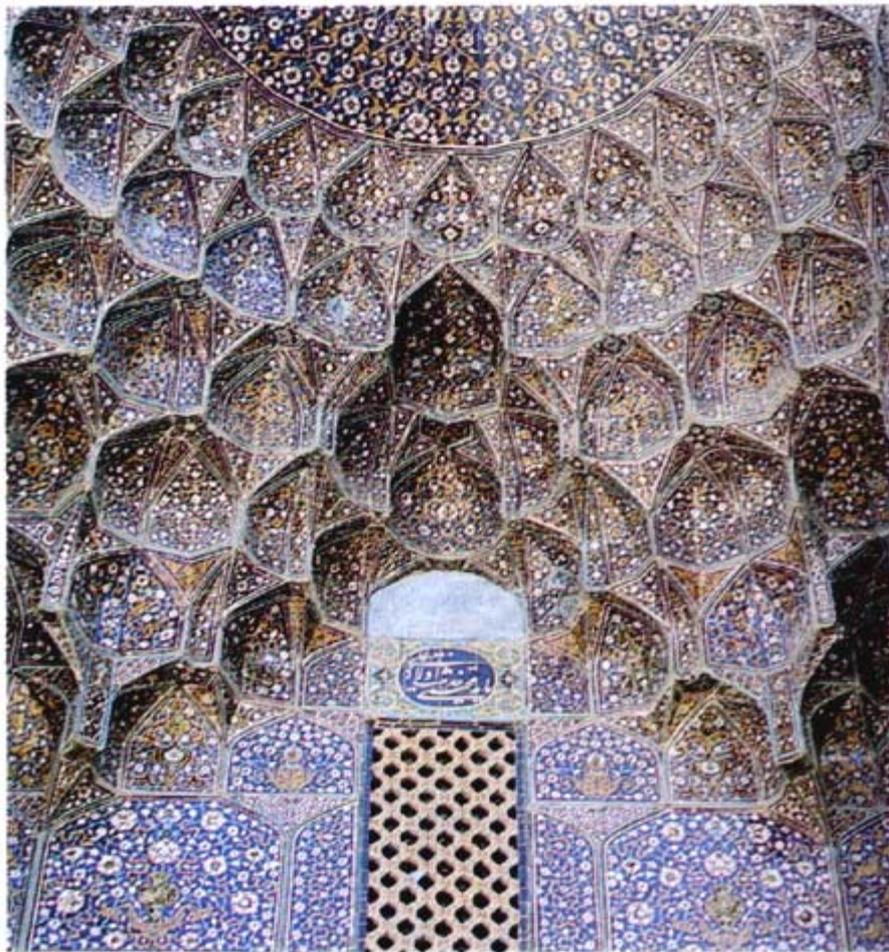


Figura 3-20 – Teto de Estalactites, Masjed-D Eman, Isfahan, Irã.

Fonte: GLANCEY (2001).

Estes ornamentos, desenvolvidos através de séculos, constituem um acervo de padrões geométricos onde estão contidas informações preciosas da geometria plana e espacial e pode-

se vislumbrar o equacionamento de curvas e superfícies de todas as classes geométricas. Presente nas formas, em todos os níveis de mimetismo a geometria mais que nunca se faz presente nas construções orientais. Sua mensagem parece lembrar que a geometria pertence ao âmbito da compreensão que o homem tem do mundo, enquanto a própria natureza é da ordem Divina. Através da geometria, o ser humano é conduzido à abstração.

Desta maneira, pode-se estabelecer gradações progressivas entre as representações naturalistas e tipológicas, e entre tipológicas e estruturais. Em épocas diferenciadas, a concepção das formas em arquitetura partiu muitas vezes de esquemas geométricos altamente complexos como nas formas da arquitetura barroca ou de Gaudí. Na arquitetura industrializada também peças estruturais assumem um caráter ornamental através de sistemas de enrijecimento de suas ligações ou pontos de apoio, sobrepondo assim recursos ornamentais com ações do âmbito do sistema construtivo ou do caráter estrutural (Figura 3-21).

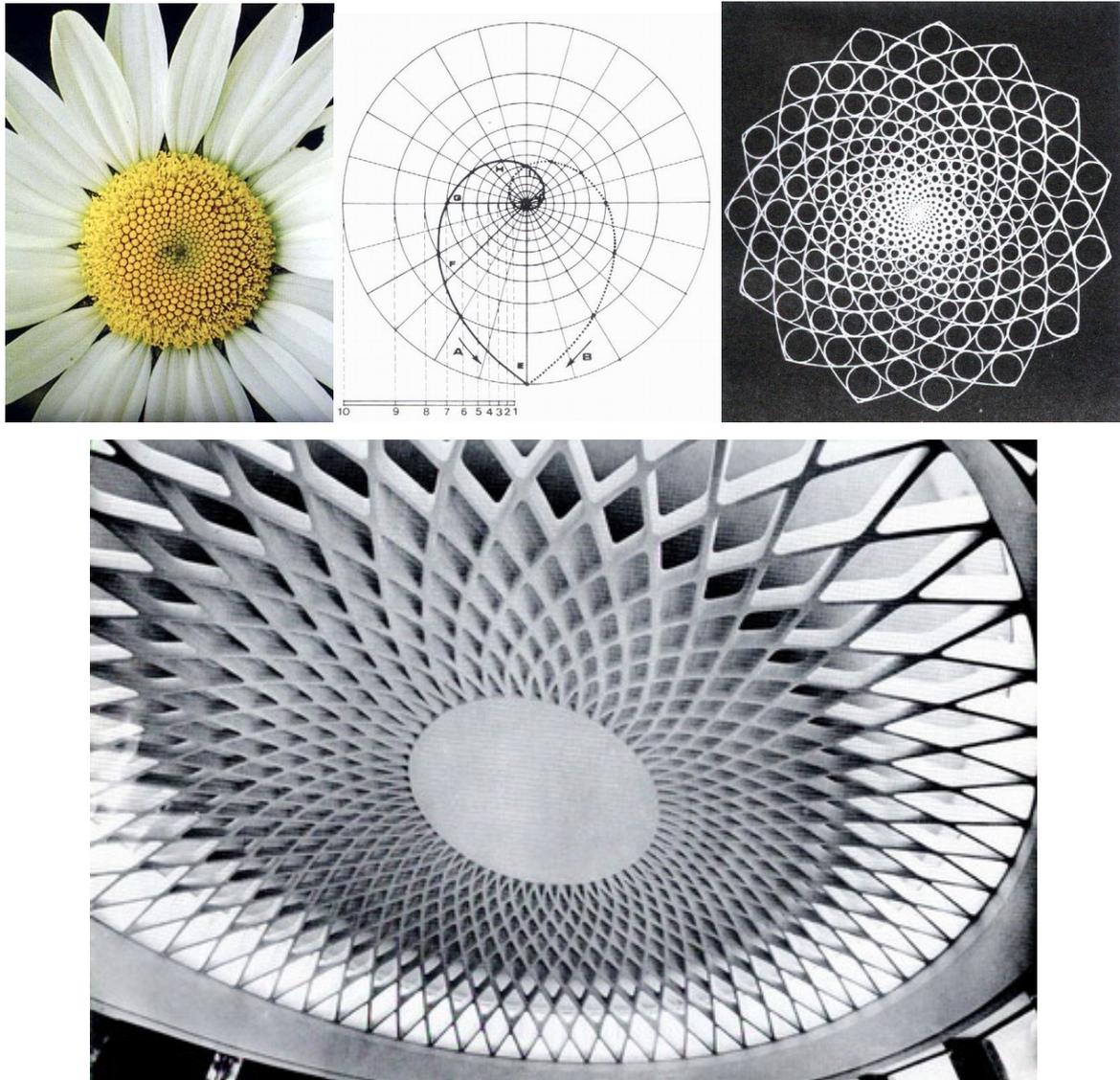


Figura 3-21 – Esquemas geométricos naturais.

Fotografia. Fonte: NEILL (1993). Esquemas. Fonte: DOCZI (1990).

Teto do Hall da Casa de Banhos em Chiacciano. Fonte: HUXTABLE (1960).

Contemporaneamente, depois do caráter redutor formal proposto pela racionalização das construções e o conseqüente despojamento devido à adoção dos volumes prismáticos ou básicos na plástica formal, esta mesma tecnologia vem proporcionar o retorno progressivo a ações conciliatórias da expressividade construtiva. O ornamento pode retornar revestido dos atributos da funcionalidade, participando como componente construtivo e o comportamento estrutural deixa de ser flexional para assumir cada vez mais o verdadeiro sentido de resposta à condução direta dos esforços, respondendo objetivamente através da forma ao encaminhamento das cargas através da sua superfície ou por atalhos equacionados por sucessivas diagonais (Figura 3-22 e Figura 3-23)

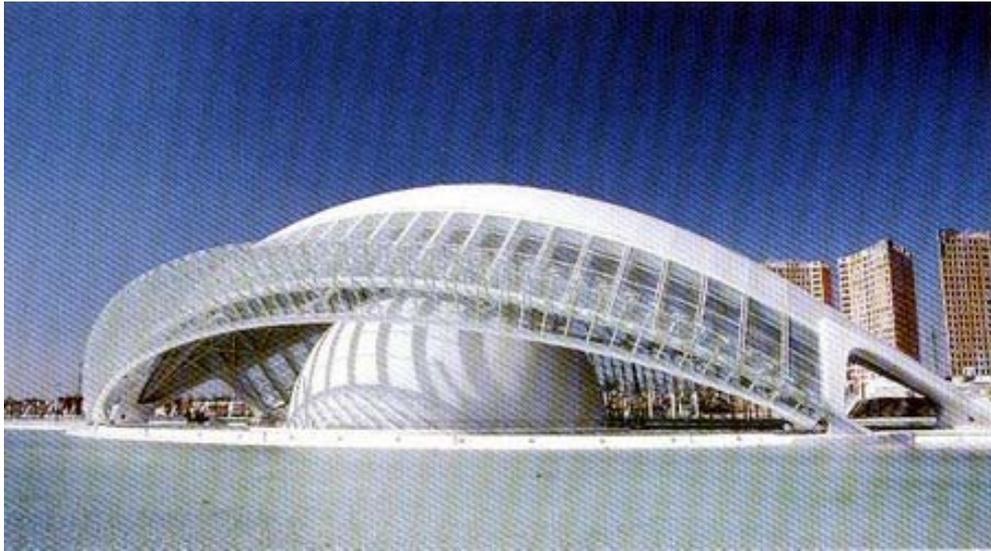
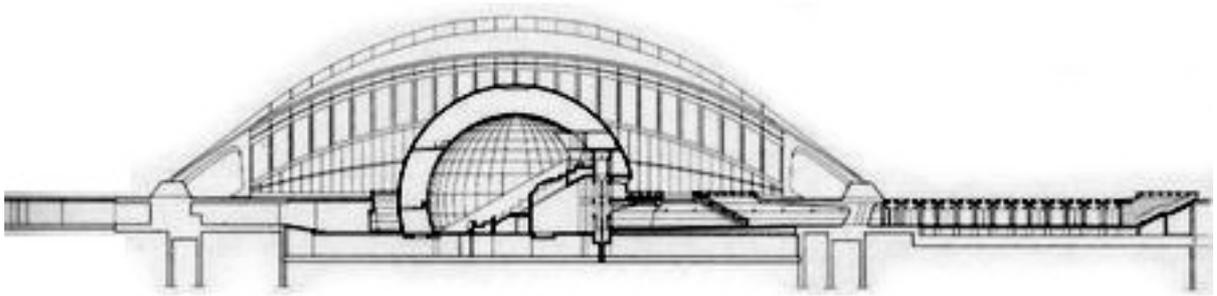


Figura 3-22 – Olho do Santiago Calatrava.

Fonte: TZONIS (1999).

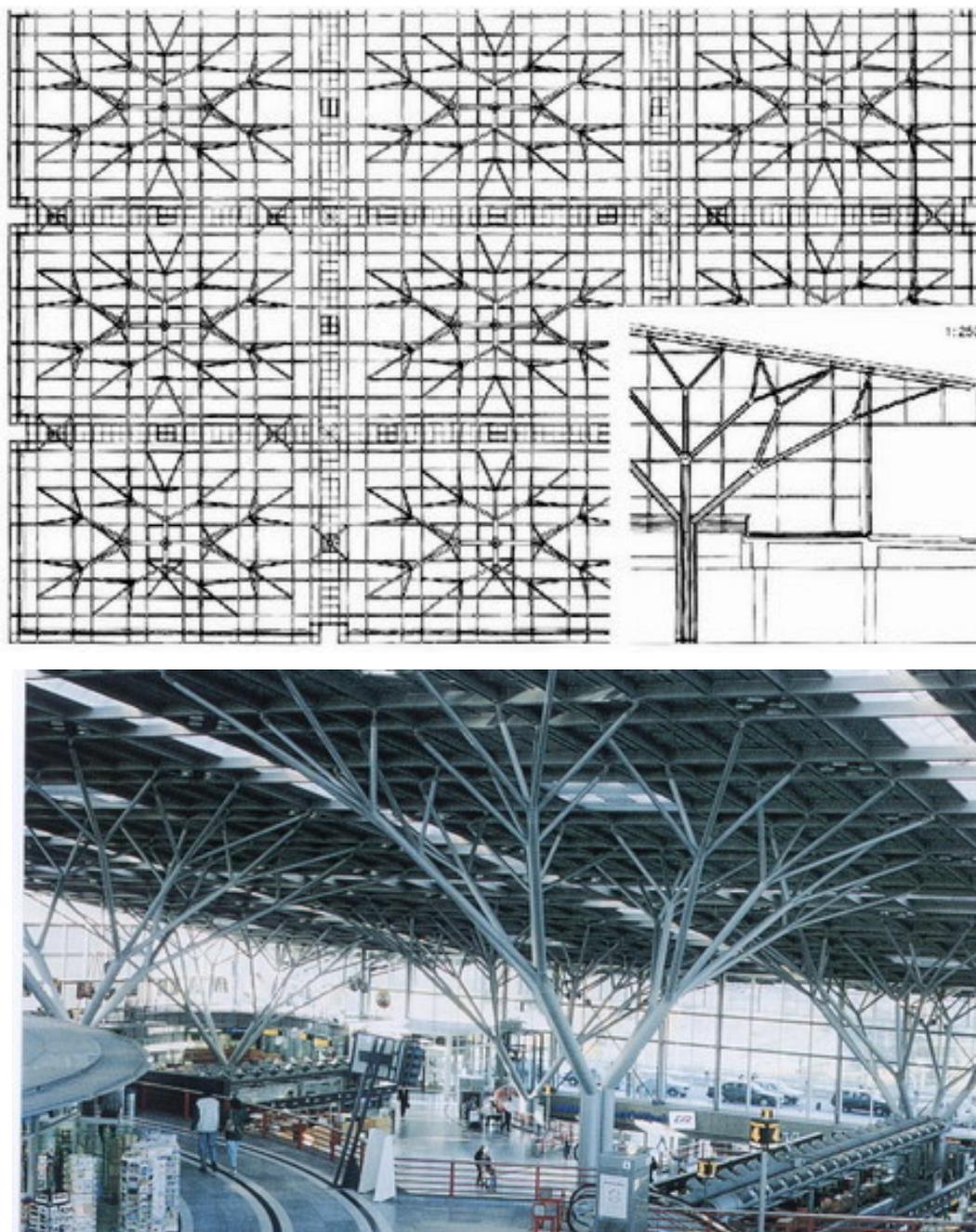


Figura 3-23 – Aeroporto de Stutgard.

Fonte: MEYER (2000).

### 3.5 O número como gerador de formas

Paralelamente à estruturação dos conceitos de número estão conseqüentemente as formas e suas proporções. Cada classe numérica se ordenou em famílias e pode gerar seus objetos próprios. Os inteiros puderam ser ordenados em pares, ímpares, primos e em classes múltiplas de três, cinco ou dez.

Ao reunir objetos que apresentavam um caráter comum, uma semelhança que convidava a reuni-los, o homem atribuiu valores numéricos a esses conjuntos. Ao dispor elementos em conjuntos o faziam de forma ordenada e regular quer fosse em linha reta, ou em conjuntos simples como os das faces de um dado, para serem mais fáceis de reconhecer. Nasceu assim a relação entre os números e as formas. Os números figurados ou números poligonais (triangulares, quadrangulares, pentagonais, etc.), podem ser construídos por um procedimento análogo ao representado na Figura 3-24.

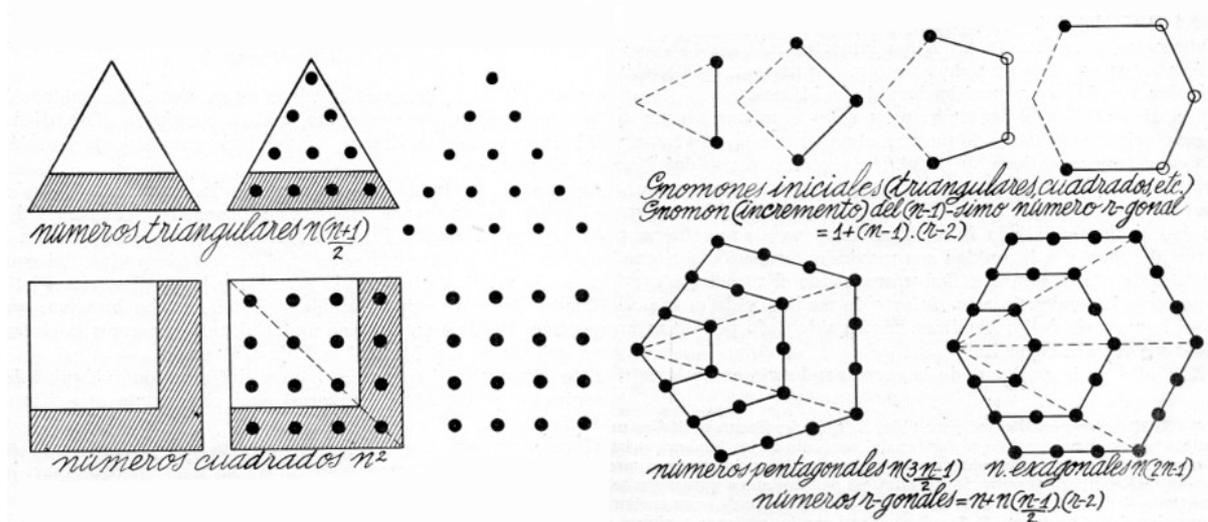


Figura 3-24 – Números poligonais figurados.

Fonte: GHYKA (1953).

Partindo do conjunto numérico constituído pelos números naturais pode-se escrever os seguintes agrupamentos:

- Números naturais: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, n
- Números triangulares: 1, 3, 6, 10, 15, 21  $n(n+1)/2$
- Números quadrangulares: 1, 4, 9, 16, 25, 36  $n^2$
- Números pentagonais: 1, 5, 12, 22, 35, 51  $n(3n-1)/2$
- Números hexagonais: 1, 6, 15, 28, 45, 66  $n(2n-1)$
- Números r-gonais  $n+n(n-1)(r-2)/2$

Mas é através de relações proporcionais que os números definem mais claramente as formas. Na geometria plana estão normalizadas algumas proporções que são consideradas especiais por normalizarem relações geométricas nas quais se baseiam formas da natureza e em decorrência da observação de geômetras foram utilizadas na construção das formas dos

objetos e inclusive no equacionamento de projetos de arquitetura. São também proporções que são usadas empiricamente nas manifestações artísticas inclusive nas construções primitivas.

### **3.5.1 O triângulo**

Alem do triângulo equilátero, pode-se citar o triângulo retângulo, conhecido como triângulo de Pitágoras, mas que já era sagrado entre os egípcios, que tem a propriedade de ter os lados constituídos por números inteiros e os lados em progressão aritmética, ou seja: 3, 4 e 5. O triângulo retângulo, juntamente com toda a teoria decorrente dos conceitos da trigonometria, tornou possível o equacionamento de problemas relativos à medição de áreas ou distâncias inclusive as inacessíveis, como no caso da astronomia. Tornando possível o traçado do ângulo reto, é utilizado até os nossos dias para demarcação de obras em construções mais empíricas. Outro triângulo retângulo ilustre é o triângulo isósceles, resultante da divisão do quadrado pela sua diagonal, com ângulos de  $45^0$  em sua base.

### **3.5.2 O quadrado**

Estando entre as formas mais utilizadas pelo homem, o quadrado representa a facilidade construtiva aliada a conceitos de estabilidade e homogeneidade. Seus quatro lados estão relacionados com a leitura dos pontos cardeais e a medição do tempo em quatro estações. Por isso simboliza o mundo físico. É também gerador de formas, como o círculo. Através de sua geometria pode-se equacionar tipologias de expansão e crescimento de formas. (Figura 3-25).

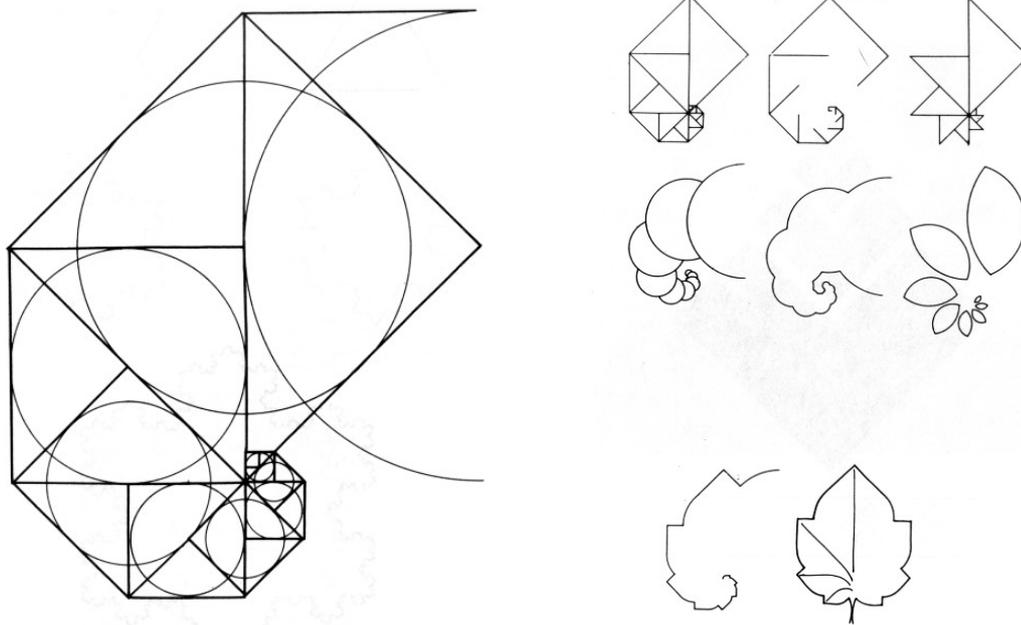


Figura 3-25 – Progressão geométrica  $\sqrt{2}$  - formas naturais.

Fonte: GHYKA (1953).

Este sistema de expansão estabelece uma seqüência de medidas em seus lados e também em sua área. Enquanto seus lados crescem segundo a progressão  $\sqrt{2}$ , suas áreas são seqüencialmente duplicadas.

### 3.5.3 Os retângulos estáticos e dinâmicos

Segundo GHYKA (1977) Jay Hambridge foi quem estudou primeiramente o conceito de retângulos dinâmicos.

“Dois retângulos de formas diferentes se distinguem pela razão entre o lado maior e o menor, número que é pois suficiente para caracterizá-lo. Um retângulo de modulo  $n$  é o que tem essa razão entre seus dois lados. Inspirado em investigações sobre números ou dimensões mensuráveis em potências, um norte americano Jay Hambridge, teve a idéia de estudar nesses traçados a disposição e as proporções relativas, não pelas linhas e sim pelas superfícies o que é natural quando se trata de arquitetura. As plantas e as fachadas dos templos egípcios e gregos em particular, são retangulares ou são compostas por uma justaposição de retângulos (o quadrado e o duplo quadrado aparecem entre estes). Hambridge agrupa todos os retângulos cujo módulo  $n$  é um número inteiro (1, 2, 3, ...) ou fracionário (3/2, 4/3, ...) aos quais

chama de estáticos. Por outro lado, aqueles em que o módulo  $n$  é um número incomensurável chama-os de retângulos dinâmicos. O quadrado e o duplo quadrado pertencem tanto à série estática como à série dinâmica”.

Tendo compilado uma série de medidas em monumentos, esculturas e vasos egípcios e gregos Hambridge chega à conclusão de que toda a arte grega dos séculos 6 a 2 a. C., ou anteriormente, a arte egípcia foi fundamentada no emprego de retângulos dinâmicos, manifestado pela ausência de razões mensuráveis entre a maior parte das dimensões. Por outro lado, as razões mensuráveis aparecem entre as superfícies, para as quais as razões de semelhança são naturalmente proporcionais ao quadrado das medidas lineares correspondentes.

Além do quadrado e suas propriedades já conhecidas, temos o retângulo 1 por  $\sqrt{2}$ . Este retângulo é importante por ter sido eleito como normalizador para padronização dos formatos de desenho (DIN = *Design International Norm*), que apresenta a propriedade única entre os retângulos de manter a mesma proporção inicial, quando dividido em duas metades iguais (Figura 3-26).

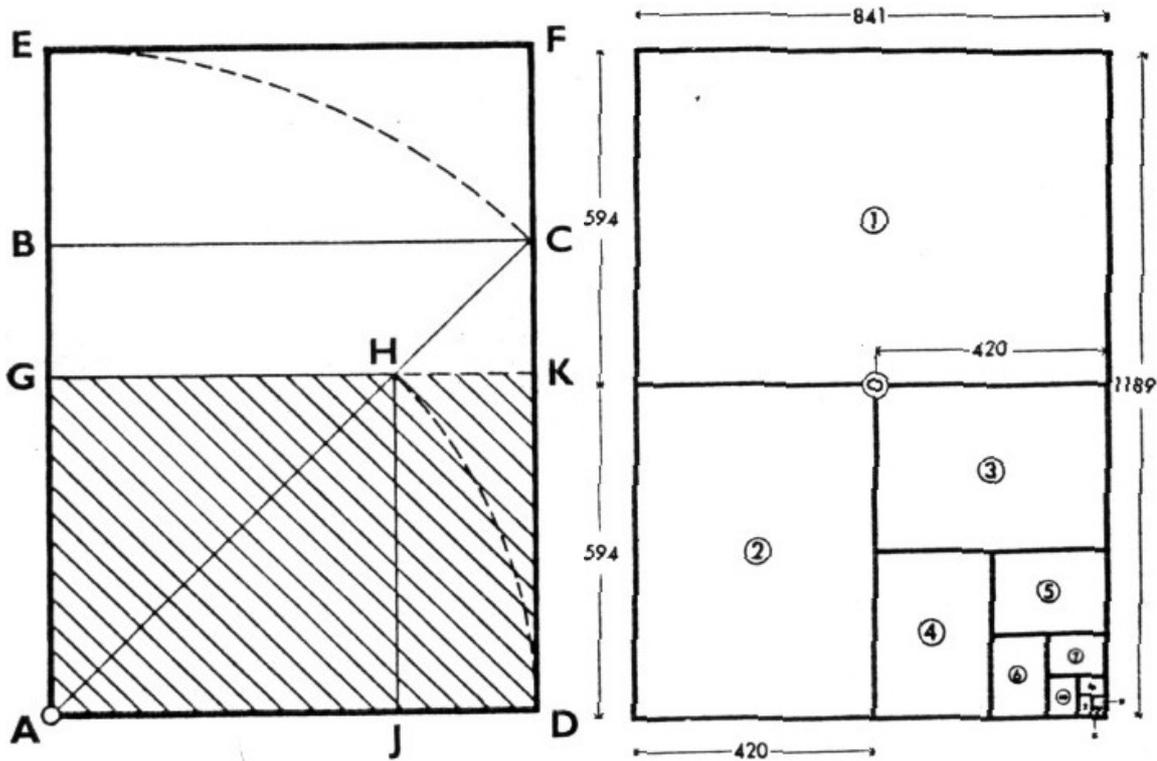


Figura 3-26 – Geração do formato padronizado DIN.

Fonte: GHYKA (1953).

Seguindo a seqüência geradora, pode-se construir o retângulo  $\sqrt{3}$  que tem as proporções onde se inscreve o triângulo eqüilátero e seqüencialmente o retângulo  $\sqrt{4}$  ou duplo quadrado. (Figura 3-27)

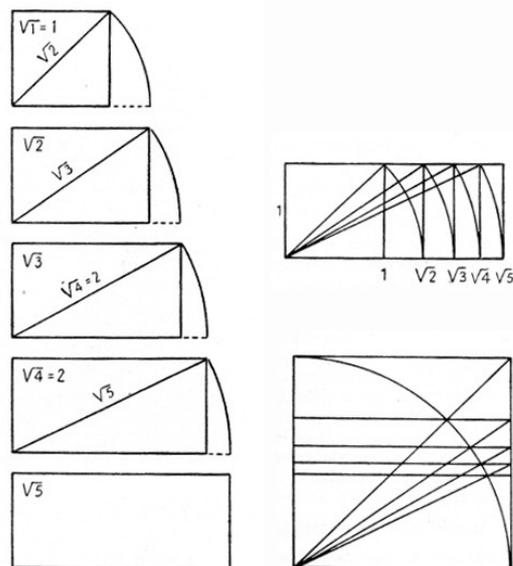


Figura 3-27 – Retângulos dinâmicos.

Fonte: GHYKA (1953)



### 3.5.4 Simetrias pentagonais

Assim como o retângulo áureo, a proporção do triângulo isósceles cujos ângulos da base medem  $72^\circ$  também é geradora de espirais na natureza e corresponde ao ângulo central do pentágono inscrito no círculo. Desta maneira, pode-se observar na simetria pentagonal a presença de proporções regidas por números também irracionais (Figura 3-29).

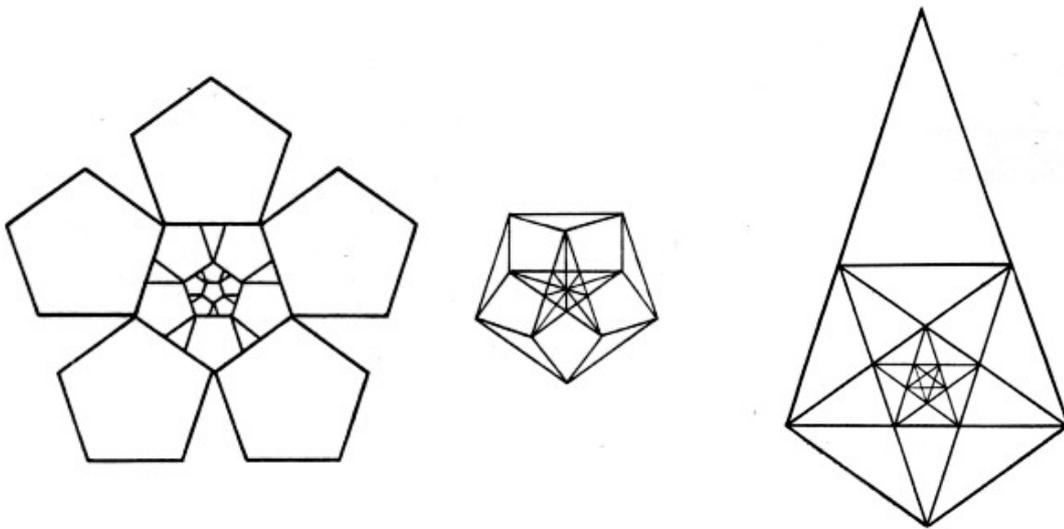


Figura 3-29 – Simetrias pentagonais.

Fonte: GHYKA (1953).

É importante observar que as formas cujas proporções estão baseadas em números irracionais podem assumir este caráter dinâmico e que o quadrado, o pentágono e o retângulo áureo estão relacionados com os sistemas de expansão presente nas formas vivas. Estas proporções estão ainda interligadas à geometria do círculo através dos diagramas apresentados na Figura 3-30.

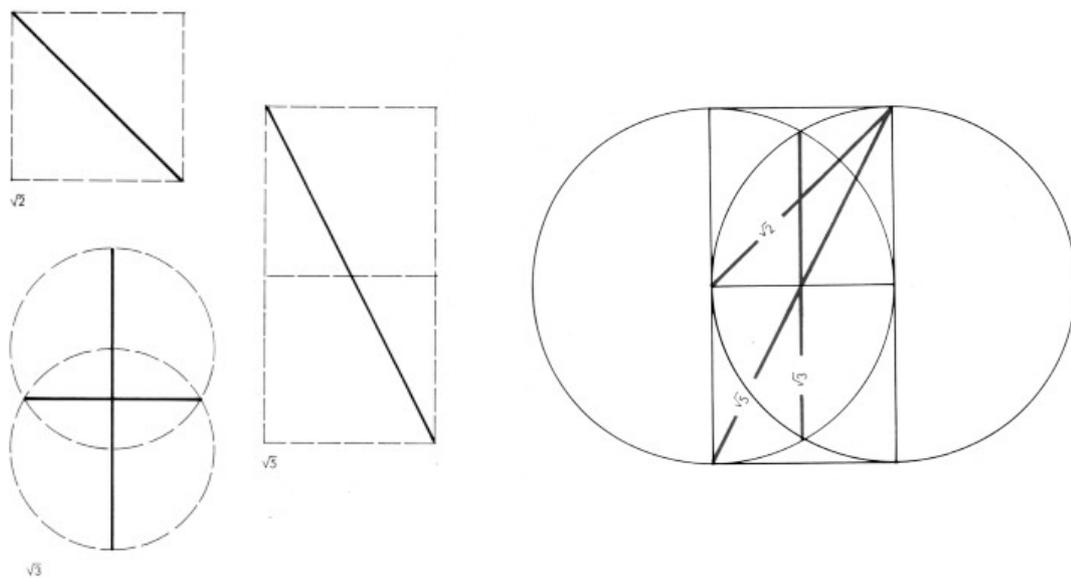


Figura 3-30 – Três raízes sagradas.

Fonte: LAWLOR (1996).

Para melhor equacionar o procedimento geométrico que fundamenta esta expansão, deve-se recorrer ao conceito geométrico denominado “*gnomom*”. Segundo GHYKA (1977), deve-se a Aristóteles a definição deste conceito: (Figura 3-31):

“Um gnomom é toda figura cuja justaposição a uma figura dada produz uma figura resultante semelhante à figura inicial. Se uma estrutura crescente está composta de partes sucessivas homotéticas (semelhantes) podemos traçar sempre por pontos correspondentes uma série de espirais logarítmicas”.....“O fenômeno causador da assimetria é, no caso, o fato do crescimento dos seres vivos, atuar de dentro para fora como forma de expansão e não por aglutinação, como os cristais e este crescimento vivo tende a produzir formas sucessivas homotéticas ou seja semelhantes a si mesmas”.

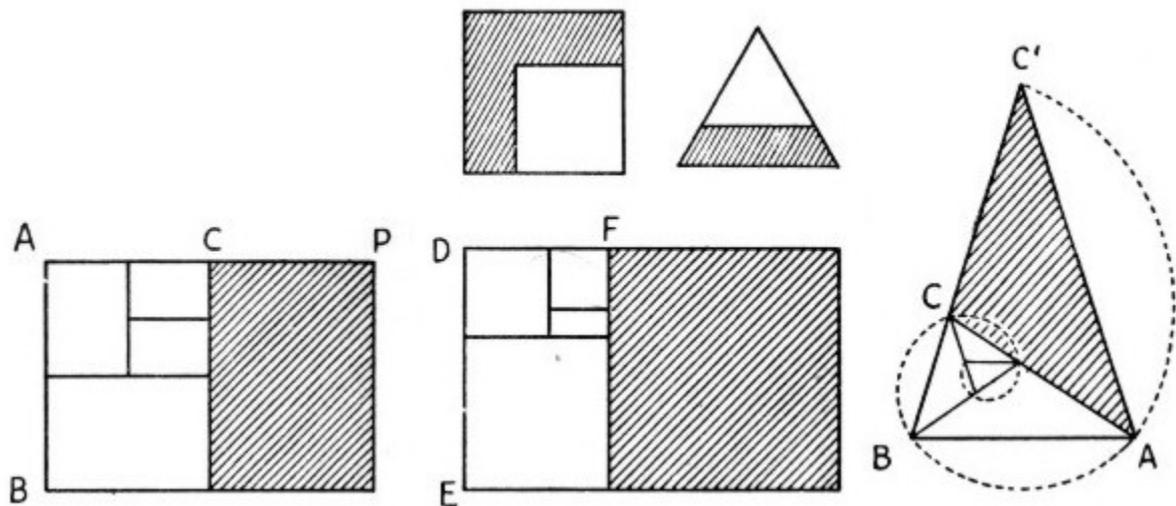


Figura 3-31 – Gnomom.

Fonte: GHYKA (1953).

Aqui se manifesta portanto a diferença essencial entre a simetria hexagonal que corresponde ao equilíbrio da matéria inerte, cujas bases ideais são o preenchimento homogêneo do plano ou do espaço, a periodicidade estática e a justaposição do mesmo motivo sem favorecimento de nenhuma direção (isotropismo), e a simetria pentagonal que introduz no plano e no espaço uma pulsação em progressão geométrica, uma periodicidade dinâmica verdadeiramente ritmada, que não só corresponde a um crescimento qualquer, e sim ao crescimento homotético, pelo fato desta pulsação geométrica se conformar segundo o perfil de uma espiral logarítmica. O estudo dos sistemas geométricos que equacionam o movimento conduz à reflexão sobre o comportamento das formas curvas em geral.

### 3.5.5 As Formas Curvas

Para uma reflexão sobre as formas curvas, pode-se citar novamente o que diz GHYKA (1953):

“Todo sistema físico-químico isolado (no qual se encontram os organismos vivos) tende a uma posição de equilíbrio estável segundo uma evolução regida pelo princípio de mínima ação (princípio de ação estacionária), segundo o qual “um sistema evoluciona constantemente dos estados menos prováveis aos mais prováveis”, ou seja quando o seu estado de equilíbrio é obtido, a sua energia potencial é a mínima possível. Quando o estado de

equilíbrio final dá lugar a configurações relativamente estáveis e inclusive rígidas, como nos cristais, podem resultar formas ou agrupamentos aproximadamente geométricos cujas linhas de contorno se acomodam segundo uma superfície mínima compatível com as forças gravitacionais a que estas formas estão submetidas.”

Combinando estas leis com a teoria de repartições homogêneas do espaço, a cristalografia pode equacionar duzentos e trinta agrupamentos possíveis, onde se encontram as redes cúbicas e hexagonais e todas as suas mútuas combinações. Nas formações cristalinas ou geométricas, que aparecem no reino inorgânico, encontra-se o tetraedro, o cubo (e seu recíproco o octaedro) e todos os seus derivados arquimedianos e outros, de simetria ortogonal ou oblíqua, mas nunca os dos corpos platônicos de estrutura pentagonal, ou seja, o dodecaedro e seu recíproco icosaedro nem nenhum de seus derivados. Entretanto, estas entidades tomam um inesperado destaque quando se passa a examinar os sistemas vivos. Basta olhar um Atlas de botânica ou um livro de zoologia para observar que neles, ao contrário, as formas pentâmeras (de simetria pentagonal) aparecem freqüentemente e inclusive com maior freqüência que as derivadas do sistema cúbico ou hexagonal (Figura 3-32).



Figura 3-32 – Exemplos de simetrias pentâmeras

Fonte: RORIZ (1998)

Esta observação foi feita recentemente por alguns estudiosos que conhecendo a fundo a cristalografia, aplicaram conceitos de simetria ao estudo morfológico dos seres vivos. Tanto no caso dos animais como das plantas parece existir uma certa preferência pela simetria pentagonal, uma simetria claramente relacionada com a importante proporção ou seção áurea, que é desconhecida no universo da matéria inerte. Com efeito, do ponto de vista do papel desempenhado pelo princípio da simetria, é difícil negar que haja uma linha fronteira de demarcação entre as formas do reino inorgânico e as formas vivas. Nas formas vivas, a evolução gradual a partir da simetria perfeita (esférica) até uma assimetria, na qual inclui-se o movimento e a preferência característica pela razão incomensurável da seção áurea. Nas formas inorgânicas, a tendência para uma simetria mais perfeita, como condição de maior estabilidade mecânica, e a exclusão de toda relação irracional nos espaços dos eixos de simetria.

Entre os grandes pesquisadores e observadores que registraram as formas da natureza, deve-se citar Ernest Heinrich Haeckel, naturalista alemão nascido em Potsdam em 1834.

Haeckel realizou pesquisas anatômicas e embriológicas em animais inferiores (protozoários) assim como nas faunas marinhas do mundo, observadas no decurso de numerosas viagens. Dedicou atenção especial ao grupo de animais marinhos unicelulares: os radiolários, ilustrando sua obra com desenhos de grande beleza. Observando-se os radiolários de Haeckel pode-se encontrar os cinco poliedros regulares, enquanto nas formas cristalinas minerais jamais aparece o dodecaedro regular nem o icosaedro. Além disso, nas formas cristalinas e minerais é constante a presença de estruturas poliédricas constituídas de faces planas, enquanto nas formas vivas as simetrias pentagonais e estruturadas pela proporção áurea parecem demonstrar claramente sua preferência pelos contornos curvos (Figura 3-33).

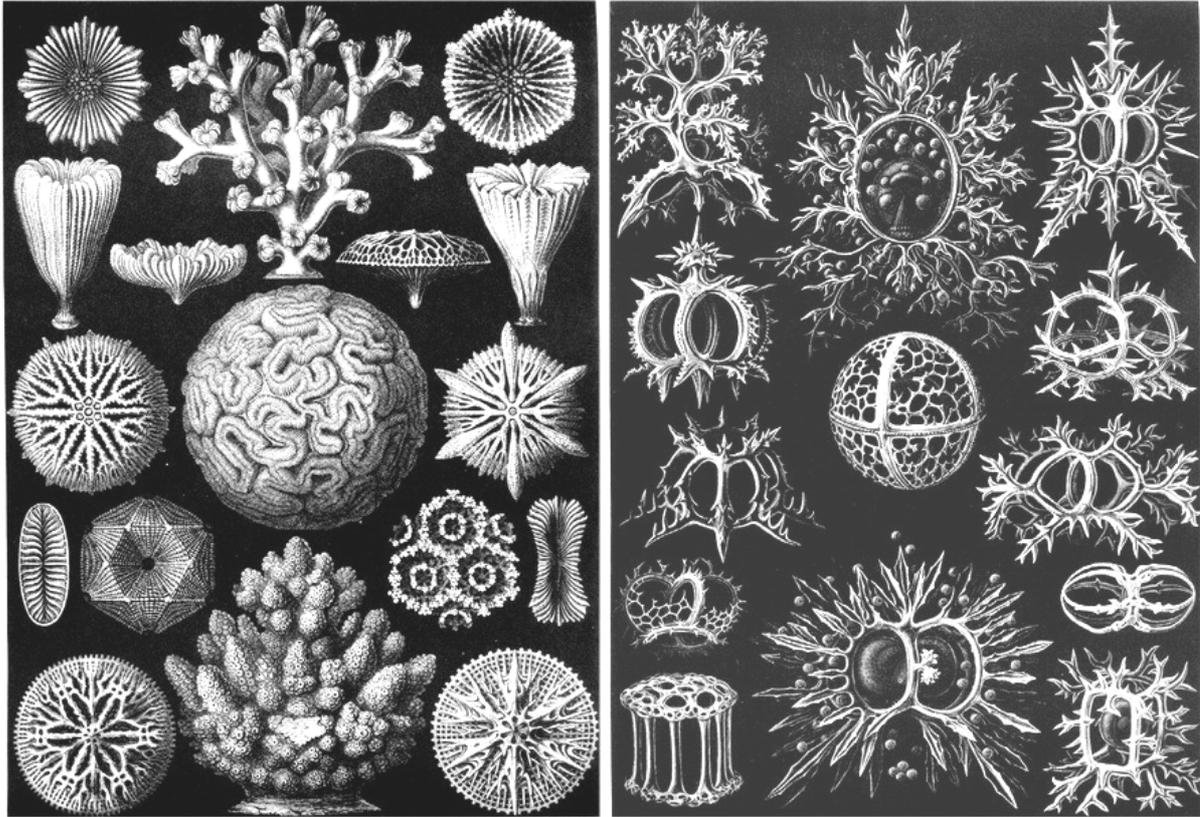


Figura 3-33 – Desenhos de Haeckel.

Fonte: EDIOURO (1972).

Com efeito no mundo vivo, o princípio de mínima ação, não exerce uma ditadura absoluta como entre os sistemas inorgânicos. O equilíbrio estático das belas formas cristalinas é o menor entre os cuidados dos organismos vivos. Existem outros dois fundamentos com os quais os princípios de simetria e de equilíbrio devem entrar em acordo mais tarde: o crescimento e a reprodução que são regulados pela lei de economia de substância e não a de ação ou energia. Enquanto em um sistema puramente físico químico, mesmo que fosse tão amplo como o universo, é possível se prever teoricamente o desenvolvimento futuro, em um sistema isolado em que se encontra matéria viva, animal ou vegetal, não parece obedecer a economia de trabalho e ignora freqüentemente as linhas geodésicas de ação estacionária. E isto não é de forma arbitrária, mas sim para permitir à vida, adaptar-se e perpetuar-se.

Se não há economia de trabalho resistente, há em troca, sobretudo nas espécies que chegaram a um grau avançado de evolução, uma notável economia de matéria, de substância, que não é manifesta nos sistemas inorgânicos. Esta economia de substância não deriva de princípios da mecânica geral, mas da necessidade vital, a luta contra a gravidade terrestre,

para permitir às plantas chegar à luz, aos pássaros voar e aos animais correr e saltar. A arquitetura gótica tratou de forma análoga o problema do empuxo vertical: a luta contra a ação da gravidade e de maneira idêntica realizou uma notável economia de matéria em função das alturas alcançadas.

A análise das formas das plantas e outros sistemas orgânicos demonstra que neles o problema da máxima resistência com o mínimo de matéria, apresenta soluções admiráveis.(Figura 3-34 eFigura 3-35).

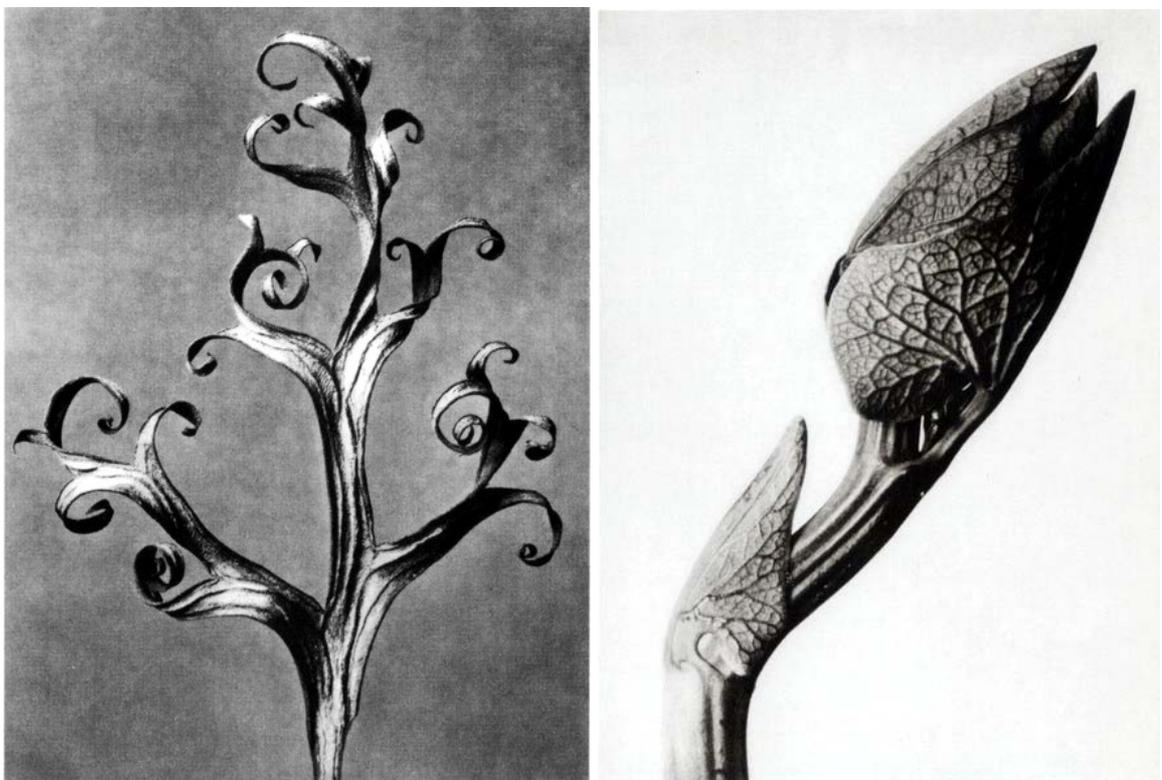


Figura 3-34 – Karl Blossfeldt.

Fonte: RIEMSCHEIDER (1993).

