



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

# **ESTRUTURAS TUBULARES ENRIJECIDAS POR SUPERFÍCIES DE DUPLA CURVATURA (HIPERBÓLICAS)**

**AUTOR: CÉLIO DA SILVEIRA FIRMO**

**ORIENTADOR: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Arlene Maria Sarmanho Freitas**

**CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. João Batista M Sousa Júnior**

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: Metálica

Ouro Preto, Dezembro de 2003

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar as vantagens e as possibilidades estruturais de sistemas enrijecidos pelos aspectos formais e geométricos de seus elementos, ou por suas disposições físicas neste sistema.

As superfícies de dupla curvatura ou superfícies hiperbólicas, devido a suas características geométricas de empenamento, conferem uma eficiência no seu comportamento estrutural superior às superfícies planas.

Dentro deste universo, a escolha de tais superfícies (anticlásticas) servirá como ponto de partida nesta pesquisa, na transposição do raciocínio do comportamento estrutural das cascas e membranas para as estruturas reticuladas de superfícies hiperbólicas. Em especial neste estudo: os Parabolóides Hiperbólicos. As estruturas de dupla curvatura, que já agregam naturalmente um irresistível apelo estético, encontram nos perfis tubulares cilíndricos vantagens significativas. A seção transversal completamente simétrica em todas as direções favorece as ligações entre as barras que se posicionam de maneiras reversas e variáveis no espaço, fazendo dos tubos um dos melhores aliados quanto às questões estruturais e de montagem.

O presente trabalho propõe-se a investigar as vantagens estruturais dessas formas, no intuito de viabilizar sistemas construtivos metálicos que possam ter aplicações imediatas em alguns campos da engenharia e da arquitetura.

**Palavras-chave:** arquitetura, estruturas tubulares, parabolóide hiperbólico, *design* estrutural, superfícies regradas.

# ABSTRACT

The main objective of this work is to investigate the advantages and possibilities of structural systems stiffened by formal and geometric aspects of its components, or by their physical arrangement in the system.

The doubly curved surfaces or hyperbolic paraboloids, due to their geometrical characteristics, have superior structural performance when compared to flat (plane) surfaces. This research departs from the selection of these surfaces, and from the structural similarities that exist between shells, isotropic membranes and ruled surfaces, especially hyperbolic paraboloids.

These solutions have not yet been sufficiently explored in their structural advantages by the steel construction industry. The strong aesthetic appeal of the doubly-curved surfaces, together with the use of hollow cylindrical sections for bars, offer significant advantages. The radial symmetry of the cross-section allows reverse and random positioning in space, resulting in an efficient solution, either in the structural or the constructive aspects.

The present work aims to investigate the structural pros and cons of the tubular sections using these geometrical shapes for the steel construction industry, and to analyze and propose new solutions for structural elements, including the analysis of their structural behaviour and constructive aspects such as production and assembling on site.

## **Key-words:**

architecture, tubular structures, hyperbolic paraboloids, structural design, ruled surfaces.

Que todos os seres sejam felizes;  
Que todos os seres sejam ditosos;  
Que todos os seres estejam em paz...

# AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que acreditaram no meu trabalho e me ajudaram durante este processo, e a todas aquelas que, direta ou indiretamente, me apoiaram.

# SUMÁRIO

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	ii
Lista de Figuras .....	vii
Lista de Tabelas .....	xvii
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	
1.1 Considerações gerais .....	3
1.2 Estruturação do trabalho .....	13
<b>CAPÍTULO 2 - INDUSTRIALIZAÇÃO</b>	
<b>2.1 Panorama geral da realidade construtiva brasileira</b>	
2.1.1 <i>Introdução</i> .....	17
2.1.2 <i>Tradição x inovação</i> .....	18
2.1.3 <i>Precauções para a nossa realidade</i> .....	19
<b>2.2 Racionalização</b>	
2.2.1 <i>Um dado histórico</i> .....	21
2.2.2 <i>Por que a industrialização? Isso realmente é importante para nós?</i> .....	22
2.2.3 <i>Qualidade construtiva x qualidade arquitetônica</i> .....	23
<b>CAPÍTULO 3 - COORDENAÇÃO MODULAR</b>	
3.1 O Conceito .....	25
3.2 A Malha .....	26
<b>CAPÍTULO 4 - FORMA x GEOMETRIA x DESEMPENHO ESTRUTURAL</b>	
<b>4.1 Introdução</b>	
4.1.1 <i>A responsabilidade formal</i> .....	42
4.1.2 <i>Qualitativo x quantitativo</i> .....	46
4.2 As Cascas .....	49
<b>4.3 As superfícies hiperbólicas</b>	
4.3.1 <i>Superfícies regradas</i> .....	52
4.3.2 <i>Superfícies regradas desenvolvíveis ou desenroláveis</i> .....	53
4.3.3 <i>Superfícies regradas não-desenvolvíveis ou empenadas</i> .....	53
<b>4.4 Parabolóide hiperbólico</b>	