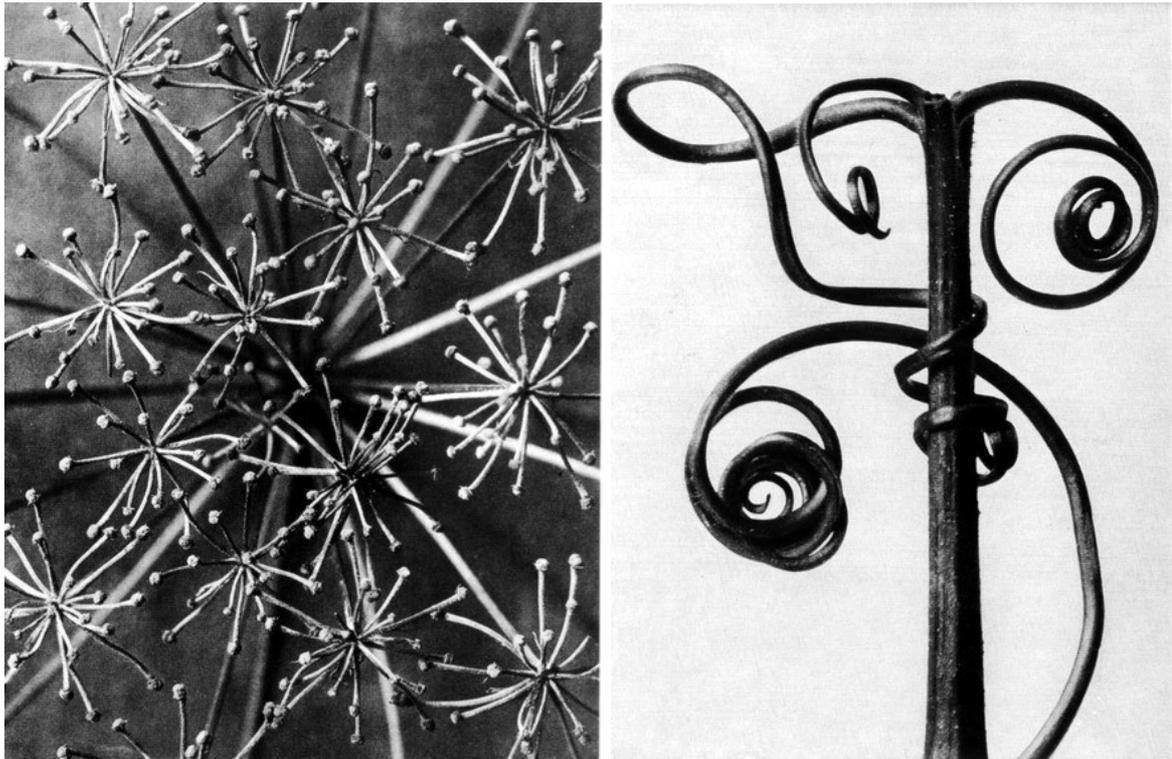


Figura 3-35 – Karl Blossfeldt.

Fonte: RIEMSCHEIDER (1993).

O fato de um sistema isolado que contenha matéria viva não estar submetido ao princípio de mínima ação, não significa que não se cumpram nele, as leis naturais da físico-química, mas sim que aquele sistema não se comporta já como um sistema isolado. A vida atua como uma força exterior que procede de uma outra dimensão. As tendências de economia de substância podem conduzir às mesmas soluções que os sistemas inorgânicos. Em tecidos de células esféricas, a economia máxima de substância poderá apresentar as mesmas conformações dos objetos submetidos às leis de tensão superficial mínima. Além disso, suas condições especiais de equilíbrio do tipo pragmático e a sua tendência à economia, os organismos vivos apresentam também um fenômeno característico, ao menos como modalidade: o do crescimento.

Os cristais inorgânicos aumentam por aglutinação (adição de elementos idênticos). O organismo vivo cresce por uma espécie de expansão de dentro para fora. Na matéria inorgânica, os elementos moleculares, uma vez em equilíbrio (rígido ou oscilante) permanecem idênticos durante o processo de agrupamento, mas os elementos que constituem o tecido vivo se renovam continuamente por combustão e eliminação. O organismo vivo, tem além disso a particularidade de oferecer em geral um só plano de simetria na direção do seu

movimento e cresce conservando as linhas gerais de sua forma. A concha conserva sua forma imutável e tem um crescimento assimétrico e o mesmo acontece com os chifres dos animais que crescem por uma extremidade apenas. Esta notável propriedade de aumentar por crescimento terminal sem modificação da forma da figura total, é por exemplo uma característica da espiral logarítmica (Figura 3-36).

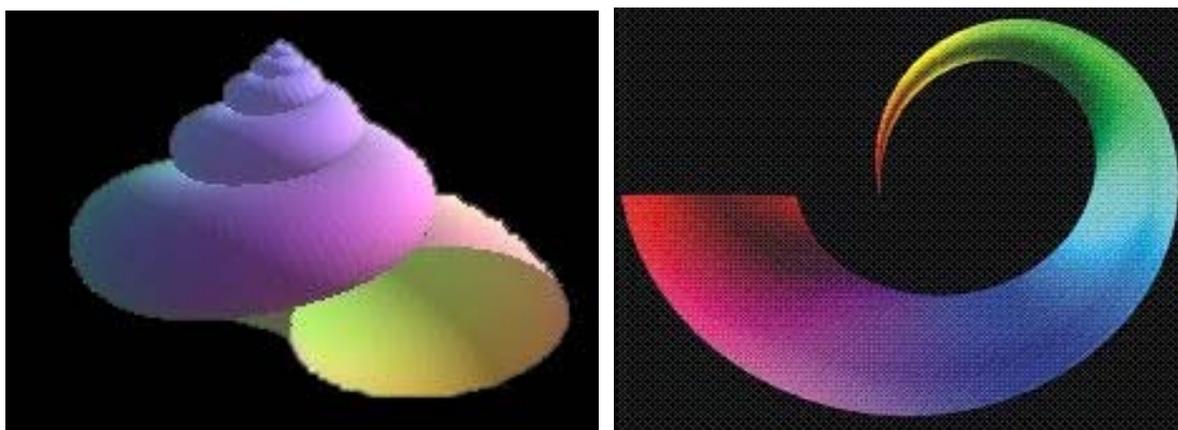


Figura 3-36 – Parametrização do caracol e do chifre.

Fonte: Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke. 2004

### 3.6 Análise de Padrões Naturais

São infinitas as maneiras de equacionar padrões naturais, mas em todos eles podem ser observados conceitos ou princípios de ordenação. Comparando formas inorgânicas com formas vivas, pode-se observar dois princípios básicos: isotropia e expansão. No caso da isotropia, a característica predominante é a homogeneidade e o equilíbrio. No caso da expansão ou contração, esta característica é o movimento. Nos dois casos pode-se perceber a presença do ritmo. No primeiro caso este ritmo é denominado estático. No segundo o ritmo é dinâmico. No caso do ritmo estático pode-se estabelecer uma periodicidade repetitiva em qualquer direção observada e as dimensões se mantêm constantes pois estão regidas pela unidade. No caso de observar-se um ritmo dinâmico, as dimensões se alternam segundo outros números maiores ou menores que um. Dependendo desses fatores pode-se obter um escalonamento onde as dimensões se ampliam ou contraem. Quando os padrões se repetem em escalas sucessivas são denominados fractais e estão regidos pelo princípio da auto-semelhança. (Figura 3-37).

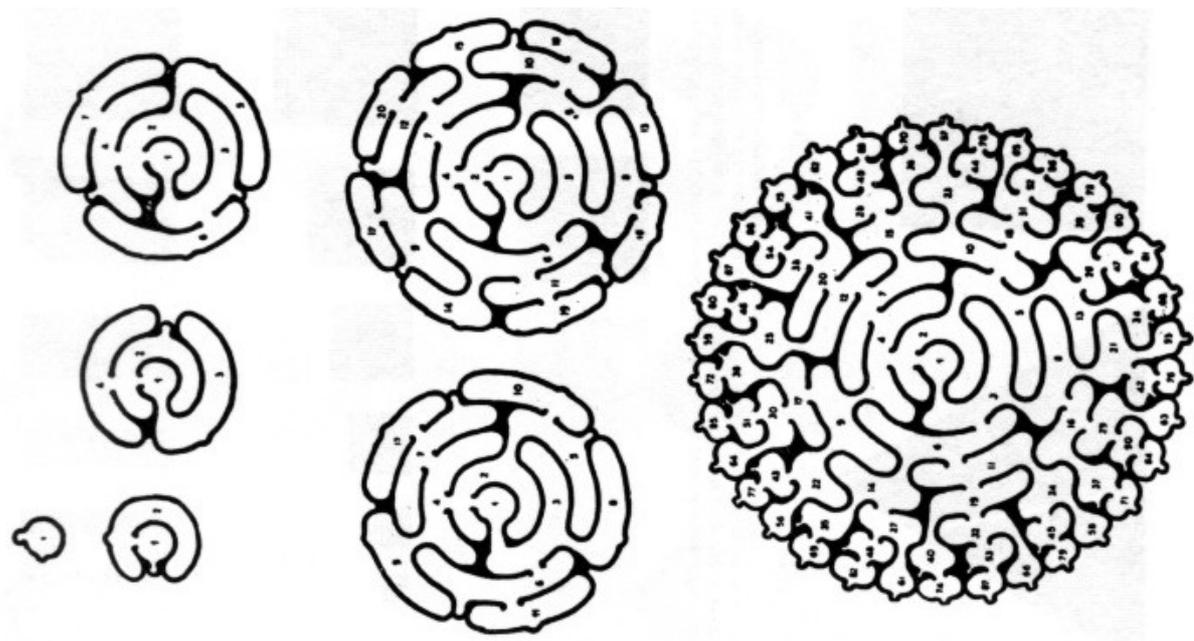


Figura 3-37 – Expansão de formas orgânicas.

Fonte: MUNARI (1968).

Entre as principais tipologias de padrões naturais, pode-se destacar:

- As simetrias de centro, planas e esféricas (Figura 3-38 e Figura 3-39).



Figura 3-38 – Cactus.

Fonte: NEILL (1993).

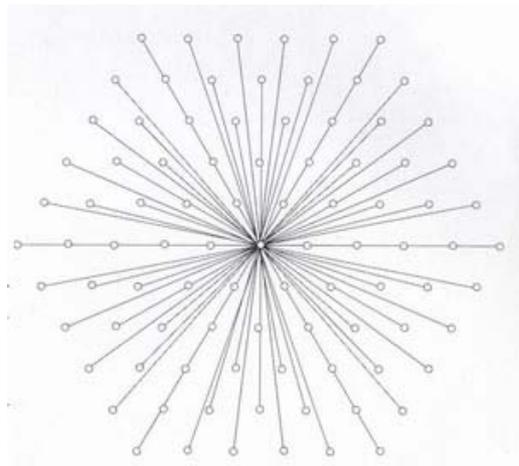


Figura 3-39 – Simetria de centro.

Fonte: NEILL (1993).

- Os meandros (curvas reversas) (Figura 3-40 e Figura 3-41)

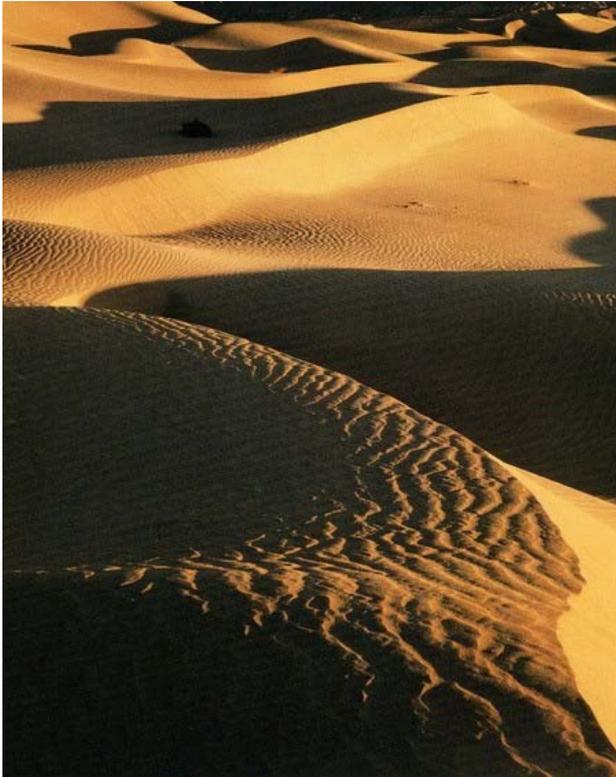


Figura 3-40 – Meandro.  
Fonte: NEILL (1993).

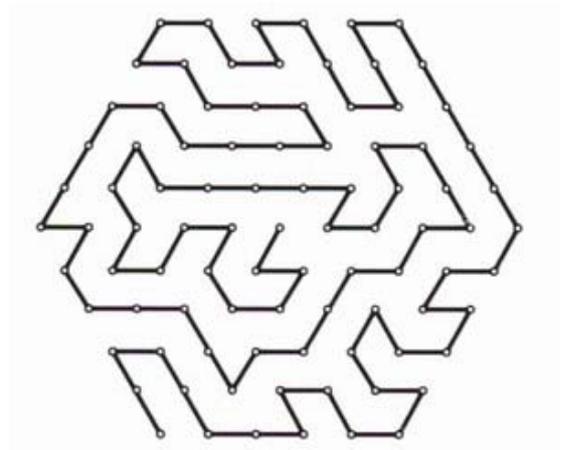


Figura 3-41 – Diagrama meandros.  
Fonte: NEILL (1993).

- As hélices e espirais. (Curvas que se estendem e revelam a vida) (Figura 3-42 e Figura 3-43).

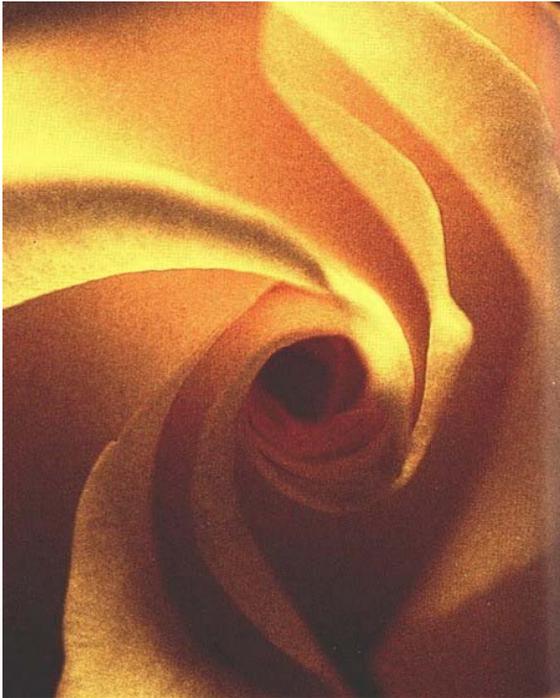


Figura 3-42 – Espirais.  
Fonte: NEILL (1993).

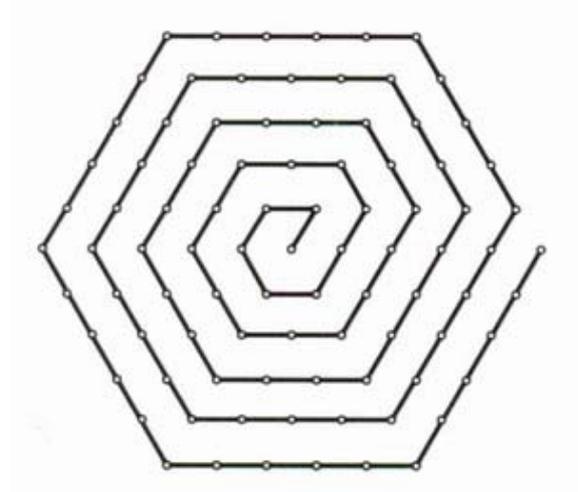


Figura 3-43 – Espirais.  
Fonte: NEILL (1993).

- As ramificações. (Ocupação homogênea dos lugares no espaço ou no plano) (Figura 3-44 e Figura 3-45).



Figura 3-44 – Ramificações.  
Fonte: NEILL (1993).

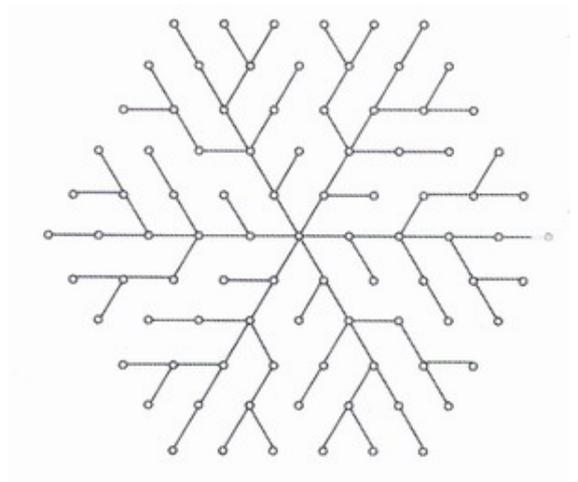


Figura 3-45 – Ramificações.  
Fonte: NEILL (1993).

- Os fractais (a repetição de modelos em escalas sucessivas) (Figura 3-46 e Figura 3-47)



Figura 3-46 – Imagem de fractais.

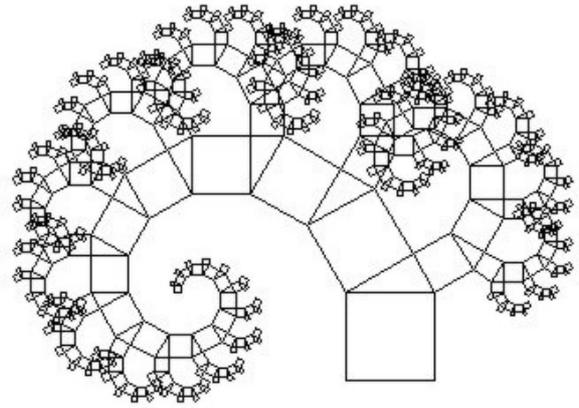


Figura 3-47 – Imagem de fractais.

Fonte: Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke. 2004

Os sistemas reticulares ou tramas: (distribuição conveniente por partes ou equípartição) (Figura 3-48 e Figura 3-49).

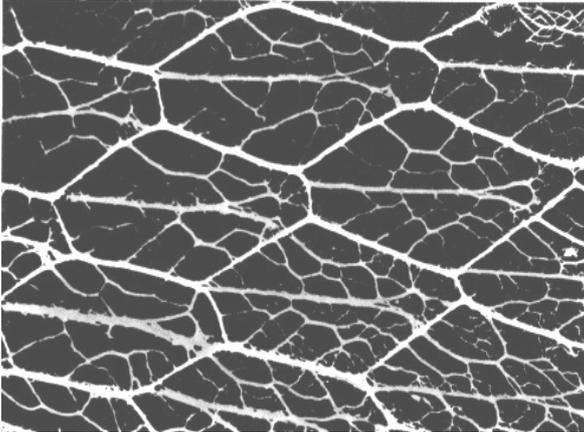
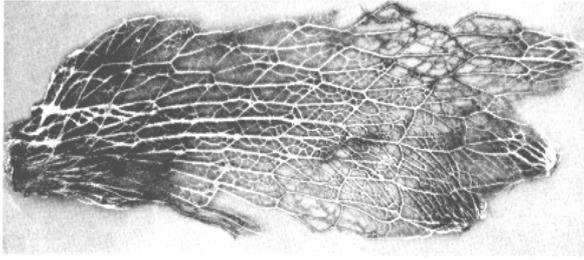


Figura 3-48 – Imagem de tramas.

Fonte: MUNARI (1968).

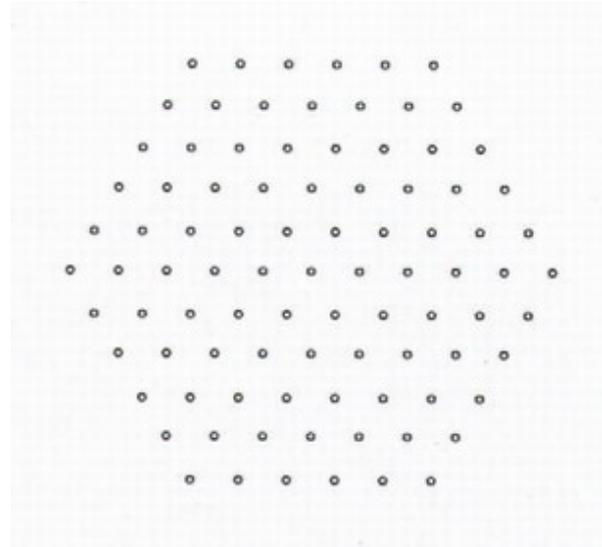
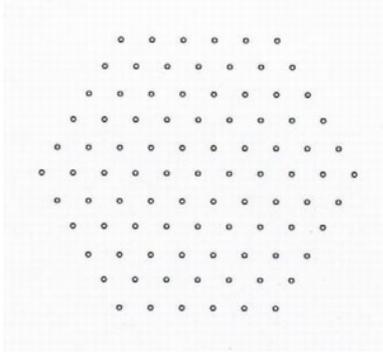


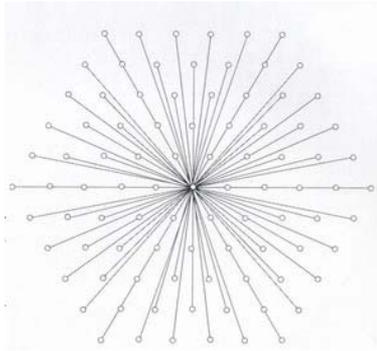
Figura 3-49 – Imagem de tramas.

Fonte: NEILL (1993).

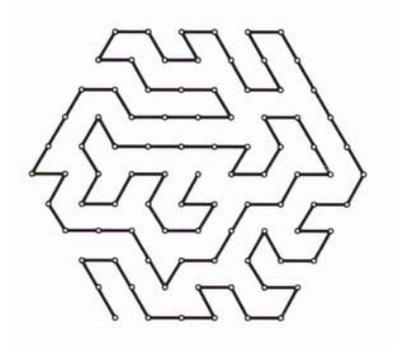
Delimitando-se um padrão geométrico de distribuição igualitária por pontos eqüidistantes, pode-se encontrar exemplos de soluções padronizadas que se classificam em modelos diversos. Outros padrões geométricos como os fractais e as tramas também podem ser normalizados através de esquemas conforme apresentados na Figura 3-50.



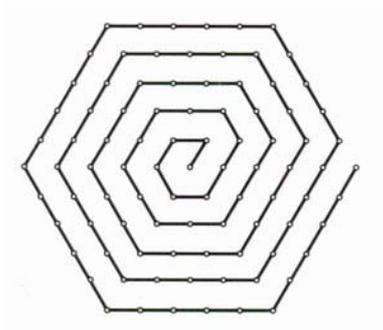
Esquema Geral



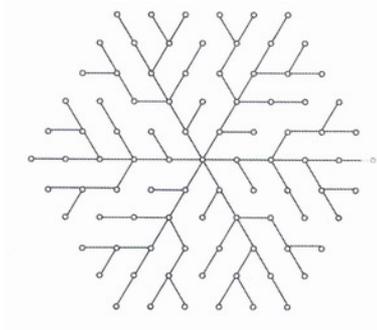
Simetria de Centro.



Meandros



Espiral.



Ramificação.



Fractais

Figura 3-50 – Esquemas geométricos de organizações formais

Fonte: NEILL (1993).

### 3.6.1 Simetrias de centro bi ou tridimensionais

São inúmeras as aplicações em projetos, da geometria decorrente das simetrias esféricas ou circulares. Tendo o centro da forma como referência, podem ser equacionadas segundo o ângulo determinado por seu raio e suas linhas de tangência que permanecem constantes em função de um mesmo diâmetro. Devido à propriedade do círculo e da esfera pela qual apresentam o mínimo de envoltório para o máximo de conteúdo, estas formas conferem aos seus descendentes esta vantajosa propriedade. Assim, tanto no plano, quanto no espaço as formas regulares (inscríveis no círculo ou na esfera) desfrutam desta propriedade, quando comparadas a qualquer outra forma similar (igual número de lados ou faces).

### 3.6.2 Simetrias que produzem o movimento

Alguns matemáticos como Hilbert (ASTRONOMY, 2004) estudaram movimentos cadenciados e equacionados por linhas retas e angulações repetitivas que podem determinar direções de crescimento ou de preenchimento de um plano ou espaço obedecendo a sistemas de percurso. Podem se pautar por impulsos radiais, ou seguindo meandros e espirais. Tais movimentos repetem procedimentos de formas naturais e foram repetidos sob a forma de esquemas em diversos ramos da arte ou da arquitetura. Estas sínteses, classificadas como tipológicas têm larga aplicação nas soluções estruturais ou no equacionamento dos fluxos em arquitetura. Proporcionam ainda a constituição de formas abertas como por exemplo no caso das ramificações, ou a ampliação do perímetro através de sucessivas dobras onde se ampliam as possibilidades de contato e a absorção de alimentos, ar, etc (Figura 3-51).

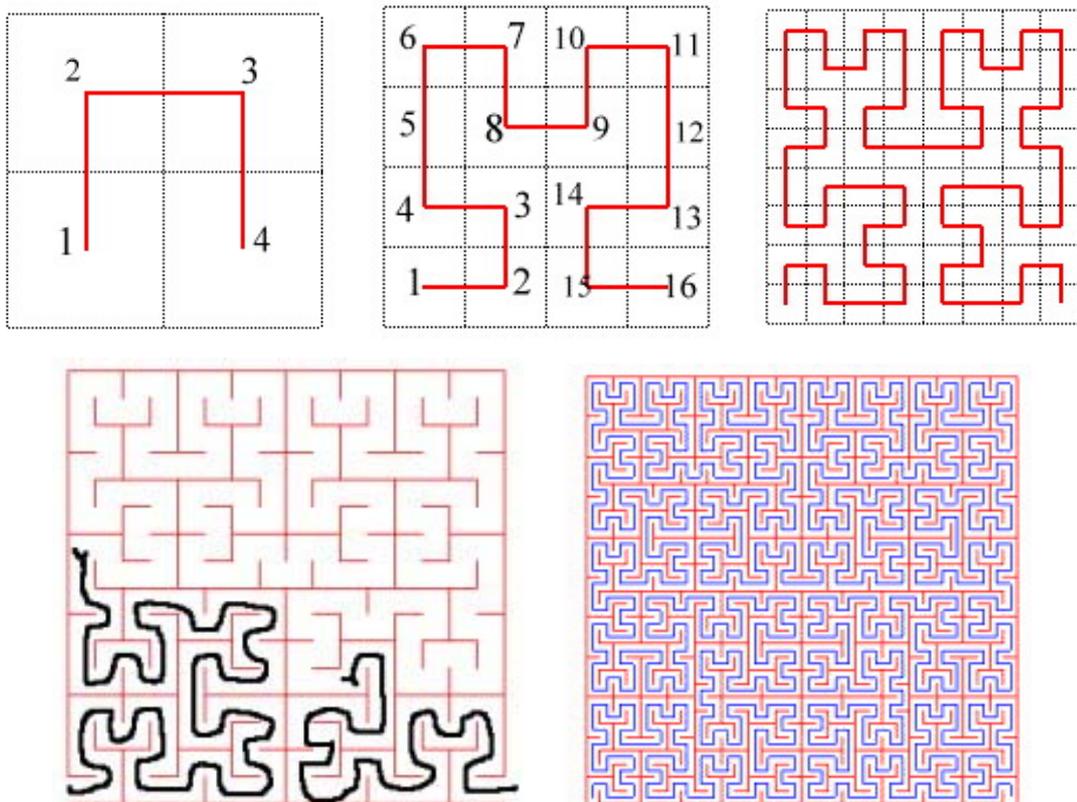


Figura 3-51 – Geometria fractal, Labirinto de Hilbert – 2D.

Fonte: Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke. 2004

Segundo LOCHER (1988), M C Escher pesquisou, através de seus desenhos, esta geometria fractal criando formas imbricadas sem contudo perder a unidade do contorno (Figura 3-52).

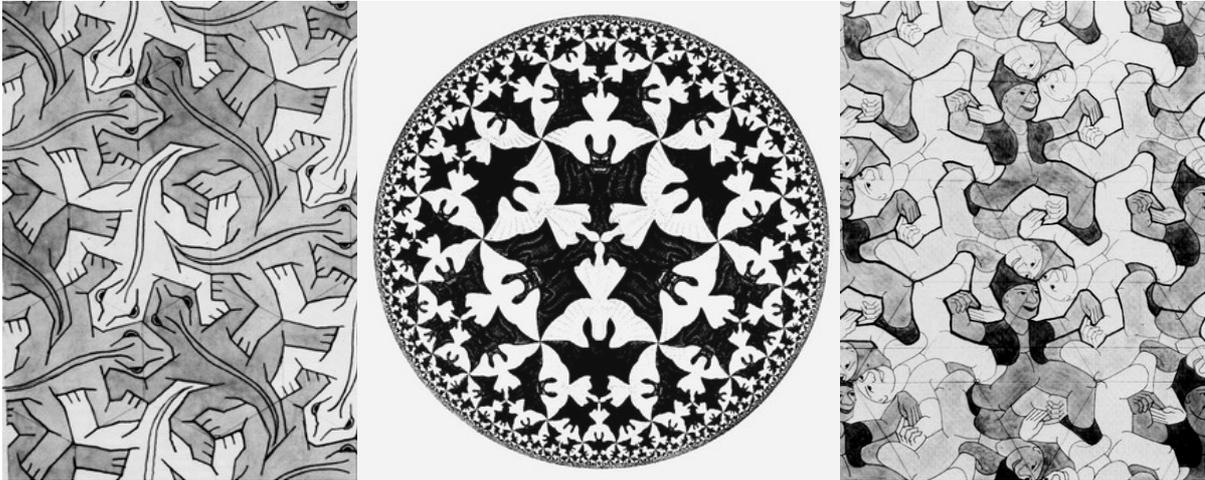


Figura 3-52 – Desenhos do Escher.

Fonte: LOCHER (1988).

Nos desenhos de Haeckel, (STÜBER, 1998) pode-se vislumbrar estes procedimentos apresentados de forma tão rica que esbarram no universo da imaginação. Quando se observa estas formas naturais, é possível perceber que a geometria fractal pode proporcionar uma maior fidelidade na representação das formas da natureza. Estes movimentos podem também ser equacionados em três direções como no caso das ramificações arbóreas ou dos sistemas prismáticos das redes tridimensionais (Figura 3-53).

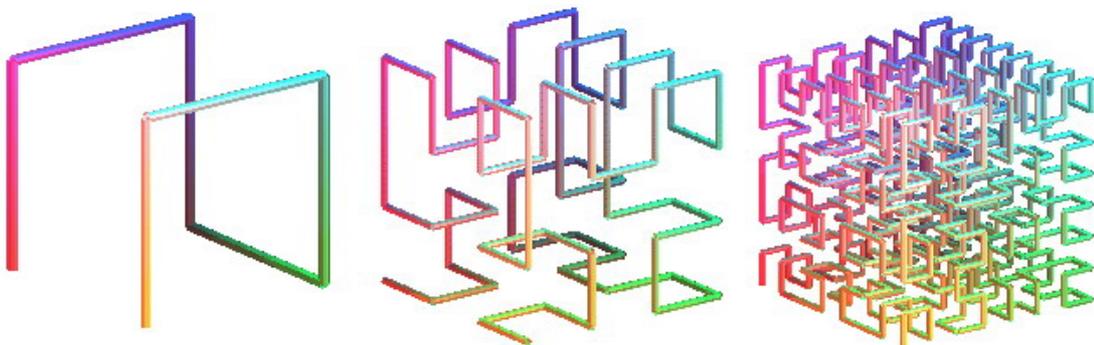


Figura 3-53 – Geometria fractal, Labirinto de Hilbert – 3D.

Fonte: [Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke](http://Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke). 2004

### **3.6.3 Movimentos e Continuidade.**

Para o equacionamento das espirais, meandros e outras formas cujos contornos estão baseados em movimentos curvos, pode-se recorrer ao ramo da topologia que tem entre seus fundamentos a geometria diferencial. Este ramo da geometria se ocupa da noção de continuidade nas formas e podem descrever formas naturais, construções empíricas e primitivas ou mesmo abrigos executados por animais por instinto. São formas modeladas pelo deslizamento natural das cargas decorrentes do peso próprio e portanto não submetidas à flexão. Impulsionadas pelo movimento, são discriminadas através de linhas ou superfícies curvas.

Para o equacionamento de curvas, pode-se inicialmente considerar aquelas pertencentes a um plano. Estas formas foram inicialmente esboçadas pela geometria analítica, mas foram posteriormente descritas em esquemas tridimensionais através do cálculo diferencial e mais recentemente modeladas por programas de informática. Também foi possível representar diferentes tipos de superfícies, estabelecendo-se princípios conceituais geradores que podem se referenciar por exemplo ao comportamento da matéria inerte, submetida à acomodação pela influência do peso próprio (superfícies mínimas). Estas, representam a acomodação da superfície de um determinado volume segundo a menor área de contorno compatível com as forças gravitacionais a que está submetido (Figura 3-54).

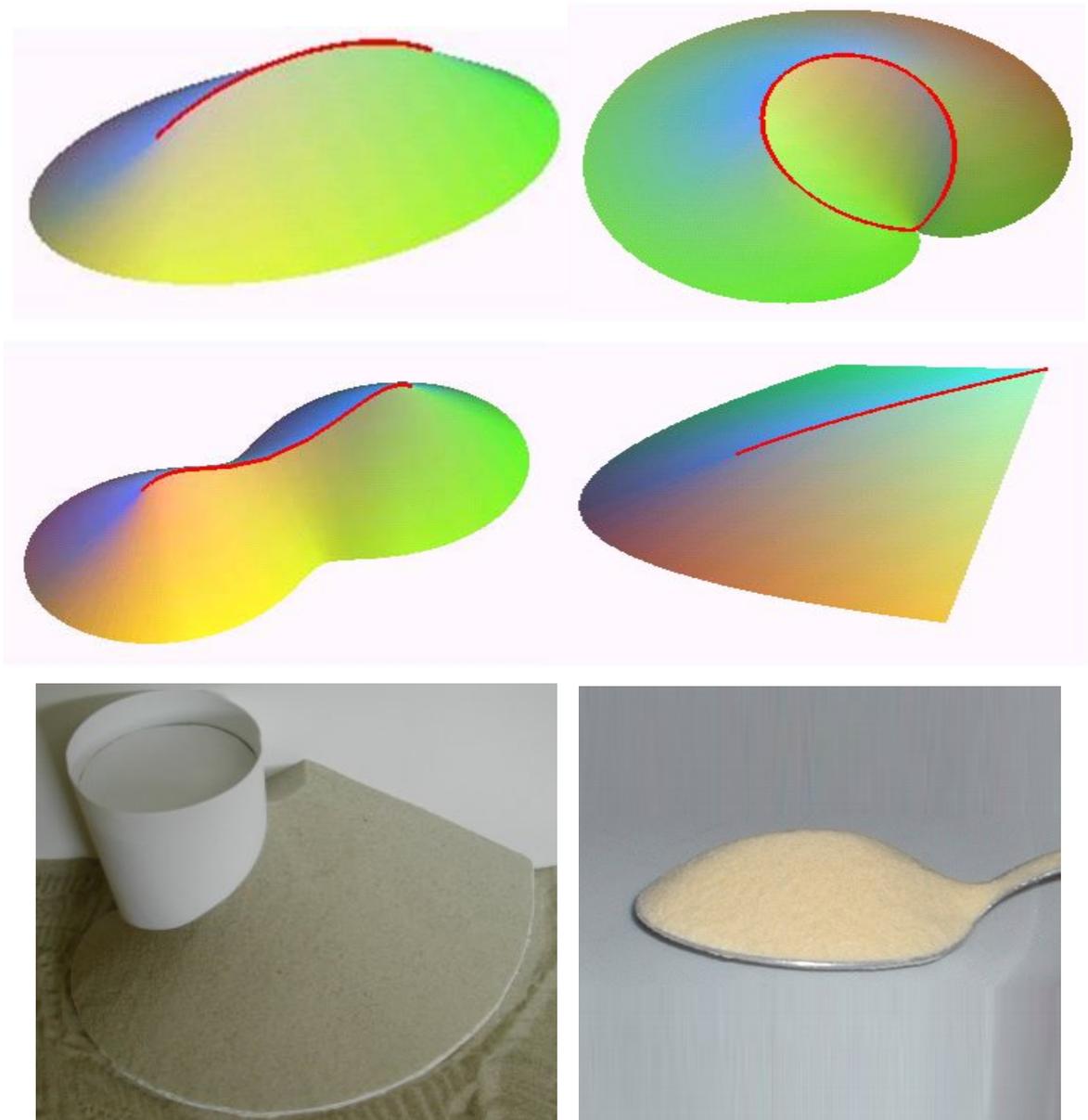


Figura 3-54 – Superfícies mínimas.

Fonte: [Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke](http://Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke). 2004

As superfícies de revolução são obtidas por rotação de curvas planas, linhas de intercessão de dois tipos de volumes curvos ou outros tipos de volumes fechados e não regulares. São apresentados na Figura 3-55.

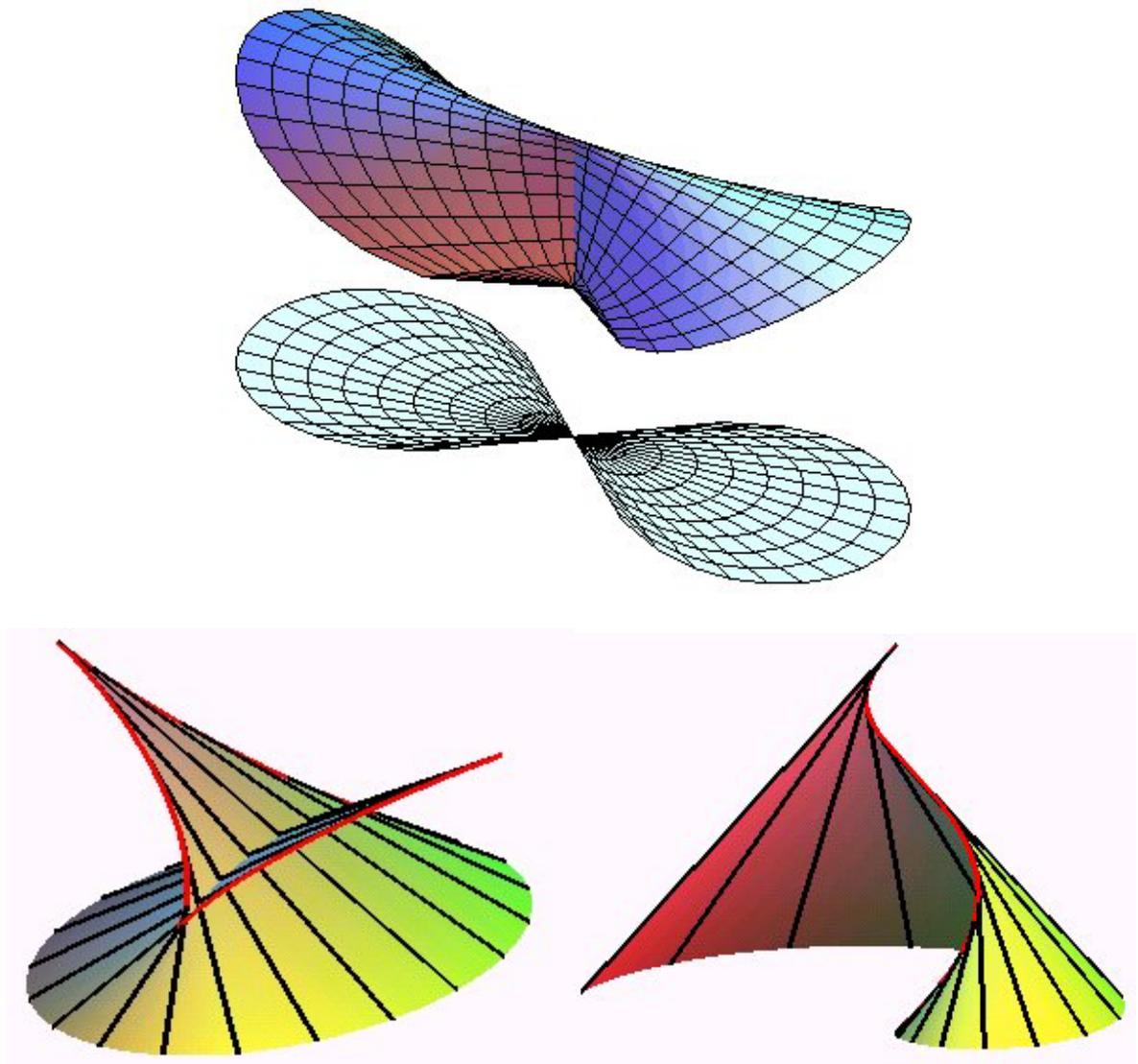


Figura 3-55 – Exemplos dos diversos tipos de parametrização de formas

Fonte: [Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke](http://Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke). 2004

A parametrização de formas curvas demonstra a possibilidade de se descrever matematicamente as formas da natureza, como as apresentadas na Figura 3-56, investigadas a partir da observação da geometria natural. Pode-se descrever inclusive as superfícies aleatórias tal como as superfícies topográficas.



Figura 3-56 – Geometrização de flores através da Pseudoesfera.

Fonte: [Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke](http://Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke). 2004

Resta ao arquiteto, provavelmente após uma atitude gestual e de acordo com os diversos parâmetros geradores da forma arquitetônica, a escolha da maneira conveniente pela qual será equacionada a solução construtiva para um determinado propósito, ou seja: o equacionamento e dimensionamento dos diversos componentes da edificação.

## CAPÍTULO IV

### 4 PARAMETRIZAÇÃO DAS FORMAS

Neste capítulo quatro trata-se das principais considerações a serem feitas para a concepção de um projeto, tendo como objetivo a tipologização dos seus componentes através da coordenação modular. Fundamenta-se na parametrização de superfícies bi e tridimensionais e seu equacionamento, buscando elucidar o seu sentido construtivo. Trata-se ainda das linhas curvas tridimensionais que equacionam intercessões entre formas diversas. Estes elementos são considerados ferramentas indispensáveis para a definição de um sistema construtivo.

#### 4.1 Sistemas de normalização para projetos de arquitetura

Em meados do século XIX, sobreveio o avanço das ciências, cuja base foi a introdução da ordem em todos os seus campos. A universalização do sistema decimal foi básica, o metro foi sendo adotado em todos os continentes, assim como a ordenação decimal dos sistemas de pesos. Independentemente, apareceram pouco depois de 1860, as normas técnicas para a fabricação de materiais de construção, partindo de pontos de vista puramente racionais. Os tijolos de barro eram dimensionados em polegadas prussianas por acordo da liga de cerâmicas. As tabelas de vigas de aço, apresentavam medidas em centímetros. As dimensões das esquadrias de madeira foram convencionadas na Inglaterra e apresentavam suas medidas em polegadas inglesas, ocorrendo o mesmo com o dimensionamento de outros elementos construtivos.

A primeira guerra mundial trouxe consigo, em 1917, a fundação da Comissão de Normas da Indústria Alemã que foi fundada primeiramente com o intuito de beneficiar as indústrias de fabricação de armas e demais aparatos bélicos, mas conseqüentemente começou a intervir também na normalização das construções. Mesmo que a normalização fizesse grandes progressos no campo técnico, não foi muito bem aceita pelos arquitetos e pelos empreiteiros, e mesmo atualmente esta rejeição ainda não parece estar totalmente vencida.

Cada uma das normas de elementos de uma construção falava sua própria linguagem e tinha sua gramática própria, de maneira que um edifício construído segundo tais normas era algo parecido com a construção da torre de Babel. Ficava pois muito difícil para um arquiteto conservar em sua memória, todos os sistemas de dimensões normalizadas que necessitava conhecer para fazer seus projetos. Como as tabelas de normas das construções naquela época não haviam sido publicadas oficialmente e só se podia obtê-las através de tabelas avulsas, acontecia freqüentemente que mesmo em uma coleção reunida com o maior cuidado, poderia faltar precisamente a tabela mais recente e que realmente já estaria em vigor. O arquiteto tinha então que perder um tempo buscando informações e com freqüência acabava renunciando ao emprego das normas.

O importante seria dimensionar todos os elementos construtivos de acordo com uma sistematização de ordem superior que facilitasse ao usuário a compreensão das normas e a notação das medidas com a garantia da adaptabilidade das diferentes partes e elementos da obra em si. Procurar unificar as medidas em uma espécie de tabela que pudesse oferecer interesse como fase preliminar de normalização, tornou-se mais importante do que manter a rotina dos fabricantes de materiais de construção já existentes.

#### **4.2 Primeiros esforços de padronização**

A subdivisão por metades sucessivas é a forma mais primitiva e mais intuitiva de repartição quando se trata de dividir alguma coisa. Já na infância, as crianças brincando praticam essas subdivisões partindo uma folha de papel em duas metades e logo estas e em outras duas e assim sucessivamente como se tratasse de um jogo instintivo.

Para a normalização nas construções, a série de frações por metades sucessivas tornou-se igualmente importante. Nas plantas clássicas do renascimento encontra-se constantemente, essa série decrescente de dimensões por metades sucessivas. Por outro lado, utiliza-se também o escalonamento por duplicações sucessivas: 2, 4, 8, 16, 32 etc. Tão importante e sensível como o sistema de repartições por metades sucessivas é o método de duplicações sucessivas. Quando se parte de 1000 para dar valores para uma família de metades sucessivas obtém-se 500, 250, 125, 62,5, 31,25, etc. A série crescente por duplicação proporciona os seguintes valores: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, etc.

Apesar de ser conveniente uma junção das duas séries não existe em princípio uma coincidência de valores e para obtê-la foram necessários alguns arredondamentos. No passado esta dificuldade foi resolvida arredondando-se o valor decrescente 62,5 para 63 formando aí uma série única com os valores: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 63, 125, 250, 500 e 1000 .

#### 4.2.1 Série dos Números Normalizados

Quando no início da primeira guerra mundial foi constituída a Comissão Alemã de Normas, que teria que fixar dimensões normalizadas para peças em geral, considerou-se a utilização do escalonamento decimal e também a série de razão 2. Além disso, deveriam ser levadas em conta outras relações matemáticas importantes para a técnica, tais como potências e raízes que ao fim representam sistemas de proporções entre medidas e que estão presentes na conformação de entidades geométricas comumente utilizadas. Criou-se então a série dos números chamados normalizados que foi determinada de maneira que sua utilização pudesse trazer importantes vantagens e sobretudo a adaptabilidade e ajuste mútuo entre suas medidas. Foi proposta a seguinte série numérica:

1 - 1,25 - 1,6 - 2 - 2,5 - 3,15 - 4 - 5 - 6,3 - 8  
10 - 12,5 - 16 - 20 - 25 - 31,5 - 40 - 50 - 63 - 80  
100 - 125 - 160 - 200 - 250 - 315 - 400 - 500 - 630 - 800 - 1000

A série apresentada tinha como justificativa as seguintes vantagens:

1. Os produtos e quocientes de números normalizados quaisquer são também números normalizados;
2. As potências inteiras de números normalizados são também números normalizados;
3. O dobro e a metade de cada número normalizado é também um número normalizado;
4. A posição da vírgula não tem importância. Por exemplo: 1,25 pode representar igualmente 0,125, ou 12,5 ou 125.

Recomendava-se no entanto levar em consideração alguns arredondamentos ou seja, admitir que  $8 \times 8 = 63$  (e não 64) ou que  $2 \times 63 = 125$  (e não 126), etc. Este grau de aproximação parecia ser suficiente para as necessidades da técnica, uma vez que para as

adições nenhum número normalizado difere de seu correspondente valor exato mais que 1,26% acima ou 1,01 % abaixo. No caso dos produtos as divergências eram maiores chegando-se a 2,4%. Entretanto estas discrepâncias, eram na prática bem menores, comparando-se com outras hipóteses teóricas que se tem que admitir em uma construção, tais como o valor das cargas móveis, a resistência teórica dos materiais, a exata posição das cargas que atuam nos vãos admitidos,etc.,.

#### **4.2.2 Considerações sobre a forma da normalização**

A ordenação das construções tornou-se um instrumento necessário para que se pudesse unificar as técnicas e culturas construtivas existentes. Também as autoridades, com seus diversos organismos para a inspeção de obras, institutos estatais de financiamentos, buscaram parâmetros para emprego dos componentes das construções. Os esforços de normalizar dimensões a serem utilizadas na construção civil conduziram ao estabelecimento de sistemas de medidas e a padronização das dimensões dos diversos materiais. Os sistemas numéricos adotados se referenciaram às medidas utilizadas em culturas e épocas diferentes. Entretanto, deve-se levar em conta que a importância dos resultados obtidos ao fim, depende das faculdades criadoras de cada arquiteto e da sua expressividade peculiar.

Normalmente entende-se por “ordenação” e normalização de uma construção, o cumprimento dos regulamentos definidos pela legislação vigente e dos requisitos técnicos e urbanísticos a que estas obras estejam submetidas. Por outro lado como arquiteto, entende-se como ordenação de uma construção, o sentido de sua expressão, a ordenação artística das proporções e medidas da obra.

O caminho a seguir para chegar a uma ordenação de medidas vai fluando entre a teoria e a prática, entre as finalidades pretendidas e as possibilidades reais até conseguir um valor equilibrado em relação às necessidades práticas, científicas e artísticas da proposta. Em outros termos, a normalização tem que ser convincente, e trazer vantagens que facilitem no momento de projetar. Para isso deverá adquirir um caráter universal proporcionando a compatibilização dos diversos componentes de uma obra.

A necessidade de espaço do homem, que é ao fim, o padrão de medida de todas as coisas, vem sendo um critério determinante para a ordenação de medidas pretendida. O sistema métrico que acabou por ser preferencialmente adotado em todos os continentes não parecia ser tão satisfatório por ser um sistema baseado nas dimensões do globo terrestre o que não estava diretamente relacionado com as dimensões humanas como os outros sistemas de medição.

Quando Le Corbusier propôs proporções relacionadas com a seção áurea como padrão direto dos sistemas de medidas, via nelas uma ponte entre o sistema métrico e o sistema anglo-americano baseado no pé inglês. (NEUFERT, 1977) O sistema duodecimal do pé e da polegada tão corrente e usual no ramo das construções, desde os mestres de obra até os operários, e o sistema de base sexagesimal para medidas comerciais de quantidades, mesmo conservando grande importância, não predominaram sobre o sistema decimal, entretanto, as referências para o estabelecimento dos sistemas de medidas sempre se pautaram pelas dimensões do corpo humano e das facilidades obtidas pela divisibilidade do sistema sexagesimal.

#### **4.2.3 Medidas nominais e medidas diretrizes**

Além de se referenciar às dimensões do corpo humano, as medidas nas construções devem ser equacionadas de maneira especial levando-se em consideração alguns preceitos: contrastando com a indústria de maquinários e das demais técnicas, a estrutura construtiva dos edifícios está condicionada geralmente ao uso de peças avulsas e repetidas que requerem uma ordenação superior e que obedecem ao conceito de séries aditivas. Assim, por exemplo, é necessário que os tijolos de alvenaria, os painéis de cimento e ou outros materiais usados em fechamentos ou partes construtivas de outra natureza qualquer, se ajustem de maneira que suas dimensões se encaixem segundo uma relação aditiva, permitindo ao fim uniformizar a espessura ou altura de seus componentes sem problemas de alinhamentos ou nivelamento. Deve-se para isso, prever as juntas e ou adaptações que farão a diferença entre as medidas estruturais do projeto e as dimensões nominais dos componentes. Desta maneira, as medidas diretrizes da obra, são na realidade medidas teóricas, mas constituem a base das medidas propostas e que representam na prática as ações a serem desenvolvidas no objeto projetado. São necessárias para a coordenação de todos os elementos construtivos. Pode-se nomear como

sistema modular as dimensões correspondentes às medidas diretrizes da obra, das quais se deduzem as medidas correspondentes aos submúltiplos das partes componentes.

Em contrapartida, medidas nominais, são as que deve ter cada um dos componentes e que em geral vêm especificadas nas normas e catálogos. Assim, ao escalonar do todo para as partes, deve-se levar em consideração as juntas ou espaçamentos necessários a cada componente, quer seja em função da margem de erro devido à não homogeneidade das peças, ou pela variação de suas dimensões em função das mudanças de temperatura, umidade do ar, ações do vento e outras cargas eventuais. Para definição desses sistemas numéricos pode-se utilizar um escalonamento que partiria das medidas nominais, chegando-se às medidas diretrizes, ou vice versa. É possível então optar por um escalonamento crescente ou decrescente de medidas e em cada caso torna-se necessário tecer considerações para se conseguir uma sucessão cadenciada de medidas. Além disso, é necessário que as dimensões dos elementos construtivos correspondam às condições de estabilidade tanto se tratando de madeira, aço ou concreto armado ou outros materiais.

Para as medidas nominais a indústria adotou progressivamente o sistema de base 60, que transportado para o sistema métrico ficou definido como 600mm. Como citado anteriormente, a facilidade de subdivisão que este sistema permite, possibilitou a utilização de medidas variáveis e inteiras dependendo do tipo de elemento a ser fabricado. Para o sistema de transporte, é possível uma melhor acomodação das peças pela modulação das carrocerias de seis ou doze metros. Para medidas diretrizes, Neufert, (1977) recomendando a série dos números normalizados, sugere a adoção do módulo 625 mm e seu próximo parceiro 624 mm (para que se providencie as folgas necessárias às junções dos componentes) inscrevendo-se ao escalonamento proposto pela série numérica convencionada.

Entretanto a divisibilidade não é o único critério a ser considerado no equacionamento dimensional de um projeto. No caso específico das coberturas, a declividade necessária ao escoamento das águas pode conduzir à utilização de planos inclinados ou mesmo encurvados. Muitas vezes devem prevalecer as relações proporcionais entre as partes para que se possa equacionar uma geometria adequada. Estas relações proporcionais estão submetidas a conceitos que se pode chamar de natureza “anatômica” das formas. São relações de natureza conceitual.

Quando a forma proposta se liberta dos rigores da geometria clássica, este equacionamento se torna mais complexo, necessitando principalmente de uma avaliação mais detalhada buscando-se a máxima homogeneidade. Quando são utilizados elementos curvos, o desenvolvimento dos componentes vai estar submetido a cálculos do âmbito da geometria diferencial. Tratando-se de componentes metálicos, deve-se recorrer à calandragem das peças. A curva poderá ainda ser geometrizada segundo linhas poligonais.

### **4.3 Linguagem modulada**

Desde os primeiros tempos da civilização, quando se construíram as primeiras pirâmides, até o século XIX, encontra-se nos diversos estilos uma ordenação mensurável entre as partes de uma obra. Entre os egípcios, tal como na arte românica e gótica, existiram relações geométricas bem manifestas das partes entre si. Também no estilo clássico adotou-se relações numéricas harmônicas como diretrizes para o dimensionamento das obras e que ao fim dos termos, concordam com as relações proporcionais das figuras geométricas fundamentais como o círculo, o quadrado, o triângulo equilátero, o pentágono, o retângulo áureo e outras.

A partir do século XVIII, a substituição do artesanato pela indústria padronizou as formas que antes, por razões técnicas, não podiam ser idênticas. A concepção das obras de arquitetura voltou-se para os aspectos da repetição e racionalização fundamentada em alguns conceitos como técnica, tecnologia, pré-fabricação, coordenação modular e design (desenho industrial). Em termos de economia moderna, um objeto só é viável se reproduzido em escala industrial. Estes conceitos estão de tal forma incorporados ao pensamento contemporâneo, que muitas vezes funcionam como paradigmas intocáveis.

É importante entretanto, refletir sobre a permanente evolução do pensamento da sociedade e dos esforços que progressivamente são feitos no sentido de estabelecer novos paradigmas para os espaços arquitetônicos. Com o advento da informática, assiste-se a superação dessa lógica reducionista. As novas tecnologias e os processos de manufatura utilizando processos digitais estão fazendo surgir uma nova indústria, em que a standardização deixa de ter tanta relevância. Para a arquitetura, tornou-se possível vislumbrar formas complexas através da grande evolução tecnológica na área da representação e que

começou a influenciar inicialmente o desenho dos objetos, mobiliários, veículos, etc. A utilização de programas de desenho para obter uma representação detalhada das formas, tornou possível idealizar objetos nunca antes equacionados. Também a pesquisa de novos materiais e elementos aplicáveis à construção, levou ao aprimoramento das tipologias construtivas, algumas trazendo possibilidades surpreendentes para concepções inovadoras. Um exemplo deste procedimento aplicado em projetos está na construção do Museu Guggenheim de Bilbao cuja forma embora complexa foi geometrizada por triangulação da superfície (Figura 4-1).

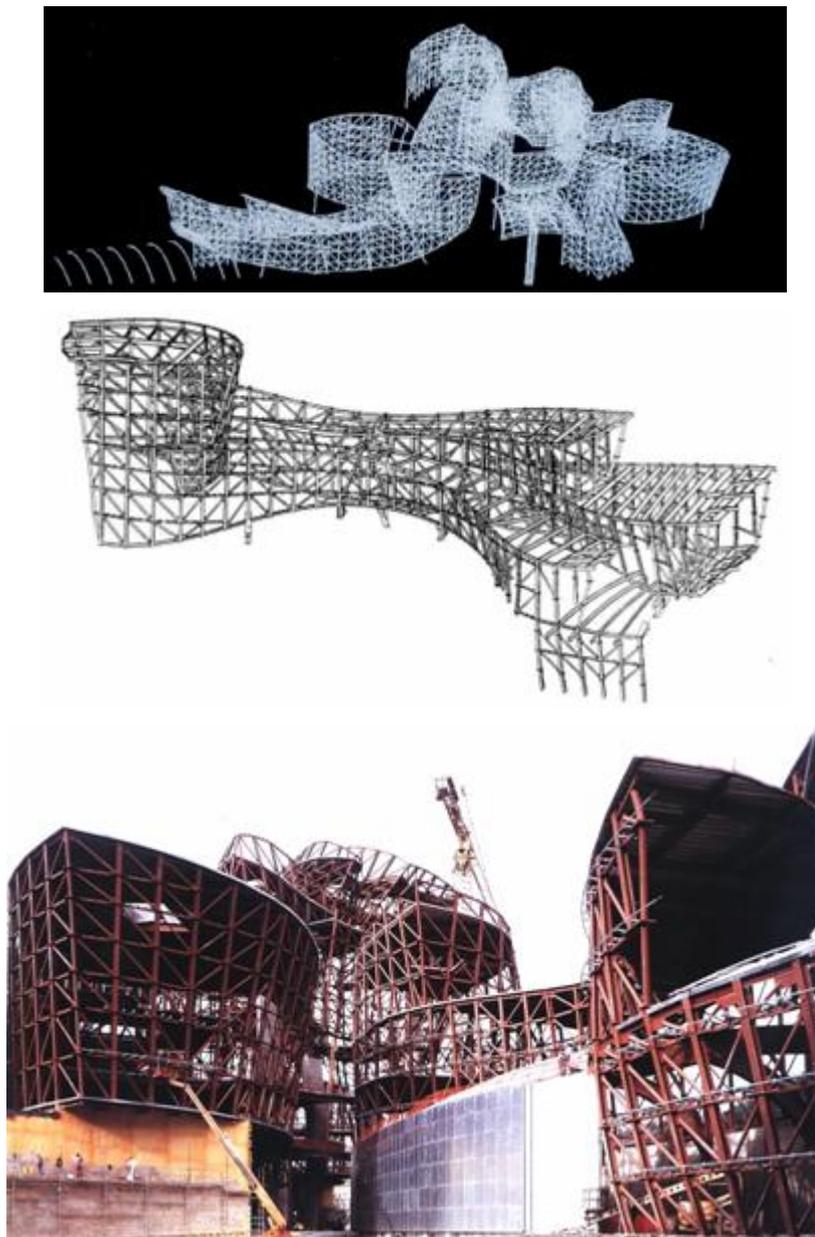


Figura 4-1 – Museu Guggenheim de Bilbao  
Fonte: LYALL, 2002

Deve-se entretanto cuidar para que não seja enfatizada a tecnologia apenas como geradora de imagem, pois se tratariam de manifestações de caráter epidérmico, o que se comprova pela observação de muitas importantes publicações de arquitetura. Isso demonstra uma nova ressurreição da crença na tecnologia, mas não aquela que sustenta o desenvolvimento do caráter científico aplicado às técnicas construtivas da arquitetura. A inventividade não pode se reduzir à riqueza de texturas e formas confiando ao computador e às imagens, o traço do arquiteto.

#### 4.3.1 Parametrização de formas

O equacionamento de formas deve inicialmente se referenciar a parâmetros geométricos. Para cada situação pode-se equacionar sistemas reticulares que possam subdividir cada elemento construtivo, utilizando-se como critério de obtenção da maior homogeneidade possível. Para ilustrar tal procedimento foram eleitas algumas formas modeladas, bi e tridimensionalmente, demonstrando-se um sentido de equacionamento que busca respeitar alinhamentos em sua superfície. No caso das superfícies curvas tratam-se de linhas geodésicas. Na Figura 4-2, pode-se observar diversos tipos de percurso descritos por uma linha através de diferentes superfícies.

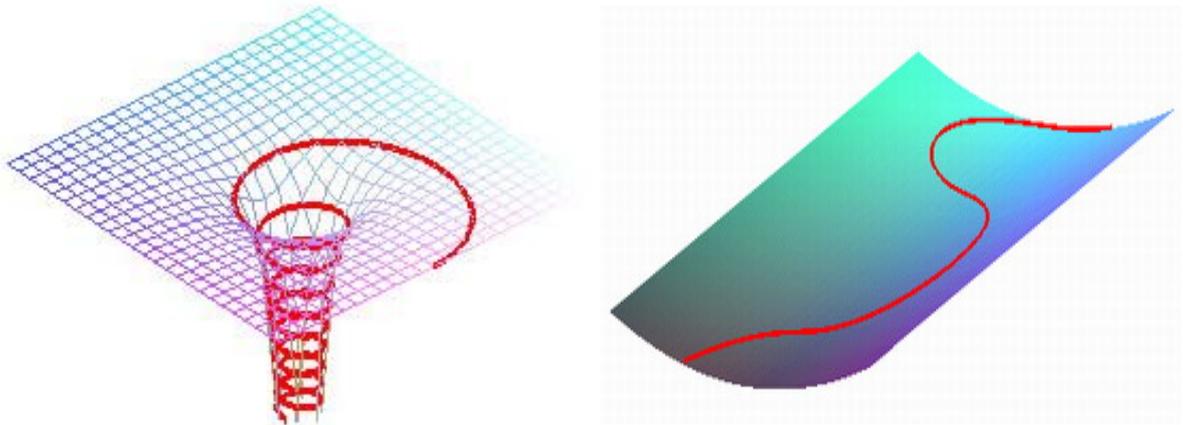


Figura 4-2 – Linhas de escoamento de uma superfície.  
Fonte: [Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke](http://Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke). 2004

Muitas vezes estas linhas podem descrever percursos totalmente aleatórios. Entretanto, quando buscam a menor distância entre dois pontos dessa superfície, são chamadas linhas

geodésicas. Quando se busca um sentido homogêneo de repartição em uma superfície, estas linhas devem descrever um percurso geodésico. (Figura 4-3)

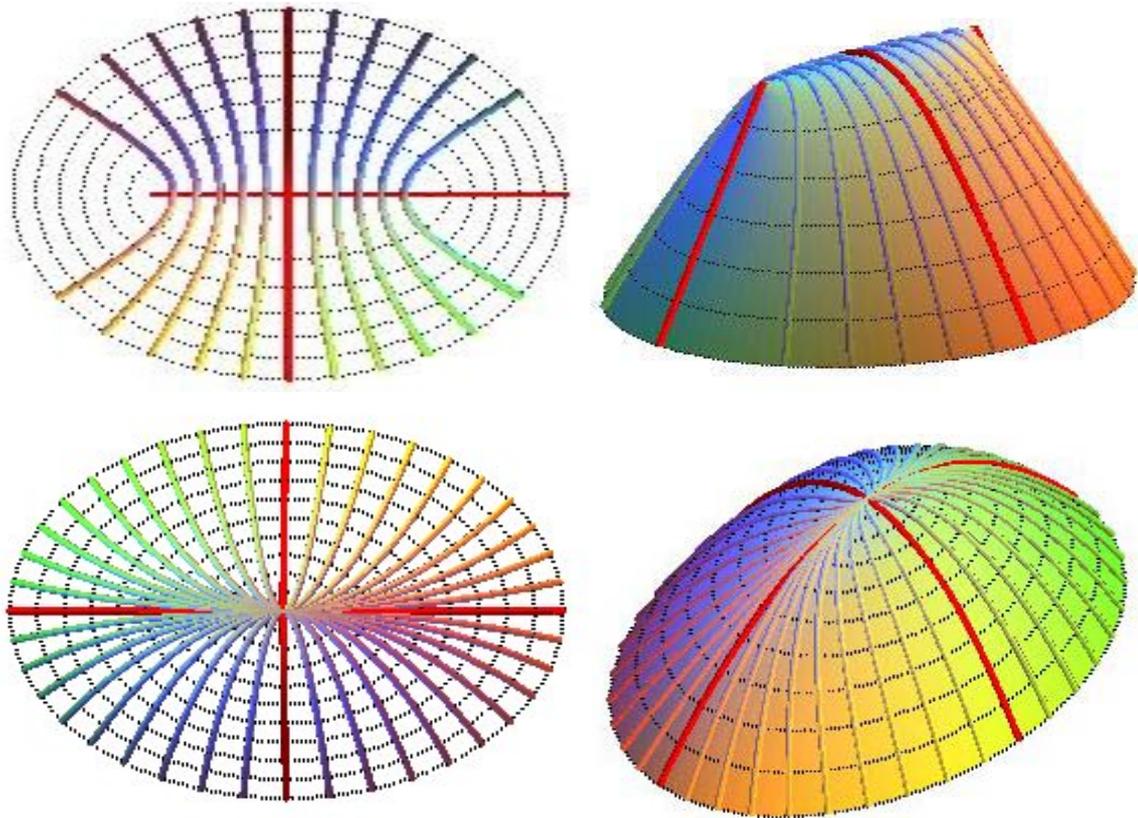


Figura 4-3 – Exemplos de repartição de superfícies segundo parâmetros cadenciados.  
Fonte: Incyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables. 2004

É comum ainda a utilização de fragmentos de formas seccionando-as através de planos de intercessão (Figura 4-4).

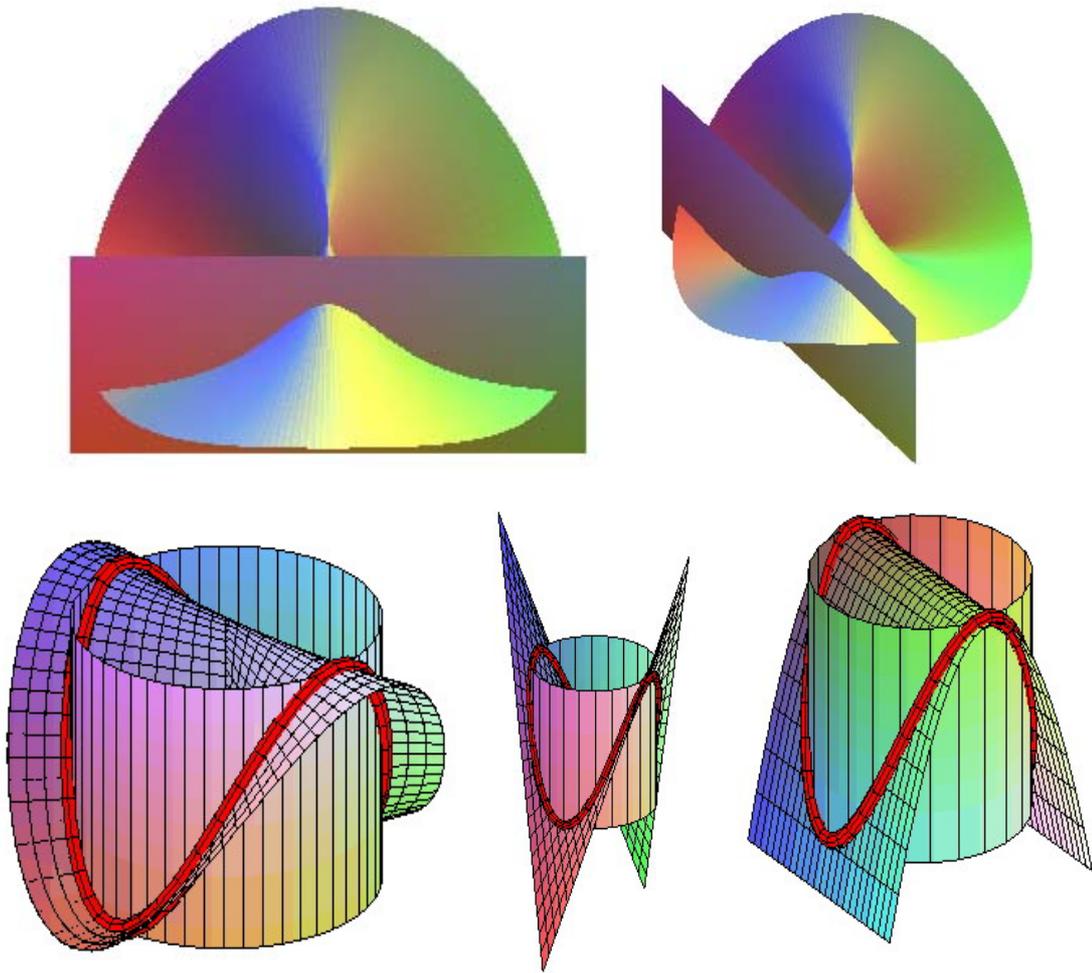


Figura 4-4 – Formas seccionadas por planos de interseção.  
Fonte: Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke. 2004

No caso específico das coberturas, pressupõe-se que tenham sempre um referencial ou suporte, tratando-se na maioria das vezes de um plano horizontal de projeção. Logo, geralmente podem ser classificadas como superfícies. Entretanto, quando ocorre a fragmentação de um elemento, deve-se estabelecer um sentido para ordenar esta interceptação. Decorrente disso, os elementos que compõem as partes da construção, seguiriam equações geométricas diferentes na delimitação do seu contorno (Figura 4-5).

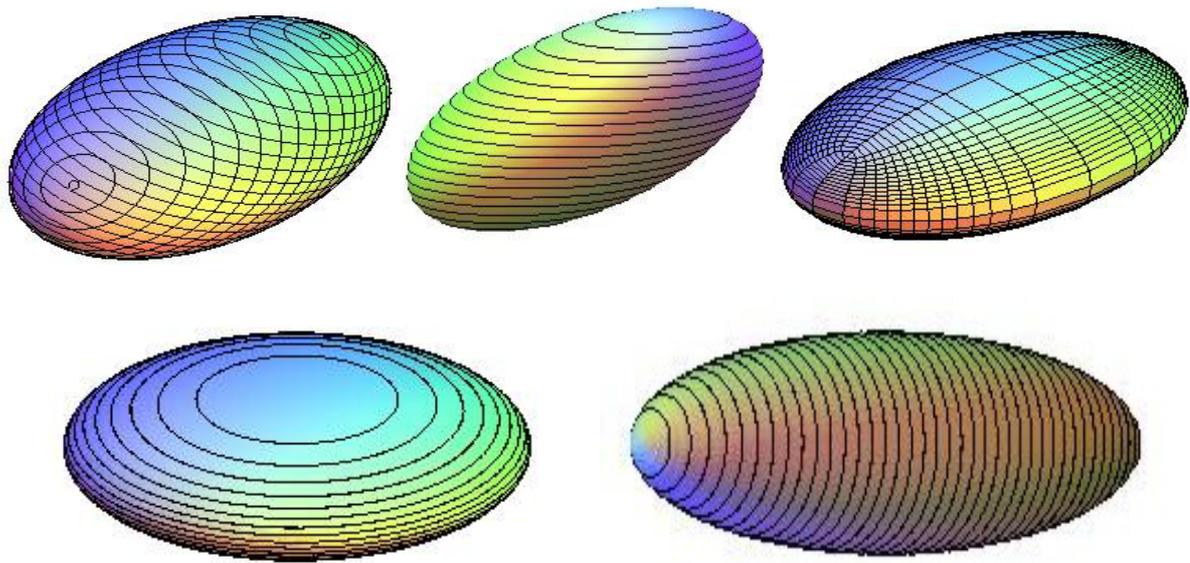


Figura 4-5 – Subdivisão de um ovóide, segundo diferentes alinhamentos.  
Fonte: Incyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables. 2004

Quando os planos de interseção são horizontais, definem alinhamentos denominados “de nível” e no caso das curvas, “curvas de nível”. Esta é uma maneira mais comum de se parametrizar formas tridimensionais, utilizadas inclusive para a descrição dos relevos em topografia (Figura 4-6).

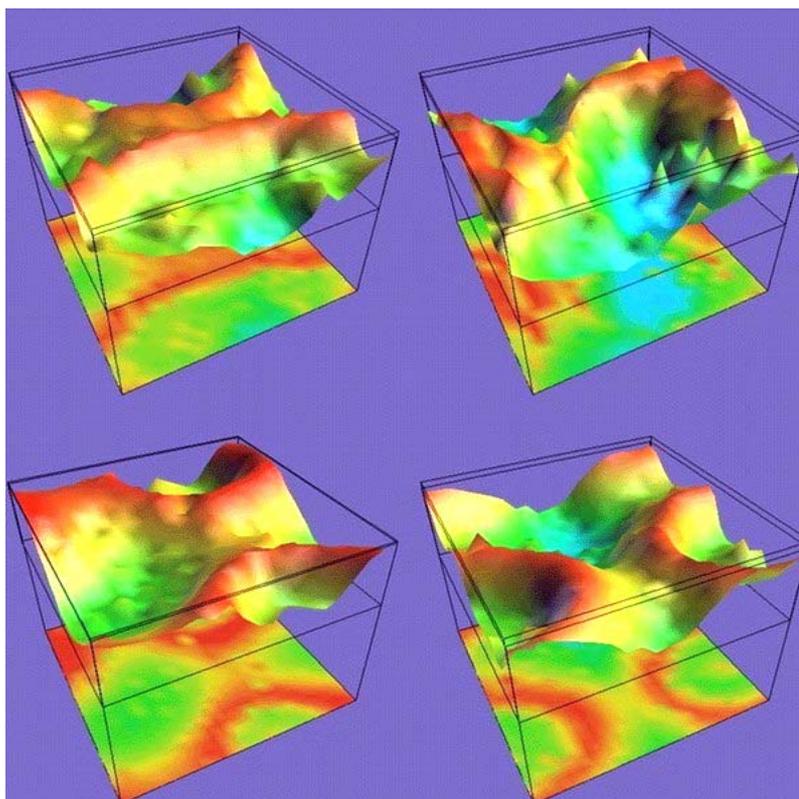


Figura 4-6 – Superfície topográfica.

Fonte: [Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke](http://Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke). 2004

Em projetos, aparecem muitas vezes linhas estruturais de composição que descrevem elementos específicos na solução do objeto, como por exemplo pórticos de entrada, elementos de conexão, ou envolvimento de uma superfície. Neste caso, muitas vezes devem ser equacionadas linhas especiais que representam as interseções. As interseções são elementos de maior importância, pois se responsabilizam pela adaptação entre as partes da construção. Demandam cuidados especiais e podem determinar o comportamento da estrutura. Quando duas superfícies curvas se interceptam, a linha de interseção é uma curva tridimensional. Nas estruturas tubulares, é comum o aparecimento de curvas tridimensionais equacionando suas interseções (Figura 4-7).



Figura 4-7 – Arquitetura de Cláudio Bernardes.

Fonte: BEIRÃO (1999).

Estas curvas foram ainda instintivamente modeladas nas construções empíricas de madeira roliça ou bambu (Figura 4-8).



Figura 4-8 – Encaixes de madeira roliça - Cláudio Bernardes.

Fonte: BEIRÃO (1999).

São inúmeras as situações em que se podem exemplificar estas interseções (Figura 4-9).

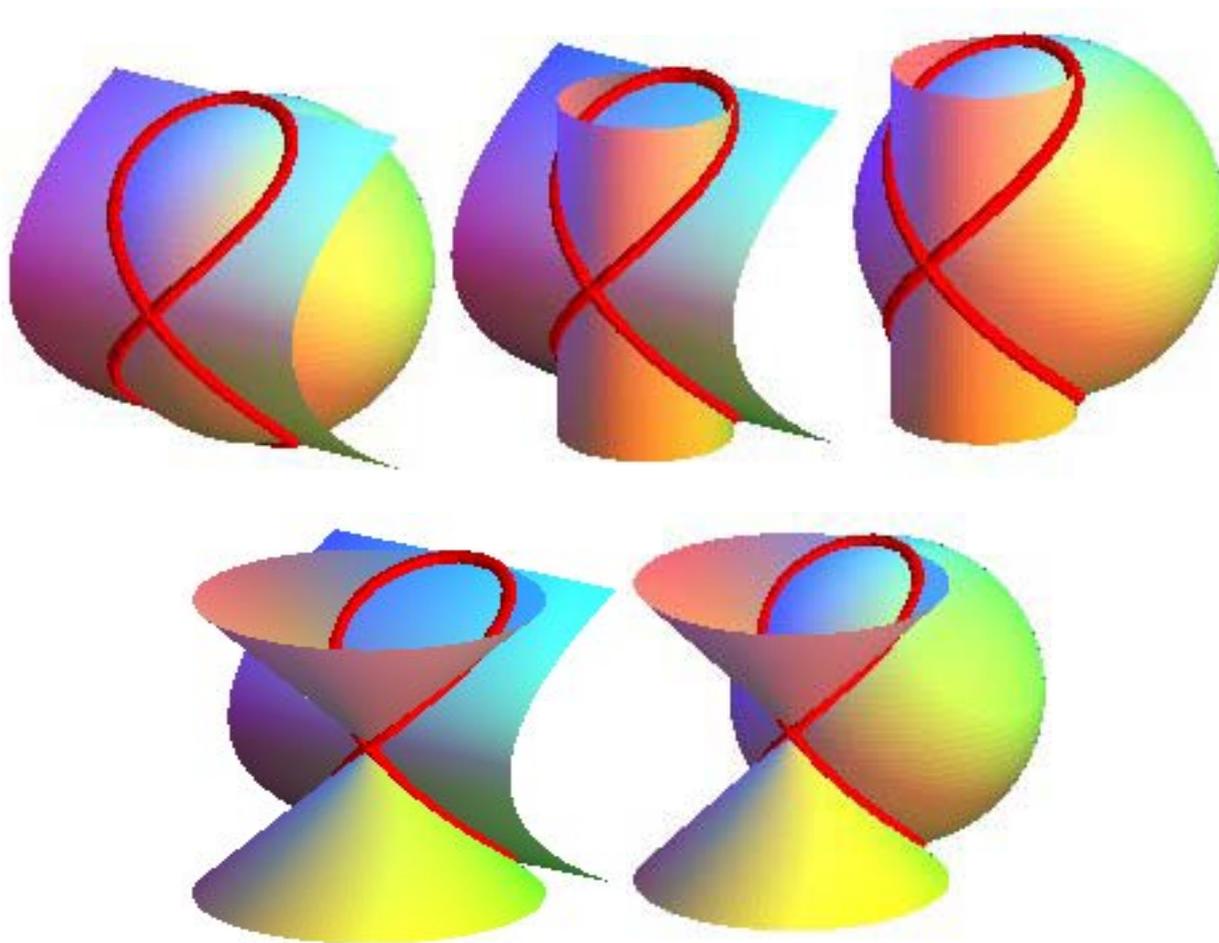


Figura 4-9 – Curva de Viviane.

Fonte: [Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke](http://Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke). 2004

Volumes, linhas e superfícies curvas podem ser equacionadas através de parâmetros geométricos. Este equacionamento só adquiriu total desenvoltura a partir dos estudos da geometria diferencial e da topologia. Este vasto e atraente repertório normalizado pelas equações matemáticas conduz à presença de uma relação entre estas entidades e o universo já vivenciado das formas naturais.

Para exemplificar relações entre a atitude espontânea de imitação presente na concepção de uma forma, pode-se citar algumas obras ou apenas idéias já utilizadas. Além de evidenciar esta relação mimética, pretende-se mostrar a possível representação destas formas através do seu equacionamento geométrico.

## 4.4 Análise de sistemas de modulação em projetos

### 4.4.1 Igreja Estância Árvore da Vida

A seguir apresenta-se o projeto da Igreja Estância Árvore da Vida de autoria do arquiteto Claudionor Beatrici. Construída em Sumaré, São Paulo.

Segundo Guilherme Mazza Dourado (2001):

“A proposta do arquiteto Claudionor Beatrici é a de um edifício desenhado como uma gigantesca concha que encerra um auditório com 9 mil lugares, sendo 5.500 situados na platéia e outros 3.500, no balcão.”... ..“O sistema estrutural combina pilares de concreto armado e estruturas espaciais metálicas curvas, imperceptíveis desde os exteriores”

A escolha dessa geometria natural se deu em razão de suas conotações simbólicas. A concha é o arquétipo do abrigo primordial, e das geometrias transcendentais que regem o cosmos e das conexões existentes entre o macrocosmos e o microcosmos. É um símbolo universal da energia vital da criação, mas não figura entre as principais simbologias da cristandade. Sua eleição demonstra a disposição dos autores em buscar formas transcendentais, mas sem se preocupar em manifestar por meio delas esta ou aquela expressão religiosa em particular. Por outro lado, a opção pela concha se deve a questões práticas. O formato semicircular possibilita uma interação direta entre o pregador e o fiel, fazendo com que grande parte da assembléia tenha pleno contato visual com o púlpito central.

Os primeiros estudos para armar a casca previam a adoção de arcos metálicos convencionais, desenhados segundo a espiral logarítmica que se origina do retângulo áureo e a série de Fibonacci, que reproduz os padrões de crescimento orgânico. Os arcos foram inicialmente idealizados para serem executados em perfis **I** de alma cheia e calandrados, apresentando dimensões variáveis, buscando-se uma configuração geométrica perfeita da concha. No entanto, uma avaliação preliminar dos custos de produção apontou que a solução seria economicamente inviável, determinando que se pesquisasse outros sistemas. A proposta síntese foi uma combinação de pilares de concreto armado na região de apoio da cobertura e a substituição das vigas metálicas em perfil **I** por estruturas espaciais metálicas curvas, vencendo vãos médios de 72 m (Figura 4-10).

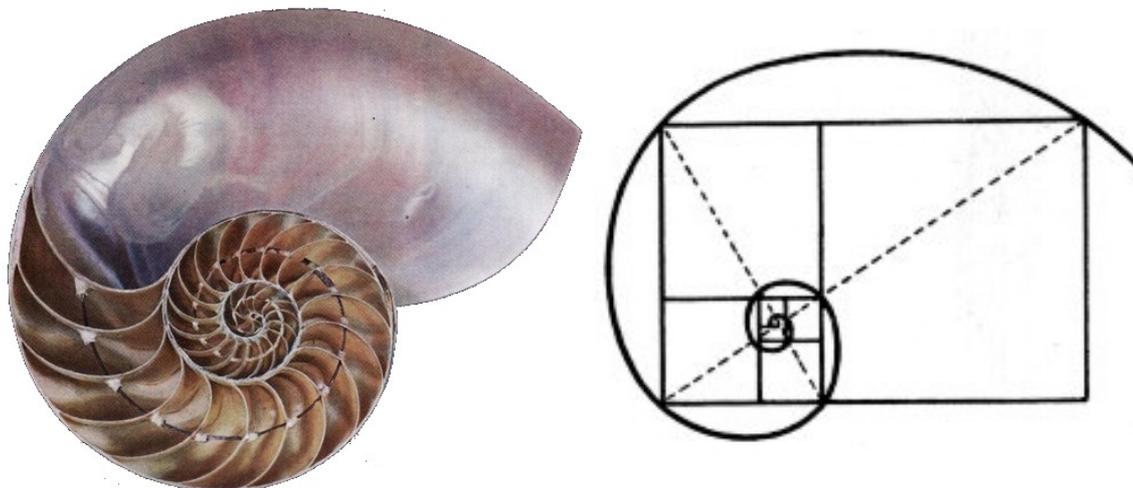


Figura 4-10 – Espiral Logarítmica.  
Fotografia - Fonte: BERGAMINI (1964).  
Espiral e retângulo Áureo. Fonte: GHYKA (1953).

Vale registrar que foi necessário o desenvolvimento de modelos matemáticos especiais para o estudo e o cálculo da estrutura com o auxílio de programas de informática. O projeto executivo da estrutura compreendeu nada menos do que 2 mil pranchas, tamanha a quantidade de componentes envolvidos.

Normalmente, quando se trabalha com estruturas espaciais planas, projeta-se um pequeno e restrito elenco de componentes padronizados e seriados para otimizar a industrialização e montagem. Mas em soluções não ortogonais, isso não se aplica. Foram desenhados 1.211 tipos de nós e 2.302 tipos de barras tubulares, todos em aço, determinando um sistema altamente complexo para usinagem e execução em canteiro. Obviamente, os processos de produção acabaram sendo mais artesanais que industriais, com as peças sendo geradas uma a uma a partir de gabaritos individuais, com mínimas repetições. Mesmo assim houve vantagens decisivas. Com a passagem do sistema metálico convencional para a estrutura espacial curva, reduziu-se drasticamente a previsão de metal a ser empregado e em grandes coberturas isso faz a diferença. Foram utilizados 252 mil kg de aço.

Além das barras tubulares variarem de comprimento, também apresentavam seções de espessuras diferentes. Na base da casca, recebiam cargas maiores demandando barras de 219 mm de seção e 5 mm de espessura. Na parte alta, os pesos eram menores demandando barras de 76 mm de seção e 2 mm de espessura.

A organização do canteiro, com as áreas de estocagem das peças, e a montagem foram operações igualmente trabalhosas. As barras e os nós tiveram que ser distribuídos em grandes áreas, agrupadas segundo seu parentesco, ou melhor, as peças que integravam determinado arco ficavam próximas.

A montagem se fez com 100 operários no total, partindo do centro para as bordas da estrutura. Por questão de segurança e rapidez, os arcos foram sendo armados no solo. Depois foram içados por guindastes e solidarizados uns aos outros pela adição de mais barras (Figura 4-11 e Figura 4-12).

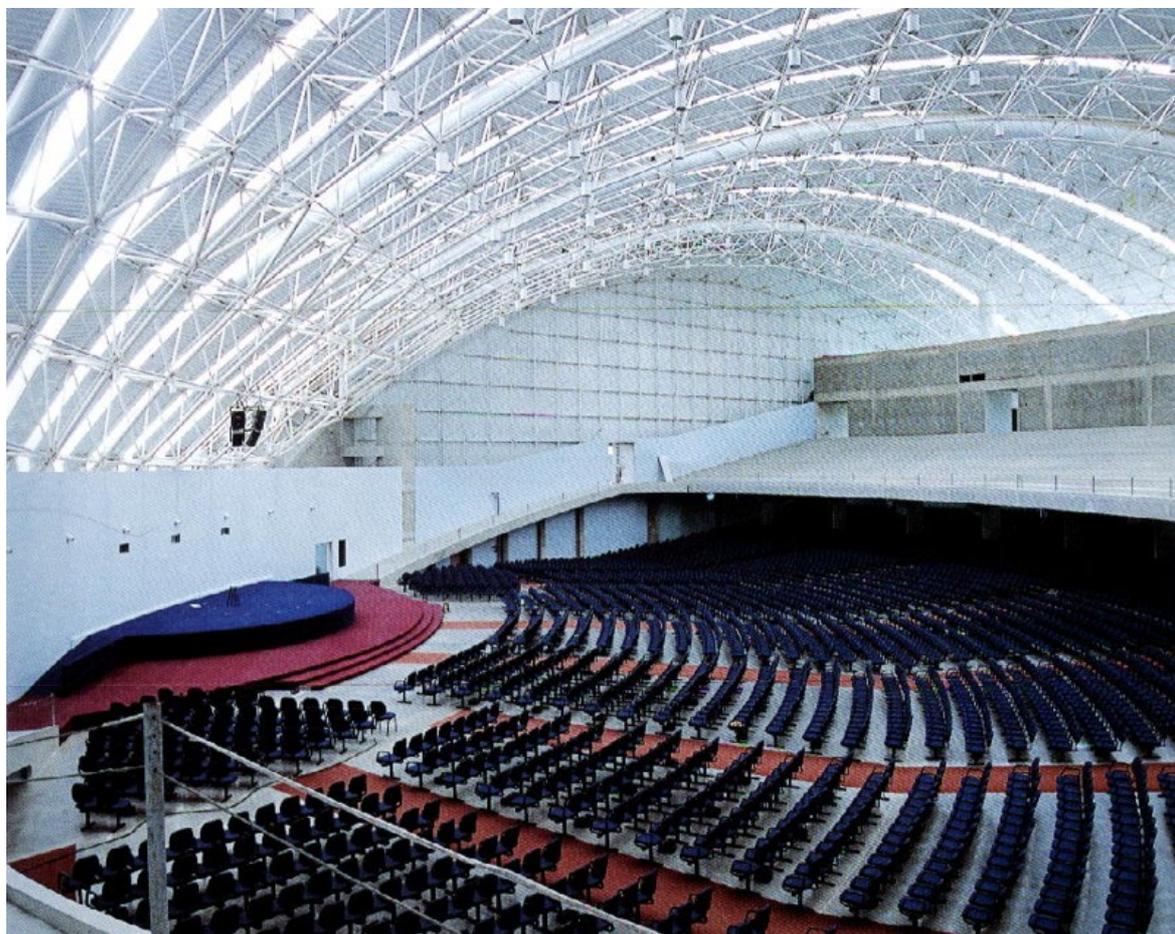


Figura 4-11 - Imagens da Estância Arvore da Vida.

Fonte: FINESTRA nº 26 jul/set 2000

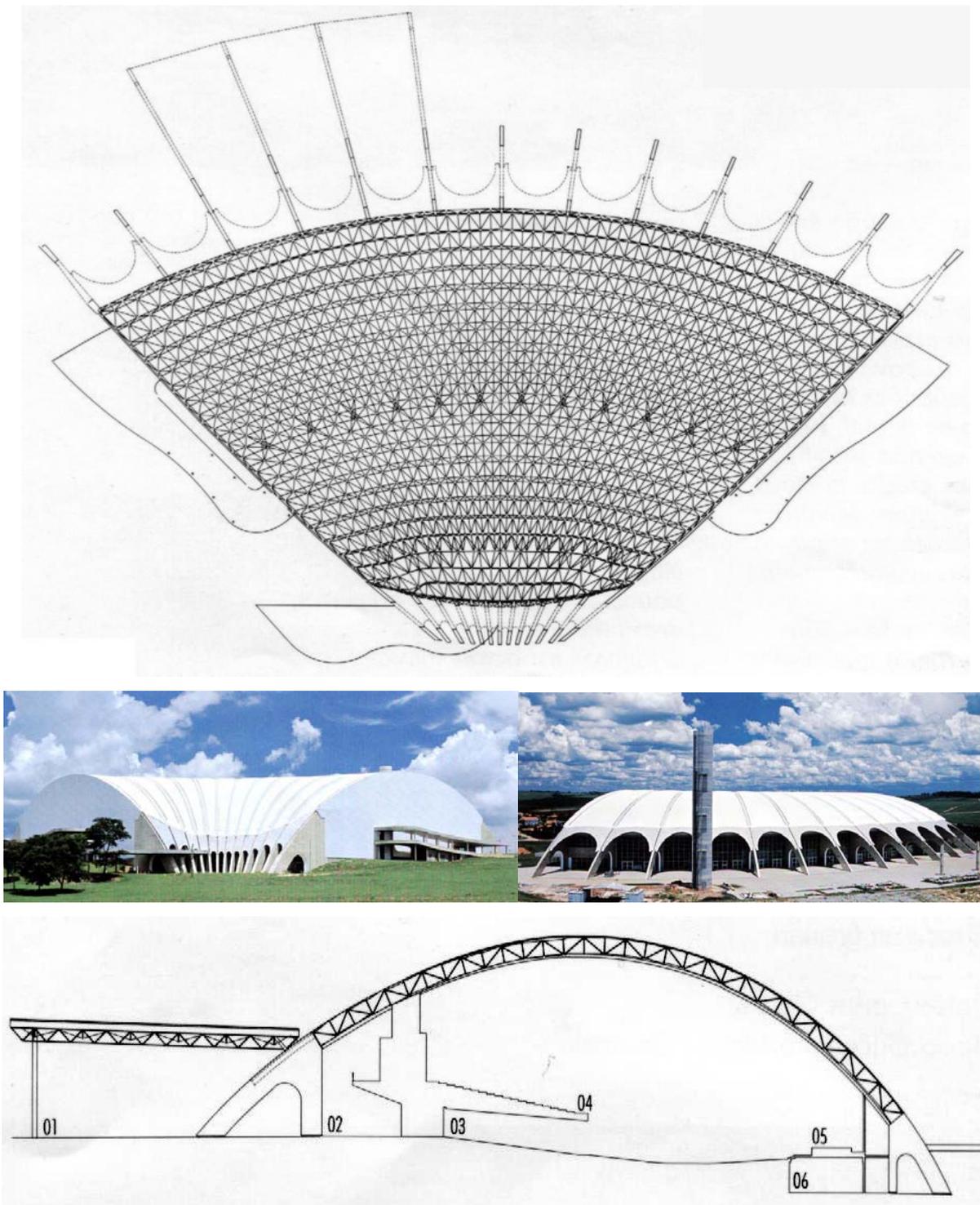


Figura 4-12 - Imagens da Estância Arvore da Vida.

Fonte: FINESTRA nº 26 jul/set 2000

#### 4.4.2 Ginásio infantil do Hospital Sara Lago Norte.

Como segundo exemplo apresenta-se o projeto do arquiteto João Filgueiras Lima Lelé, que é o ginásio infantil do Hospital Sara no Lago Norte em Brasília. Situado sobre um platô na parte mais elevada do terreno, 10 m acima do nível do lago e no vértice do terreno, o ginásio infantil ou escolinha para excepcionais faz parte dos cinco conjuntos de edificações horizontalizadas e distintas entre si pelas atividades de ocupação e pela tipologia de suas coberturas. Trata-se de uma edificação singular, semelhante ao espaço lúdico propiciado pela cobertura de um circo, com planta circular de 52 m de diâmetro. Os espaços internos se distribuem pela periferia, e os acessos se voltam para uma ampla área central onde está localizada a piscina. Esta área é delimitada por painéis à meia altura e encimada por uma grande clarabóia com fechamento em material translúcido.

A estrutura é composta por 56 vigas radiais concêntricas conformadas segundo um arco de dupla curvatura que fazem entre si ângulos de  $6,4286^\circ$ . Esta viga é uma treliça de altura variável e nas extremidades assume a configuração típica de uma viga de alma cheia, formada por chapa maciça. Os banzos, superior e inferior, são também constituídos por chapas maciças calandradas. As vigas se apóiam na parte superior, em um anel central de compressão constituído em chapa calandrada com 2.310 mm de diâmetro e 1.072 mm de altura, provido de mísulas de apoio. Na parte inferior apóiam-se diretamente sobre bases individuais, com inserts metálicos embutidos no concreto. Sobre as vigas, arrimam-se as terças de apoio das telhas de cobertura.

O volume da cobertura pode ser descrito pela revolução de uma linha de curvatura reversa, originando uma superfície e se exprime segundo contorcimentos de um tronco de cone ou de uma “pseudo-esfera” lembrando ainda a conformação de uma oca indígena. (Figura 3.56).

A mesma concepção deste projeto foi utilizada em outras propostas do mesmo autor, tal como o pavilhão dos cartórios do tribunal regional eleitoral da Bahia onde a edificação possui dois pavimentos, variando apenas em alguns detalhes como o sistema de apoio periférico e a dimensão do diâmetro. Foi proposta ainda em estudo preliminar e desta vez com 32 m de diâmetro, para a fundação Darcy Ribeiro para ser edificada nas margens do lago em Brasília, e carinhosamente apelidada “beijódromo” por prever um jardim central com o

objetivo de atrair beija-flores. Em todos os casos foi prevista uma forma de exaustão central do ar.

A utilização de uma mesma forma em situações diversificadas, demonstra que pode ser conceituada como uma tipologia construtiva, muitas vezes utilizadas em coberturas onde se pressupõe apenas um grande vão para ser utilizado em múltiplas situações. Neste caso, as possíveis repartições internas funcionam independentes da cobertura. Em todos os casos a viga radial foi equacionada segundo um plano vertical de altura variável e sua maior dimensão correspondendo ao centro da viga (onde as cargas adquirem maior concentração) (Figura 4-13 e Figura 4-14).

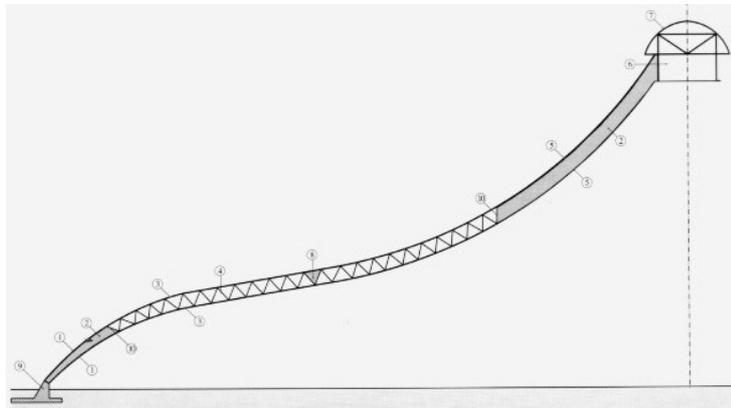
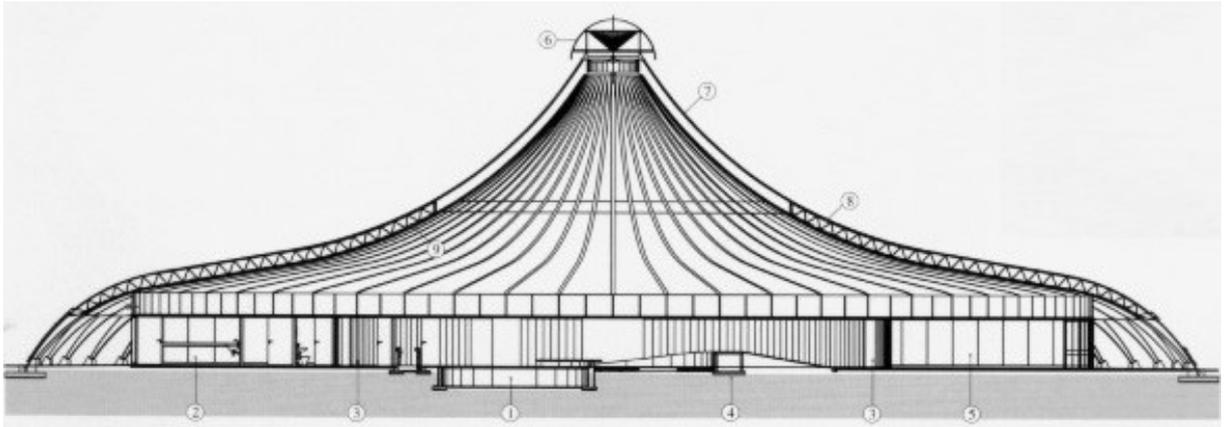


Figura 4-13 – Seção da estrutura, detalhe da viga e vista aérea do conjunto.  
Fonte: MATTOS (2001).



Figura 4-14 – Montagem da estrutura.  
Fonte: MATTOS (2001).

Para fazer uma transposição desta tipologia formal para um sistema tubular de cobertura em treliças, foi proposto um estudo em parceria com o arquiteto Eduardo Castanheira, onde a viga radial, praticamente o único elemento construtivo a ser equacionado para a concepção do projeto, foi detalhada com uma seção triangular, onde o banzo inferior constituía um elemento axial contido em um plano vertical e o banzo superior, constituído por dois tubos, descreviam curvas divergentes. No sentido longitudinal, o centro da viga apresentava maior altura tal qual o procedimento adotado no exemplo anterior. (Figura 4-15).

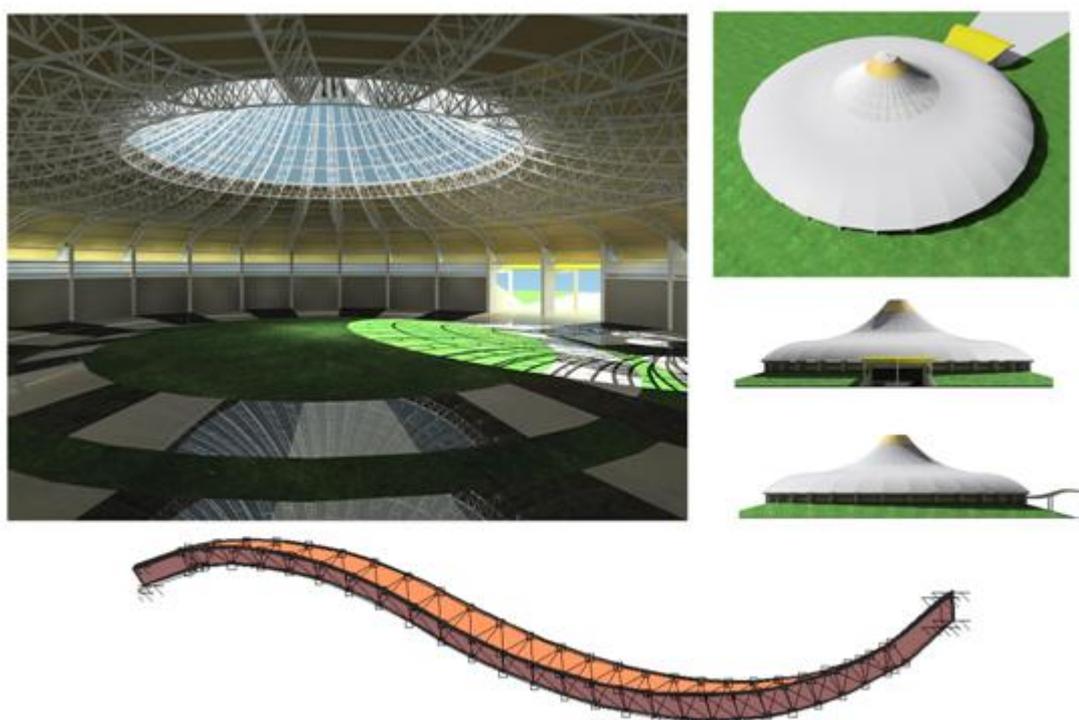


Figura 4-15 – Proposta de estrutura usando viga treliçada tubular

O diâmetro proposto foi de 33 m e a planta subdividia radialmente em 30 partes iguais. Para utilização do local foi proposta uma estufa, onde o espaço central constituía viveiro de mudas, com cobertura translúcida e espaços periféricos destinados à comercialização de flores, acessados por um anel de circulação. A planta de forma circular foi geometrizada na cobertura segundo um contorno poligonal, evitando-se assim o equacionamento construtivo de uma superfície de dupla curvatura. Foi importante perceber que, apesar da superfície da cobertura apresentar arestas e o seu contorno em planta ser uma linha poligonal, portanto delimitada por linhas retas, a percepção do volume é a de uma curva perfeita. Entretanto, a viga espacial proposta adquiriu uma conformação tortuosa de difícil equacionamento geométrico, pois os banzos superiores descreviam curvas cujos centros não estariam situados

no mesmo plano de sua curvatura, necessitando de equipamentos mais sofisticados para a execução de sua calandragem. Não se trata, mesmo assim, de uma concepção inviável, mas sim de um custo mais elevado. Equacionar o objeto geometricamente, proporcionou uma experiência bastante rica.

#### **4.4.3 Reconstrução do Grande Teatro do Palácio das Artes**

Como um outro exemplo, apresenta-se o projeto de reconstrução do Grande Teatro do Palácio das Artes de Belo Horizonte dos arquitetos Hilda Cotegipe Pellico, Lizandro Melo Franco, Roberto Marçolla Lott e Rubem Sá Fortes.

Após o incêndio ocorrido em 1997, iniciaram-se as ações no sentido da reconstrução do grande teatro do Palácio das Artes em Belo Horizonte. O processo de reconstrução teve como características a complexidade inicial de uma sala de espetáculos deste porte, acrescida dos condicionantes que os elementos remanescentes da estrutura preexistente impuseram. Tratava-se de um trabalho de reconstrução de um espaço com volumetria previamente definida e com mínimas condições de ser alterada externamente. Por isso, a concepção desta cobertura fundamenta-se em um conceito relativamente inusitado uma vez que suas características geométricas foram definidas pelas necessidades do espaço interno como é próprio de um teatro. Em justaposição a este quadro cabe mencionar o valor simbólico que o teatro conquistou junto à população de Belo Horizonte. O objetivo foi então compatibilizar estes múltiplos condicionantes e propondo ao mesmo tempo uma feição atual mantendo certas características que não o afastassem da imagem que a população retinha da sua ambientação interna. Uma análise detalhada do espaço constituído anteriormente, levou à detecção de características deficitárias do teatro que foram encaradas como elementos que se procuraria alterar. A mais relevante destas alterações foi o volume da caixa de ressonância formada pela sala.

Todo o processo de elaboração do projeto arquitetônico iniciou-se com a definição da cobertura que reporia a estrutura metálica destruída pelo fogo. Pelo fato de se buscar o aumento do volume interno do teatro e conciliar a necessidade de passarelas para manutenção dos sistemas de iluminação e outros equipamentos do supra-teto, optou-se pela utilização de tesouras metálicas, cujas linhas sustentassem estes elementos.

Entre os aspectos considerados, o que mais introduziu alterações e definiu materiais, foi o cálculo das características acústicas que a sala deveria ter. Inicialmente, constatou-se que o teatro apresentava deficiências de audição para os espectadores que ocupassem as filas posteriores, seja da platéia como do balcão. Os espetáculos que utilizavam a fala como meio de expressão tinham a acústica prejudicada pelo pouco tempo de reverberação característico do ambiente. Para melhorar as características acústicas do ambiente foi sugerida a utilização de elementos convexos que possibilitassem melhor dispersão do som no ambiente.

O elemento fundamental, suporte de tantos sistemas vitais para o funcionamento adequado do ambiente é portanto o forro, que mantém ocultos da visão do usuário, dutos de ventilação, regulação acústica e combate a incêndios, além de diversas passarelas. Dentro da linha estética que se objetivou imprimir ao teatro, a opção recaiu para a chapa de aço oxidado. Este forro é formado por três seções convexas paralelas à boca-de-cena, em correspondência às paredes luminosas laterais, compostas por placas translúcidas e dispostas lado a lado. Existe ainda uma quarta seção deste forro, na parte posterior e sobre o balcão, onde as placas são perfuradas em atendimento às necessidades apontadas pelo projeto acústico e de onde se originam os pontos de iluminação desta área, além de permitir a passagem do ar refrigerado.

A parte frontal do ambiente foi a que mais teve suas características espaciais alteradas. As paredes laterais ao proscênio se configuram agora como elementos marcantes na ambientação do teatro, moldura que direciona a visão do espectador para a cena, formando um pórtico perspectivado em continuidade com o forro, ambos em curvas suaves, revestidas por folhas de cobre texturizado, definindo o foco do ambiente e lhe conferindo nobreza e destaque.

As tesouras, principais elementos estruturais, foram projetadas com todas as barras parafusadas e com peso próprio que não excederam a mil quilos. Puderam assim, ser içadas por guias com essa capacidade e como matéria prima, foram utilizados perfis laminados. Para instalação das tesouras foi montado um cimbramento tubular com um piso em toda a área da platéia a 12 m de altura proporcionando a montagem como se estivesse sendo executadas ao nível do piso. Os forros metálicos modulados e reguláveis em aço Sac-41, foram idealizados com faces aparentes jateadas para que ao longo do tempo, adquirissem a tonalidade característica da pátina desse tipo de aço. O pórtico do palco, que serve também como torre de

sustentação de um forro móvel na boca de cena, tem 24 m de vão livre, 8 m de altura e foi construído com treliças tubulares. As tesouras vencem vãos, variáveis de até 46 m e altura até 6 m, para resistirem a cargas permanentes de 212 kgf/m<sup>2</sup> e mais sobrecarga de 25 kgf/m<sup>2</sup>, além do peso próprio. Sustentam ainda sete passarelas transversais e longitudinais para manutenção e trabalhos durante os espetáculos, com sobrecargas de 150 kgf/m<sup>2</sup>. Os cálculos indicaram um peso total de 10.800 kgf para a tesoura de maiores dimensões. O peso total da cobertura da platéia é de 140 toneladas para uma área de 1500 m<sup>2</sup> (Figura 4-16, Figura 4-17, Figura 4-18 e Figura 4-19).



Figura 4-16 – Imagens do Palácio das Artes após incêndio

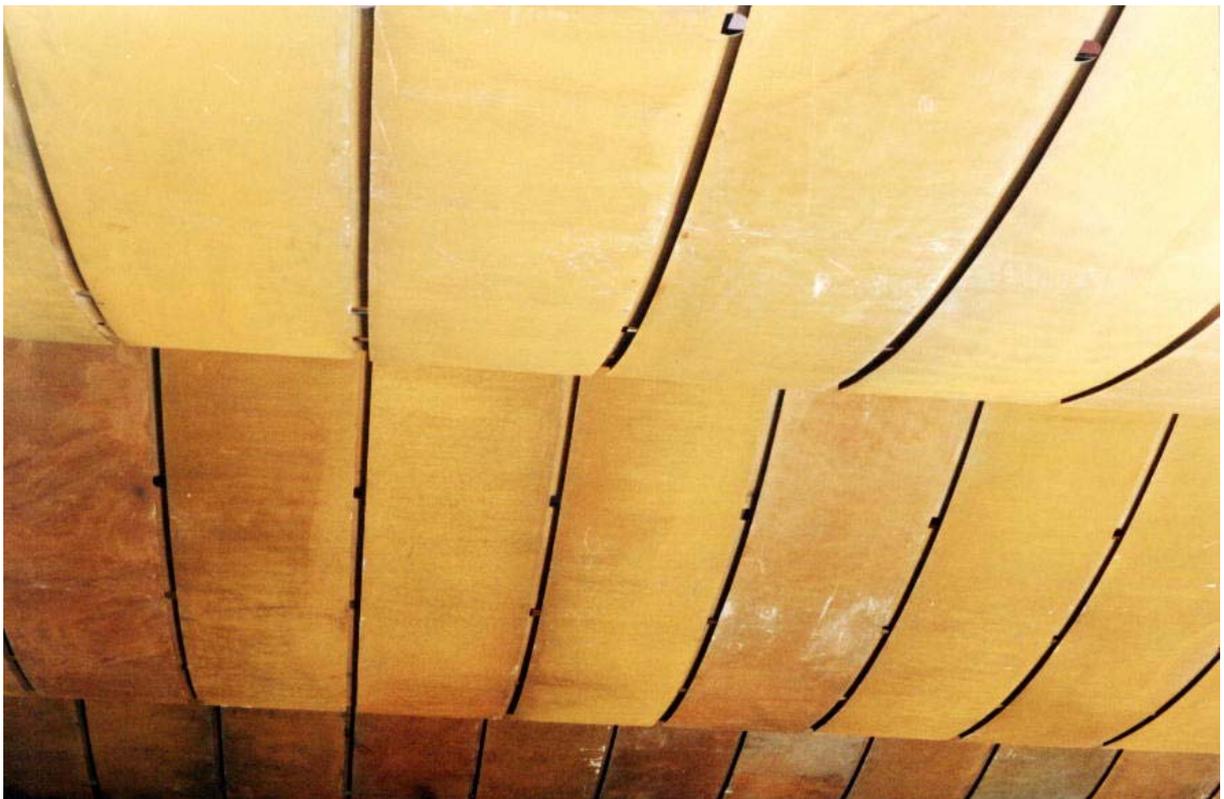


Figura 4-17 – Imagens do Palácio das Artes durante obra

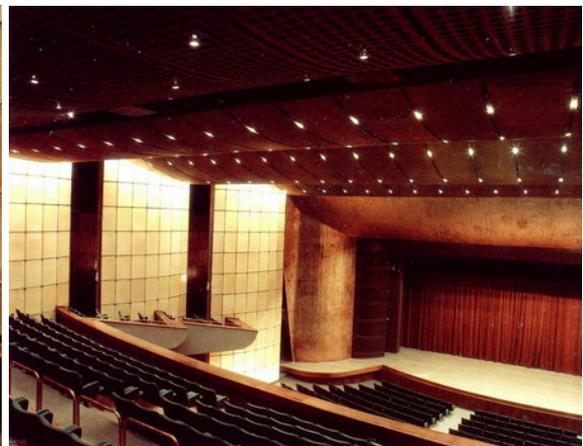
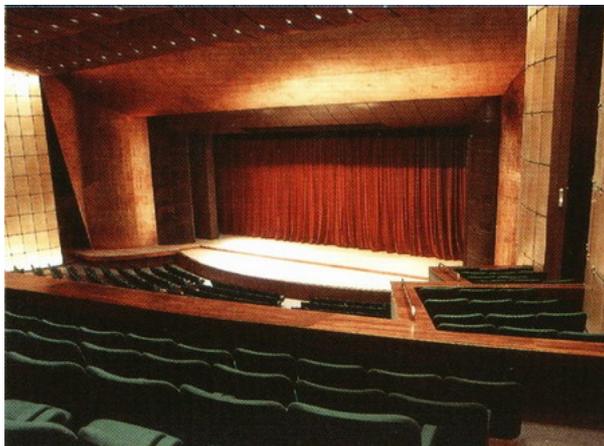


Figura 4-18 – Imagens do Palácio das Artes após reconstrução

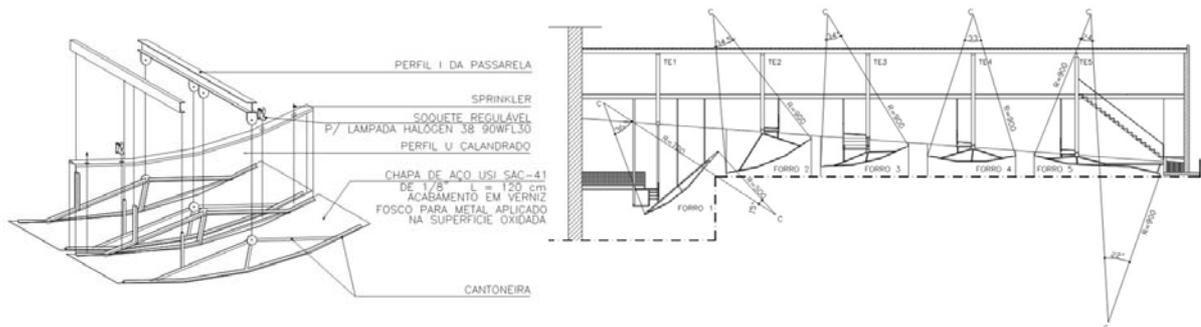
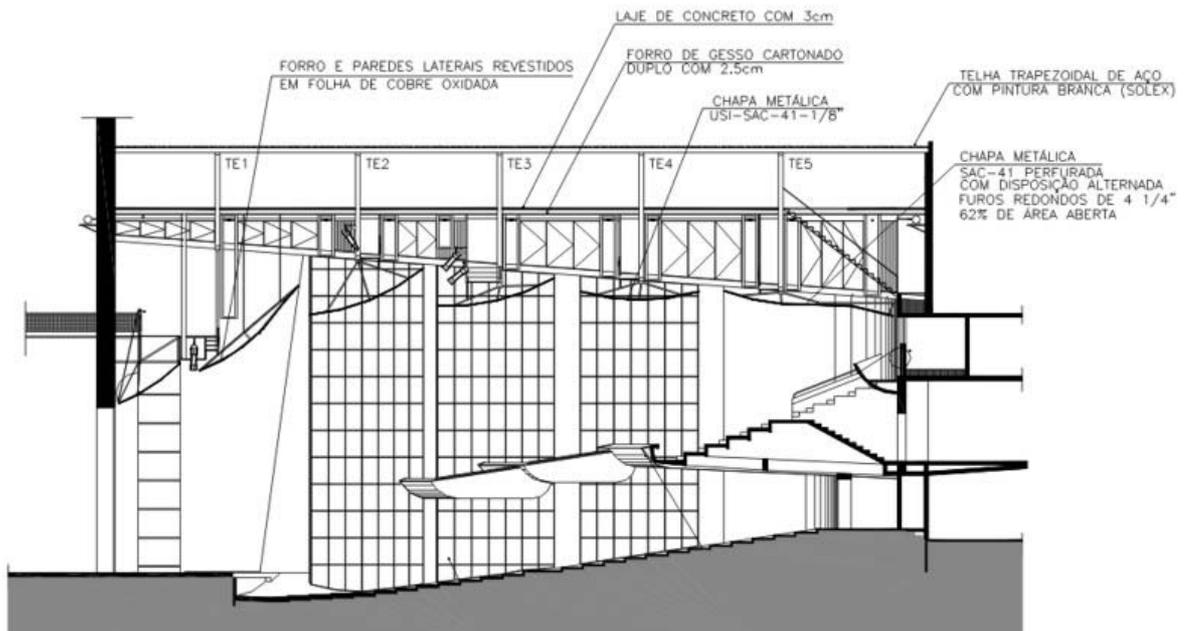
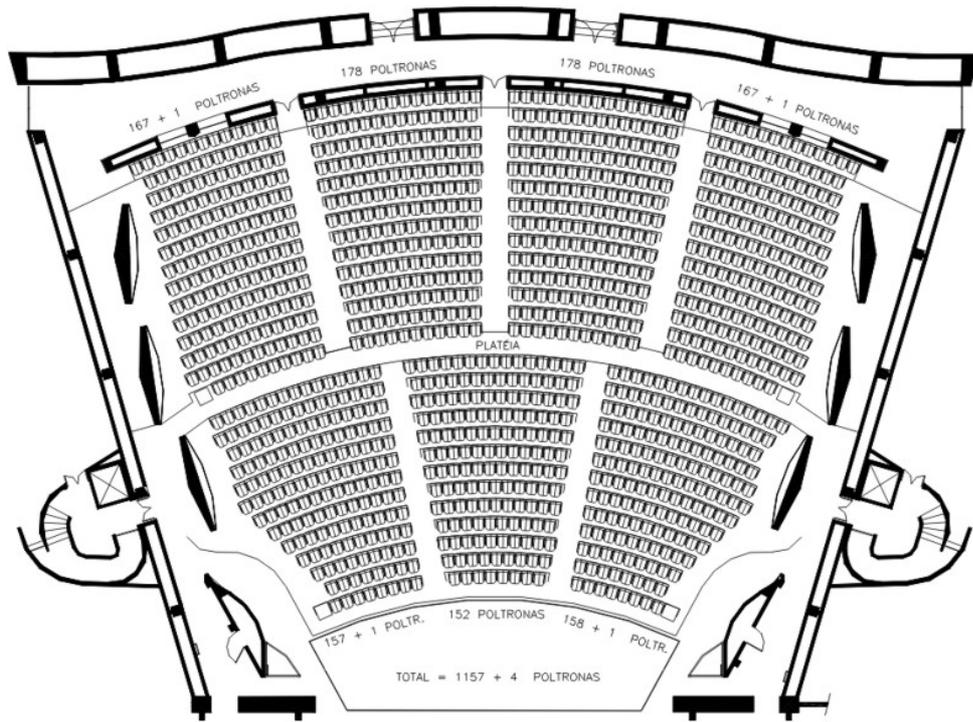


Figura 4-19 - - Projeto arquitetônico do Palácio da Artes

Tratando-se de um ambiente a ser projetado mas com dimensões já definidas, o sistema modular utilizado optou pela constituição de juntas onde se poderia adaptar as dimensões dos componentes do teto, ao dimensionamento característico das chapas metálicas. Os módulos propostos foram solidarizados através de junções em perfis C calandrados onde foram propostas perfurações por onde permeia a iluminação da platéia. Estas junções entre os módulos receberam pontos de solda na parte posterior das chapas evitando assim a possibilidade de se tornarem visíveis para a platéia. Como as chapas não receberam cortes posteriores à fabricação, mantiveram arestas perfeitas. Com sua espessura de 3 mm, permitem que se caminhe sobre elas permitindo os trabalhos de manutenção dos equipamentos situados sobre o teto, incluindo a iluminação. Nas interseções com as paredes laterais foram previstas juntas para evitar problemas de adaptação devido a prováveis imperfeições nas dimensões do espaço já constituído.

## CAPÍTULO V

### 5 MODELOS RETICULARES

Neste capítulo, estudam-se modelos reticulares de resolução geométrica, equacionados em sistemas bi e tridimensionais. Trata-se ainda dos principais tipos de ligação por serem determinantes na geometria e proporção dos sistemas construtivos. Exemplifica-se com o estudo do projeto em execução do Centro Nacional de Natação da vila olímpica das Olimpíadas de 2008, em Pequim, com final previsto para o final de 2006. Para percorrer este caminho, deve-se começar pelos reticulados bidimensionais.

#### 5.1 Reticulados descritos em um plano

Entre as maneiras de se equacionar formas, a mais utilizada é a constituição de sistemas reticulares. Na natureza também são inúmeros os exemplos de utilização destes modelos. Quando estas repartições têm formas variadas esses arranjos acontecerão de diversas maneiras, já que as tramas aleatórias são infinitas. As mais interessantes entretanto, são as organizações repetitivas ou seja, que seguem regras de formação e por isso têm uma estrutura analisável. Por outro lado, linguagem e ritmo estáticos nem sempre são satisfatórios como meio de expressão em arquitetura. Portanto deve-se buscar alternativas para que estes sistemas reticulares possam adquirir uma dinâmica, ou seja, uma alternância de parâmetros. Pode-se por exemplo, estabelecer um sistema de feixes paralelos, mas sem adotar uma repetição recorrente das medidas utilizadas. A organização de sistemas reticulares pode ser equacionada a partir de sistemas de base ortogonal em obediência aos sistemas convencionais de representação, mas seu conceito geométrico de ordenação baseia-se na classificação dos seus tipos de nós.

Situando-se inicialmente em um plano, pode-se eleger alguns pontos e interligá-los através de segmentos de retas. Os espaços abertos entre eles tomam a forma de polígonos planos. Cada ponto da trama onde se encontram os lados, chama-se nó. Quanto maior número de polígonos houver em torno de um nó (portanto, menor a área de cada polígono), mais densa será a trama. Para que se tenha uma trama regular, as formas que completam um nó deverão ser polígonos regulares.

A análise da quantidade de possíveis malhas formadas com polígonos regulares baseia-se no teorema que afirma que “num polígono regular de n lados o ângulo interno do vértice é igual a  $180^\circ (n-2)/n$  em graus”.(SÁ, 1982)

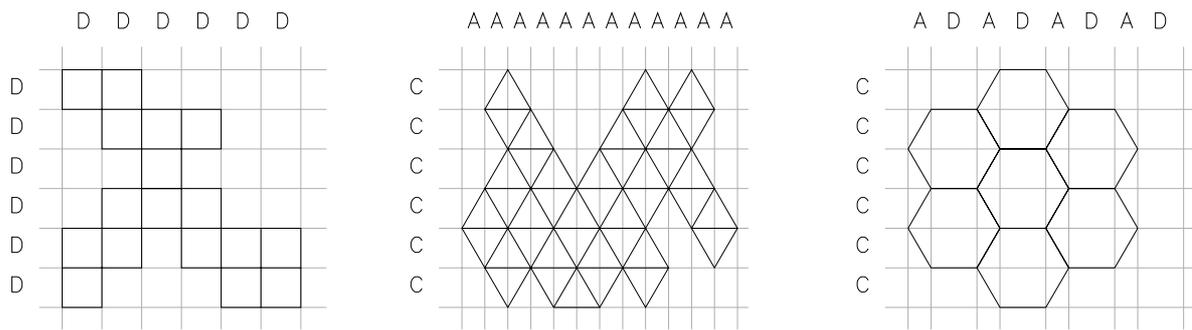
Para se cobrir um plano com polígonos regulares contornando totalmente um vértice, poderão ser reunidos:

$$\frac{360^\circ}{\frac{180^\circ(n-2)}{n}} = \frac{2n}{n-2} = 2 + \frac{4}{n-2} \quad (5.1)$$

Para que o número de polígonos seja inteiro e com o valor de “n” inteiro, os valores de “n” que satisfazem a expressão acima são apenas: n = 3, 4, ou 6. Por isso só existem malhas regulares de triângulos, quadrados e hexágonos. Apenas as malhas compostas de um só tipo de polígono podem ser chamadas de malhas regulares. Tendo-se arranjos de mais de um tipo de polígono regular em torno de um mesmo nó pode-se chamar, esta malha de semi-regular. Para o desenvolvimento dos estudos, serão analisados os aspectos de homogeneidade, densidade e dualidade.

## 5.2 Conceito de Homogeneidade

Os modelos homogêneos são os mais utilizados para o equacionamento das estruturas, uma vez que além de oferecer facilidade na padronização de seus componentes, seus nós são também iguais, e as cargas são distribuídas de maneira igualitária. Conforme já observado no item anterior, os arranjos possíveis de nós, repetindo apenas um tipo de polígono regular e valores inteiros do mesmo elemento, são apenas três : triângulos equiláteros, quadrados e hexágonos. Apenas estes três tipos de polígonos podem constituir malhas totalmente regulares e repartir um plano de forma perfeitamente homogênea (Figura 5-1). Para melhor facilitar a nomeação de polígonos, definiu – se que serão referenciados pelo seu número de lados, ou seja: Triângulo Equilátero: (3), Quadrado: (4), Hexágono: (6), Octógono: (8), Decágono: (10), Dodecágono (12), etc.



Quadrado (4)

Triângulo equilátero. (3)

Hexágono (6)

Figura 5-1 – Malhas Regulares e Homogêneas com apenas um tipo de polígono regular e de nó

Observando-se as tramas mostradas na figura 5.1, vê-se que os nós estão posicionados segundo alinhamentos em seqüências diferenciadas. No caso do quadrado a distância entre os alinhamentos é constante, e se repete nos dois sentidos. Nos outros dois casos, variam segundo relações equacionadas por proporções especiais ou seja:

$D = \text{Unidade} = \text{lado do polígono}$

$$A = \frac{1}{2} = 0,5D \tag{5.2}$$

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,8660D$$

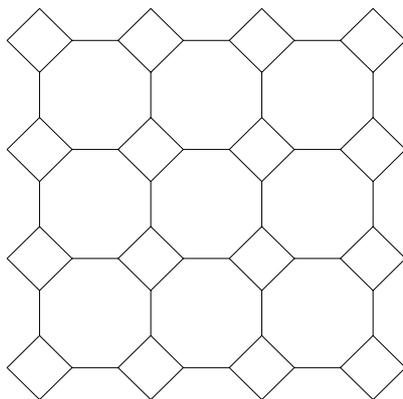
Os arranjos semi-regulares são aqueles constituídos de dois ou mais tipos de polígonos regulares. Analisando-se os tipos possíveis de nós, pode-se chegar a dezoito arranjos porém, seis deles não permitem repetições contínuas em um plano. Além dos três arranjos totalmente regulares, existem oito arranjos com um só tipo de nó. Nesses reticulados pode-se avaliar numericamente as áreas em torno de cada nó definindo-se para eles uma densidade igualitária. Os agrupamentos com dois ou três tipos de nó não são totalmente homogêneos, e pode-se dizer que estas organizações variam de densidade.

### 5.3 Conceito de Densidade

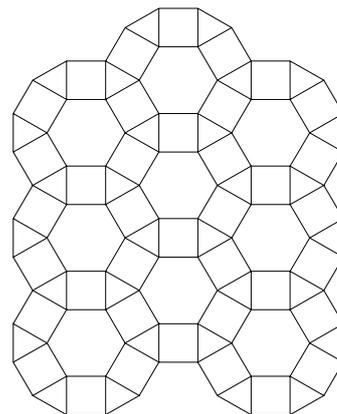
Um segundo conceito a ser pesquisado é o conceito de densidade. Quanto maior número de lados tiver um polígono maior será sua área em função de um mesmo valor para o lado. Nos arranjos onde aparecem polígonos com maior número de lados, vê-se que os

espaços vazios preponderam, formando conjuntos de menor densidade. Para analisar a área em torno de cada vértice, deve-se relacionar os valores dessas áreas em função do lado, como por exemplo: triângulo:  $0,43301 L^2$ , quadrado:  $1,0000 L^2$ , hexágono:  $2,59808 L^2$ , octógono:  $4,82843 L^2$ , dodecágono:  $11,19615 L^2$ , etc.

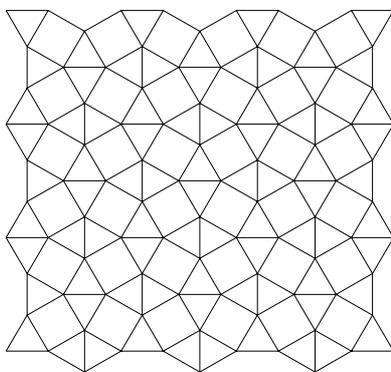
Os oito tipos de vértices mencionados anteriormente constituem as “malhas semi- regulares simples” formadas por mais de um tipo de polígono regular e somente um tipo de nó (Figura 5-2). Para avaliar a densidade destes arranjos pode-se somar as áreas dos polígonos existentes em cada nó e dividir a unidade pela soma destas áreas. Assim, quanto maior a soma das áreas, menor será a densidade encontrada. As malhas mais densas apresentam características de maior resistência e também maior peso para o caso de serem utilizadas em sistemas estruturais. Na Figura 5-2 apresentam-se as malhas semi-regulares simples com dois tipos de polígonos e um só tipo de nó. Observe que a malha de triângulos é a mais densa, seguida da malha de quadrados e restando à malha de hexágonos a menor densidade.



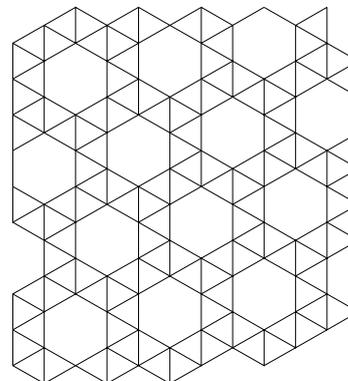
Polígonos: 4.8.8



Polígonos: 3.4.6.4



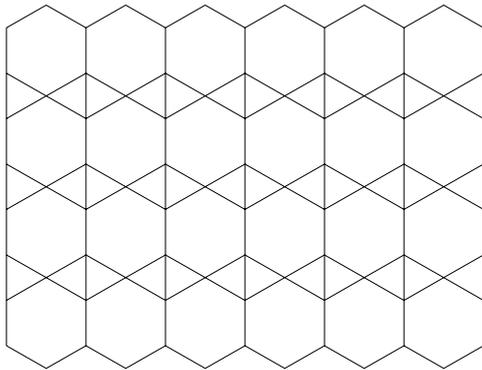
Polígonos: 3.3.4.3.4



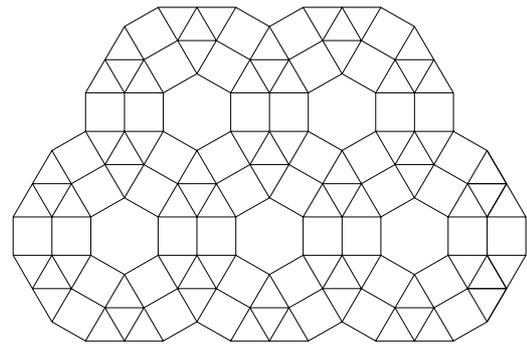
Polígonos: 3.3.3.3.6

Figura 5-2 – Malhas semi-regulares simples

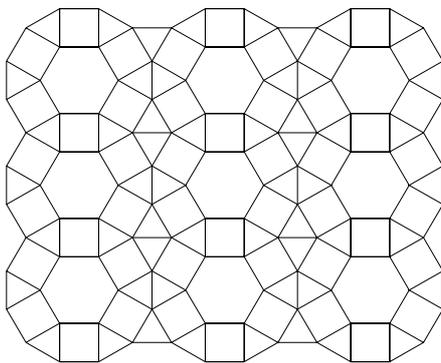
Nos arranjos mostrados na Figura 5.3 estão relacionados modelos semi-regulares com mais de um tipo de polígono e com dois tipos de nó, portanto com densidade e homogeneidade variáveis.



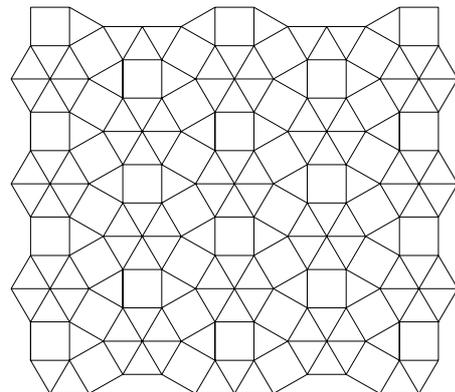
Polígonos 3.6.3.6  
3.3.6.6



Polígonos 3.4.6.4  
3.3.3.4.4



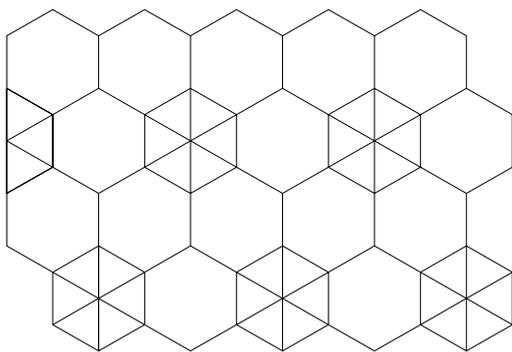
Polígonos 3, 4, 6, 4  
3, 3, 4, 3, 4



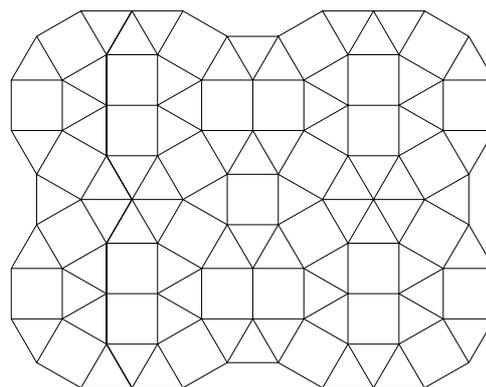
Polígonos 3, 3, 4, 3, 4  
3, 3, 3, 3, 3, 3

Figura 5-3 – Semi-regulares duplas

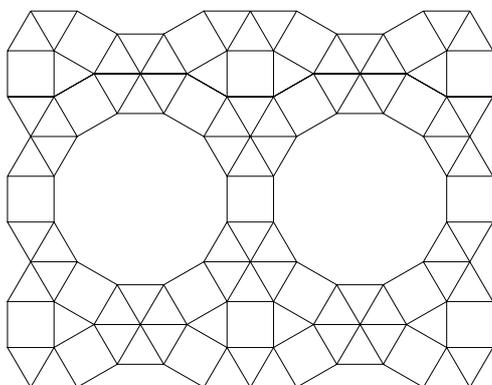
As malhas semi – regulares triplas podem ter dois ou mais tipos de polígonos e três tipos de nó e estão relacionadas na Figura 5-4.



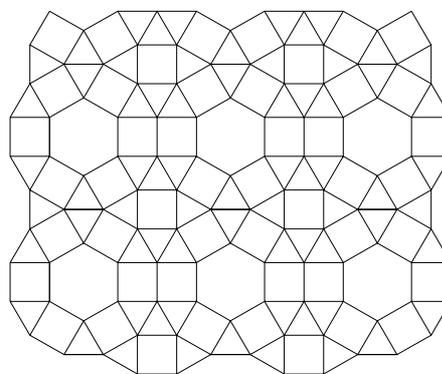
Polígonos 6.6.6 / 3.3.6.6  
3.3.3.3.3.3



Polígonos 3.3.3.4.4 / 3.3.6.6  
3.3.4.3.4



Polígonos 3.3.4.12 / 3.3.4.3.4  
3.3.3.3.3.3



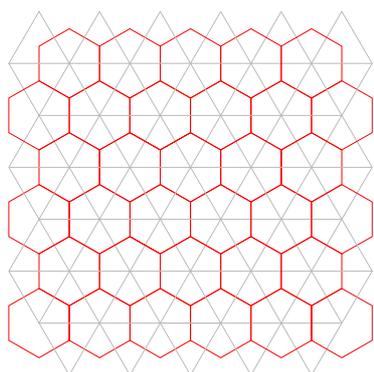
Polígonos 3.3.4.3.4 / 3.4.6.4  
3.3.3.4.4

Figura 5-4 – Semi-Regulares triplas

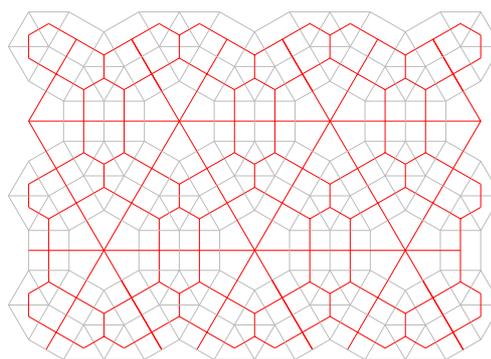
#### 5.4 Conceito de Dualidade

Nos arranjos anteriormente relacionados pode-se analisar ainda o conceito de dualidade. Uma malha é a dual de outra, quando tem seus vértices ou nós no centro dos polígonos de uma outra malha regular ou semi-regular, conformando arranjos constituídos por polígonos não regulares, porém compondo formas que se relacionam geometricamente com aquelas iniciais que as geraram.

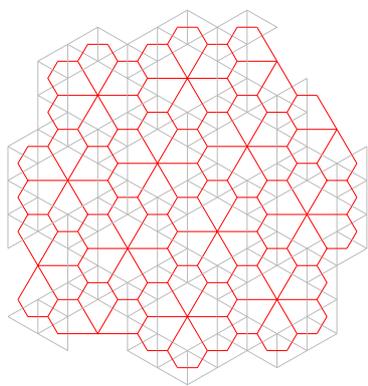
O conceito de dualidade é importante do ponto de vista estrutural, pois no caso das treliças espaciais, são as malhas duais que vão constituir os vértices contidos no banzo superior ou inferior desses arranjos (Figura 5-5).



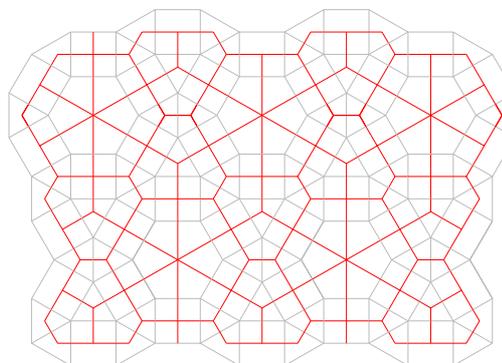
Dual 3.3.3.3.3.3



Dual 3.4.6.4 / 3.3.3.4.4



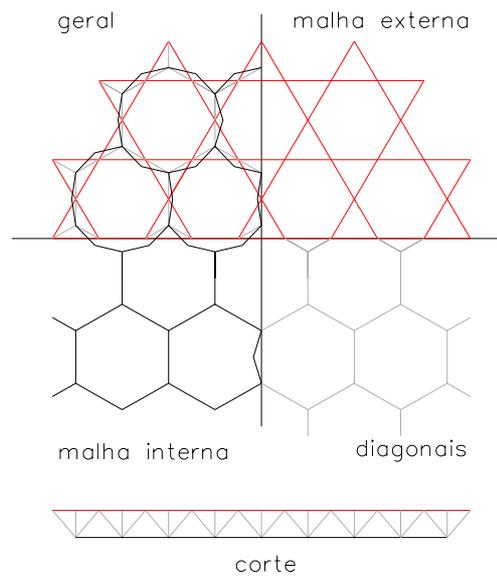
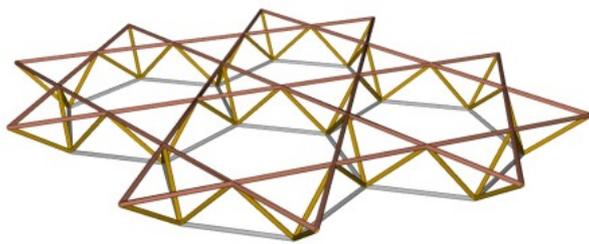
Dual 3.3.3.3.6



Dual 3.4.6.4 / 3.3.4.3.4

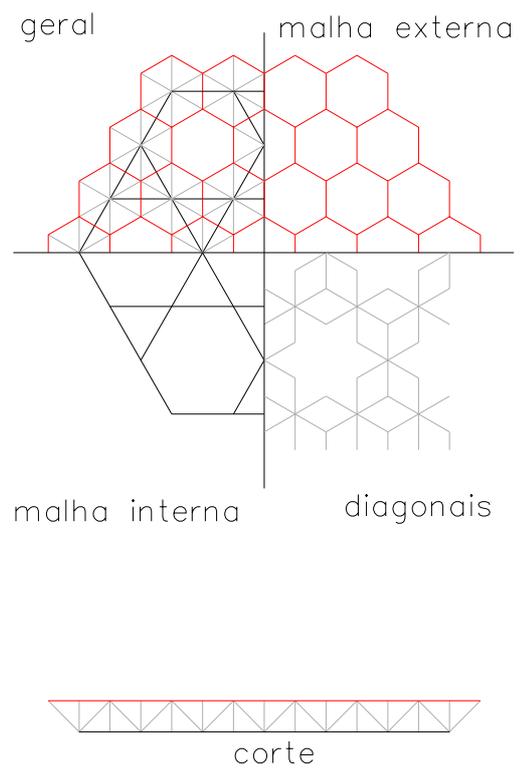
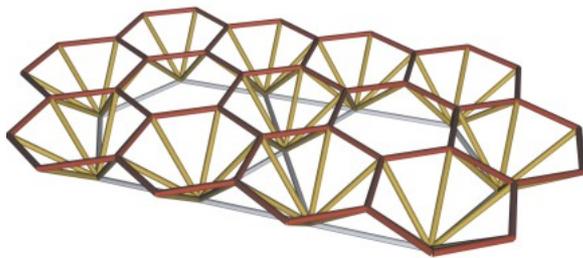
Figura 5-5 – Exemplos de malhas duais

Sobre qualquer desses arranjos pode-se improvisar outros talvez não tão homogêneos, mas que podem apresentar qualidades a ser exploradas. Dentro deste amplo universo, foram eleitos exemplos especiais para serem investigados, para o caso de se pretender usar vãos modulados em treliças espaciais. Neste caso pode-se utilizar modelos tridimensionais estruturados pelas malhas regulares e duais com altura variável conforme o caso. (distância entre pilares, diâmetro ou forma das barras). Alguns destes modelos estão relacionados nos modelos mostrados nas Figuras Figura 5-6 e Figura 5-7



Treliça proposta.

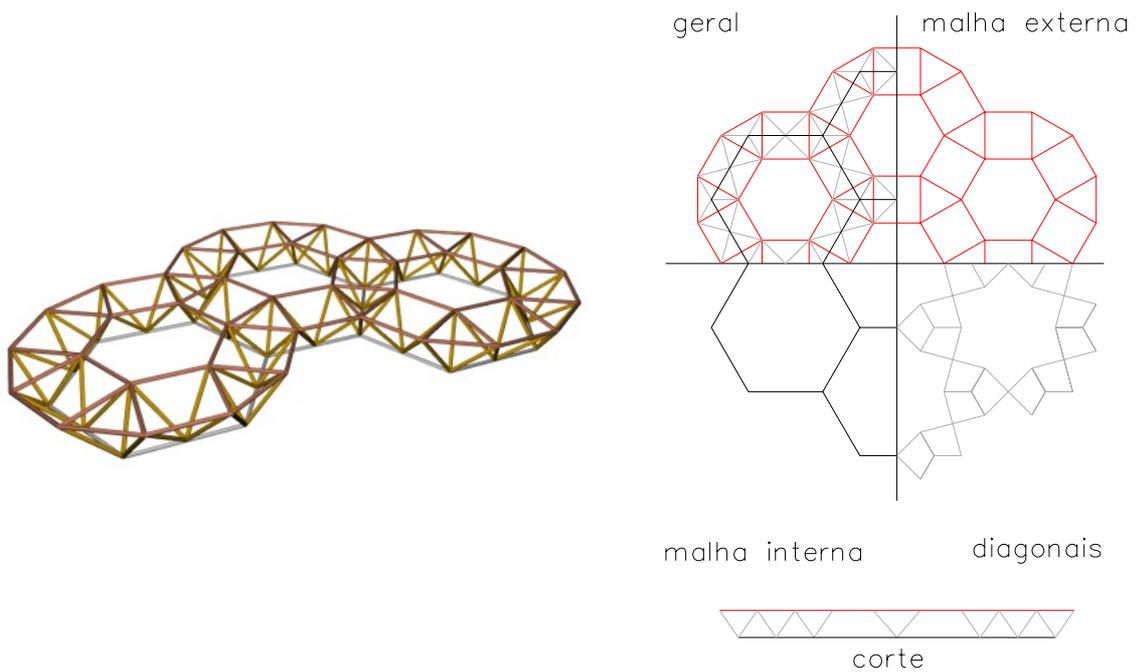
Esquema das barras



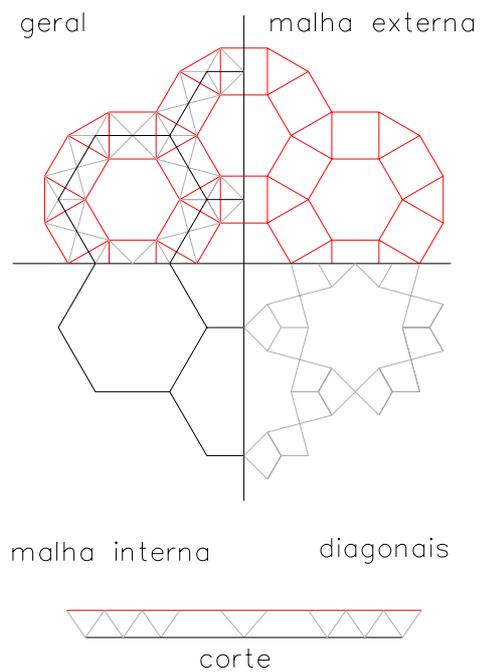
Treliça proposta.

Esquema das barras

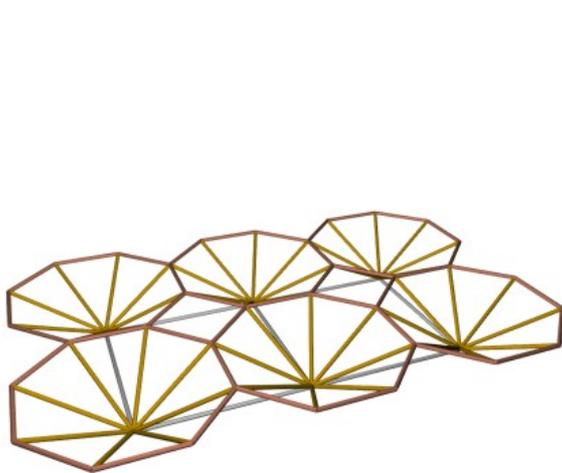
Figura 5-6 – Exemplos em planta e volumetria exemplificando os tipos de tramas selecionados para ilustrarem a proposta.



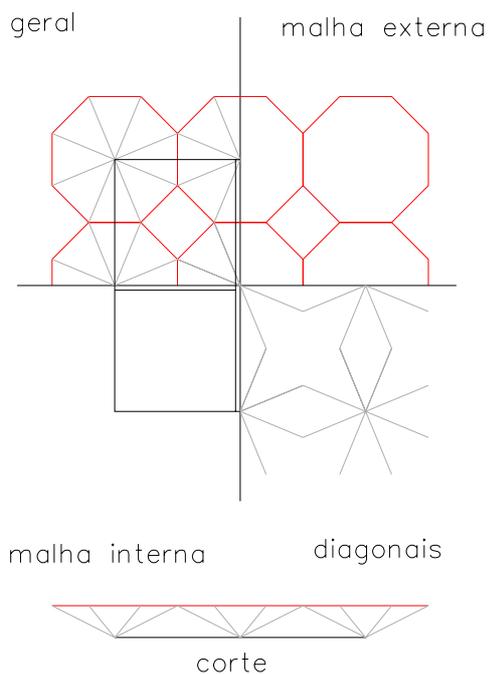
Treliça proposta



Esquema das barras



Treliça proposta



Esquema das barras

Figura 5-7 – Exemplos em planta e volumetria exemplificando os tipos de tramas selecionados para ilustrarem a proposta.

Para os exemplos apresentados nas Figura 5-6 e Figura 5-7 podem ser feitos estudos geométricos e equacionamento de suas relações angulares gerando sugestões para seu detalhamento e os tipos de nós possíveis de serem utilizados. As organizações geométricas já

apresentadas, podem ser formalmente modificadas introduzindo-se curvaturas na concepção de sua superfície e gerando-se volumes com curvatura simples ou dupla, abrindo assim infinitas novas possibilidades para a concepção de formas e sistemas estruturais. (Figura 5-9).

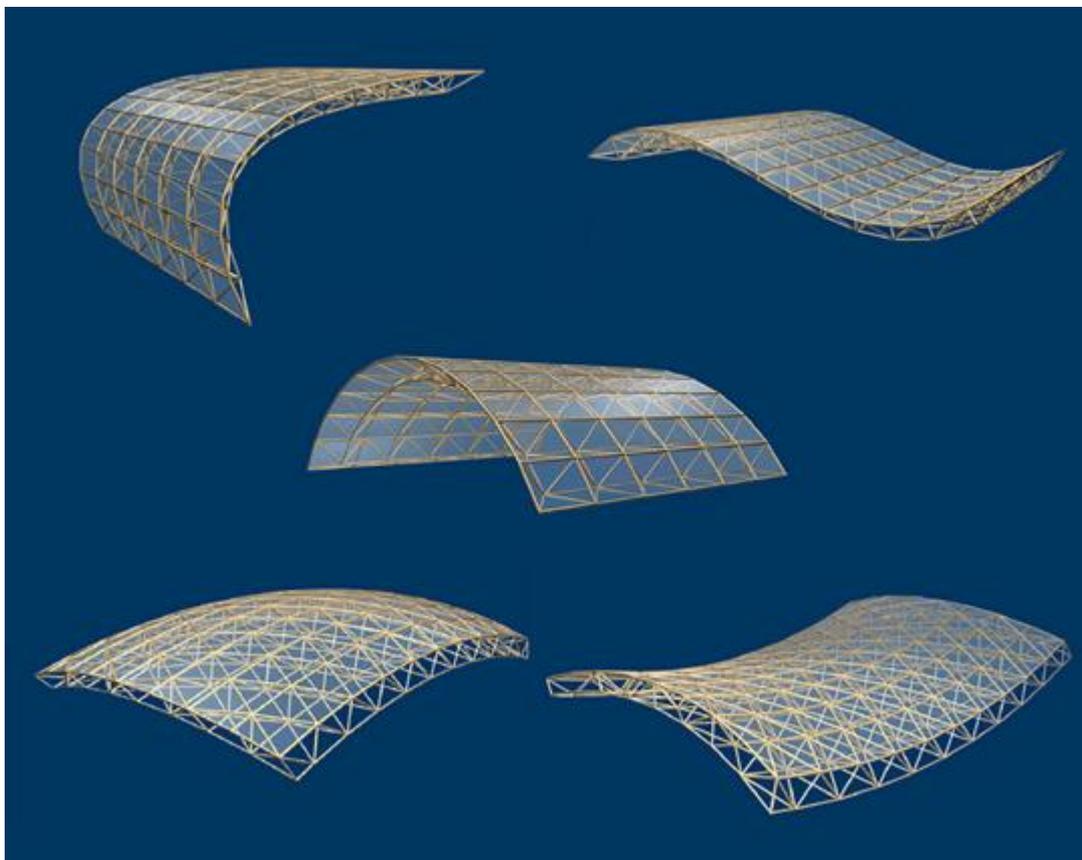


Figura 5-8 – Modelos de coberturas treliçadas com simples ou dupla curvatura

### 5.5 O nó nas estruturas tridimensionais

O tipo de junção a ser utilizada depende primordialmente da técnica de conexão (parafuso, solda ou conectores mecânicos). Também é afetado pela forma dos membros: tubular, perfil T, cantoneira, etc.. Cada um envolve uma técnica de conexão. As conexões soldadas dão maior resistência, mas geralmente são usadas conexões parafusadas.

O custo de produção das junções é um dos mais importantes fatores que afetam na economia final das estruturas espaciais. Muitos tipos de conectores têm sido desenvolvidos, mas nem sempre apresentaram a universalidade necessária para serem utilizados como um sistema padrão.

Do ponto de vista geométrico, as junções devem manter a perfeita centralidade de seus eixos não originando portanto excentricidades nos modelos propostos. As tipologias já desenvolvidas, obedecem basicamente os seguintes conceitos:

- Nó massivo ou maciço constituído de um elemento sólido multifacetado.
- Nó axial constituído de planos posicionados radialmente.
- Nó poliédrico constituído de um volume com o interior e algumas faces vazadas para permitir acesso aos parafusos.

Entre os nós maciços o exemplo mais difundido é o sistema MERO desenvolvido na Alemanha em 1942-3. (MERO, 2004) As barras do sistema MERO são tubos de seção circular, possuem pinos móveis em suas extremidades com porcas que permitem a fixação das barras aos nós. As barras obedecem comprimentos estabelecidos por series geométricas, começando com 1 m e progredindo para  $1 \times \sqrt{2}$ , 2,  $2\sqrt{2}$  e assim por diante. Os nós são constituídos de esferas maciças de aço onde são feitas as perfurações e roscas que recebem os parafusos de fixação que se encontram nas extremidades das barras. Possui 18 furos roscados e permite a conexão de barra em ângulos de  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , assim como em múltiplos desses valores. Este padrão geométrico pode ser feito em diferentes tamanhos para resistir a diferentes forças. Os 18 furos para fixação das barras, dispostos em eixos perpendiculares entre si em três direções não apresentam excentricidade (Figura 5-9).

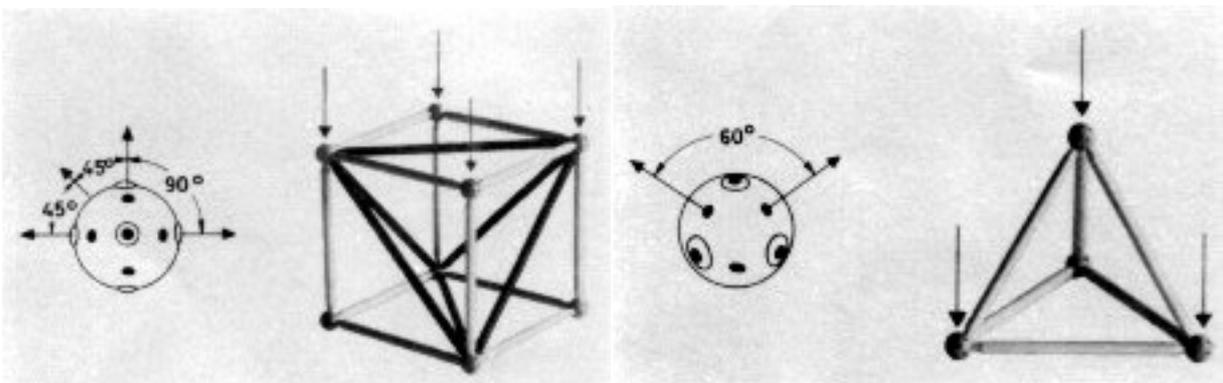
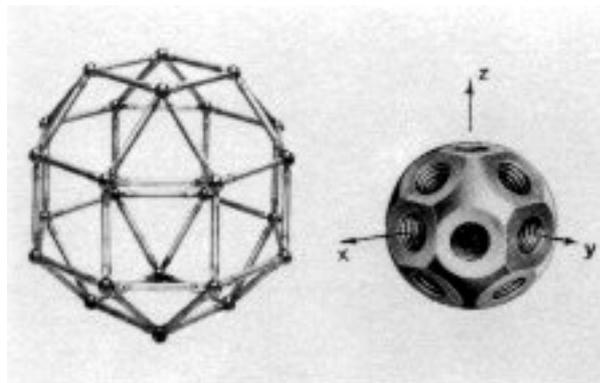


Figura 5-9 – Sistema Mero – nó e barra e exemplos de volumes geométricos

Fonte: MERO, 2004

Uma das qualidades deste sistema é de se reduzir somente a dois elementos: o nó e barra. Em outros sistemas, o nó se decompõe em várias peças.

Entre os vários exemplos de nó axial, que geralmente é constituído de chapas soldadas ou dobradas, pode-se citar o sistema ARQUETIPO. Embora não apresente excentricidade, utiliza apenas um parafuso, contrariando as recomendações correntes de utilizar no mínimo dois parafusos em ligações. As barras são tubulares, abertas e estampadas nas extremidades, sistema que diminui a resistência da peça. Este tipo de junção representa solução relativamente barata e possui inúmeras similares sendo portanto o sistema mais utilizado no Brasil (Figura 5-10).

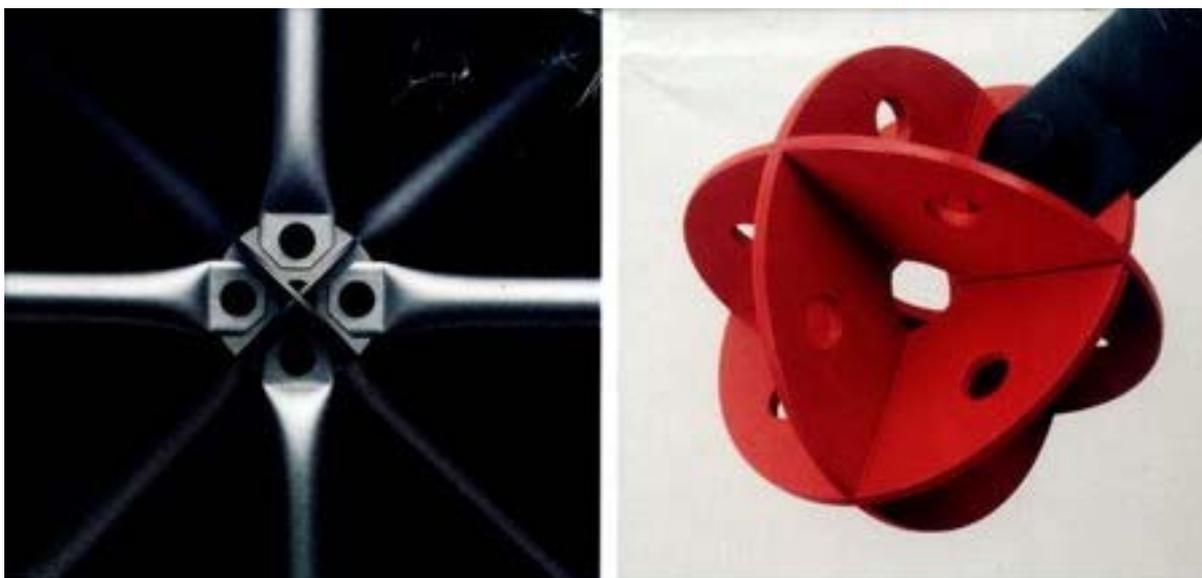


Figura 5-10 – Nó Arquétipo.

Fonte: Catálogo Técnico ARQUETIPO Produtos Industriais.

Entre os nós poliédricos pode-se citar o no da Metalnox (METALNOX, 2004) que utiliza uma forma poliédrica seccionada, permitindo assim facilidade no sistema de conexão dos parafusos. O modelo poliédrico do nó é o rombicuboctaedro que permite articulações ortogonais na horizontal e  $45^\circ$  e  $90^\circ$  na vertical (Figura 5-11).

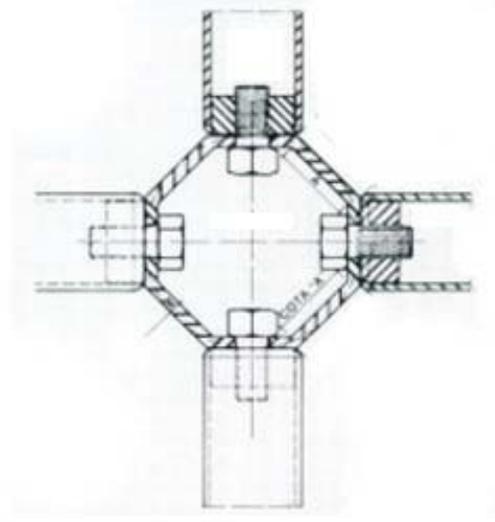
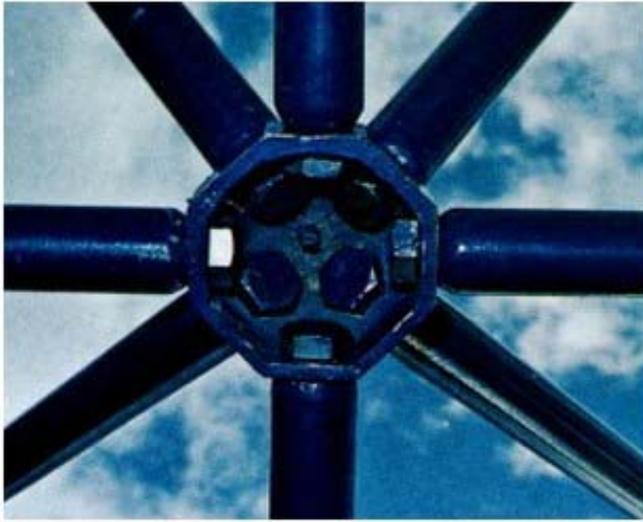


Figura 5-11 – Nó Metalnox.

Fonte: METALNOX, 2004

Os sistemas reticulares tridimensionais são objetos de estudo no Brasil e em diversos países e constituem sistemas patenteados por várias indústrias. Embora busquem sempre uma ordenação geométrica padronizada, podem estar submetidos a esquemas um pouco mais aleatórios, possibilitados pela aplicação de novos conceitos geométricos, tais como o da utilização de um poliedro não regular para o equacionamento angular do reticulado. Essa idéia pode ser exemplificada através do projeto do Centro Nacional de Natação que está sendo executado para sediar as Olimpíadas de 2008 em Pequim. A autoria é do escritório australiano PTW – Peddle Thorp and Walker – que propôs um modelo geométrico inspirado em bolhas de sabão.

Segundo Renato Schroeder (2004)

“Coube à conceituada Arup, empresa de consultoria em engenharia que expandiu sua atuação e hoje projeta de automóveis a obras de infra-estrutura o conceito estrutural da edificação. De fato uma idéia simples e concisa: uma forma quadrática que apela para a complexidade da teoria das bolhas de sabão para criar a estrutura que veda e reveste ao mesmo tempo”.

Segundo os arquitetos (aU 119, 2004), a estrutura é baseada na mais eficiente forma de subdivisão do espaço tridimensional. Trata-se de um padrão muito comum na natureza, fundamental no arranjo de células, estruturas de cristais e é claro, na formação da espuma de sabão.

“A teoria das bolhas de sabão foi criada por Weaire e Phelan, professores do departamento de matemática da Trinity College, da Universidade de Dublin, para resolver um problema matemático proposto no século 19 pelo físico irlandês Lord Kelvin”.

O problema tratava da subdivisão do espaço tridimensional. Segundo KELVIN (1984):

“Se nós tentarmos subdividir o espaço tridimensional em múltiplos compartimentos, todos de igual volume, de que formatos esses seriam quando as superfícies subdivididas são de uma área mínima?”

O próprio Lord Kelvin buscou a resposta na combinação de pentágonos e hexágonos resultantes da subdivisão do espaço tridimensional das bolhas de sabão. Mas só em 1993, Weaire e Phelan (AU nº 119, 2004) construíram espuma (ou seja, um conjunto de bolhas) a partir de duas diferentes células, uma com 14 lados (dois hexágonos e 12 pentágonos) e uma de 12 lados (todos pentágonos) usando menor área de superfície do que Lord Kelvin. Embora pareça complexo e orgânico, esse formato é baseado em alto grau de repetição. Utilizam-se apenas três diferentes faces, quatro diferentes margens e três diferentes nós (Figura 5-12).

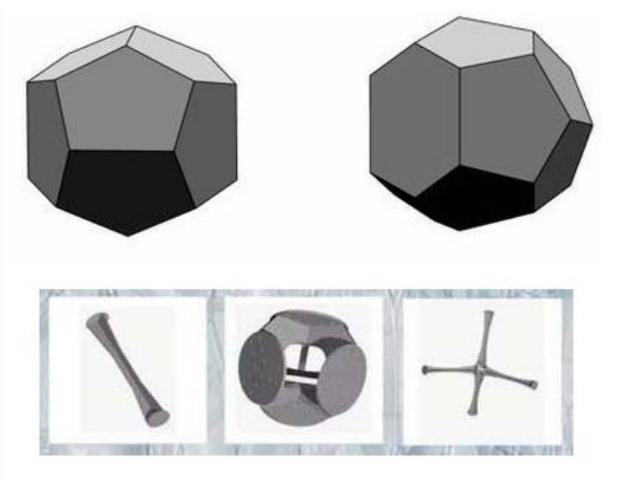
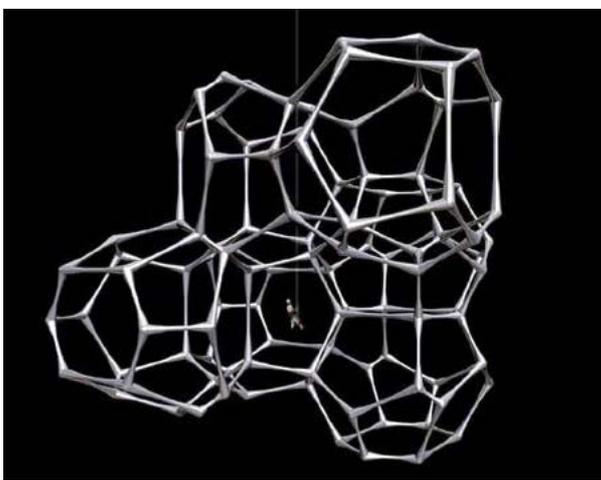
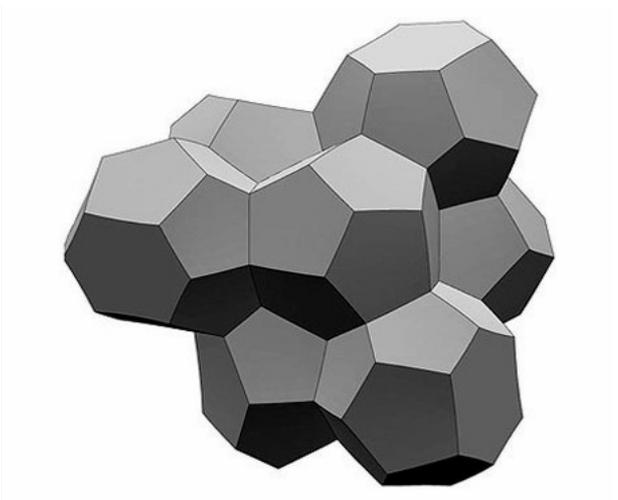
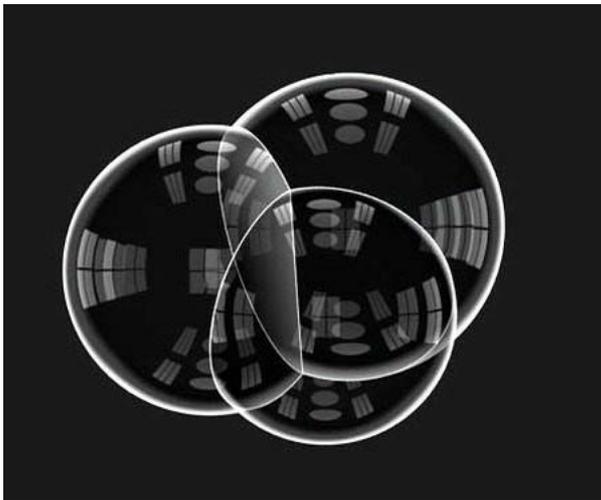
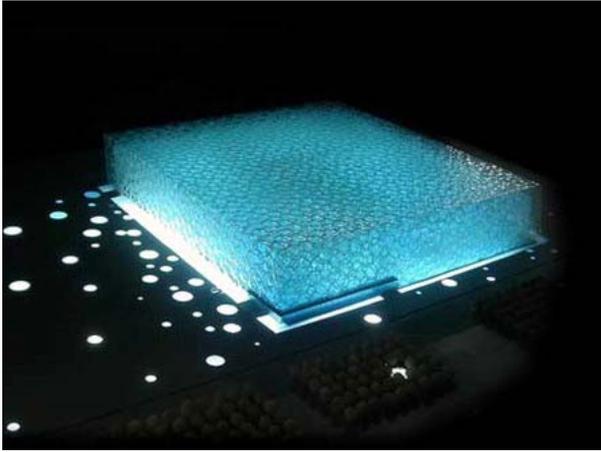


Figura 5-12 – Centro nacional de Natação. Pequim.

Fonte: SCHROEDER (2004).

## CAPÍTULO VI

### 6 MODELOS PROPOSTOS

#### 6.1 Considerações iniciais

O presente capítulo trata de propostas de modelos estruturais para análise de comportamento, visando estudar projetos com estruturas moduladas e utilizando sistemas tubulares na sua concepção. Para maior racionalização dos elementos de projeto, buscou-se as vantagens da utilização de sistemas geométricos regulares. Para elaboração dos projetos ficou estabelecido como critério, que sejam coberturas com proporções horizontais, para uma área de aproximadamente 2.500 m<sup>2</sup>. Como função do espaço proposto definiu-se que seja a de um restaurante com atendimento previsto para 2000 pessoas em três turnos diferentes.

O terreno escolhido pertence ao campus da UFOP e o objetivo desta definição foi obter maior facilidade para se estabelecer parâmetros de projeto tais como: pré-dimensionamento da construção, pontos de acesso, orientação solar, eixos visuais importantes, sentido dos ventos dominantes, clima local, etc. Trata-se de uma esquina, tendo um espaço de estacionamento como vizinho lateral. As demais linhas de contorno do terreno são configuradas como vias de acesso ao mesmo. Uma via lateral foi proposta e utilizada para acesso de serviços e docas de carga e descarga. Como edificações vizinhas, estão a Prefeitura, o Centro de Vivência, Blocos de Serviços, o IFAC e os Laboratórios da Escola de Minas, Figura 6-1

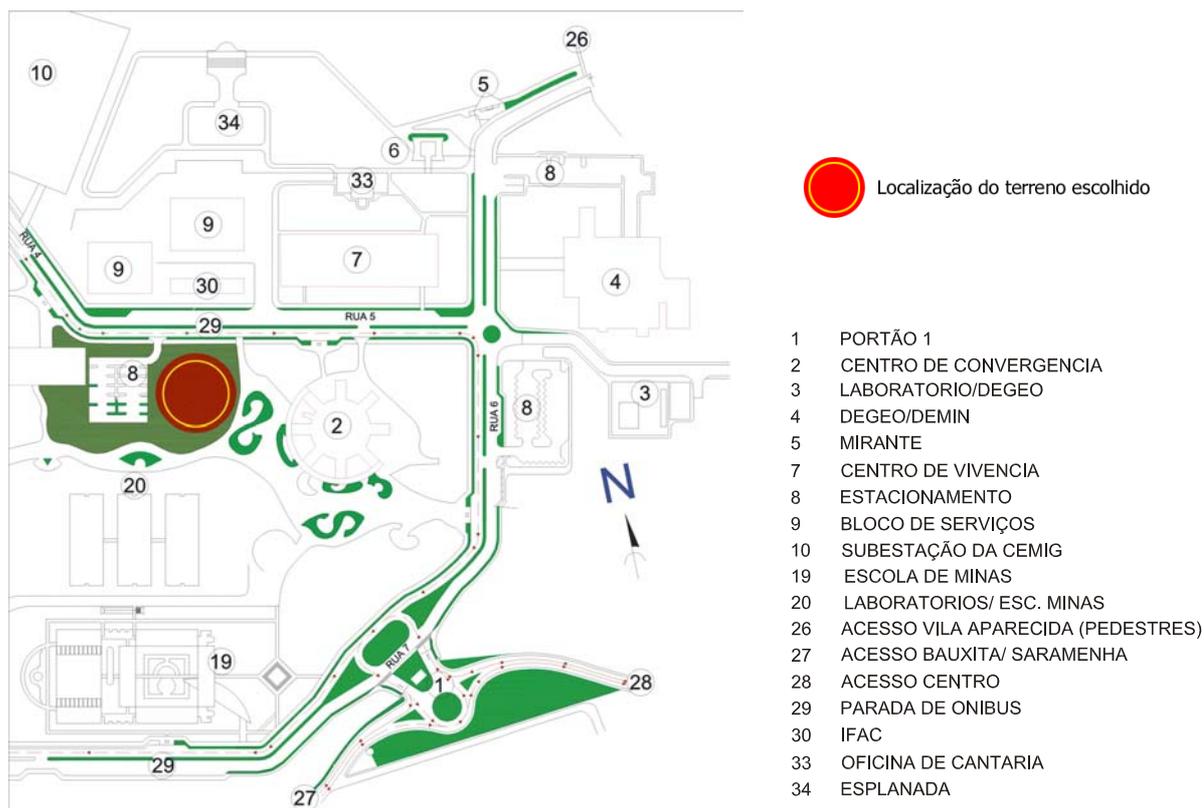


Figura 6-1 – Planta do campus com terreno em destaque

Reunidos em um bloco único, e posicionados junto ao acesso de serviços proposto, estão os setores de produção, acesso de funcionários, circulação vertical, administração e banheiros. Esta setorização foi utilizada para organizar fisicamente os espaços em todos os projetos. Estes ambientes foram concebidos com um pé direito de 4 m, permitindo assim a utilização de sua cobertura como um segundo pavimento, onde foram previstas áreas ajardinadas com bancos para repouso e descanso após as refeições. Foi previsto ainda um setor administrativo e um espaço destinado aos alunos, para atividades acadêmicas. No salão de refeições o pé direito está entre 7 e 8 m, dependendo de cada proposta, com soluções de *lay-out* que possibilitam a colocação de até 200 mesas e atendimento de 700 pessoas, simultaneamente. Espaços de transição (varandas, recuo nos planos de fechamento) foram propostos com a intenção de proteger as esquadrias e evitar insolação excessiva na época do verão. Três entradas, uma para cada via circundante, foram criadas visando facilitar o acesso de pessoas provenientes das construções vizinhas.

## 6.2 Modelo 01

A concepção do primeiro projeto é a de um elemento tridimensional modular que funciona como uma estrutura independente, mas podendo ser interligado a outros e funcionando ao fim como um conjunto solidário. A intenção desta proposta é a de uma construção que possa expandir em passos mínimos de  $100 \text{ m}^2$ . Sua forma está baseada em um fragmento estrutural do poliedro arquimediano denominado rombicuboctaedro que é constituído por faces retangulares e triangulares (Figura 6-2).

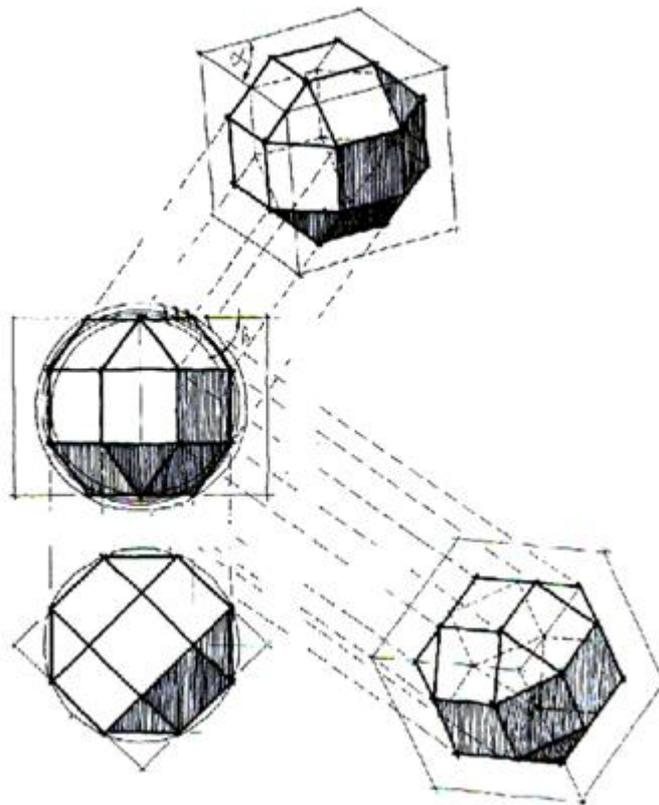


Figura 6-2 – Rombicuboctaedro.

Fonte: SÁ (1982).

Cada módulo proposto, tem como projeção um polígono octogonal articulado a outros quatro e entre eles aparecendo um quadrado de área equivalente a aproximadamente 16 % da área de projeção do módulo estrutural (Figura 6-3 e Figura 6-4).

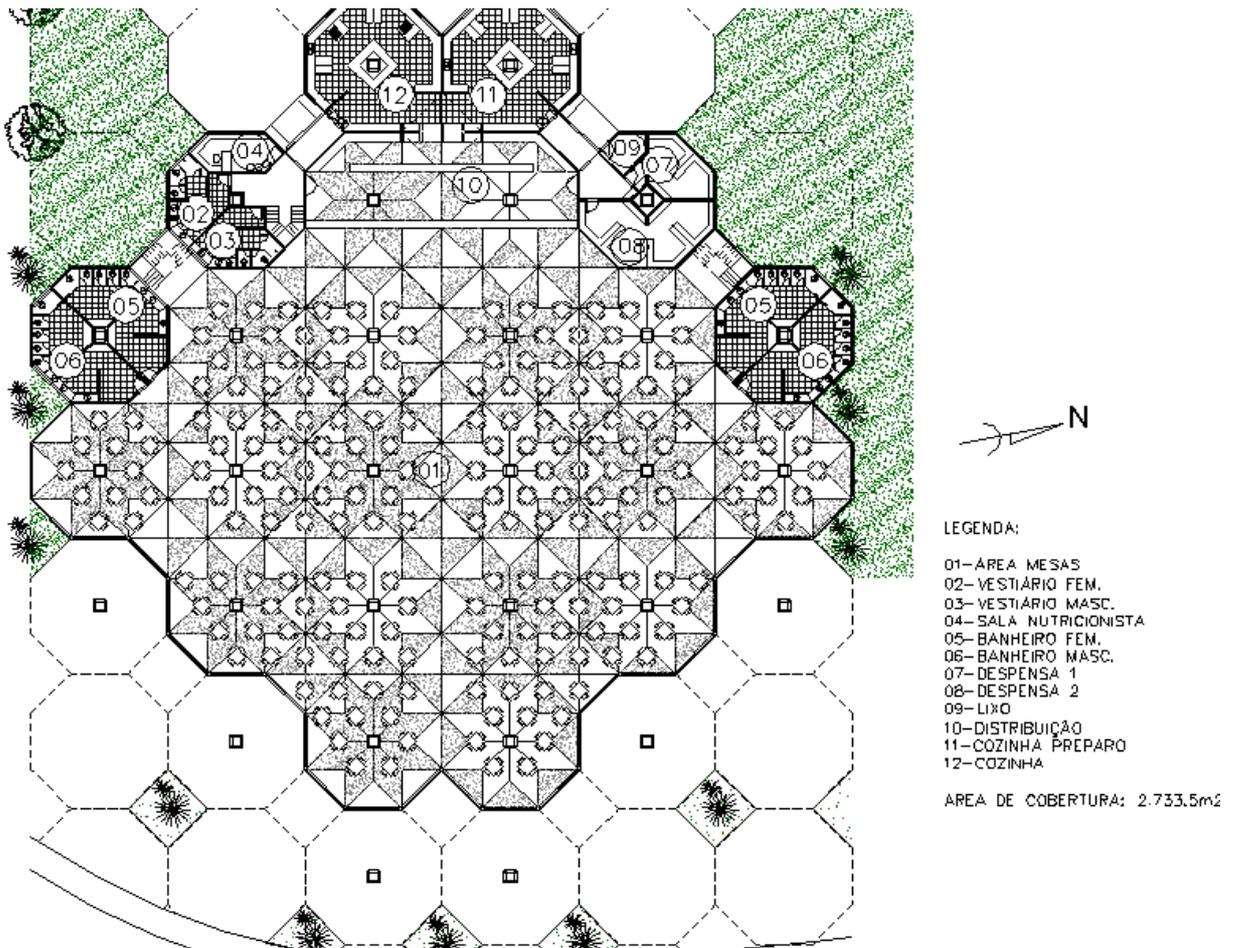


Figura 6-3 – Planta do restaurante

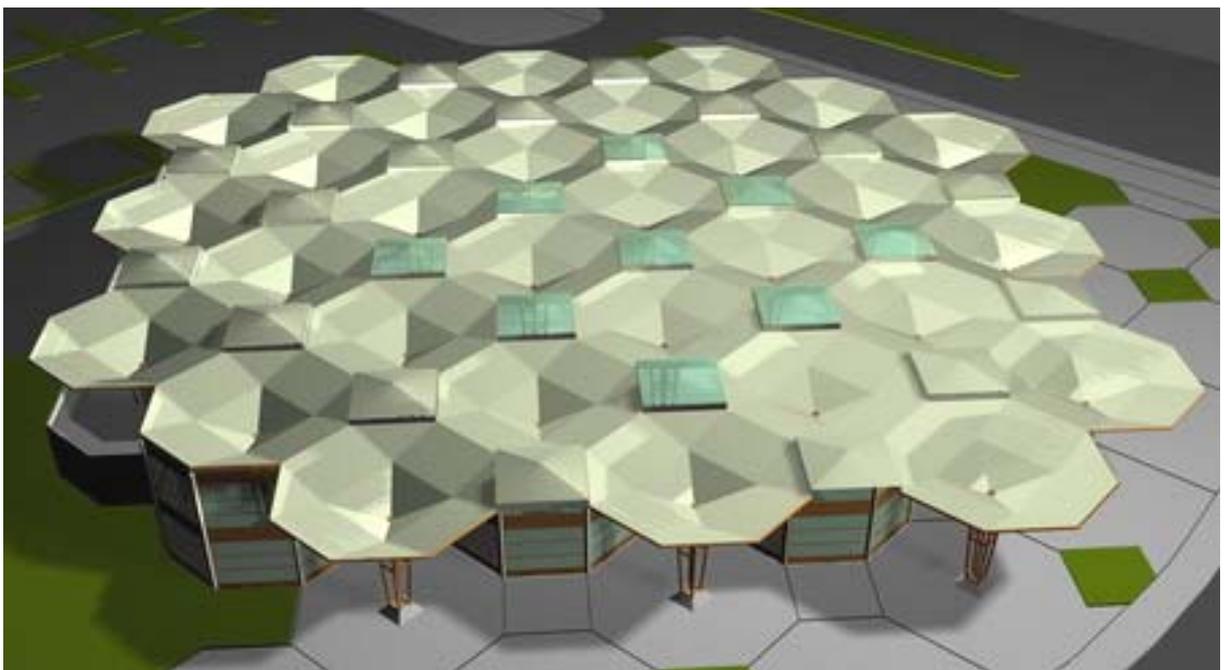


Figura 6-4 –Vista da cobertura

Em alguns casos, principalmente na região central da construção, estes quadrados serão cobertos por um material translúcido (policarbonato alveolar). O módulo proposto, comporta-se como um guarda chuva ascendente com apoio central em pilares onde ocorre o recolhimento das águas pluviais. Este recolhimento tem ainda como objetivo, o armazenamento e conseqüente reaproveitamento destas águas visando utilizá-las na irrigação das áreas ajardinadas do campus. Especialmente, a justaposição de elementos modulados proporcionou a configuração de linhas poligonais semelhantes a arcos parabólicos criando uma sensação de um ambiente arbóreo (Figura 6-5)



Figura 6-5 – Perspectiva interna

O salão de refeições, devido à presença dos pilares distribuídos por todo o espaço, ficou delimitado em áreas de menores dimensões criando conjuntos mais intimistas e evitando a impessoalidade presente nos grandes espaços. Para os planos de fechamento, foram previstos: forro em gesso cartonado no teto, painéis pré-moldados de concreto nas áreas de apoio e estrutura metálica secundária para apoio das lajes de terraço (Figura 6-6 e Figura 6-7).

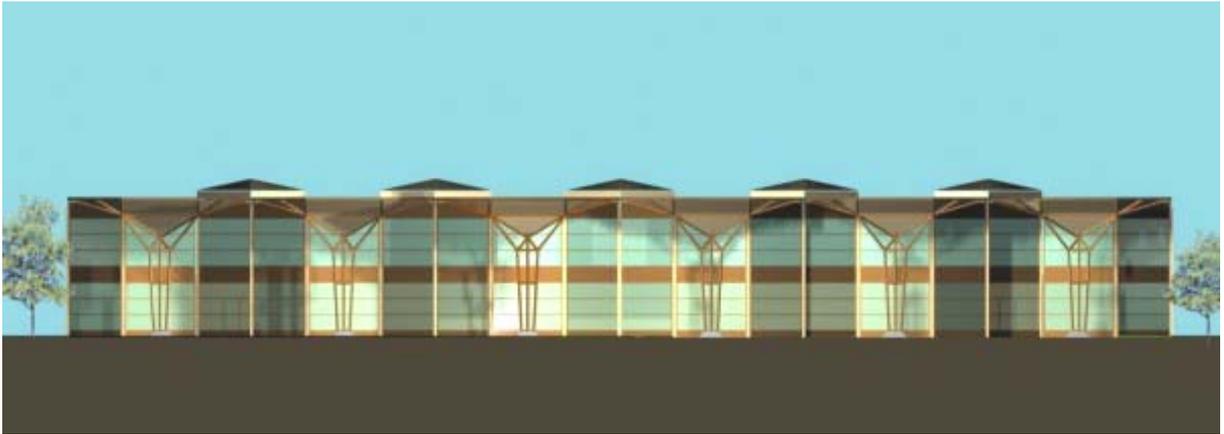


Figura 6-6 – Elevação frontal

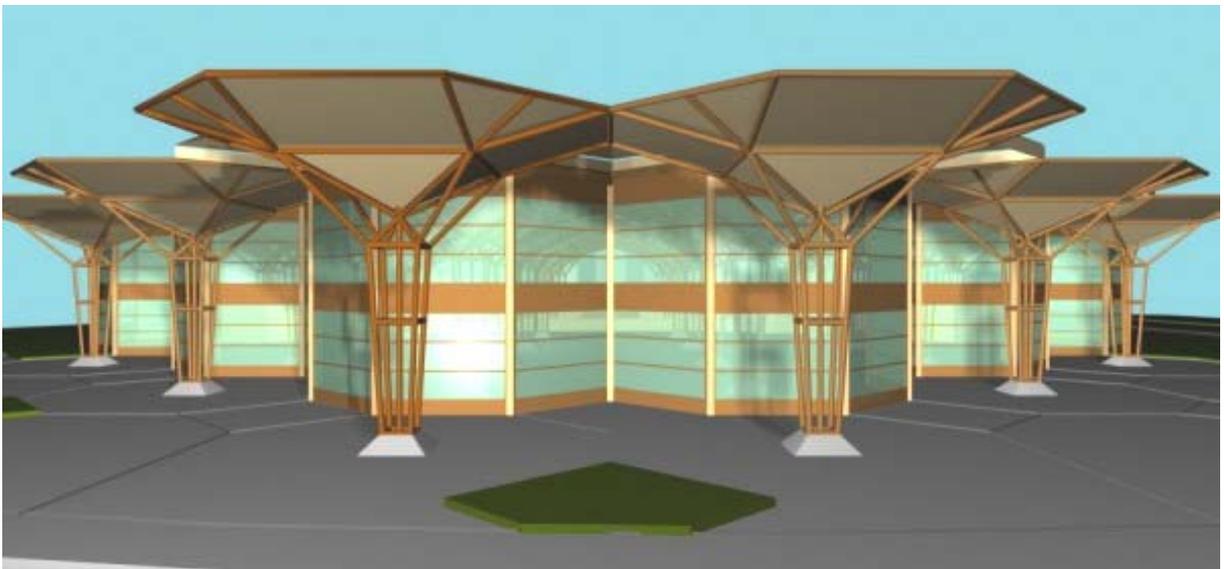


Figura 6-7 – Perspectiva

### **6.2.1 Sistema modular proposto**

Nas figuras Figura 6-8 à Figura 6-11 apresentam-se seqüencialmente a unidade estrutural proposta.

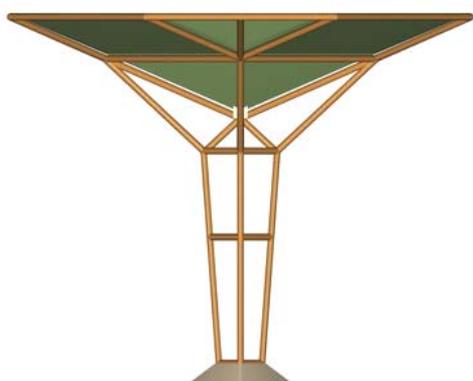


Figura 6-8 – Pilar - Vista Lateral 1



Figura 6-9 – Pilar - Vista Lateral 2



Figura 6-10 – Pilar - Vista Superior



Figura 6-11 – Pilar - Vista Inferior

Este módulo-pilar é autoportante podendo ser usado em construções de menor porte, tais como: espaços de serviços, com finalidades comerciais, residenciais, etc. Cada unidade pode abrigar uma construção de até 200 m<sup>2</sup> quando se utilizam dois pavimentos.

Os quadrados da malha utilizada, são definidos pela articulação de quatro módulos e pode ser utilizado como espaço de iluminação ou ventilação no caso de uma construção de maiores dimensões (Figura 6-3). Ainda nesse caso, foi proposta uma base de concreto em cada ponto de apoio dos pilares permitindo o nivelamento de suas bases e conseqüentemente, das suas arestas superiores. Em conjuntos modulares de maiores proporções, o sistema pode ser utilizado em supermercados, escolas, instituições, etc. Seus pontos de apoio estão ordenados segundo um reticulado ortogonal, facilitando a organização dos espaços em geral.

A cobertura resultou da junção de 24 módulos com 93,25 m<sup>2</sup> cada um, totalizando uma cobertura de 2.240 m<sup>2</sup> e constituindo a parte fechada do restaurante. Espaços de transição

foram ainda propostos criando-se varandas com a finalidade de mostrar a estrutura e proteger os planos de fechamento, ampliando em 560,0 m<sup>2</sup> a área de projeção da retícula modular.

O sistema de captação das águas pluviais é subterrâneo e as águas são coletadas em um reservatório também no subsolo, visando sua reutilização na irrigação dos jardins circundantes ou jardineiras da edificação. Na base de cada pilar deve ser previsto portanto uma caixa de inspeção dessa rede coletora.

### **6.2.2 Sistema estrutural**

O conceito deste elemento modular é o de uma cobertura com apenas um apoio por módulo. Sua forma poliédrica permite a utilização de barras retas, porém quando os módulos são justapostos, sua conformação se aproxima ao perfil de um arco, constituindo um espaço cujo teto se configura em abóbadas (Figura 6-5).

A forma modular proposta é poliédrica e constituída por retângulos e triângulos, estando os retângulos ladeados por triângulos o que favorece o enrijecimento do conjunto. As arestas se posicionam em diagonais conformando pórticos de formato aproximadamente parabólico. Quando os módulos são agrupados, transformam-se em um conjunto solidário de maior estabilidade e rigidez. Para o caso de um módulo solitário, pode-se usar o plano de esquadrias para que estes dois objetivos sejam conseguidos.

### **6.3 Projeto 02**

No segundo estudo, foi proposta uma cobertura com um único vão de maiores proporções tendo portanto sua utilização voltada apenas para obras com demanda de grandes áreas. No caso deste estudo, a cobertura tem o perímetro hexagonal e se inscreve em um círculo de 30 m de raio e com 2.340 m<sup>2</sup> de área construída.. A estrutura apóia-se em seis pilares radialmente alinhados aos seis vértices da forma hexagonal proposta. O vão entre pilares diametralmente opostos é de 42 m e de 21 m entre pilares laterais.

Para se conseguir uma declividade adequada no plano da cobertura, foi proposta uma curvatura suave da ordem de 5% com o objetivo de se obter uma concordância entre os planos da estrutura e de fechamento do teto. Esta curvatura contribuiu ainda para diminuição do efeito das cargas verticais no centro do vão (Figura 6-12).

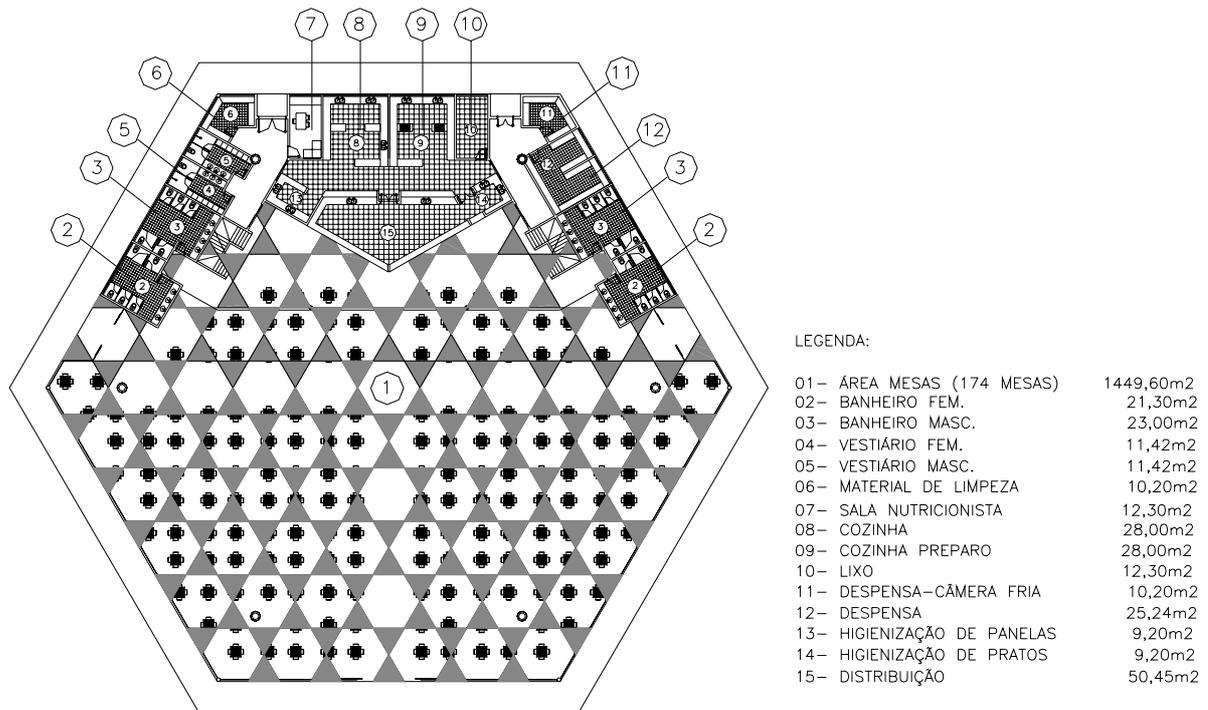


Figura 6-12 – Planta da edificação

Como consequência desta curvatura o eixo geométrico da parte superior do pilar foi inclinado em função da radialidade presente na geometria da malha modular. O descaimento natural da cobertura, permitiu o recolhimento da água na periferia, tornando-se mais fácil o seu armazenamento subterrâneo em consonância com a primeira proposta apresentada.

O plano de fechamento foi alinhado aos vértices do banzo superior da malha deixando um beiral de 2,36 m em todo o perímetro da cobertura. Este fechamento proporcionou melhor vedação do espaço interno e permitindo deixar aparente as barras estruturais com suas pirâmides voltadas para baixo. No beiral, estas pirâmides também estarão visíveis. O plano de recolhimento das águas pluviais se posicionou segundo o alinhamento das esquadrias permitindo o seu recolhimento através de alguns dos seus montantes. A declividade conseguida no plano de cobertura evitou elementos intermediários para suportar as terças de

apoio das telhas e facilitou o recolhimento das águas em apenas uma poligonal que acompanha o beiral.

### 6.3.1 Sistema modular proposto

A malha modular proposta reúne hexágonos e triângulos equiláteros no banzo superior. Especialmente, os triângulos equiláteros conformaram-se em pirâmides tetraédricas cujos vértices inferiores foram interligados formando outra malha hexagonal, correspondente ao banzo inferior da treliça. O hexágono de 30 m de raio foi subdividido em 91 módulos de 5,45 m de diâmetro e 2,73 m de lado. Para se conseguir a curvatura suave de 5% desejada, fixou-se um centro de curvatura a 150 m deste alinhamento (Figura 6-13).

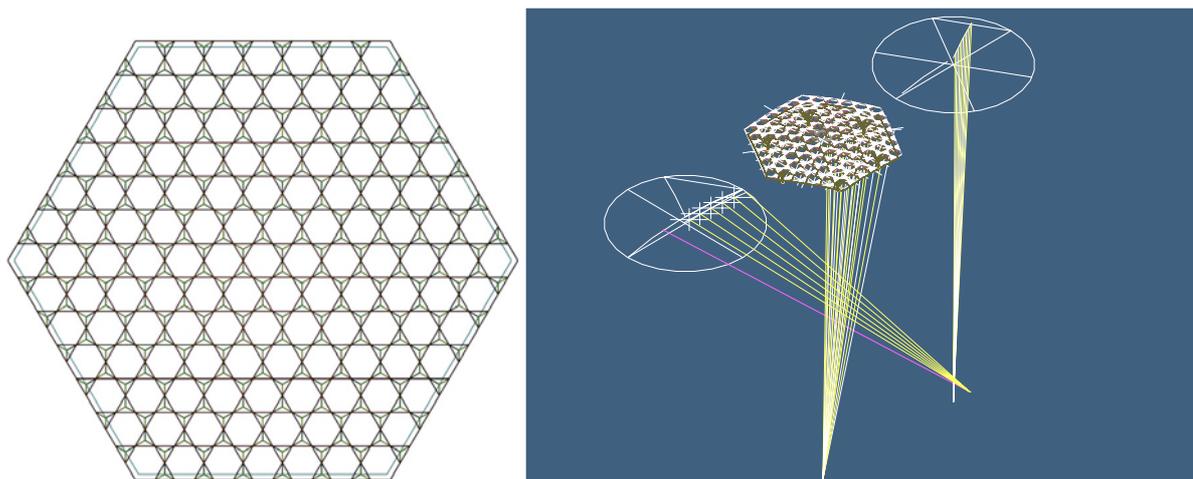


Figura 6-13 – Diagrama e perspectiva da malha utilizada

A presença dos elementos tetraédricos ladeando hexágonos de maiores dimensões que as usadas na maioria das treliças convencionais conferiu a estes uma rigidez e estabilidade e proporcionando assim menor densidade ao conjunto. Os vértices da malha superior e inferior estão assim posicionados segundo superfícies esféricas concêntricas cujos raios diferem segundo a altura da treliça ou seja: 2,25 m. O plano inferior é constituído por outra malha hexagonal com módulos de 6,3 m de diâmetro e 3,15 m de raio (Figura 6-14 e Figura 6-15).

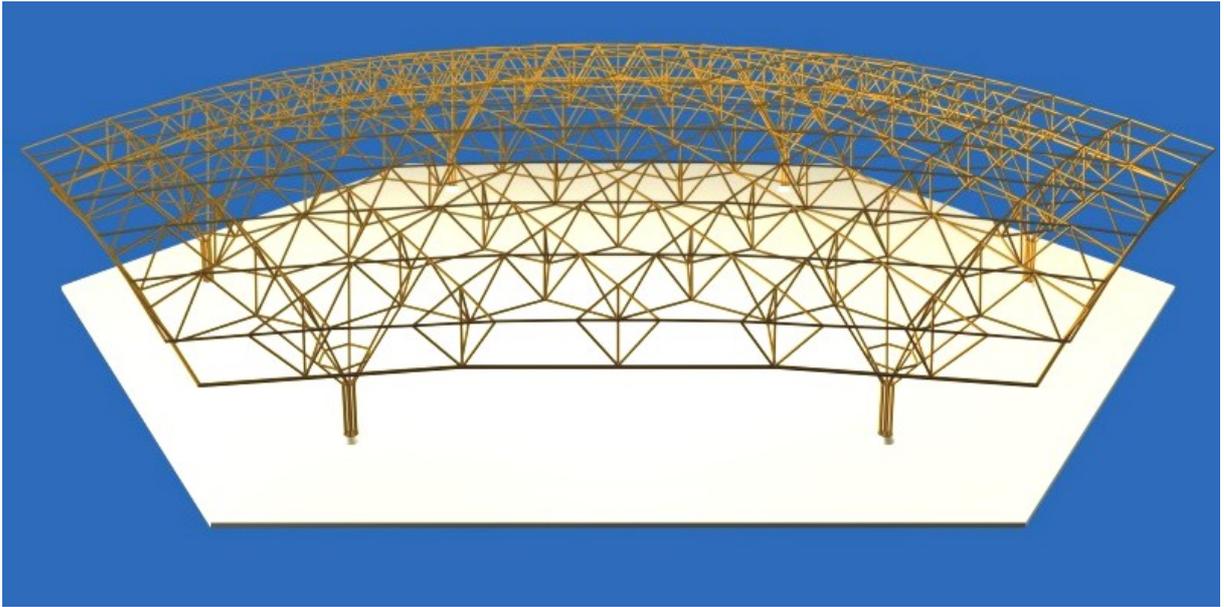


Figura 6-14 – Perspectiva da estrutura

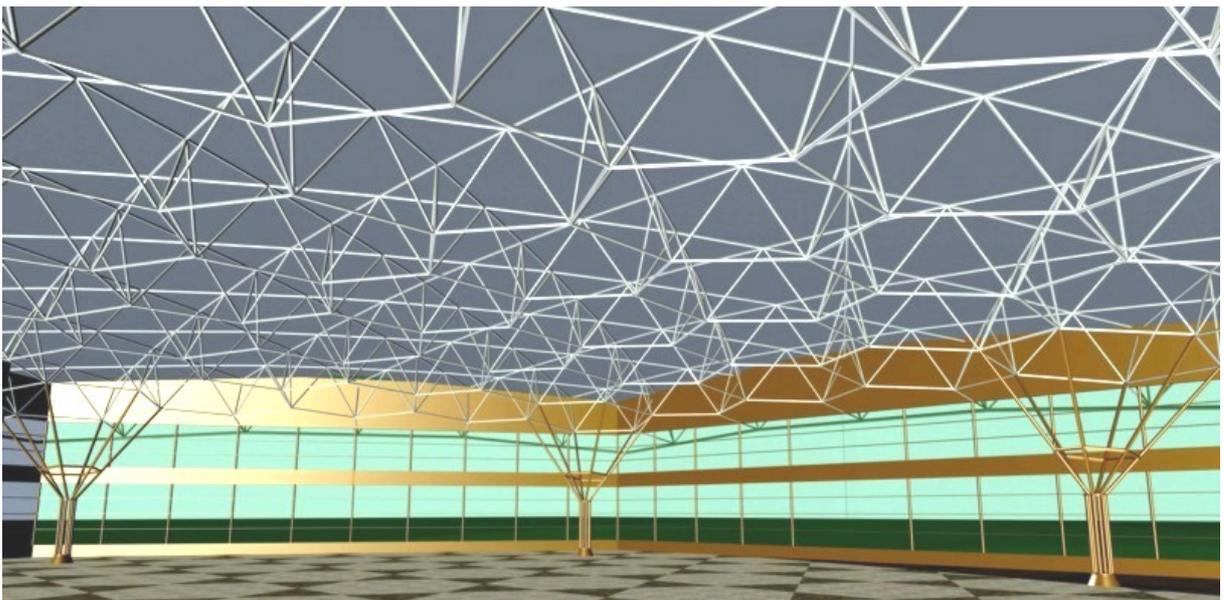


Figura 6-15 – Perspectiva interna da estrutura

As barras posicionam-se segundo uma superfície esférica determinando um fragmento poliédrico regular de ângulo central constante. Foram previstos seis pilares, cada um no alinhamento de um dos vértices, em consonância com a forma hexagonal proposta. Sua forma resultou do prolongamento de arestas dos tetraedos circundante aos pontos de apoio, constituindo assim um eixo de organização também radial (Figura 6-16)

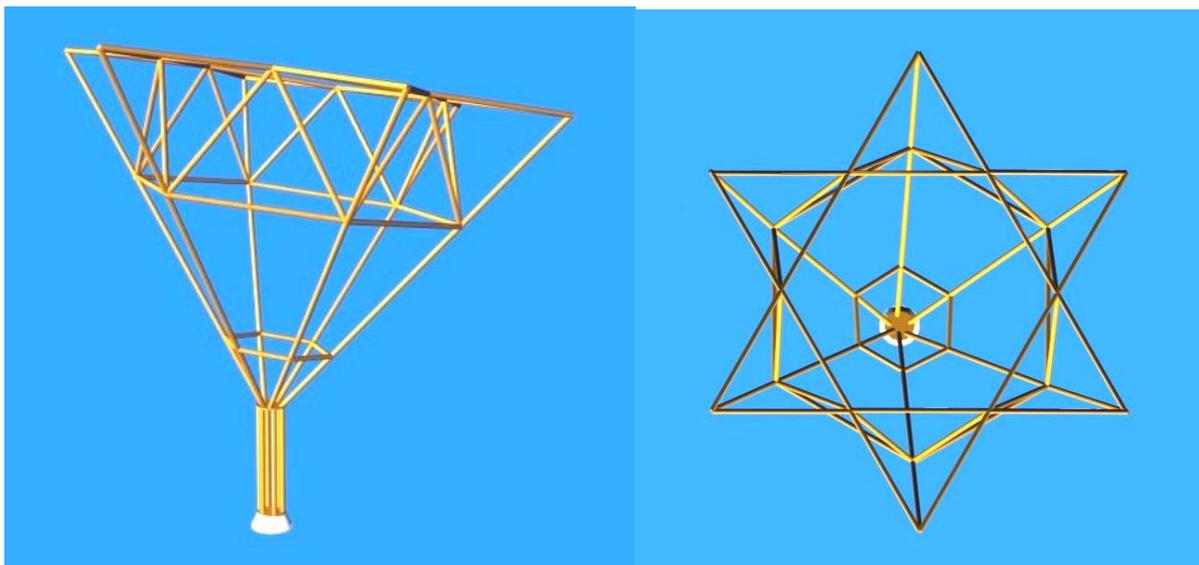


Figura 6-16 – Pilar - vista lateral e superior

### 6.3.2 Sistema Estrutural

O sistema proposto sintetiza dois conceitos de conformação estrutural. O primeiro se refere à criação de um elemento poliédrico onde formas curvas são equacionadas por dois tipos de polígonos: hexágonos e triângulos equiláteros. O segundo se refere à utilização de sistema reticular espacial treliçado posicionando seus vértices nos centros dos triângulos existentes no banzo superior e altura de 2,25 m. Devido ao fato de estar sendo utilizada uma malha de baixa densidade, os nós são também menos complexos (seis barras em cada nó).

O resultado obtido é o de uma treliça espacial curva ou geodésica treliçada de maior leveza, facilitando o uso de iluminação e ventilação zenital necessária nos grandes espaços. A curvatura dada ao plano da cobertura aumentou os efeitos de compressão nas barras, conduzindo as cargas aos pontos de apoio e aliviando a tração no banzo inferior no centro do vão (Figura 6-14).

### 6.4 Projeto 03

No projeto 03, buscou-se utilizar um sistema construtivo mais convencional para estabelecer parâmetros comparativos em relação ao peso por  $m^2$ , densidade, configuração dos

espaços criados, volumetria e relações geométricas entre os modelos 01 e 02 e o mais utilizado pelas fábricas de sistemas de treliças espaciais (Figura 6-17).



Figura 6-17 – Perspectiva do restaurante

Convencionou-se utilizar um sistema de treliças utilizando uma malha com eixos ortogonais de espaçamento constante e alinhamentos diagonais conformando pirâmides. Outra malha quadrangular constitui o banzo superior.

O fechamento do espaço seguiu o alinhamento das diagonais com a intenção de dar maior estabilidade aos grandes planos envidraçados e deixando os pilares visíveis. Também no beiral, o fechamento da cobertura se alinha ao plano das esquadrias deixando aparente as barras da treliça nos balanços externos dando assim maior visibilidade à estrutura. O bloco de serviços é construído com painéis pré-moldados e dotado de terraços como nos projetos anteriores. Para não gerar necessidade de apoios mais altos para as terças da cobertura, foi proposta uma rede de calhas conduzindo as águas até um cintamento coletor no alinhamento do plano das esquadrias. As águas serão recolhidas por tubos, que estarão incorporados ao plano de fechamento. O recuo das esquadrias, com beirais de tamanhos variáveis, resultou na definição de um espaço interno de 1.575 m<sup>2</sup> e 1.130 m<sup>2</sup> de varandas em todo o seu entorno.

#### **6.4.1 Sistema modular Proposto**

A cobertura é composta de 20 x 20 módulos de 2,60 m por 2,60 m, totalizando uma área de 2.700 m<sup>2</sup> e 52 m de lado. Os pilares foram posicionados a dois módulos e meio do alinhamento do beiral originando um vão de 15 módulos ou 39 m. As dimensões do módulo

adotado foram definidas através de pesquisa entre as medidas mais utilizadas por fabricantes que trabalham com sistemas semelhantes. Tratando-se de uma treliça espacial com banzos paralelos e retícula modular idêntica em ambos, as barras utilizadas têm apenas dois tipos de tamanho: barras diagonais e barras horizontais, variando entretanto os esforços e portanto a solicitação das mesmas conforme o seu distanciamento dos pilares. Entretanto, para os planos de fechamento, foi utilizado o alinhamento das diagonais da cobertura para evitar a monotonia dos grandes planos laterais. Também os blocos de serviços apoio e circulação estão dispostos segundo este alinhamento seguindo um reticulado modular de 3,67 x 3,67 m, melhorando assim a proporção dos espaços para as atividades definidas pelo programa (Figura 6-18 e Figura 6-19).

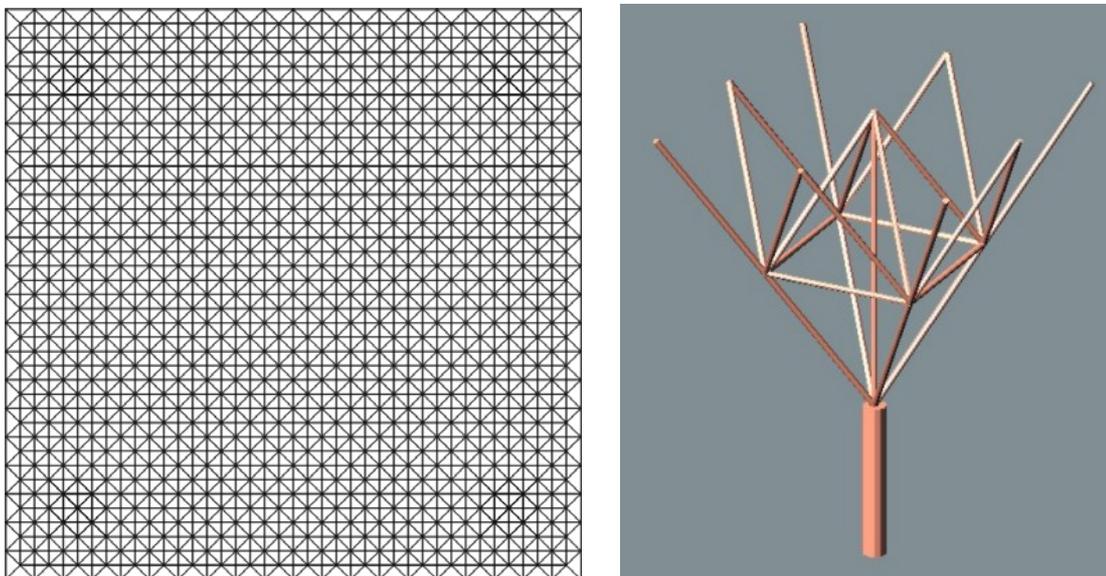


Figura 6-18 – Malha modular e perspectiva do pilar

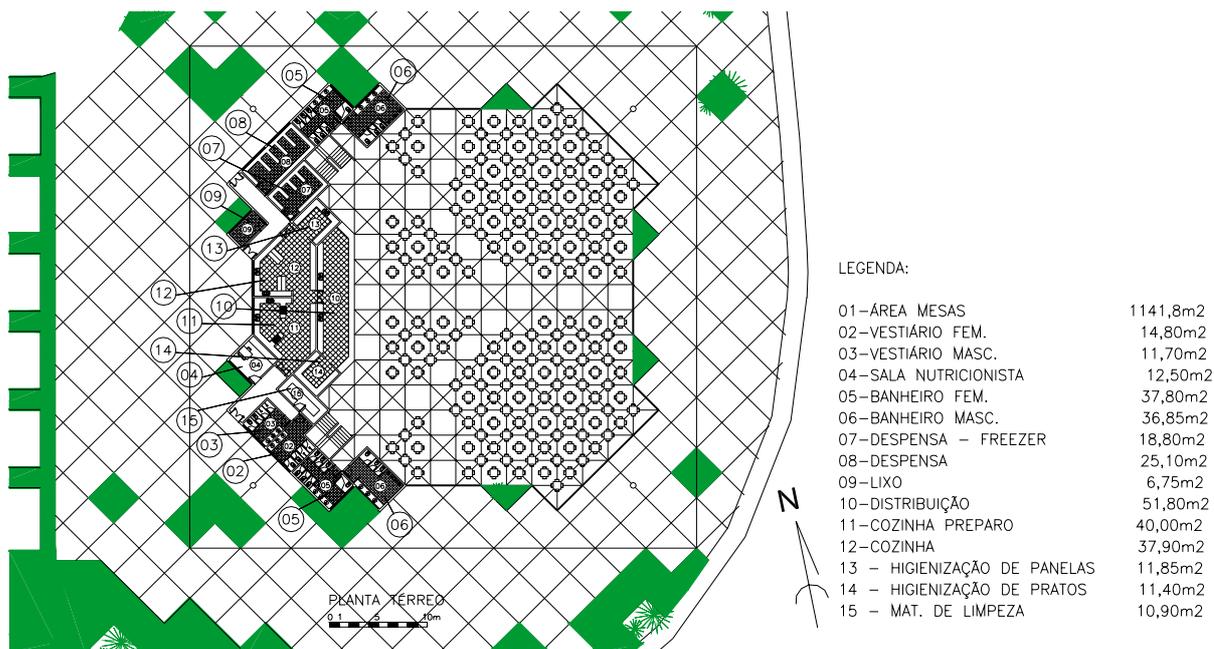


Figura 6-19 – Planta com sistema o sistema modular

#### 6.4.2 Sistema estrutural

O sistema estrutural utilizado adota um reticulado em malha espacial constituída de pirâmides de base quadrangular cujos vértices estão interligados por barras de igual dimensão e angulação (Figura 6-17). Trata-se do sistema mais utilizado em coberturas espaciais, devido à sua simplicidade (apenas dois tamanhos de barra) e alta resistência, vencendo portanto grandes vãos. Os pilares foram posicionados à dois módulos e meio a partir do alinhamento do beiral, proporcionando um balanço, que possibilitou aliviar o efeito das cargas no vão central da estrutura. Quanto aos nós, a simplicidade também está presente, pois sua geometria requer apenas um tipo de nó tanto no banzo superior como no inferior. Como exemplo de utilização, pode-se citar o pavilhão do Anhembi em São Paulo

#### 6.5 Processo Construtivo

No projeto 01, a construção baseia-se em um sistema de módulos independentes, com a finalidade de permitir expansão do espaço, caso necessário. Cada módulo é portanto autoportante, podendo ser planejado separadamente. A base de concreto que funciona simultaneamente como fundação e coletora de águas pluviais serve ainda como elemento nivelador na base dos pilares e conseqüentemente da cobertura. Cada módulo estrutural deve

portanto ser montado separadamente. O fechamento da cobertura, apoiado sobre terças, deve preceder a locação das lajes de cobertura dos blocos de serviço que tem também estrutura e fechamentos especiais com painéis pré-moldados. Os planos de esquadrias em todos os casos devem ser autoportantes, e os vidros com maior ou menor grau de filtragem solar para evitar excesso de luminosidade.

No caso dos projetos 02 e 03, que utilizam treliças espaciais curvas e planas, o sistema prevê a utilização de barras identificadas por tipologias que normalmente são posicionadas no próprio canteiro, montadas no chão e içadas posteriormente, quando forem montados os pilares. No projeto 02, devido à curvatura proposta, o sistema de recolhimento das águas será feito no alinhamento dos pilares e através destes, conduzidas ao chão, para reservatório subterrâneo. A declividade natural que a forma proporciona, permite o apoio direto das telhas metálicas sobre terças apoiadas sobre as barras do banzo superior. No projeto 03, a coleta de águas pluviais obedece a um sistema modular secundário que conduz as águas ao alinhamento dos pilares onde são recolhidas e conduzidas ao reservatório tal como nos demais projetos. Este procedimento evita apoios secundários de maiores proporções nas barras do banzo superior com a finalidade de assegurar a declividade de 5% pretendida. Uma vez finalizada a cobertura, procede-se de maneira análoga ao projeto 01 para construção do bloco de serviços e sua laje de cobertura, assim como a constituição de sua impermeabilização e ambientação dos jardins previstos no terraço. Os planos de esquadrias estão recuados do alinhamento do beiral, movimentando-se no sentido de proporcionar seu maior enrijecimento e enriquecer a leitura do volume proposto. No espaço existente entre os banzos, superior e inferior, os planos de fechamento serão constituídos por venezianas metálicas, assegurando assim uma ventilação adequada ao ambiente. Os planos de esquadrias estarão sempre acompanhando a malha estrutural proposta. Em todos os modelos, será utilizado forro de gesso cartonado que será fixado na parte inferior das terças após a colocação de manta asfáltica de isolamento térmico. Em todos os casos a cobertura metálica será em telha sanduíche prevendo-se obter portanto um bom isolamento acústico. Devido às grandes dimensões dos espaços estão previstas faixas periódicas de cobertura translúcida, em policarbonato alveolar onde conseqüentemente não será utilizado forro.

No capítulo sete, será feita uma análise estrutural dos projetos propostos, com a finalidade de se obter seu dimensionamento, procedendo assim uma análise comparativa de suas vantagens e desvantagens como processo construtivo.

## CAPITULO VII

### 7 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DOS PROJETOS PROPOSTOS

Neste capítulo faz-se o levantamento de cargas e a análise tridimensional da estrutura dos três modelos de cobertura propostos.

#### 7.1 Carregamentos considerados

Os tipos de carregamento utilizados para o desenvolvimento desse projeto foram sobrecarga (Sc), carga permanente (CP) e ações devido ao esforço do vento (CV). Os carregamentos “Sc” e “CP” foram obtidos, respectivamente, através da NBR 6120:1980 e de catálogos de fabricantes, enquanto o carregamento “CV” foi obtido através da NBR 6123:1988.

Foi considerado o seguinte valor para “Sc”:

- 0,50 kN/m<sup>2</sup>, para sobrecarga de cobertura.

#### 7.2 Combinações de ações consideradas

Os carregamentos atuantes devem ser combinados devido ao fato dos mesmos poderem atuar simultaneamente. Com isso, são definidos dois tipos de combinações de ações de carregamento de acordo com a NBR 8800:1986:

Combinações de ações para os estados limites últimos e;

Combinações de ações para os estados limites de utilização.

#### 7.3 Análise Tridimensional

Para a realização da análise estrutural 3D, foi utilizado o software ANSYS Versão 6.0 (ANSYS, 2001). Nesse software as análises são realizadas através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Este permite a visualização da estrutura em 3D original e deformada, os esquemas de carregamento e os diagramas de esforços normal, cortante e momento fletor. As cargas podem ser pontuais, uniformes, trapezoidais e de temperatura. Qualquer tipo de vinculação, flexível, rígida ou semi-rígida, pode ser considerada.

## **7.4 Projeto 01**

Nesse item são apresentados o levantamento de cargas, a análise tridimensional da estrutura e o dimensionamento do Projeto 01.

### **7.4.1 Levantamento de ações do projeto 01**

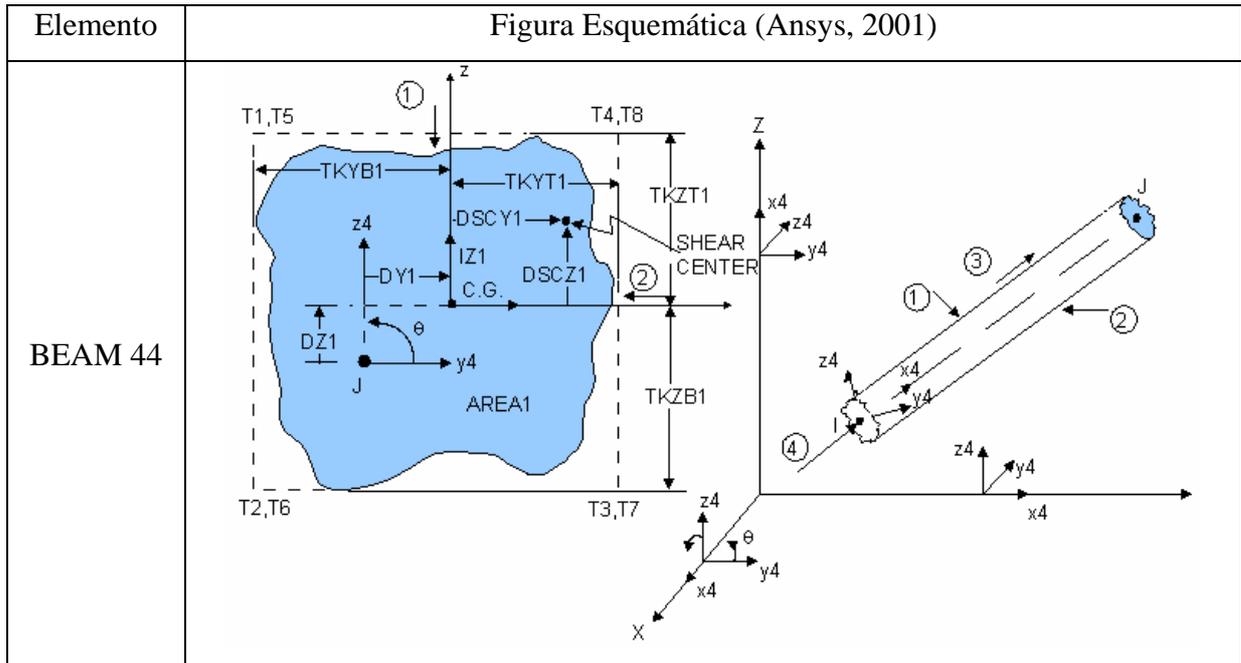
Em relação ao carregamento “CP”, foram considerados os seguintes itens:

- estrutura tubular principal e secundária;
- telha metálica tipo sanduíche:  $0,12 \text{ kN/m}^2$ ;
- telha tipo translúcida:  $0,017 \text{ kN/m}^2$ .

### **7.4.2 Análise estrutural tridimensional do projeto 01**

No Projeto 01 foi realizada análise linear da edificação. O elemento utilizado na análise, mostrado na Tabela 7-1, foi um elemento de barra uniaxial tridimensional de dois nós com seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações em relação aos eixos “x”, “y” e “z”), o elemento BEAM 44. Os tipos de cargas utilizadas foram cargas pontuais e uniformemente distribuídas e as ligações entre barras foram consideradas rígidas.

Tabela 7-1– Elementos utilizados na análise estrutural do Projeto 01.



Para o Projeto 01 foram adotados perfis tubulares para todas as barras componentes da edificação. A análise estrutural 3D foi realizada com o objetivo de verificar o comportamento da estrutura em três dimensões, obtendo-se uma análise mais próxima da realidade. Primeiramente, toda a estrutura foi modelada em três dimensões no *software* ANSYS Versão 6.0 (ANSYS, 2001). Nas Figura 7-1 e Figura 7-2 apresentam-se respectivamente a configuração do módulo de origem da estrutura e modelagem de toda a estrutura do Projeto 01, respectivamente.

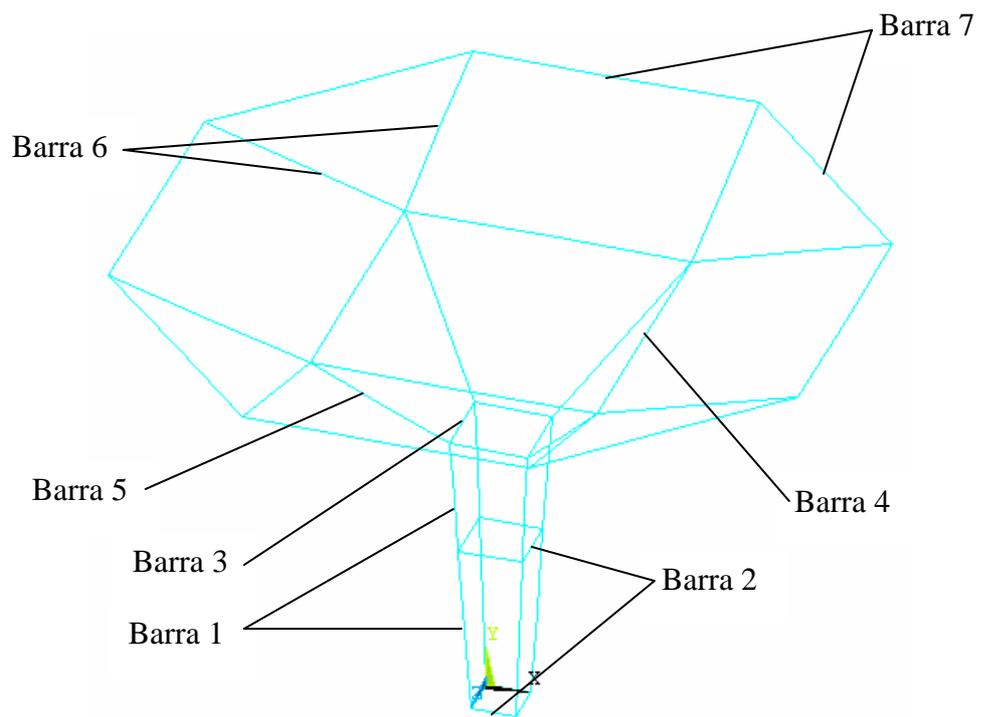


Figura 7-1 – Configuração do módulo de origem da estrutura do Projeto 01

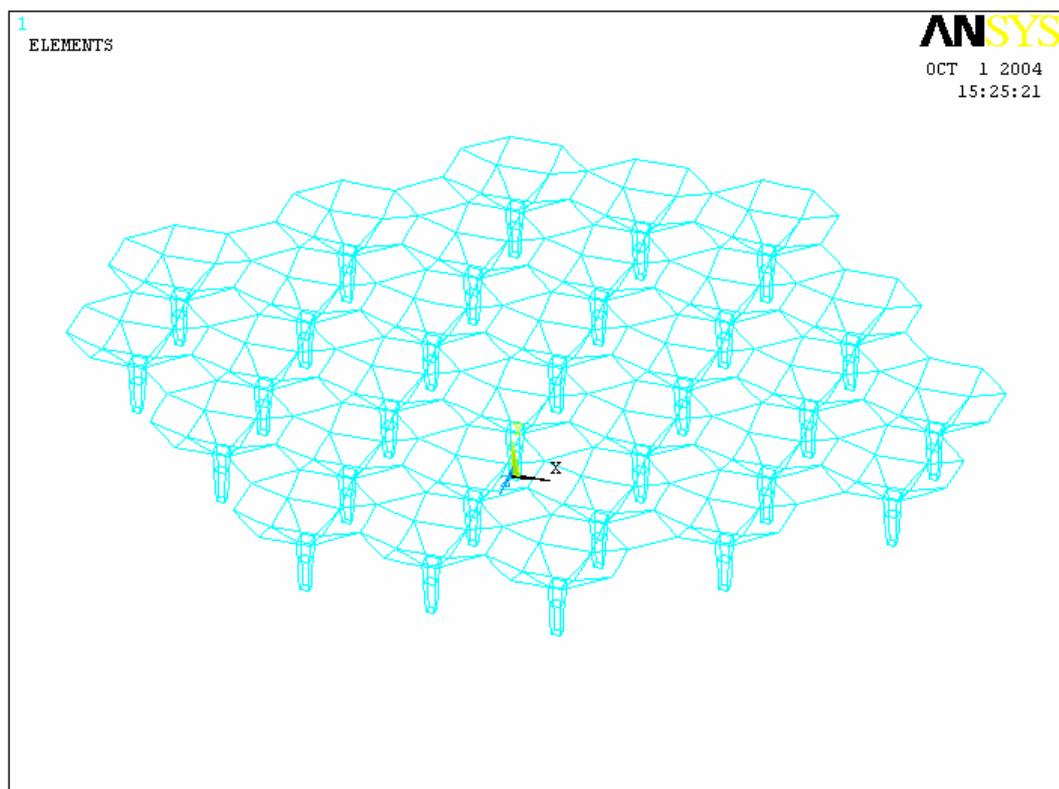


Figura 7-2 – Modelagem da estrutura 3D do Projeto 01.

Em seguida, os carregamentos “CP”, “Sc”, “CV-90°” (carga de vento a 90°) e “CV-0°” (carga de vento a 0°) foram aplicados. Na Figura 7-3 mostra-se o carregamento CP como exemplo desta etapa da análise.

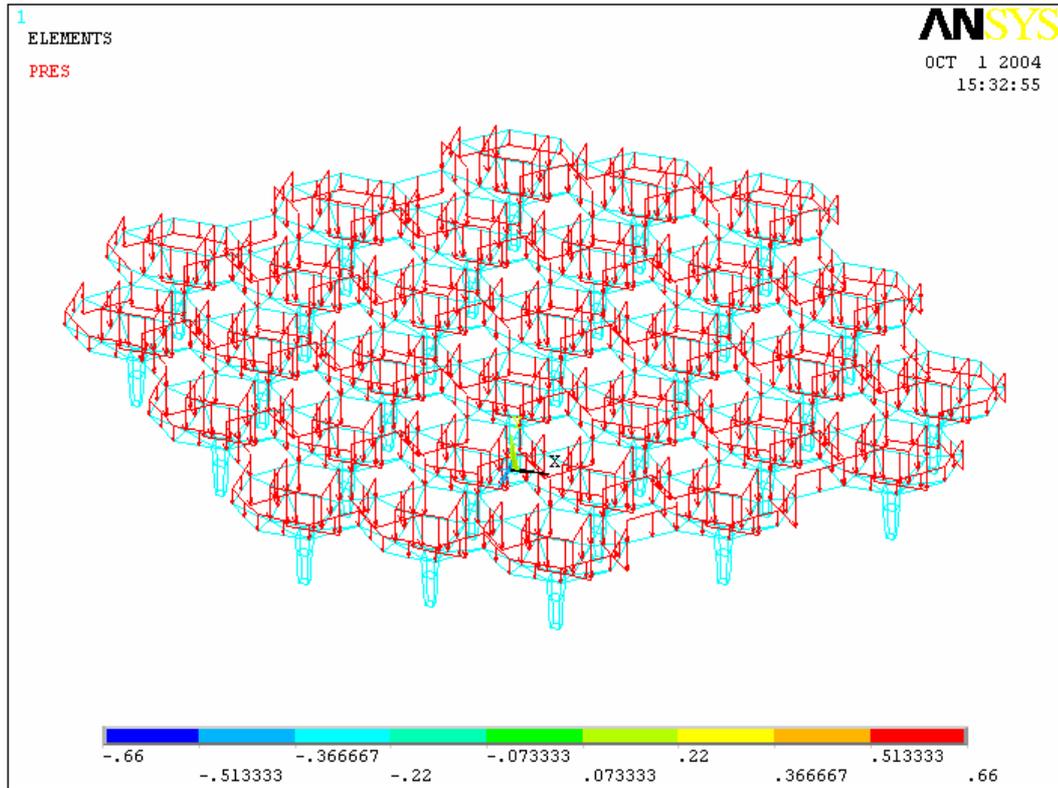


Figura 7-3 – Carregamento “CP” aplicado na estrutura (kN/m).

Após a aplicação dos tipos de carregamento, foram realizadas todas as combinações de ações para o Estado Limite Último e determinaram-se os esforços solicitantes de cálculo para cada barra. Esses esforços foram determinados verificando-se a pior situação de esforço atuante em cada barra, ou seja, a combinação de ação que mais solicitou cada barra. Na Tabela 7-2 são apresentados os esforços solicitantes máximos em cada barra, e a localização destas barras são mostradas na Figura 7-1.

Com a obtenção dos esforços solicitantes de cálculo em cada barra, foi realizado o dimensionamento destas barras de acordo com a NBR 8800:1986, considerando aço VMB 300 ( $f_y = 300$  Mpa). Na Tabela 7-3 identificam-se os perfis determinados para as barras a partir das análises e do dimensionamento.

Tabela 7-2 - Esforços solicitantes em cada barra do Projeto 01.

Elementos	Esforços Solicitantes de Cálculo				
	Momento fletor (kNm)		Esforço cortante (kN)		Esforço Normal (kN)
	Mdx	Mdy	Vdx	Vdy	Nd
Barra 1	27,53	27,40	-	41,50	59,11
Barra 2	26,28	7,27	79,00	-	-28,91
Barra 3	10,11	7,05	-	17,80	30,70
Barra 4	4,00	3,80	6,60	-	11,20
Barra 5	10,16	7,60	5,30	-	84,31
Barra 6	4,51	4,51	2,90	-	60,10
Barra 7	2,61	1,10	4,70	-	-70,52

Tabela 7-3 – Perfis utilizados para as barras na análise de dimensionamento da estrutura em 3D do Projeto 01.

Elementos	Perfis
Barra 1	TB $\phi$ 141,3 x 19,1
Barra 2	TB $\phi$ 141,3 x 9,5
Barra 3	TB $\phi$ 141,3 x 9,5
Barra 4	TB $\phi$ 141,3 x 9,5
Barra 5	TB $\phi$ 141,3 x 5,6
Barra 6	TB $\phi$ 141,3 x 5,6
Barra 7	TB $\phi$ 141,3 x 5,6

Realizado todo o dimensionamento da estrutura da edificação, foram realizadas as combinações de ações para os Estados Limites de Utilização, de acordo com a NBR 8800:1986. Na Figura 7-4 são mostrados os deslocamentos verticais em metros dos elementos constituintes da estrutura do Projeto 01.

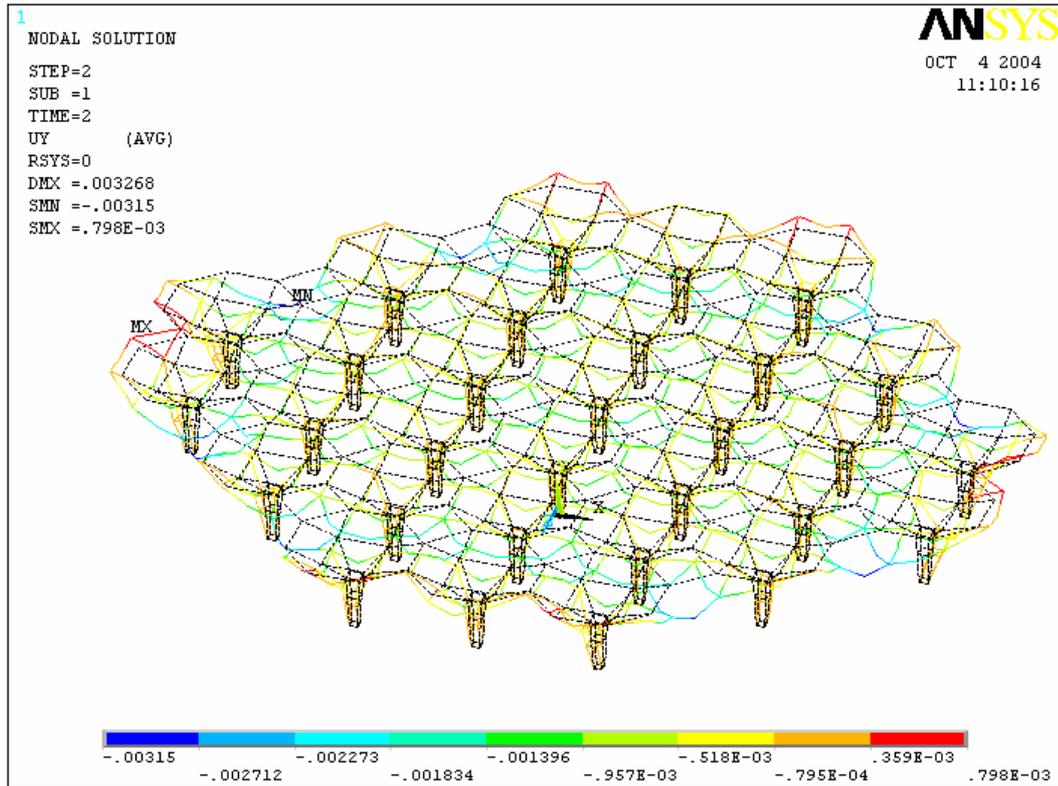


Figura 7-4 – Deslocamentos verticais dos elementos do Projeto 01.

O deslocamento vertical máximo admissível para as vigas de cobertura da edificação é de  $L/180$  (Tabela 26 – Anexo C – NBR 8800:1986), onde “L” é o vão livre teórico da viga em estudo. Assim, tem-se um deslocamento vertical máximo admissível de 22,22 mm, pois as vigas têm vão de 4,00 m. Portanto, como o maior deslocamento vertical da edificação foi de 3,15 mm, a edificação satisfaz a esse estado limite de utilização.

Após esta verificação, determinaram-se os deslocamentos horizontais da estrutura. Nas Figura 7-5 e Figura 7-6 ilustram-se, através de saída gráfica do software utilizado, os deslocamentos horizontais em metros dos elementos resultantes da aplicação das combinações de ações necessárias.

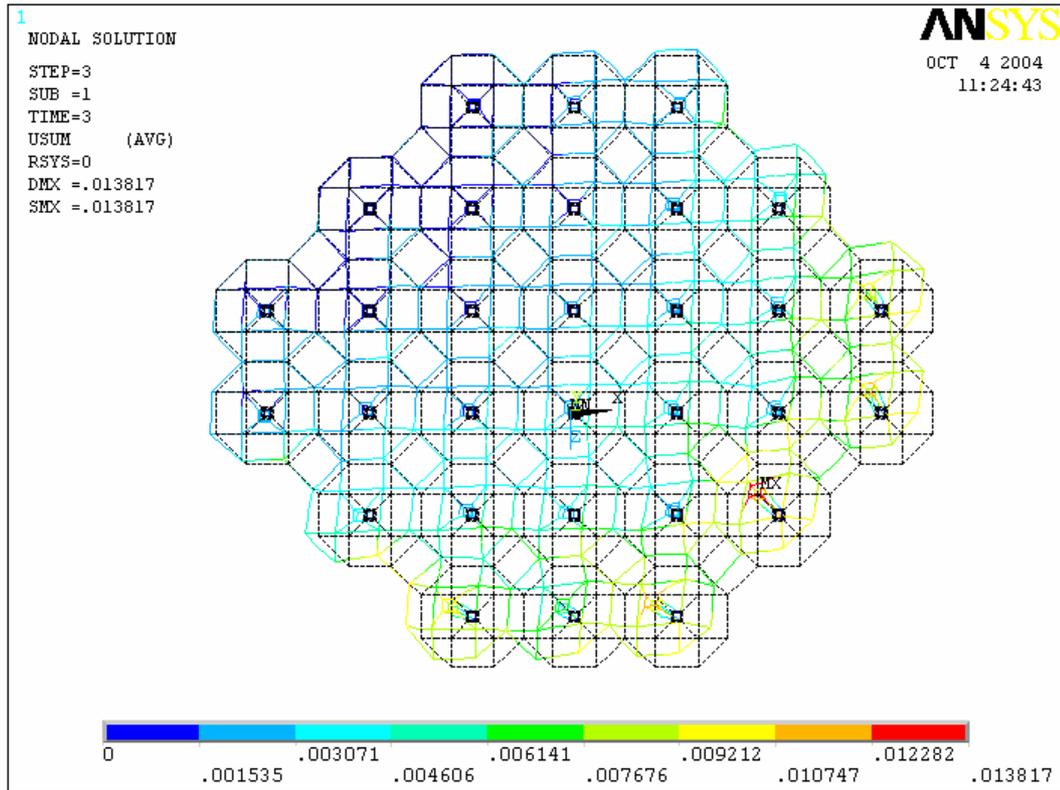


Figura 7-5 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-90° dos elementos do Projeto 1.

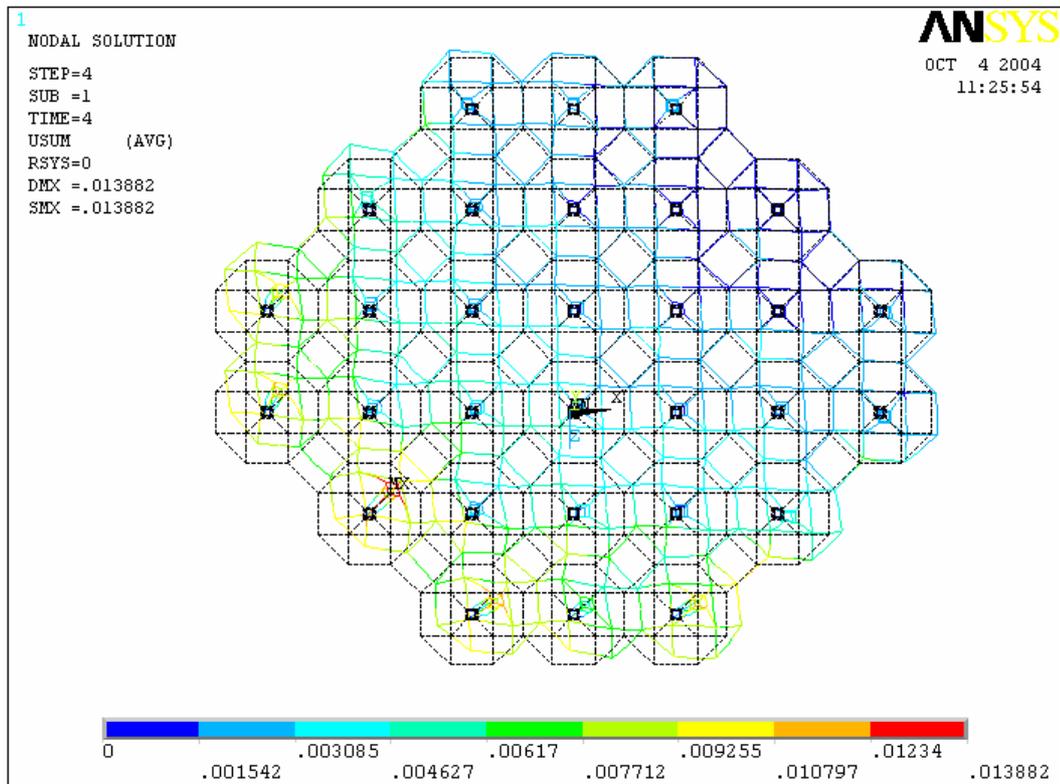


Figura 7-6 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-0° dos elementos do Projeto 1.

O deslocamento horizontal máximo admissível para a edificação é de  $H/300$ , onde “H” é a altura da edificação (Tabela 26 – Anexo C – NBR 8800:1986). Assim, tem-se um deslocamento horizontal máximo admissível de 23,33 mm, pois a  $H = 7,00$  m. Portanto, como o maior deslocamento horizontal da edificação foi de 13,88 mm (Figura 7-6), a edificação satisfaz às verificações desse estado limite de utilização.

Após a verificação dos Estados Limites de Utilização, tem-se na Tabela 7-4 o quantitativo de material utilizado no Projeto 01 referente as barras constituintes da estrutura, considerando análise estrutural em 3D.

Tabela 7-4 – Quantitativo de material utilizado no Projeto 01

<b>Elementos</b>	<b>Perfis</b>	<b>L (m)</b>	<b>p (kg/m)</b>	<b>Quant.</b>	<b>Peso (kg)</b>
Barra 1	TB $\phi 141,3 \times 19,1$	4,30	57,40	120	29.618,40
Barra 2	TB $\phi 141,3 \times 9,5$	0,89	31,00	240	6.621,60
Barra 3	TB $\phi 141,3 \times 9,5$	1,09	31,00	120	4.054,80
Barra 4	TB $\phi 141,3 \times 9,5$	4,00	31,00	120	14.880,00
Barra 5	TB $\phi 141,3 \times 5,6$	2,80	18,60	120	6.249,60
Barra 6	TB $\phi 141,3 \times 5,6$	2,94	18,60	240	13.124,16
Barra 7	TB $\phi 141,3 \times 5,6$	4,00	18,60	196	14.582,40
<b>Peso Total (kg)</b>					<b>89.130,96</b>
<b>Área Total (m<sup>2</sup>)</b>					<b>2.936,15</b>
<b>Taxa Final (kg/m<sup>2</sup>)</b>					<b>30,36</b>

## **7.5 Projeto 02**

Nesse item são apresentados o levantamento de cargas, a análise tridimensional da estrutura e o dimensionamento do Projeto 02.

### **7.5.1 Levantamento de Ações do Projeto 02**

Em relação ao carregamento “CP”, foram considerados os seguintes itens:

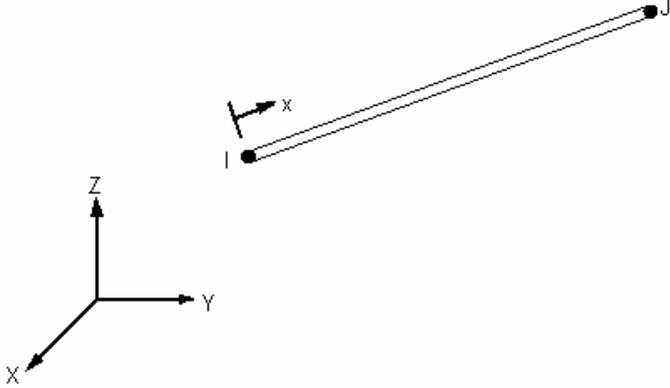
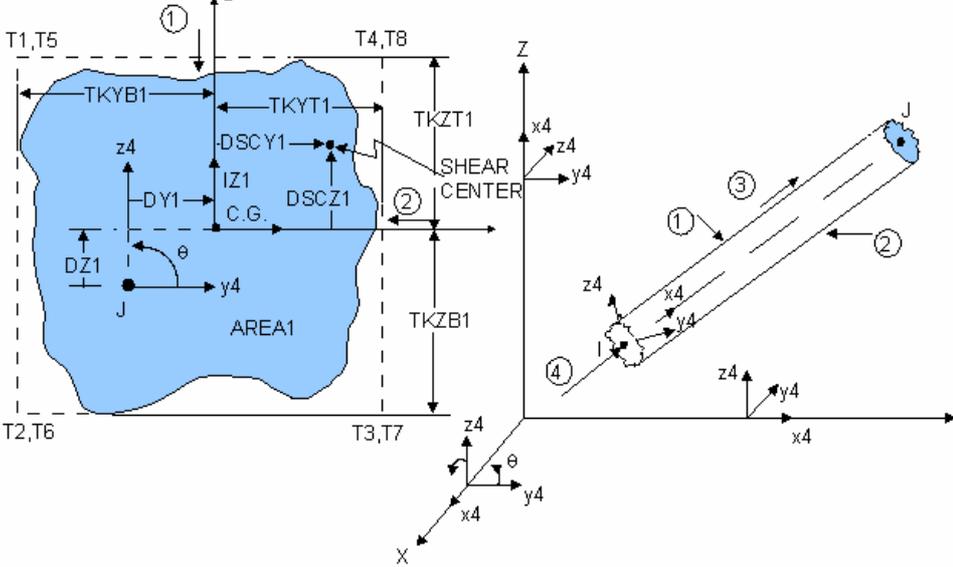
- estrutura tubular;
- telha metálica tipo sanduíche:  $0,12 \text{ kN/m}^2$ .

### **7.5.2 Análise Estrutural Tridimensional do Projeto 02**

No Projeto 02 foi realizada análise linear da edificação. Os elementos utilizados na análise, mostrados na Tabela 7-5, foram elementos de barra uniaxiais tridimensionais de dois nós: elementos LINK 180 e BEAM 44. O primeiro é um elemento com três graus de liberdade por nó (translações em relação aos eixos “x”, “y” e “z”) e o segundo um elemento com seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações em relação aos eixos “x”, “y” e “z”). Os tipos de cargas utilizadas foram cargas pontuais e uniformemente distribuídas e as ligações foram consideradas flexíveis e rígidas.

Para o Projeto 02 foram adotados perfis tubulares para todas as barras componentes da edificação. A análise estrutural 3D foi realizada com o objetivo de verificar o comportamento da estrutura em três dimensões, obtendo uma análise mais próxima da realidade.

Tabela 7-5 – Elementos utilizados na análise estrutural do Projeto 02.

Elemento	Figuras Esquemáticas (Ansys, 2001)
LINK 180	
BEAM 44	

Primeiramente, toda a estrutura foi modelada em três dimensões no *software* ANSYS Versão 6.0 (ANSYS, 2001). Nas Figura 7-7 e Figura 7-8 apresenta-se respectivamente a modelagem de toda a estrutura e a localização das barras constituintes da estrutura do Projeto 02, respectivamente.

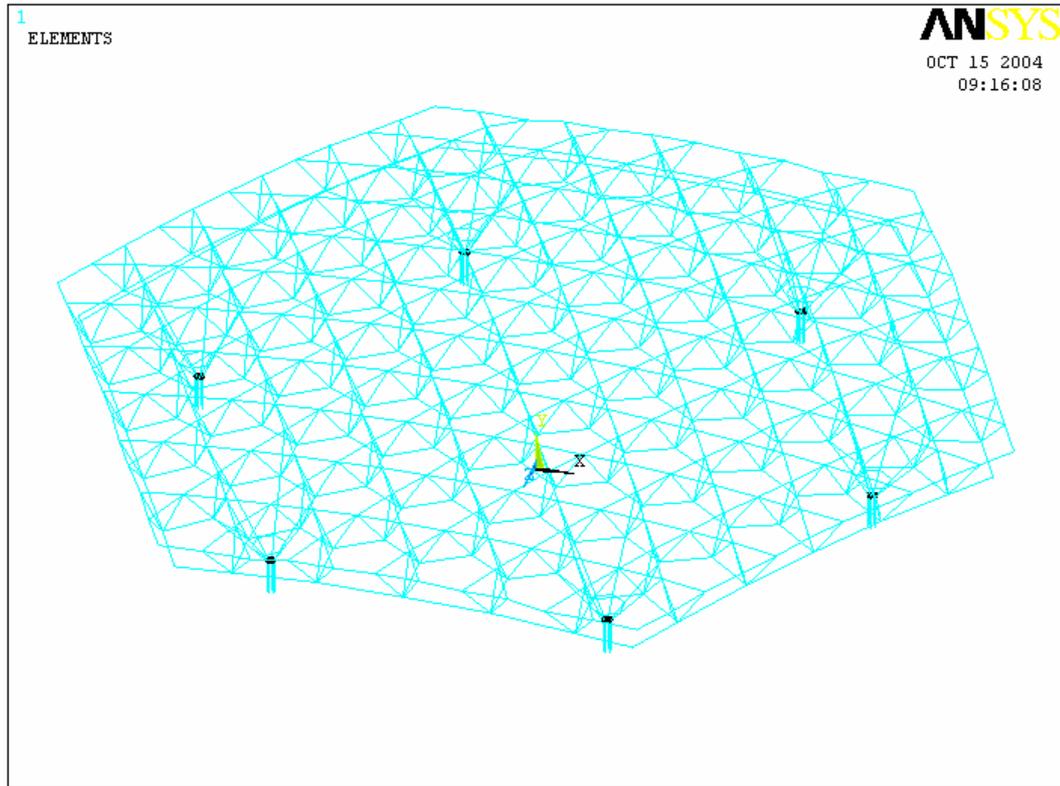
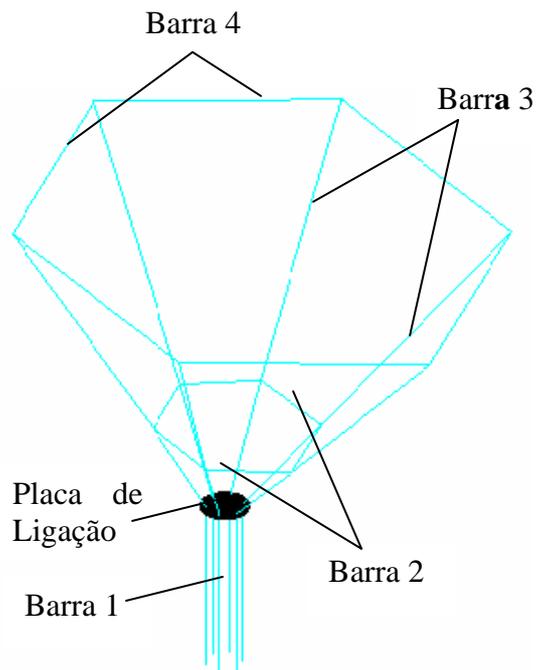
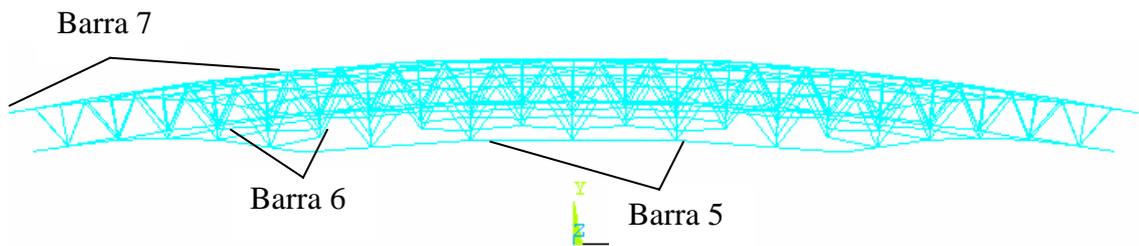


Figura 7-7 – Modelagem da estrutura 3D do Projeto 02.



a) Barras dos pilares.



b) Barras da cobertura.

Figura 7-8 – Localização das barras constituintes da estrutura do Projeto 02.

Em seguida, os carregamentos “CP”, “Sc”, “CV-90°” (carga de vento a 90°) e “CV0°” (carga de vento a 0°) foram aplicados. Na Figura 7-9 mostra-se o carregamento “CV-90°” como exemplo desta etapa da análise.

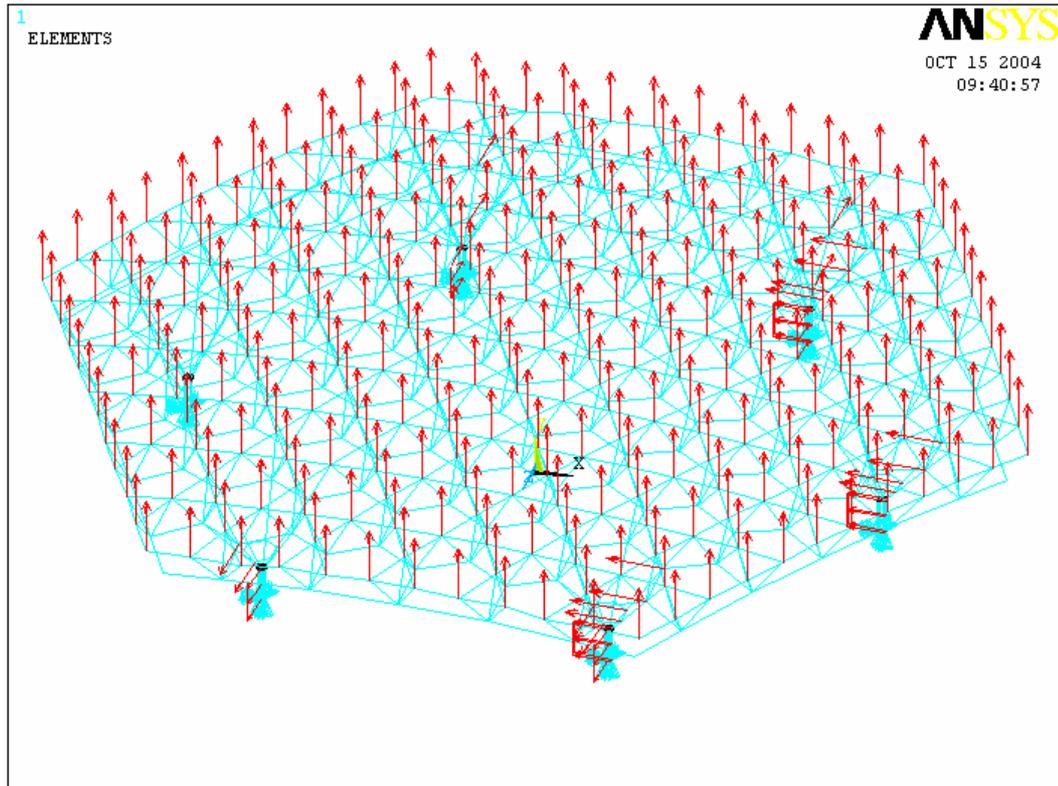


Figura 7-9 – Carregamento “CV-90°” aplicado na estrutura.

Após a aplicação dos tipos de carregamento, foram realizadas todas as combinações de ações para o Estado Limite Último. Determinaram-se os esforços solicitantes de cálculo para cada barra. Esses esforços foram determinados verificando-se a pior situação de esforço atuante em cada barra, ou seja, a combinação de ação que mais solicitou cada barra. Na Tabela 7-6 são apresentados os esforços solicitantes máximos em cada barra. A localização destas barras é mostrada na Figura 7-8.

Tabela 7-6 – Esforços solicitantes em cada barra do Projeto 02

Elementos	Esforços Solicitantes de Cálculo				
	Momento fletor (kNm)		Esforço cortante (kN)		Esforço Normal (kN)
	Mdx	Mdy	Vdx	Vdy	Nd
Barra 1	98,06	43,27	-	69,36	243,82
Barra 2	-	-	-	-	-30,80
Barra 3	47,74	73,31	-	37,15	251,75
Barra 4	6,28	4,73-	3,90	-	112,87
Barra 5	7,82	5,40	3,23	-	-170,17
Barra 6	-	-	-	-	-152,80
Barra 7	18,68	4,83	13,94	-	-164,11

Com a obtenção dos esforços solicitantes de cálculo em cada barra, foi realizado o dimensionamento destas barras e da Placa de Ligação de acordo com a NBR 8800:1986, considerando aço VMB 300 ( $f_y = 300$  Mpa). Assim, determinou-se a espessura de 63,50 mm para a chapa das Placas de Ligações e a Tabela 7-7 identifica os perfis determinados para as barras a partir das análises e do dimensionamento.

Tabela 7-7– Perfis utilizados para as barras na análise de dimensionamento da estrutura em 3D do Projeto 02

Elementos	Perfis
Barra 1	TB $\phi 219,1 \times 14,3$
Barra 2	TB $\phi 101,6 \times 4,0$
Barra 3	TB $\phi 219,1 \times 14,3$
Barra 4	TB $\phi 114,3 \times 6,4$
Barra 5	TB $\phi 141,3 \times 5,6$
Barra 6	TB $\phi 88,9 \times 4,4$
Barra 7	TB $\phi 141,3 \times 7,9$

Realizado todo o dimensionamento da estrutura da edificação, foram realizadas as combinações de ações para os Estados Limites de Utilização, de acordo com a NBR 8800:1986. Na Figura 7-10 são mostrados os deslocamentos verticais em metros dos elementos constituintes da estrutura do Projeto 02.

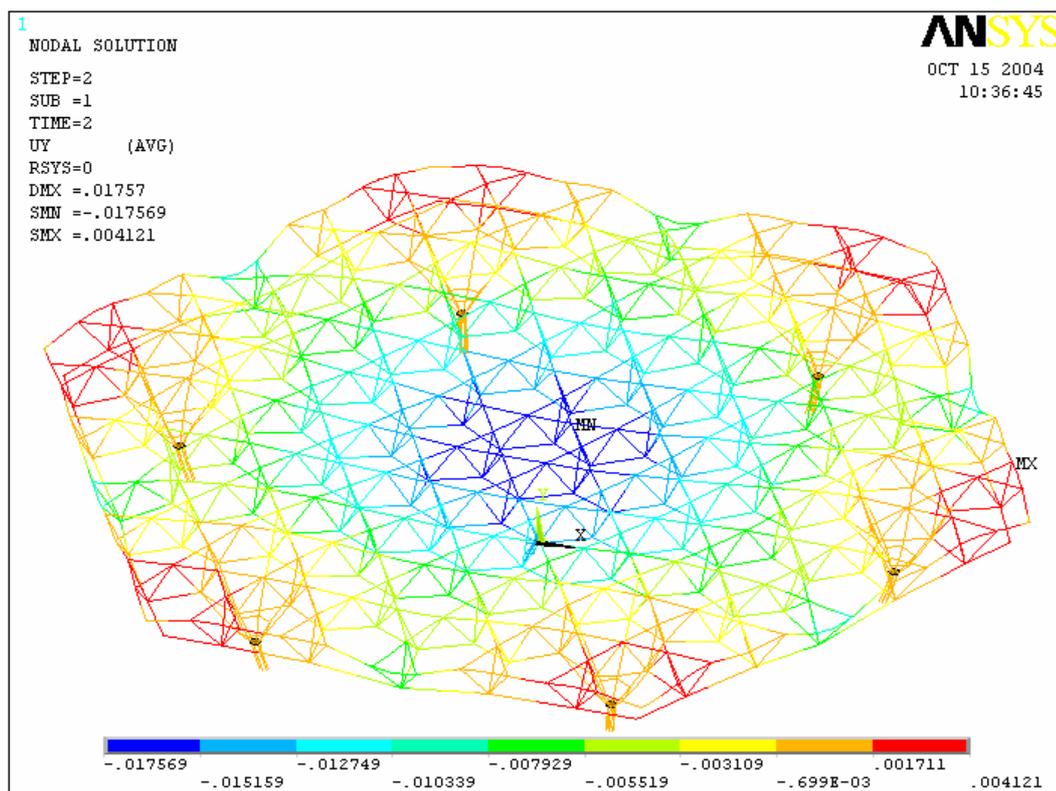


Figura 7-10 – Deslocamentos verticais dos elementos do Projeto 02.

O deslocamento vertical máximo admissível para as vigas de cobertura da edificação é de  $L/180$  (Tabela 26 – Anexo C – NBR 8800:1986), onde “L” é o vão livre teórico da viga em estudo. Assim, tem-se um deslocamento vertical máximo admissível de 234,44 mm para toda a estrutura (vão livre da estrutura é de 42,20 m) e de 15,27 mm para cada barra horizontal da cobertura (vão livre de 2,75 m). Portanto, como o maior deslocamento vertical da edificação foi de 17,57 mm e o maior deslocamento vertical de uma barra da cobertura foi de 7,23 mm, a edificação satisfaz a esse estado limite de utilização.

Após esta verificação, determinaram-se os deslocamentos horizontais da estrutura. Nas Figura 7-11 e Figura 7-12 ilustram-se, através de saída gráfica do *software* utilizado, os deslocamentos horizontais em metros dos elementos resultantes da aplicação das combinações de ações necessárias. O deslocamento horizontal máximo admissível para a edificação é de  $H/300$ , onde “H” é a altura da edificação (Tabela 26 – Anexo C – NBR 8800:1986). Assim, tem-se um deslocamento horizontal máximo admissível de 33,33 mm, pois a  $H = 10,0$  m. Portanto, como o maior deslocamento horizontal da edificação foi de 31,04 mm (Figura 7-12), a edificação satisfaz às verificações desse estado limite de utilização.

Após a verificação dos Estados Limites de Utilização, tem-se na Tabela 7-8 o quantitativo de material utilizado no Projeto 02 referente às barras e Placas de ligações constituintes da estrutura, considerando análise estrutural em 3D.

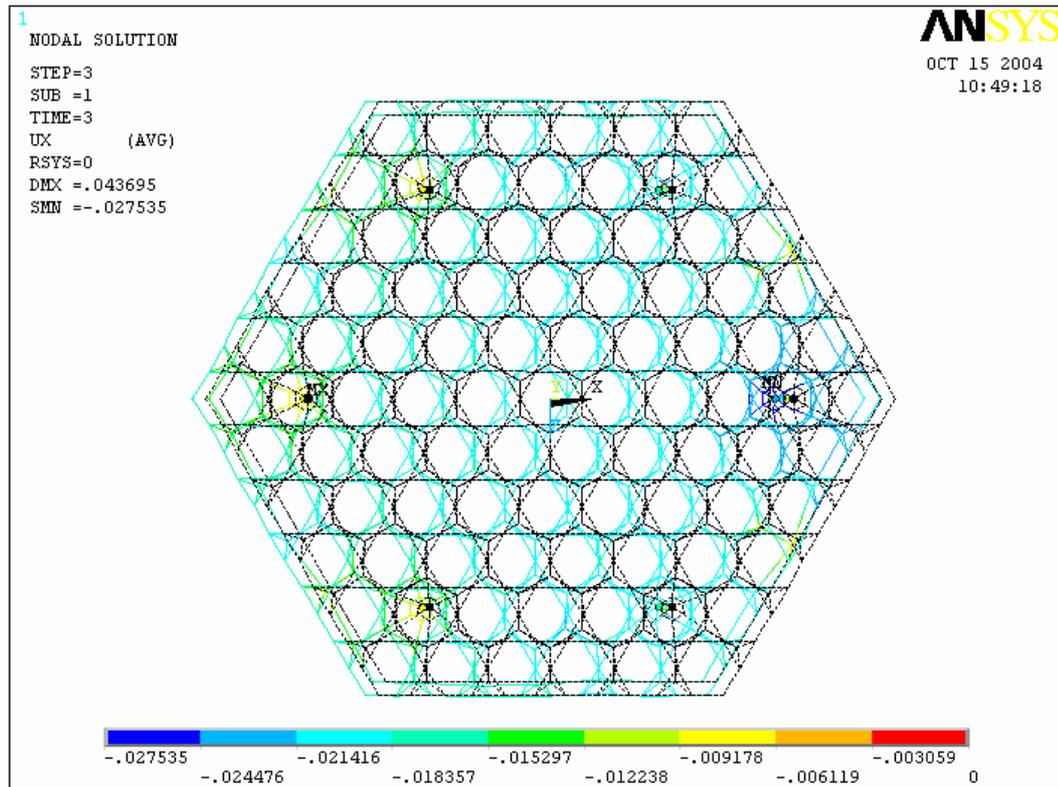


Figura 7-11 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-90° dos elementos do Projeto 02

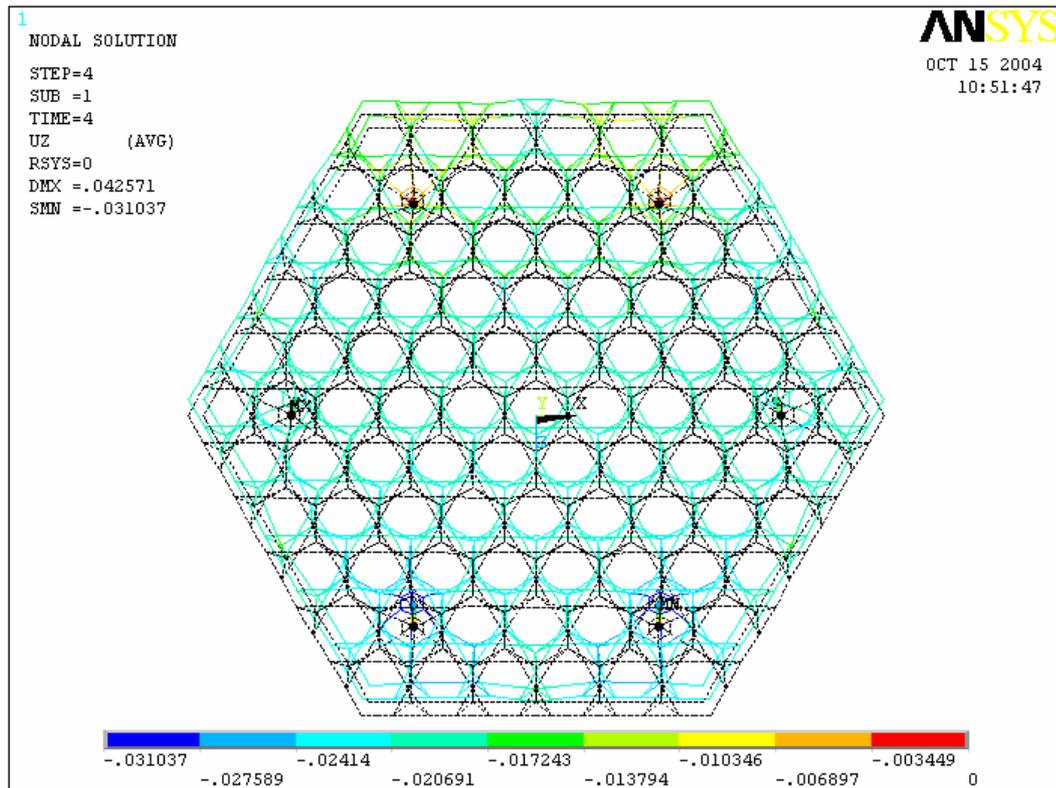


Figura 7-12 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-0° dos elementos do Projeto 02.

Tabela 7-8 – Quantitativo de material utilizado no Projeto 02.

Elementos	Perfis	L (m)	p (kg/m)	Quant.	Peso (kg)
Barra 1	TB $\phi$ 219,1x14,3	2,20	72,10	36	5.710,32
Barra 2	TB $\phi$ 101,6x4,0	1,15	9,54	36	394,96
Barra 3	TB $\phi$ 219,1x14,3	5,00	72,10	36	12.978,00
Barra 4	TB $\phi$ 114,3x6,4	3,15	16,90	36	1.916,46
Barra 5	TB $\phi$ 141,3x5,6	3,12	18,60	240	13.927,68
Barra 6	TB $\phi$ 88,9x4,4	2,75	9,11	538	13.478,25
Barra 7	TB $\phi$ 141,3x7,9	2,75	26,10	576	41.342,40
Placa de ligação	CH 63,5	-	145,00	6	870,00
<b>Peso Total (kg)</b>					<b>90.618,06</b>
<b>Área Total (m<sup>2</sup>)</b>					<b>2.338,26</b>
<b>Taxa Final (kg/m<sup>2</sup>)</b>					<b>38,75</b>

## **7.6 Projeto 03**

Nesse item são apresentados o levantamento de cargas, a análise tridimensional da estrutura e o dimensionamento do Projeto Convencional (Projeto 03).

### **7.6.1 Levantamento de Ações do Projeto 03**

Em relação ao carregamento “CP”, foram considerados os seguintes itens:

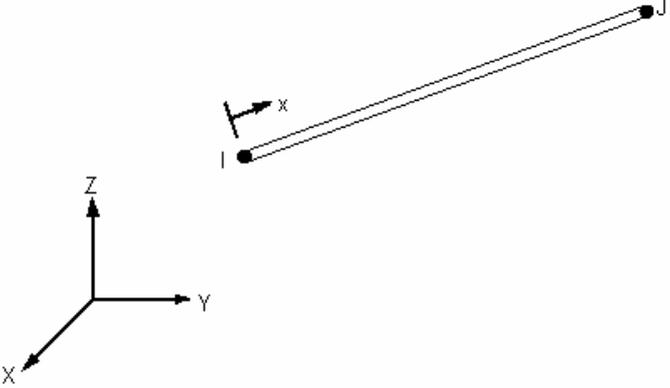
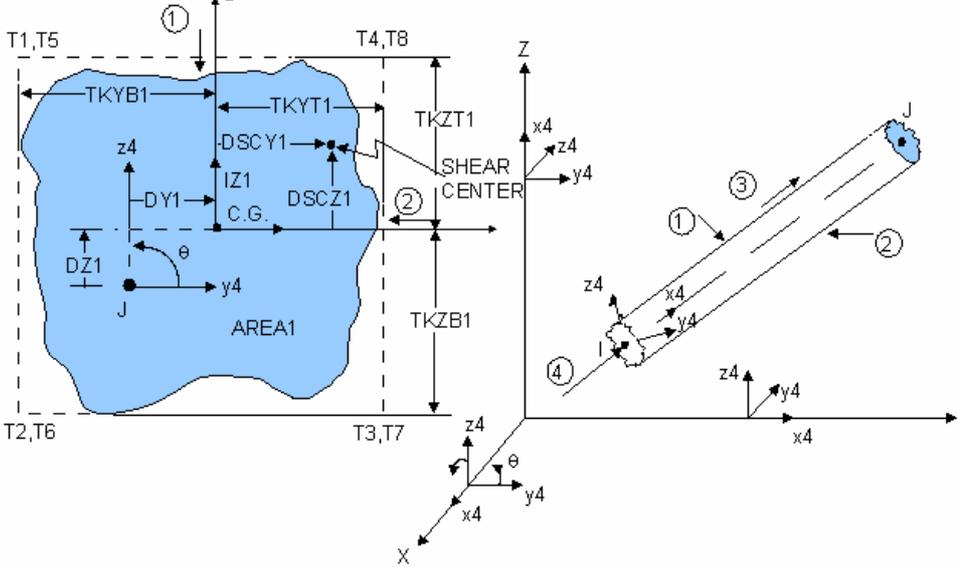
- estrutura tubular;
- telha metálica tipo sanduíche:  $0,12 \text{ kN/m}^2$ .

### **7.6.2 Análise Estrutural Tridimensional do Projeto 03**

No Projeto 03 foi realizada análise linear da edificação. Os elementos utilizados na análise, mostrados na tabela 1.1, foram elementos de barra uniaxiais tridimensionais de dois nós: elementos LINK 180 e BEAM 44. O primeiro é um elemento com três graus de liberdade por nó (translações em relação aos eixos “x”, “y” e “z”) e o segundo um elemento com seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações em relação aos eixos “x”, “y” e “z”). Os tipos de cargas utilizadas foram cargas pontuais e uniformemente distribuídas e as ligações foram consideradas flexíveis e rígidas.

Para o Projeto 03 foram adotados perfis tubulares para todas as barras componentes da edificação. A análise estrutural 3D foi realizada com o objetivo de verificar o comportamento da estrutura em três dimensões, obtendo uma análise mais próxima da realidade.

Tabela 7-9 – Elementos utilizados na análise estrutural do Projeto Convencional.

Elemento	Figuras Esquemáticas (ANSYS, 2001)
LINK 180	
BEAM 44	

Primeiramente, toda a estrutura foi modelada em três dimensões no *software* ANSYS Versão 6.0 (ANSYS, 2001). Nas Figura 7-13 e Figura 7-14 apresenta-se respectivamente a modelagem de toda a estrutura e a localização das barras constituintes da estrutura do Projeto 03, respectivamente.

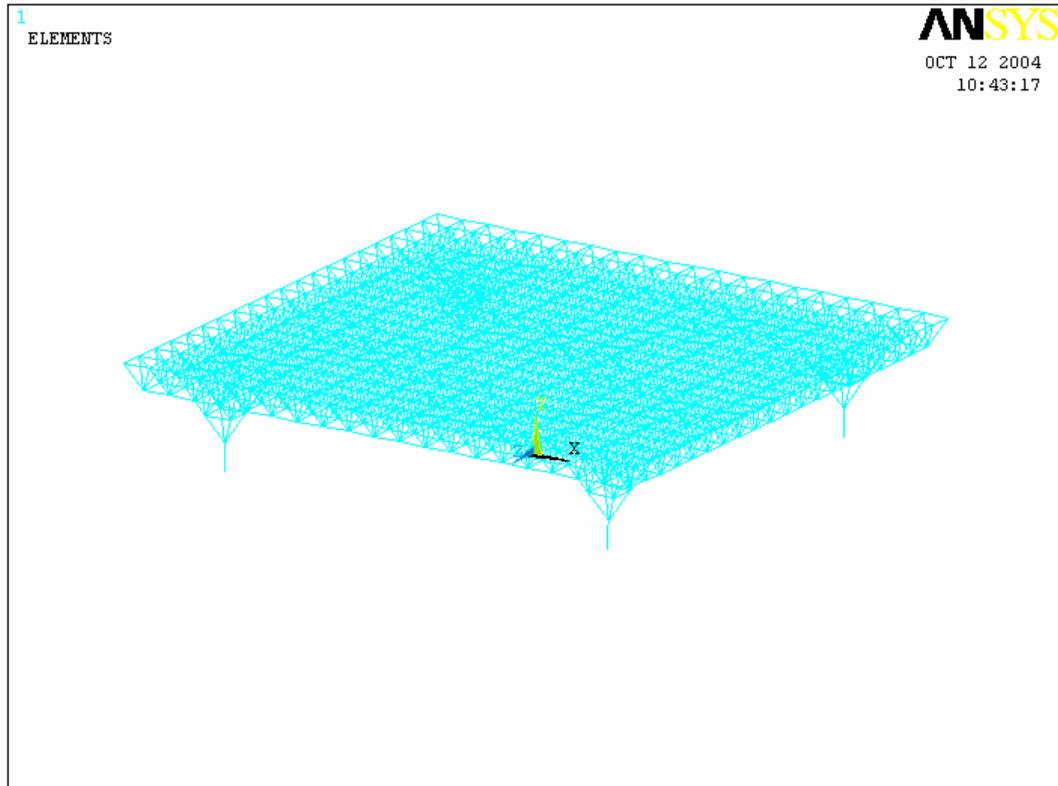


Figura 7-13 – Modelagem da estrutura 3D do Projeto Convencional.

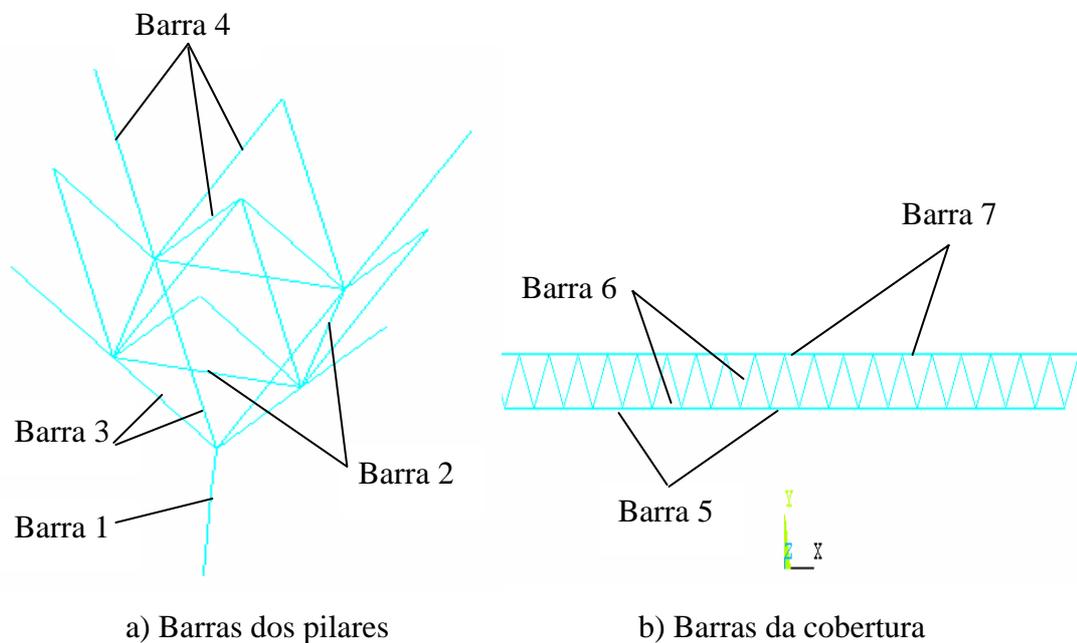


Figura 7-14 – Localização das barras constituintes da estrutura do Projeto Convencional.

Em seguida, os carregamentos “CP”, “Sc”, “CV-90°” (carga de vento a 90°) e “CV-0°” (carga de vento a 0°) foram aplicados. Na Figura 7-15 mostra-se o carregamento “CV-90°” como exemplo desta etapa da análise.

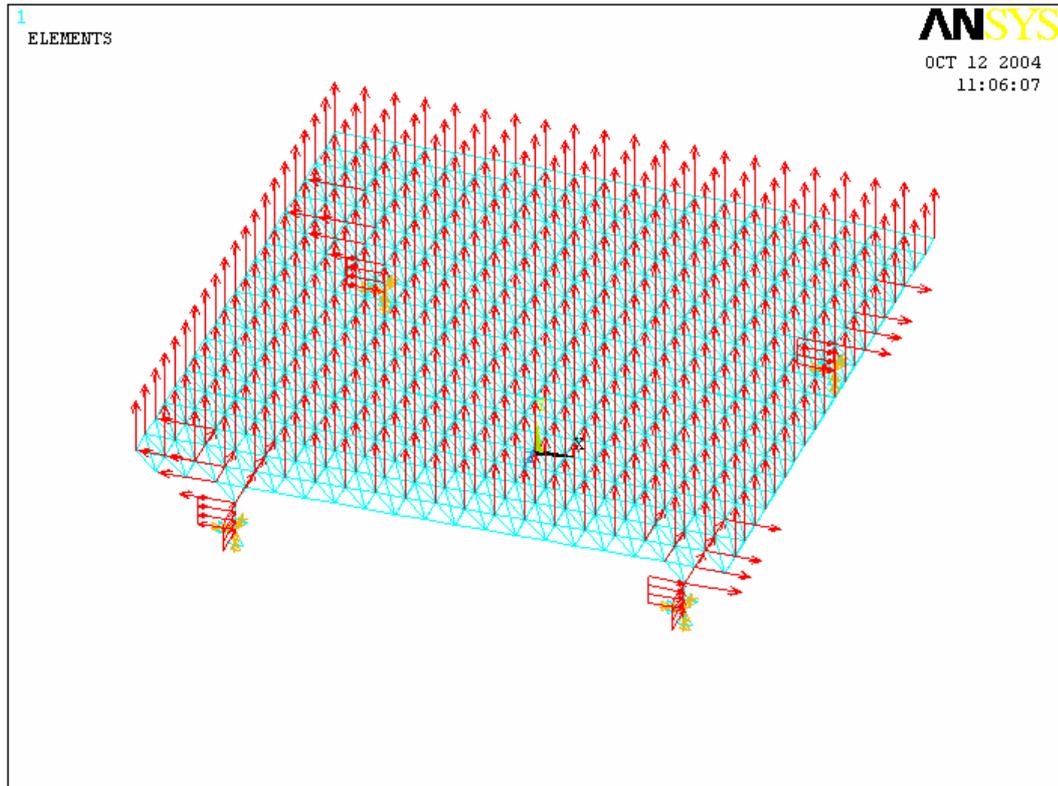


Figura 7-15 – Carregamento “CV-90” aplicado na estrutura.

Após a aplicação dos tipos de carregamento, foram realizadas todas as combinações de ações para o Estado Limite Último e determinou-se os esforços solicitantes de cálculo para cada barra. Esses esforços foram determinados verificando-se a pior situação de esforço atuante em cada barra, ou seja, a combinação de ação que mais solicitou cada barra. Na Tabela 7-10 são apresentados os esforços solicitantes máximos em cada barra. A localização destas barras é mostrada na Figura 7-14.

Com a obtenção dos esforços solicitantes de cálculo em cada barra, foi realizado o dimensionamento destas barras de acordo com a NBR 8800:1986, considerando aço VMB 300 ( $f_y = 300$  Mpa). Na Tabela 7-11 identificam-se os perfis determinados para as barras a partir das análises e do dimensionamento.

Tabela 7-10 – Esforços solicitantes em cada barra do Projeto Convencional.

Elementos	Esforços Solicitantes de Cálculo				Esforço Normal (kN)
	Momento fletor (kNm)		Esforço cortante (kN)		
	Mdx	Mdy	Vdx	Vdy	Nd
Barra 1	1473	452,65	-	721	908,36
Barra 2	-	-	-	-	-119,74
Barra 3	53,83	39,40	-	16,91	847,38
Barra 4	-	-	-	-	-563,18
Barra 5	0,25	0,32	0,30	-	-186,33
Barra 6	-	-	-	-	-266,20
Barra 7	0,31	0,94	1,96	-	-178,57

Tabela 7-11 – Perfis utilizados para as barras na análise de dimensionamento da estrutura em 3D do Projeto 03.

Elementos	Perfis
Barra 1	TB $\phi$ 406,4 x 90
Barra 2	TB $\phi$ 73,0 x 5,2
Barra 3	TB $\phi$ 219,1 x 14,3
Barra 4	TB $\phi$ 168,3 x 5,2
Barra 5	TB $\phi$ 101,6 x 4,0
Barra 6	TB $\phi$ 114,3 x 4,4
Barra 7	TB $\phi$ 101,6 x 4,0

Realizado todo o dimensionamento da estrutura da edificação, foram realizadas as combinações de ações para os Estados Limites de Utilização, de acordo com a NBR 8800:1986. Na Figura 7-16 são mostrados os deslocamentos verticais em metros dos elementos constituintes da estrutura do Projeto 03.

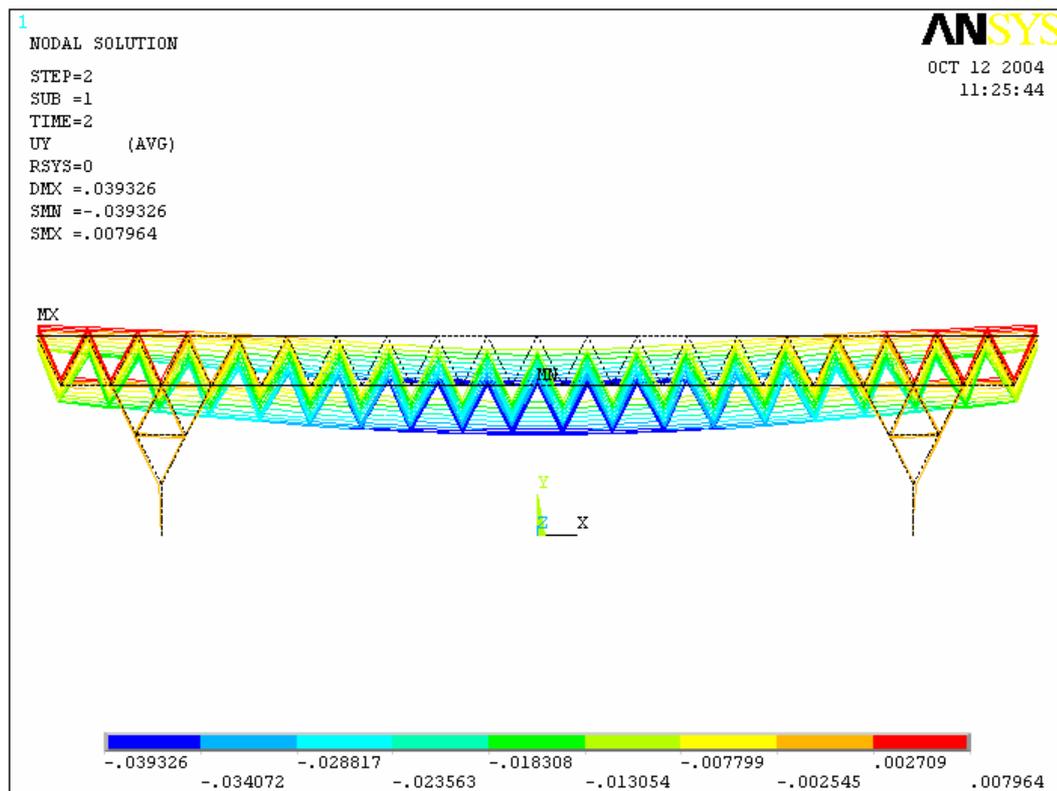


Figura 7-16 – Deslocamentos verticais dos elementos do Projeto Convencional

O deslocamento vertical máximo admissível para as vigas de cobertura da edificação é de  $L/180$  (Tabela 26 – Anexo C – NBR 8800:1986), onde “L” é o vão livre teórico da viga em estudo. Assim, tem-se um deslocamento vertical máximo admissível de 216,67 mm para toda a estrutura (vão livre da estrutura é de 39,00 m) e de 14,44 mm para cada barra horizontal da cobertura (vão livre de 2,60 m). Portanto, como o maior deslocamento vertical da edificação foi de 39,33 mm e o maior deslocamento vertical de uma barra da cobertura foi de 10,51 mm, a edificação satisfaz a esse estado limite de utilização.

Após esta verificação, determinaram-se os deslocamentos horizontais da estrutura. Nas Figura 7-17 e Figura 7-18 ilustram-se, através de saída gráfica do *software* utilizado, os deslocamentos horizontais em metros dos elementos resultantes da aplicação das combinações de ações necessárias.

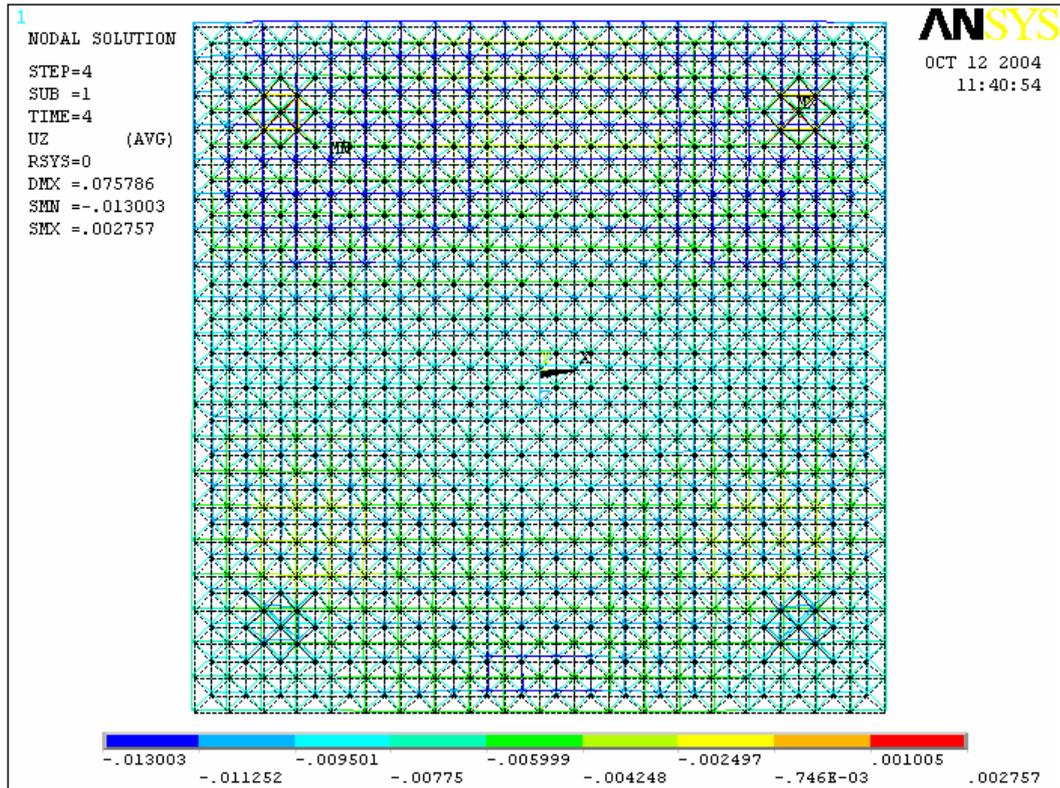


Figura 7-17 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-90° dos elementos do Projeto Convencional

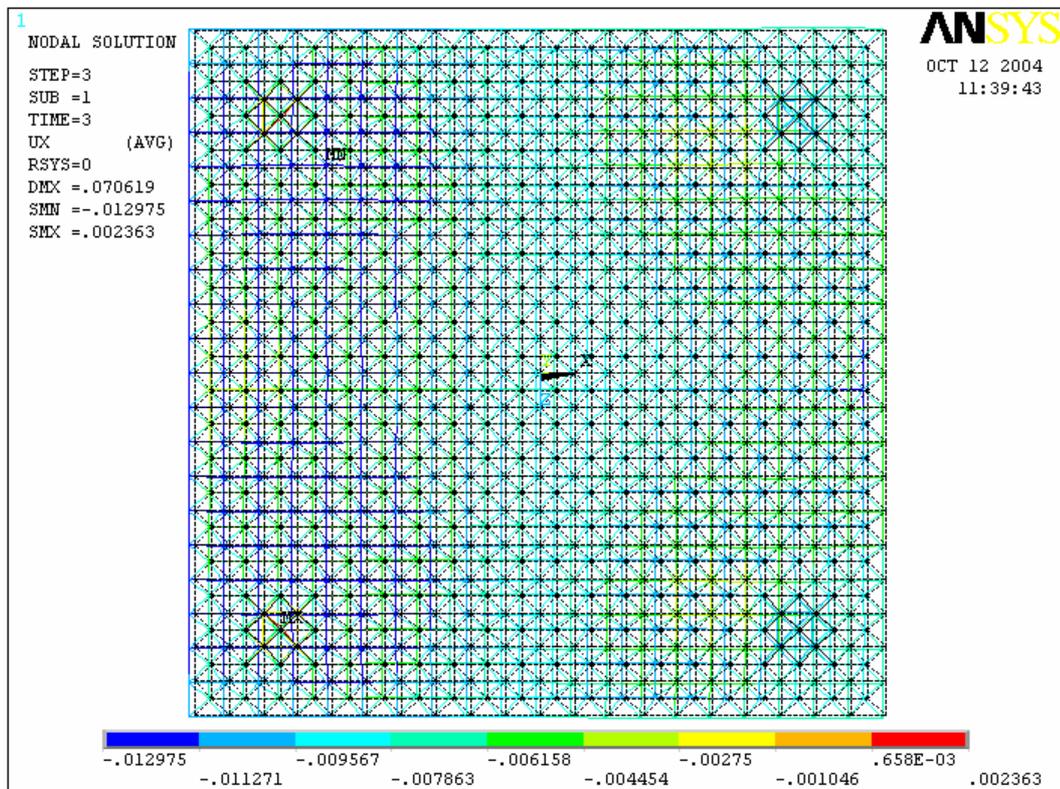


Figura 7-18 – Deslocamentos horizontais na direção do carregamento de vento CV-0° dos elementos do Projeto Convencional

O deslocamento horizontal máximo admissível para a edificação é de  $H/300$ , onde “H” é a altura da edificação (Tabela 26 – Anexo C – NBR 8800:1986). Assim, tem-se um deslocamento horizontal máximo admissível de 34,67 mm, pois a  $H = 10,40$  m. Portanto, como o maior deslocamento horizontal da edificação foi de 13,00 mm (Figura 7-18), a edificação satisfaz às verificações desse estado limite de utilização.

Após a verificação dos Estados Limites de Utilização, tem-se na Tabela 7-12 o quantitativo de material utilizado no Projeto Convencional referente as barras constituintes da estrutura, considerando análise estrutural em 3D.

Tabela 7-12 – Quantitativo de material utilizado no Projeto 03.

<b>Elementos</b>	<b>Perfis</b>	<b>L (m)</b>	<b>p (kg/m)</b>	<b>Quant.</b>	<b>Peso (kg)</b>
Barra 1	TB $\phi 406,4 \times 90,0$	2,60	702,00	4	7.300,80
Barra 2	TB $\phi 73,0 \times 5,2$	2,60	8,63	16	359,01
Barra 3	TB $\phi 219,1 \times 14,3$	3,20	72,10	16	3.691,52
Barra 4	TB $\phi 168,3 \times 5,2$	3,20	20,80	64	4.259,84
Barra 5	TB $\phi 101,6 \times 4,0$	2,60	9,54	760	18.851,04
Barra 6	TB $\phi 114,3 \times 4,4$	3,20	11,80	1600	60.416,00
Barra 7	TB $\phi 101,6 \times 4,0$	2,60	9,54	840	20.835,36
<b>Peso Total (kg)</b>					<b>115.713,57</b>
<b>Área Total (m<sup>2</sup>)</b>					<b>2.704,00</b>
<b>Taxa Final (kg/m<sup>2</sup>)</b>					<b>42,79</b>

### 7.6.3 Análises dos resultados

Comparando-se os resultados obtidos na análise e dimensionamento dos modelos, foi observado que os projetos propostos resultaram em sete tipologias de barras cada um, entretanto são diferentes nas tipologias de nós. No projeto 03, embora exista apenas um tipo de nó, o número total de elementos foi 866 nós em função de sua maior densidade. Quanto aos outros modelos, o projeto 01, possui maior número de nós, mas no total são apenas 626 nós, caracterizando-se a sua menor densidade. O projeto 02 possui dois tipos de nó totalizando 636 nós e sua densidade é também é menor. Quanto ao peso, O projeto 01

totalizou 30,36 kg/m<sup>2</sup>, o projeto 02 totalizou 30,86 kg/m<sup>2</sup> e o projeto 03, 42,79kg/m<sup>2</sup>. Demonstrando que o projeto 03 sendo mais denso é portanto mais pesado. Deve-se analisar ainda que existe diferença entre os vãos e tipos de apoio conforme descrição no capítulo. Os projetos 02 e 03 possuem vãos únicos e respectivamente 6 e 4 pilares.

## CAPITULO VIII

### 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os projetos desenvolvidos neste trabalho, tiveram como parâmetro alguns conceitos que foram estabelecidos inicialmente tais como: estabelecer um sistema de cobertura que permitisse expansão progressiva ou seja, crescimento e possibilidade de ampliação, e outro em que fosse determinada inicialmente a área a ser utilizada constituindo um espaço único previamente definido. Outro parâmetro importante foi estabelecer uma comparação com um sistema convencional de se construir coberturas espaciais industrializados que são mais utilizados atualmente.

Paralelamente, buscou-se observar a viabilidade de sistemas modulares menos utilizados e as possíveis dificuldades decorrentes desta variação de procedimento. A análise e o dimensionamento feito mostrou que o peso por m<sup>2</sup> final dos modelos propostos foi menor que modelo convencional verificado o que não é certamente o único parâmetro a ser considerado. Mostra entretanto que as novas propostas de sistemas modulares são igualmente viáveis e mais leves.

Outro aspecto analisado é quanto ao número de componentes, pois verificou-se que embora o número de barras fosse igual, o número de nós em cada projeto não convencional foi menor, porém de tipologias mais diversificadas. Pode-se portanto concluir que a viabilidade de um modelo não está condicionada apenas ao peso final obtido, mas deve-se tecer considerações quanto aos aspectos da produção e montagem. Em todos os casos, é importante realçar a participação do engenheiro e o arquiteto na avaliação dos diversos parâmetros inerentes às decisões a serem tomadas no andamento e concepção de uma proposta. Quanto à ambientação, utilizar modelos dotados de maior originalidade pode enriquecer o espaço atribuindo-lhe maior autenticidade.

Ao fim desse trabalho pode-se ainda concluir que é importante valorizar o processo de criação tanto quanto tecer considerações sobre os resultados obtidos. Observou-se que é fundamental refletir sobre as formas de um modo mais amplo e sobre as possibilidades de sua utilização para o equacionamento de projetos de arquitetura. Embora os estudos de geometria sempre estivessem presentes nas atividades intelectuais do ser humano, hoje estas

informações estão muito mais democratizadas. Assim, existe um vasto campo de informações disponíveis para que se possa recorrer quando necessário. Entretanto, esta ampla disponibilidade, pode conduzir a uma dispersão semelhante ao desconhecimento. Organizar as informações para que sejam utilizadas é um campo a ser explorado.

Os estudos de geometria desenvolvidos pelas escolas de arquitetura, engenharia ou desenho industrial precisam ser ampliados para que se possa equacionar novos processos de criação e representação. A transmissão dos dados de projeto diretamente ao sistema de produção implica em novos tipos de arquivos, mas os princípios que fundamentam o equacionamento das formas sempre estiveram sob a responsabilidade da matemática, em cujas origens são encontradas três atividades básicas: contar, medir e fazer formas. Das três, as duas primeiras têm recebido muito mais atenção. Dispõe-se de textos antigos sobre a contagem e a medição, que constituem um registro palpável da matemática primitiva. Entretanto, é comum existir apenas uma relação implícita, entre as artes e a matemática. Pode-se supor que o artista é, muitas vezes, um matemático inconsciente, descobrindo e explorando idéias de arranjos espaciais, simetria, periodicidade, combinações analíticas ou transformações, percebendo de forma intuitiva, teoremas visuais da geometria, com apenas curtos e escassos períodos de matematização consciente.

A arte da Renascença apresentava, freqüentemente, uma qualidade matemática; os artistas estavam interessados na geometria espacial, nos problemas da perspectiva e da redução da realidade às dimensões de um desenho. Entretanto de uma maneira geral, demorou bastante para que os arquitetos evoluíssem para além do círculo e do retângulo. Especificamente em arquitetura, conceber uma forma, e conseguir construí-la, demanda uma série de decisões que deverão ser subsidiadas por uma análise preliminar e o planejamento de etapas seqüenciais até a finalização da obra. Porém esta obra, é um meio de expressão e como tal tem sua linguagem própria. A forma arquitetônica nasce a partir de vínculos culturais, da paisagem local, da tipologia de seus usuários, do formato e proporções do local a ser edificado, dos recursos materiais disponíveis para subsidia-la e da expressividade de seus autores. Dentro dessa paisagem plural, deve ser buscada uma síntese que responderá ao conceito e deverá exprimir a resposta dada.

Fica como sugestão para trabalhos futuros:

A proposição de novos sistemas construtivos padronizados, buscando uma linguagem mais inovadora na sua concepção.

A investigação da geometria das junções e sua importância na concepção dos sistemas construtivos.

A pesquisa de novas formas de equacionamento geométrico e processos de representação aplicados à engenharia e arquitetura.

Documentação de experiências com modelos estruturais teóricos a serem desenvolvidos nos cursos de arquitetura e engenharia, buscando aumentar a investigação através da vivência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### 7.7 Livros e catálogos

A e V. Monografias de Arquitectura y Vivienda: **Norman Foster 1986-1992**. Ano 38, nº38, p.112, Noviembre/Diciembre-1992.

ABRAMS, Harry N. **The Word of M. C. Escher**. New York, New Concise Nal Edition, 1974, 151p.

AMBASZ, Emilio (org.). **Shigeru Ban**. London, Laurence King Publishing, 2001, 143p.

ANSYS. **User's Manual for Revision 6**. Houston, PA, Swanson Analysis Systems Inc., 2001.

AU. A revista de todos os arquitetos. **Renato Schroeder**. Ano 119, nº 119, p42-47, Fevereiro-2004.

BEIRÃO, Nirlando. **Arquitetura: Cláudio Bernardes**. São Paulo, DBA Artes Gráficas, 1999, 204p.

BENDER, Richard. **Una visión de la construcción industrializada**. Barcelona, Gili, 1976.

BERGAMINI, David. **As Matemáticas**. Rio de Janeiro, Livraria José Olympio Editôra, 1965, 200p.

BLANC, Allan et alii. **Architecture and constructin in steel**. *Londres*, E&FN Spon, 1993.

CARDELLACH, Félix. **Filosofia de las Estructuras**. Barcelona, Editores Técnicos Asociados, 1970; primeira edição:1910.

CARVALHO, Maria Irene Bigotte de. **Construções Fabulosas: Volume I**. Madrid, Ediciones del Prado, 1995, 125p.

CONSIGLIERI, Victor. **A Morfologia da Arquitetura 1920-1970**. Lisboa, Editorial Estampa, 1994, 321p.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Aço e Arquitetura: Estudos de Edificações no Brasil**. São Paulo, Zigurate Editora, 2001, 171p.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de Aço: Conceitos, Técnicas e Linguagem**. São Paulo, Zigurate Editora, 1997, 159p.

DOCZI, Gyorgy. **O Poder dos limites: harmonias e proporções na natureza, arte e arquitetura**. São Paulo, Mercury, 1990. 149p.

DOVER, Publications. **Arabic Art in Color**, 1978.

ENGEL, Heino. **Sistemas Estruturais**. Barcelona, Editorial Gustavo Gili, 2001. 352p.

FINESTRA Brasil, **Guilherme Mazza Dourado**. Ano 7, nº26, 77-81p, Julho/Setembro 2001.

GALIANO, Luís Fernández. **Cobijo**. Madrid, H. Blume Ediciones, 1979, 135p.

GHYKA, Matila C. **Estética de Las Proporciones En La Natureza y En Las Artes**. Buenos Aires, 1953, 298p.

GLANCEY, Jonathan. **A História da Arquitetura**. São Paulo, Edições Loyola, 2001, 240p.

GÖSSEL, Peter; LEUTHÄSSER, Gabriele. **Architecture in the Twentieth Century**. Köln, Benedikt Taschen, 1991, 432p.

HAECKEL, Ernst, **Arquivo de Desenhos de Formas Artísticas da Natureza**. Rio de Janeiro, Editora Tecno-Print S/A, 1972, 94p.

HART, F., HENN, W. Sontag. H. **El Atlas de la Construccion Metálica – Casas de Pisos**, Editorial Gustavo Gilli, S.A, Barcelona, 1976.

HUXTABLE, Ada Louise. **Masters of World Architecture: Pier Luigi Nervi**. New York, George Brazill Inc., 1960, 128p.

JENCKS, Charles. **Arquitectura Tardomoderna y otros ensayos**. Barcelona, Editorial Gustavo Gili, 1982. 200 p.

JODIDIO, Philip. **Santiago Calatrava**. Köln, Tashen, 2001, 175p.

JODIDIO, Philip. **Novas formas na arquitetura: a arquitetura dos anos 90**. Colônia, Tashen, 1997. 237p.

LATORRACA, Giancarlo (org.). **JOAO FIGUEIRAS LIMA. Lelé**. São Paulo, Instituto Lina Bo e P. M. Bardi; Lisboa, Editorial Blau, 1999, 264 p.

LAWLOR, Robert. **Geometria Sagrada**. Madrid, Ediciones del Prado, 1996, 112p.

LYALL, Sutherland. **Masters of Structure: Engineering Today's Innovative Buildings**. London, Lawrence King Publishing, 2002, 224p.

LOCHER, J.L. **The World of M. C. Escher**. New York, Abradale Press, 1988, 263p.

LOTUFO, Vitor Amaral; Lopes, João Marcos Almeida. **Geodésicas e Cia**. São Paulo, 1989, 59p.

MAKOWSKI, Z.S. **Estruturas Espaciales de Acero**. Barcelona, Gili, s.d.

MANSELL, George. **Anatomia da Arquitetura, Rio de Janeiro**. Ao Livro Técnico S/A, 1980, 190p.

MARCHAND, Pierre. **A Arte da Construção: Cabanas de Madeira, Palácio de Vidro, Arranha-Céus de Concreto e Aço**. São Paulo, Cia Melhoramentos, 1995, 45p.

MARGARIT, J.; Buxadé. C. **Las mallas espaciales em arquitectura**. Barcelona, Gili, 1972.

MARTÍNEZ, Juan María; LUCIA, Àngel . **Prodígios da Natureza Volume I**. Madrid, Ediciones del Prado, 1995, 119p.

MEYER, Karl Fritz. **Estruturas Metálicas: Construções com tubos**. KM Engenharia LTDA, Belo Horizonte, 2002, 224p.

MUNARI, Bruno. **Design e Comunicação Visual**. São Paulo, Livraria Martins Fontes, Editora Ltda, 1968, 374p.

NBR 6120. Rio de Janeiro, 1980, **Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações**.  
ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR 6123. Rio de Janeiro, 1988, **Forças Devido ao Vento em Edificações**  
ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR 8800. Rio de Janeiro, 1986, **Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios**.  
ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

NEILL, William. **By Nature's Design: an exploration book**. San Francisco, Chronicle Books, 1993, 119p.

NEUFERT, Ernst. **Industrialización de Las Construcciones**. Barcelona, Editorial Gustavo Gili S/A, 1977, 327p.

REBELLO, Yopanan. PEREIRA, Conrado, **A Concepção Estrutural e a Arquitetura**, Ziguarte Editora, São Paulo, 2000, 271p.

ROLAND, Conrad. **Frei Otto: estruturas**. Barcelona, Gustavo Gili, s.d.

RORIZ, Aydano **Enciclopédia 1001 Plantas & Flores** São Paulo, Editora Europa, 1998, 258p.

ROSSO, Teodoro. **Teoria e prática da coordenação modular**. São Paulo, FAU-USP, 1976.

SÁ, Ricardo. **Edros**. São Paulo, Pro Editores, 1982, 121p.

SALVADORI, Mario. **Estructura para Arquitectos**. Buenos Aires, Editorial CP 67, 1994, 254p.

SIEGUEL, Curt. **Formas estructurales em la arquitectura moderna**. México DF, Continental, 1966 (texto original: 1960).

TZONIS, Alexander. **Santiago Calatrava: The Poetics of Movement**. London, Thames e Hudson, 1999, 239p.

VALLOUREC & MANNESMANN REPORT: **The Vallourec & Mannesmann Tubes magazine. Frankreich: Vallourec & Mannesmann Tubes**, n. 11, mai. 2003

VALLOUREC & MANNESMANN TUBES. 2001. **Catálogo de produtos**.

VALLOUREC & MANNESMANN TUBES. 2002. **Catálogo de produtos**.

VALLOUREC & MANNESMANN TUBES. **Tubos estruturais de seção circular (MSH): dimensões, propriedades geométricas e materiais**. [S.l.], 2000. Informações técnicas.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de. **Estruturas da Natureza: Um Estudo da Interface entre Biologia e Engenharia**. São Paulo, Studio Nobel, 2000, 311p.

YOSHIDA, Yoshio. **Norman Foster: 1964-1987**. Tokyo, Yoshio Nakamura, 1988, 308p.

YOSHIDA, Yoshio. **Renzo Piano: Building Workshop 1964-1988**. Tokyo, Yoshio Nakamura, 1989, 287p.

ZERBST, Rainer. **Antoni Gaudí**. Köln, Benedikt Taschen, 1991, 329p.

## 7.8 Endereços relacionados (www)

Astrotourswinburneastronomyonline/Paulbourke

Disponível: <<http://astronomy.swin.edu.au/~pbourke/>>

Acesso: 16.out.2004

Incyclopédie des Formes Mathématiques Remarquables

Disponível: <<http://www.mathcurve.com/>>

Acesso: 22.out.2004

MERO Structures, Inc.

Disponível: [www.mero.com](http://www.mero.com)

Acesso: 17.set.2004

## ANEXOS

## ANEXO I - Sistemas de Numeração

No Anexo I apresenta-se a evolução histórica dos sistemas de numeração, a necessidade de sua normalização e o número como elemento padrão na definição de espaços elementares construtivos

### Sistemas de numeração

O país dos números não é uma república, e sim, uma monarquia. Não se pode ver neste termo o símbolo de uma sociedade rígida e de compartimentos estanques. Nela rege uma hierarquia, e são numerosas e flexíveis as relações entre os súditos do rei. O rei é o número um. Se deus não tivesse criado o universo, a idéia da pluralidade seria inconcebível. Esta pluralidade só poderia aparecer tendo-se pelo menos duas coisas: a partir de então, uma mente inteligente pode construir todas as matemáticas. O que é o dois? O um se reproduz dividindo-se em dois. Depois do nascimento deste vice-rei, a família não para de aumentar, pois descobriu o grande segredo da reprodução. Inicialmente, fez-se a famosa sucessão dos inteiros:  $N = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, \dots$ . De certa maneira podem ser vistos como frutos de um semeador que planta regularmente uma árvore a cada quilômetro, sem nunca voltar ou parar.

Repetições sucessivas de um mesmo número ou parcerias entre eles, levou ao estabelecimento de operações numéricas que resultaram inicialmente nos conceitos de soma e multiplicação. É fácil ver que o produto da multiplicação de um inteiro por outro é mais um inteiro, não ocorrendo mais aí, a criação de novos membros na família, mas aí aparecem duas simplificações aparentemente inofensivas que conduziram insensivelmente a dois cataclismos neste pequeno mundo bem organizado. Os dois são parecidos. Imaginando que se tenha efetuado as duas operações:

$$3 + 4 = 7 \quad \text{e} \quad 2 \times 5 = 10 \quad (4.1)$$

E que por acaso se deixasse de lembrar algum componente de tal operação de maneira que apenas fosse lembrada de uma das partes e de seu resultado, ou seja:

$$3 + \dots = 7 \quad \text{e} \quad \dots \times 5 = 10 \quad (4.2)$$

Neste caso o trabalho é fácil pois é possível criar notações tais como:

$$7 - 3 = 4 \quad \text{e} \quad 10 / 5 = 2 \quad (4.3)$$

Trata-se evidentemente de duas novas operações e os novos operadores estão representados por novos símbolos:  $(-3)$  e  $(/5)$ , mas finalmente os resultados são os antigos operadores perdidos. Pode-se observar ainda que nos dois casos, seria possível proceder de forma idêntica quando se quisesse encontrar qualquer um dos dois fatores em questão. A ordem não altera o resultado pelo fato destas operações terem a propriedade denominada comutativas. Nas operações que são denominadas operações inversas da soma e da multiplicação, e que são reconhecidas como se tratando da subtração e da divisão. Nas operações inversas acima mencionadas percebe-se que já não ocorre a mesma característica da comutatividade, ou seja: se invertendo-se os termos da operação, ficaria:

$$7 - 4 = 3 \quad \text{e} \quad 10 / 2 = 5 \quad (4.4)$$

Prosseguindo em direção a esta nova hipótese pode-se imaginar o aparecimento dos inteiros negativos, e do zero quando a operação não deixa resto. Fruto da divisão, estava criada a família dos números fracionários. Esta operação já era conhecida por qualquer mãe de família ao repartir entre todos pedaços iguais de uma torta.

Acaba de ser franqueada, cada vez com maior êxito, dois sentidos proibidos em duas direções diferentes: Não é possível dividir por zero. Este sentido proibido seria difícil de franquear. Praticamente, por trás dessa defesa insignificante se oculta toda a teoria dos infinitamente grandes que certamente constituíram sua nova família. Outro sentido proibido aparece quando se considera a elevação de uma potência  $n$  de um número (também chamada exponenciação) ou seja: um produto de  $n$  fatores iguais deste mesmo número. Assim,

$$2^3 = 2 \times 2 \times 2 \quad \text{e} \quad 5^4 = 5 \times 5 \times 5 \times 5 \quad (4.5)$$

Limitando-se ao caso mais simples da elevação ao quadrado e conhecendo-se um número  $\mathbf{b}$ , é fácil conhecer seu quadrado  $\mathbf{a}$  ou seja pode-se escrever:  $a = b^2$ . Vice-versa, conhecendo o resultado ( $\mathbf{a}$ ) e o operador (2), pode-se encontrar  $\mathbf{b}$ ?. Isto é possível, se  $\mathbf{a}$  foi realmente obtido a partir de  $b^2$ . ao contrário, se foi definido ao acaso pode acontecer que este

número não seja um número corretamente definido. Por exemplo, não existe nenhum número inteiro cujo quadrado seja 2, ou seja: tal que  $n^2 = 2$ .

Os gregos, que acreditavam haverem reduzido todos os números existentes aos números racionais, descobriram surpresos que esse número possuiria, se existisse, uma seqüência de decimais perfeitamente calculáveis estando entretanto contido em um espaço indefinido dentro da ordem dos valores definidos. Ficou decretado entretanto, que esses números também têm direito à cidadania. Certamente serão tratados de uma maneira distinta dos outros números que são inteiros ou frações de termos inteiros. Para frações ordinárias pode-se comprovar e demonstrar que por muito longe que se vá, há uma lei sensível que organiza suas decimais. Assim:

$$1/7 = 0,142857\ 142857\ 142857\ 142857\dots \quad (4.6)$$

O bloco (142857) repete-se periodicamente, mas isto não ocorre para o valor  $\sqrt{2}$  cujos valores numéricos dos elementos fracionários não são repetitivos. As observações que foram feitas para o valor  $\sqrt{2}$ , são também características de outras raízes ou relações geométricas entre partes. São os números irracionais puros e fazem parte deste conjunto as raízes  $\sqrt{3}$  e  $\sqrt{5}$ , por exemplo, além do número  $\pi$ , relação entre a circunferência e seu diâmetro. Alguns números, derivados de um conjunto de operações envolvendo inteiros e números irracionais, como por exemplo o número de ouro:

$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad (4.7)$$

são chamados números reais. Repetindo-se a técnica contínua de fabricação, um número passivo, submetido à ação de um operador, converte-se em um novo resultado, apliquemos este método para extrair uma raiz quadrada de um número negativo, o teclado não ficará horrorizado quando se escreve:  $i^2 = -1$ . Como se tratasse de um jogo, multiplicando-se este fantasma por números reais e pode-se chamar de números imaginários puros aos resultados obtidos, ou imaginários compostos se forem ainda somados aos números reais. O conjunto de todos os números da fórmula:

$$x + iy \quad (4.8)$$

onde  $x$  e  $y$  são reais e  $i$ , o que se nomeia como número imaginário, foi denominado “números complexos”.

Estão aí portanto, alguns entre os mais famosos descendentes do rei Um e ficaram conhecidos por constituírem castas distintas. De um conjunto a outro foram perdidas algumas propriedades e outras foram adquiridas. Mas estas castas não estão de maneira alguma isoladas. Foi visto que estes números podem ser miscigenados em espaços que são as operações ordinárias. Entretanto, algumas considerações devem ser traçadas pois não corresponde à realidade, a aparente facilidade com que foram presididas estas criações sucessivas. Esses acontecimentos só foram sedimentados ao longo de muito tempo e os matemáticos e os filósofos reconheceram um caminho comum entre os acontecimentos que ocorreram ao acaso ou por intuição.

### **A.1 - Estruturação dos sistemas de contar**

O homem é a única criatura da terra que executa o complicado processo de contar. Os homens primitivos provavelmente formavam números com os dedos, como alguns ainda o fazem. Com a evolução da sociedade, os cálculos foram ficando mais complicados. As operações aritméticas evoluíram com o aparecimento da subtração, multiplicação e divisão e conseqüentemente o aparecimento de dispositivos para sua execução. Os gregos já usavam calculadores mecânicos e nos 2000 anos seguintes, desenvolveu-se uma série de máquinas cada vez mais complexas, culminando com o computador eletrônico, esse “cérebro” que resolve problemas difíceis em frações de segundo e que lentamente vai transformando a civilização.

Acredita-se que algumas tribos antigas usaram a contagem de base 2 isto é: 1, 2, 2-1, 2-2, 2-2-1, e assim por diante. Outras usavam a base 3: 1, 2, 3, 3-1, 3-2, 3-3, 3-3-1, etc. Ao se tornarem agricultores e construtores, os povos mais adiantados aumentaram seu limite de contagem. Os 2 x 5 dedos das mãos foram sem dúvida a causa do sistema decimal fazer parte do sistema numérico de quase todas as raças, o que leva a supor que a série dos dedos de ambas as mãos é usada para se contar até a atualidade pelos povos primitivos e também nas fases básicas em todas as escolas. Muitos usaram os dedos dos pés e das mãos como referência, inventando números até 20, o que ainda pode ser lembrado nas palavras

francesas para 80 e 90 – “quatre vingt” e “quatre vongt dix”, que significam “quatro vinte” e “quatro vinte dez”. Os astecas no México estabeleceram também um sistema numérico com base 20. Pode-se notar que todas as formas primitivas de contar se referenciaram a grupos ou conjuntos de objetos fáceis de contar. Assim, um homem equivaleria ao conjunto “vinte”.

Fosse qual fosse o sistema de contagem, os mercadores das antigas civilizações empilhavam pedrinhas no chão para indicar os números contados. O ábaco, dispositivo de cálculo que ainda se usa nos bazares orientais de Teerã e Hong Kong, deve ter começado como um depósito de pedrinhas, no qual certo tipo de forma ou cor valia 1, outro tipo valia 10, outro 100 e assim por diante. O uso de dispositivos para cálculos talvez tenha retardado o aperfeiçoamento dos números escritos, a partir dos quais se desenvolveram as idéias modernas da aritmética e da álgebra. Preserva-se até hoje nos algarismos romanos, um dos métodos mais primitivos de escrever números: I, II, III, IV, V, constituídos segundo a técnica de traduzir cada número como a soma ou subtração de poucos símbolos básicos.

Acredita-se que os algarismos atuais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, e 9, foram desenvolvidos pelos hindus para o sistema de numeração de base 10 ou “decimal” método de contagem originado do latim décima (décimo ou dízimo). Parece simples a maneira de juntar algarismos para fazer números, mas ela é o engenhoso resultado de séculos de desenvolvimento do que os matemáticos denominam “notação posicional”: a posição de cada algarismo indica seu valor. Os números maiores do que um, estão separados dos menores, frações, pela vírgula decimal. O algarismo logo à esquerda da vírgula tem o seu valor próprio; o seguinte tem seu valor multiplicado por 10; o algarismo seguinte é multiplicado por 100; o seguinte por 1000 e assim por diante. À direita da vírgula, o primeiro algarismo tem 1/10 do valor; o algarismo seguinte, para a direita, 1/100 do seu valor o seguinte, 1/1000 e assim por diante. Inventou-se depois uma notação abreviada denominada “potência” ou “expoente”. No caso de  $10^3$ , por exemplo, o número 3 indica a potência, ou outra maneira de dizer  $10 \times 10 \times 10$ , ou 1.000.

O sistema usado atualmente, sistema de notação decimal posicional, tem a base 10. Não há contudo, razão alguma, exceto talvez, o número dos dedos de ambas as mãos, para se deixar de adotar a base 12 ou 20. Segundo BERGAMINI (1964):

“Houve épocas em que o sistema de numeração e classificação duodecimal foi empregado tão exclusivamente que chegou a substituir o sistema

decimal. Os caldeus fixaram o ciclo anual do sol em 360 dias. Daí resultou a divisão do círculo em  $360^\circ$ . Por outro lado, o ciclo da lua teria 29,53 dias o que foi arredondado para 30 dias ou equivalente a um mês e desta maneira chegou-se ao ano solar igual a 12 meses. Esta combinação pouco satisfatória do ano solar com o lunar foi remediada posteriormente por outras formas de calendário, mas em todas elas acontecia que em pouco tempo o sistema não coincidia com a realidade. Júlio César pôs fim a esta confusão, mediante a adoção geral do calendário Juliano em todo o império romano. Fixou-se o ano em 365 dias e introduziu-se um ano bissexto de 366 dias a cada quatro anos.”

A notável preferência de que desfrutou o sistema duodecimal fundamenta-se sem dúvida na sua melhor divisibilidade. Enquanto o número 10 só é divisível por 2 e 5, o 12 o é por 2, 3, 4 e 6. Maior ainda é a divisibilidade dos números múltiplos de 12. Entre os números que têm grande quantidade de divisores encontrar-se-á quase sempre o fator 12. Por todas essas razões o sistema duodecimal do pé e da polegada embora já abolido pelas normas técnicas, é tão utilizado ainda de maneira informal no dimensionamento dos materiais de construção. Embora a base 60 seja altíssima para um sistema de notação, ainda é empregada na divisão da hora em 60 minutos e do minuto em 60 segundos. O sistema de base 60 apresenta séria desvantagem por ser tão grande: para apresentar todos os algarismos de um a 59 seria preciso criar 59 símbolos diferentes. Ninguém, nem mesmo os sumerianos e babilônios que eram tão amigos dos números, gostariam de decorar 59 símbolos. Para contornar tal dificuldade aqueles povos usavam combinações de dois símbolos em forma de cunha, um deles representando o número 10 e outro o número 1. A base 60 contudo, tem inúmeras vantagens por ser dividida de forma exata pelos números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30, e 60. Isto significa que os problemas de aritmética, resolvidos no sistema de base 60, dão mais resultados redondos do que na base 10.

Bergamini (1964) prossegue ainda:

“Mais importante porém para os mesopotâmicos astrônomos, é que a base 60 ajustara-se bem com divisão do ano em 360 dias. Este sistema surgiu antes de 1700 a.C. Tábuas cuneiformes dessa época indicam que já era usado para os cálculos dos matemáticos súditos do rei Hamurabi. Não tinham ainda, símbolo para o zero. Deixavam um espaço em branco para indicar posição não ocupada numa seqüência. Mas como muitas vezes se esqueciam disso, os números ficavam ambíguos. Os arqueólogos encontraram em escavações, grande número de tábuas cuneiformes que datam de aproximadamente 300 a. C., e nesse

período já havia aparecido um símbolo para o zero: uma marca semelhante à letra W de cabeça para baixo. Durante esse período os persas dominaram a mesopotâmia, e o sistema de base 60 progrediu notavelmente”.

O sistema de base 60 sobreviveu aos mesopotâmicos que o inventaram e, durante séculos, foi a única notação posicional existente. Os astrônomos gregos e hindus usaram-no para escrever, em forma posicional, as frações envolvidas no mapeamento dos céus no início da era cristã. O sistema de base 10 também foi usado, mas apenas para contagem, pois na fase inicial não tinha notação posicional.

Em torno do ano 500 dessa era, os hindus desenvolveram uma notação posicional para o sistema decimal. Abandonaram os símbolos que vinham usando para algarismos maiores do que 9 e padronizaram os 9 primeiros algarismos. Embora sofrendo modernizações posteriores, são esses os símbolos que ainda hoje se usa para os algarismos de 1 a 9. O zero, embora importante, somente apareceu em estágio posterior ao desenvolvimento da notação posicional decimal. Quem primeiro divulgou tal notação foi um matemático árabe de Bagdá, chamado al-Khwarizmi, em livro escrito por volta do ano 825, no qual recomendava a nova técnica oriental aos matemáticos e mercadores. Contudo, não foi ouvido e os novos algarismos levaram dois séculos para chegar à Europa. Citando ainda BERGAMINI (1964):

“O sistema de notação posicional de base 10 acabou superando os outros, porque foi adotado pelos mercadores europeus. É provável que os contadores árabes e hindus das grandes firmas exportadoras de Gênova e Hamburgo demonstrassem mais rapidez nos cálculos que os europeus utilizadores dos algarismos romanos. A atitude dos mercadores não foi inicialmente partilhada pelos cientistas, por um motivo ponderável: o sistema decimal não dispunha de processo fácil para indicar frações. Para esse aspecto importante do cálculo era preciso recorrer ao antigo sistema de base 60. O método atual de traduzir frações decimais, é o resultado do trabalho de alguns pensadores da Ásia e Europa. No século XV al-Kashi foi um dos primeiros matemáticos a perceber que as potências negativas podiam ser exploradas tanto no sistema de base 10 como no 60. No século XVI, o belga Simon Stevin apresentou o primeiro tratamento sistemático das novas frações decimais, numa obra que marcou época: *La Disme* (a arte dos décimos). A vírgula de separação decimal surgiu pela primeira vez em 1617, num livro do escocês John Napier.”

Além do estabelecimento de um sistema universal para se contar ou avaliar quantidades, a evolução dos conceitos matemáticos, como foi visto, levou à determinação das mais diversas classes numéricas inclusive aquelas da ordem irracional decorrentes de relações fundamentadas em proporções geométricas. Entre elas, a mais decantada e intrigante: a série áurea.

## A.2 - Proporção áurea

A proporção “áurea”, que aparece nas formas naturais, é um importante conjunto de medidas escalonado em dimensões crescentes ou decrescentes, mantendo-se fixo o fator de proporcionalidade. Os babilônios e os egípcios já haviam investigado essas leis cósmicas. O conceito que fundamenta esta relação pode ser exemplificado quando se toma um segmento de reta e se reparte dividindo-o em duas partes de tal maneira que estas partes mantenham entre si a mesma relação proporcional que a existente entre sua dimensão total e a maior de suas partes. Nos estudos que se referem às dimensões cósmicas, pode-se encontrar também estas relações que parecem permear a natureza como um princípio regulador ou uma força reguladora micro ou macro cósmica. Segundo o NEUFERT (1977):

“Kepler foi o primeiro astrônomo que tratou desta questão e criou para ela a expressão “sectio divina” ou divina seção. Em outra ocasião denomina a divisão de uma linha em proporções harmônicas de “sectio proportionalis” ou divisão proporcional.”

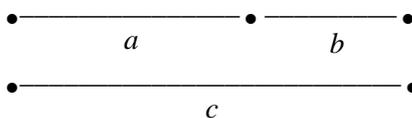
Segundo GHIKA (1953):

“Na concepção de Euclides, cuja teoria de razões e proporções está baseada nos trabalhos de Eudoxio, discípulo de Platão, encontra-se a seguinte definição: “Razão é a relação quantitativa no que se refere à dimensão, entre medidas homogêneas. A proporção é a igualdade entre razões.” Traduzido em álgebra, isto conduz à equação geral da proporção geométrica entre quatro valores  $a/b = c/d$  (proporção descontínua). Quando os dois valores intermediários  $b$  e  $c$  são iguais, obteremos uma proporção contínua:  $a/b = b/c$ . Nicómaco observou que razão é a relação entre dois termos e a proporção uma combinação ou correlação entre duas razões ao menos. São necessários portanto, no mínimo três termos para estabelecer uma proporção. Levando-se mais longe o princípio da máxima economia, pode-se obter uma proporção contínua partindo de apenas dois valores  $a$  e  $b$  definindo o terceiro termo  $c$ , como a soma de  $a + b$  e obtendo a

proporção contínua mais característica das formas naturais:  $a/b = a+b/a$ . É nesta proporção denominada “contínua por excelência” que se baseia a razão denominada “seção áurea”. Traduzida em palavras esta equação diz: A razão entre a soma de duas dimensões consideradas e a maior delas, é igual à razão entre esta e a menor”.

Tomando como referência este conceito algébrico pode-se escrever portanto:

$$\frac{a}{b} : \frac{c}{a} \text{ e } c = a+b, \text{ portanto } \frac{a}{b} : \frac{a+b}{a} \quad (4.9)$$



Dividindo-se por b os termos do segundo membro (o que não altera seu valor) tem-se:

$$\frac{a}{b} = \frac{\frac{a}{b} + 1}{\frac{a}{b}} \quad (4.10)$$

e colocando-se:  $\frac{a}{b} = x$ , tem-se:

$$x = \frac{x+1}{x} \quad (4.11)$$

$$x^2 = x + 1 \quad (4.12)$$

$$x^2 - x - 1 = 0 \quad (4.13)$$

Que é uma equação do 2º grau cujas raízes são:

$$x_1 = \frac{\sqrt{5}+1}{2} = 1,6180339 \quad (4.14)$$

$$x_2 = \frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0,6180339 \quad (4.15)$$

que por sua vez equivale a

$$x_2 = 1/x_1 \quad (4.16)$$

Pode-se observar ainda que elevando  $x_1$  ao quadrado obtém-se o valor:

$$x^2 = \frac{\sqrt{5}+3}{2} = 2,6180339 \quad (4.17)$$

e o resultado pode também ser escrito:

$$x^2 = x+1 \quad (4.18)$$

Prosseguindo:

$$\frac{1}{x} = x - 1 \quad (4.19)$$

$$x = 1 + \frac{1}{x} \quad (4.20)$$

$$x^2 = x+1 \quad (4.21)$$

$$x^2 = x+1 \quad (4.22)$$

$$x^3 = x^2+x \quad (4.23)$$

$$x^4 = x^3 + x^2 \quad (4.24)$$

$$x^5 = x^4 + x^3 \quad (4.25)$$

Os valores podem ser seqüencialmente investigados e se conclui que cada termo é equivalente à soma dos dois anteriores. O conceito que rege esta progressão geométrica que já era conhecida pelos egípcios e os gregos, foi posteriormente aplicado ao conjunto dos números inteiros por Leonardo de Pisa que propôs uma série numérica denominada “Serie Fibonacci”, (pseudônimo por ele utilizado). Fibonacci aplicou este procedimento à serie de números inteiros e determinou uma serie numérica partindo de 1, ou seja:

$$1 : 2 : 3 : 5 : 8 : 13 : 21 : 34 : 55 : 89 : 144 : 233 : 377 : 610 : 987 : 1597, \text{ etc} \quad (4.26)$$

As razões obtidas a partir dos valores:

$$1/1 = 1 ; 2/1 = 2 ; 3/2 = 1,5 ; 5/3 = 1,66... ; 8/5 = 1,6 ; 13/8 = 1,625 ; 21/13 = 1,615 ; \quad (4.27)$$

$$34/21 = 1,619 ; 55/34 = 1,617 ; 89/55 = 1,618...$$

Pode-se observar que os resultados tendem ao limite cujo valor equivale ao fator de proporcionalidade da seção áurea quando se busca escalonamento do menor para o maior termo. Curiosamente, observando-se as razões inversas que utiliza o menor termo como denominador tem-se:

$$1/1 = 1 ; 1/2 = 0,5 ; 2/3 = 0,666 ; 3/5 = 0,6 ; 5/8 = 0,625 ; 8/13 = 0,615 ; 13/21 = 0,619 ; \quad (4.28)$$

$$21/34 = 0,617 ; 34/55 = 0,618 ; 55/89 = 0,617 ; 89/144 = 0,618 ; 144/233 = 0,618$$

Nestes resultados observamos que a razão tende para o limite cujo valor equivale ao fator de proporcionalidade da seção áurea quando percorremos o escalonamento do menor para o maior.

A série áurea sempre esteve presente para marcar relações entre partes, quando se trata de definir medidas do corpo humano. Tais medidas foram mais tarde institucionalizadas e se tornaram padrões para o dimensionamento dos espaços e dimensionamento dos elementos construtivos utilizados nas construções.

### A.3 - Medidas referenciadas no corpo humano

Segundo NEUFERT (1977):

“Entre os sistemas de medidas que se referenciaram nas dimensões humanas, o pé foi o mais utilizado em países da Europa e Oriente. Em alguns países foram adotados:

Espanha:	1 vara	= 3 pés
Portugal:	1 vara	= 3 1/3 pés
Rússia:	1 archian	= 2 1/2 pés
Dinamarca:	1 ana	= 2 pés
Inglaterra:	1 jarda	= 3 pés

Além do pé, foram utilizadas outras referências para medição tais como a ana ou codo egípcio correspondente a sete vezes a largura da mão de quatro

dedos cada uma (sem o polegar) correspondente a 525 mm, o passo, correspondente a 625 mm e a braça, correspondente à distância entre a ponta do dedo médio até a axila correspondente a 80mm e a polegada correspondente a 25mm, variáveis entretanto conforme a região.”

Na Figura A- 1 e Figura A- 2 pode-se observar alguns sistemas de medidas que se referenciaram nas dimensões humanas.

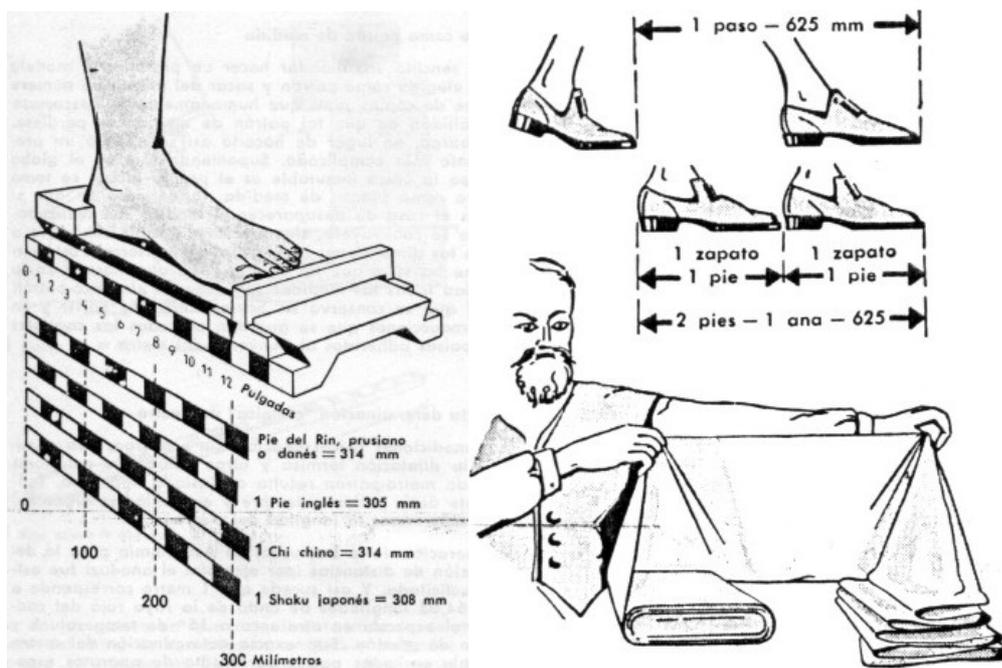


Figura A- 1 – Exemplos de sistema de medição com o corpo.

Fonte: NEUFERT (1977).

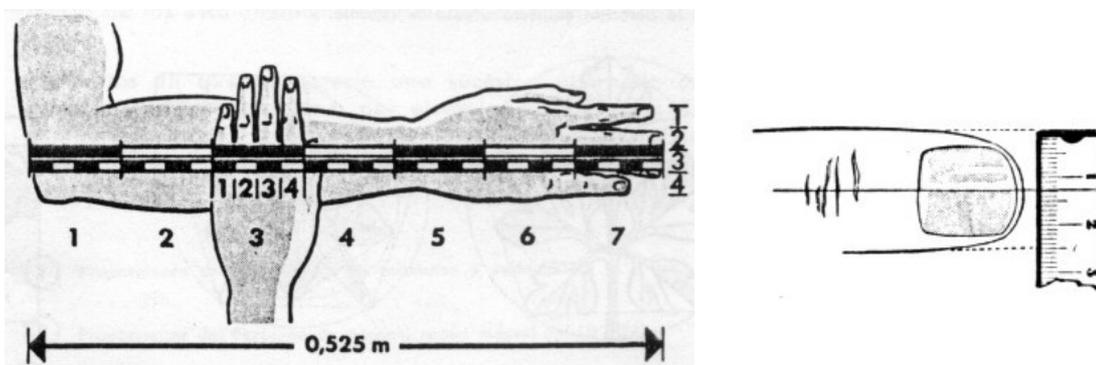


Figura A- 2 – Exemplos de sistema de medição com o corpo.

Fonte: NEUFERT (1977).

Paralelamente, à adoção de tais parâmetros, tornou-se necessário definir medidas padronizadas para o corpo humano. Vários artistas como Leonardo da Vinci, Albert Dürer, Zeysing, além de Le Corbusier estudaram estas medidas definindo proporções universais a serem adotadas como referência. para estabelecer relações entre partes e buscando definir um conjunto numérico que pudesse normalizar estas relações. Na Figura A- 3 apresenta-se um estudo das proporções do corpo humano, segundo um escalonamento de medidas relacionadas pela proporção áurea. O estudo foi elaborado por DOCZI (1990).

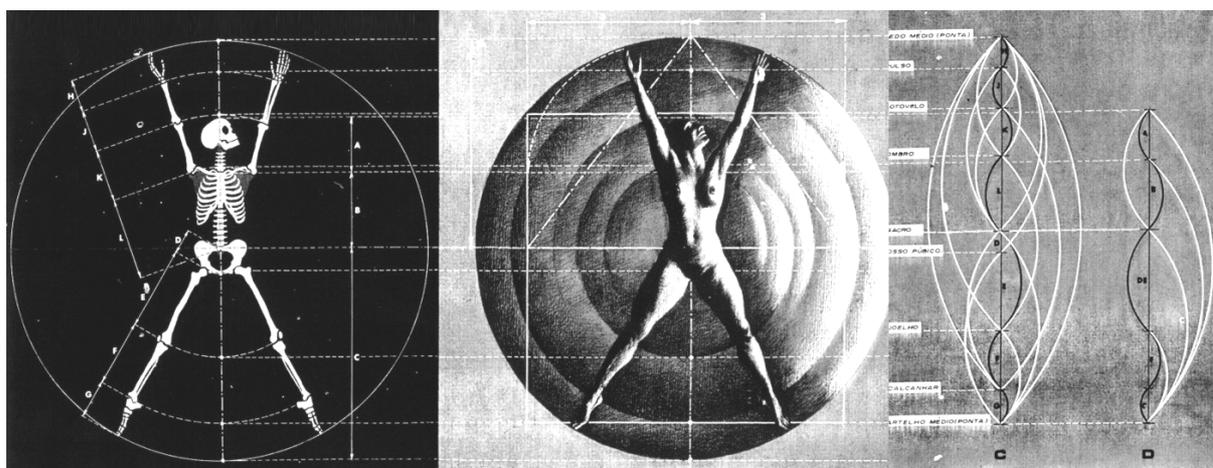


Figura A- 3 – Cânone do corpo humano.

Fonte: DOCZI (1990).

A inscrição das referências de medidas do corpo para dimensionamento das obras de arquitetura proporcionava uma coerência e uma facilidade para efetuar medições. Entretanto, alguns acontecimentos provocaram mudanças para estas convenções. No século XVIII a França e especialmente Paris era o centro de toda investigação científica. Quase toda a ciência européia naquela época funcionava sob o sistema do pé francês como unidade de medida. Uma prova da notável atividade da França naqueles tempos é que apesar do sistema de medidas da ciência européia ter sua origem em Paris, onde estava domiciliado, realizou-se aí, a transformação do sistema de polegadas e pés com seu escalonamento duodecimal para o sistema métrico com graduação decimal, transformação que iniciou antes da revolução de 1789 e se completou após esta.

A causa principal desta mudança, foi a diversidade de valores dados ao pé em cada país ou local. Ao ser instituído o metro padrão, apareceram valores diversificados para a medida do pé, demonstrando esta diversidade:

- Pé Prussiano = 314 mm
  - Pé Inglês = 305 mm
  - Chi chinês = 314 mm
  - Shaku japonês = 308 mm
- (4.29)

Além disso, eram dadas dimensões variadas ao pé conforme sua aplicação tal como: pé de construção, pé de madeira, pé de agrimensor, pé de cantaria, etc.

Com a adoção do sistema de base dez (e não doze) também para os sistemas de pés e polegadas, produziu-se uma irremediável confusão, coisa compreensível uma vez que o tamanho da polegada variava dentro de um mesmo país devido à maneira diferente adotada para dividir o pé, usado como unidade. O fato demonstrou que era realmente mais sensato mandar fazer um protótipo ou modelo de medida eleito como padrão e produzir um número suficiente de cópias para que se garantisse que esse padrão de medida não se perderia. No entanto, a escolha deste modelo adotou um procedimento um pouco complicado: As dimensões da Terra que foram tomadas como referência, supondo-se que o globo terrestre era a única coisa que pudesse ser considerada imutável, revelaram-se bastante imprecisas. Mesmo assim a solução convencionada acabou prevalecendo.

Supondo-se que no caso deste padrão desaparecer, deveria ser prontamente refeito, estabeleceu-se como modelo o metro padrão original que se conserva em Sèvres perto de Paris existindo reproduções que se guardam em todas as capitais dos países que aderiram ao convênio. Sua exata determinação “cósmica” ficou definida como a “décima - milionésima parte do quadrante do meridiano terrestre”. Posteriormente, verificou-se ainda a imprecisão dos modelos devido a problemas de dilatação térmica e outras influências exteriores. A cooperação da luz, usual em astronomia para determinação de distâncias, foi solicitada e acontece que hoje o metro padrão está referenciado a um tipo de comprimento de onda que se mede no espectro do Cadmio em determinadas condições de temperatura e pressão. Mesmo não se referenciando às proporções do corpo humano, o metro padrão teve como grande mérito a unificação e universalização dos sistemas de medidas. A partir desta referência básica, outras também puderam ser equacionadas constituindo bases de referência.

Embora estas informações façam parte do conhecimento geral, é importante reuni-las como objeto de reflexão, pois ao pensar as formas, pode-se notar que convenções que

parecem ter sempre existido foram equacionadas ao longo do tempo e muitas vezes parecem fragmentadas, perdidas e sem que estabeleçam um seqüencial coerente.

Para a concepção do objeto arquitetônico é necessário estar atento a esta lógica do comportamento da matéria. O processo imitativo sempre esteve presente na expressão do ser humano e a observação desses conceitos conduz ao equacionamento das idéias tanto pela lógica matemática quanto pelas atividades decorrentes da sua utilização como é o caso da arquitetura.