4.4.1 <i>Caracterização</i> .....	57
4.4.2 <i>Proposta de investigação / objeto de estudo</i> .....	63
4.5 <b>Experimento comprobatório</b> .....	68
<b>CAPÍTULO 5 - A GEOMETRIA NATURAL</b>	
5.1 <b>Eficiência energética x eficiência geométrica</b> .....	71
5.2 <b>A coordenação modular na natureza</b> .....	75
5.3 <b>Geometria fractal</b> .....	82
5.4 <b>Design x natureza</b> .....	88
<b>CAPÍTULO 6 -A SEÇÃO TUBULAR CIRCULAR</b>	
6.1 <b>Aspectos de sua geometria</b> .....	105
6.2 <b>Resistência à compressão – flambagem</b> .....	113
6.3 <b>Resistência à torção</b> .....	115
6.4 <b>Um pouco de vivência</b> .....	117
6.5 <b>Considerações finais – vantagens</b> .....	137
<b>CAPÍTULO 7 - ESTRUTURAS HIPERBÓLICAS</b>	
7.1 <b>As primeiras estruturas HP</b> .....	138
7.2 <b>Usos e aplicações</b> .....	144
7.3 <b>Exemplo de projeto e fabricação de produto</b> .....	151
<b>CAPÍTULO 8 - INVESTIGAÇÃO COMPORTAMENTAL COMPARATIVA</b>	
8.1 <b>Objetivo</b> .....	154
8.2 <b>Metodologia</b> .....	155
8.3 <b>Resultados</b> .....	162
8.4 <b>Análise dos resultados</b> .....	169
8.5 <b>Análise final</b> .....	170
<b>CAPÍTULO 9 – CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	
9.1 <b>Conclusões</b> .....	171
9.2 <b>Prospecções/possibilidades</b> .....	177
9.3 <b>Desenvolvimentos futuros</b> .....	186
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	187

# LISTA DE FIGURAS

<b>1.1</b>	Vistas em detalhe do projeto do grande Domo da Casa de Ópera de Cingapura, uma superestrutura tubular espacial amorfa com dupla curvatura .....	5
<b>1.2</b>	Vistas gerais do projeto do grande Domo da Casa de Ópera de Cingapura, uma superestrutura tubular espacial amorfa com dupla curvatura .....	6
<b>1.3</b>	Características complementares do pensamento humano .....	9
<b>1.4</b>	Exemplo de catálogo de produtos de prateleira, ou seriados .....	11
<b>1.5</b>	Ilustração do <i>show room</i> de peças em ferro fundido; muitas delas instaladas no Brasil - Catálogo de MacFarlane & Co., 1882-83 .....	12
<b>1.6</b>	Pilares e grades em ferro fundido de MacFarlane & Co na Estação da Luz em São Paulo .....	12
<b>2.1</b>	A racionalização do sistema construtivo japonês através da padronização de todas as dimensões, despertou a atenção de todo o mundo, pela afinidade com o conceito da industrialização .....	21
<b>3.1</b>	Exemplo típico de residência japonesa estruturada pela malha .....	27
<b>3.2</b>	Visão geral do complexo da Sede do Governo de Tóquio, Japão .....	28
<b>3.3</b>	Vista parcial aérea da edificação TMG N° 1 Building do complexo da Sede do Governo de Tóquio, Japão .....	29
<b>3.4</b>	“Célula mãe” do <i>layout</i> típico .....	30
<b>3.5</b>	Definição da malha estruturadora .....	30
<b>3.6</b>	Zoneamento interno e planta .....	31
<b>3.7</b>	Planta dos pavimentos tipos .....	31
<b>3.8</b>	Modulação dos painéis de fechamento .....	32
<b>3.9</b>	Etapas construtivas / Painéis de fechamento .....	32
<b>3.10</b>	Vista parcial térrea da edificação TMG N° 1 Building do complexo da Sede do Governo de Tóquio, Japão .....	33
<b>3.11</b>	Planilha de quantitativos de elementos tubulares e conexões .....	35
<b>3.12</b>	Projeto de forma elaborado por uma equipe de alunos .....	36
<b>3.13</b>	Croqui volumétrico da proposta de forma dos alunos .....	37
<b>3.14</b>	<i>Kit</i> plástico (Mini Quadro 350) dos elementos da planilha da 3.11 .....	38
<b>3.15</b>	Objeto criado pela equipe de alunos (projeto das FIG. 3.12 - 3.13) .....	39
<b>3.16</b>	Objeto criado pela equipe de alunos .....	39



<b>3.17</b>	Objeto criado pela equipe de alunos .....	39
<b>3.18</b>	<i>Hall</i> de edificação em estrutura tubular de seção circular. Tóquio, Japão .....	41
<b>4.1</b>	Ação da gravidade sobre tira de papel plana .....	43
<b>4.2</b>	Ação da gravidade sobre tira de papel enrijecida pela curvatura .....	43
<b>4.3</b>	Vista externa do pavilhão do Japão - Expo de Hanover 2000 .....	44
<b>4.4</b>	Vista externa do pavilhão do Japão - Expo de Hanover 2000 .....	44
<b>4.5</b>	Vista aérea da estrutura em tubos de papelão montada no Jardim das Esculturas do MoMA em N.Y. em 2000 .....	45
<b>4.6</b>	Detalhe da estrutura em tubos de papelão montada no Jardim das Esculturas do MoMA em N.Y. em 2000, similar à executada no pavilhão do Japão - Expo de Hanover, 2000 .....	46
<b>4.7</b>	Geratriz & diretriz do hiperbolóide de revolução .....	52
<b>4.8</b>	Superfícies regradas desenvolvíveis ou desenroláveis a) Desenvolvimento do cilindro b) Desenvolvimento do cone .....	53
<b>4.9</b>	Parabolóides Hiperbólicos .....	54
<b>4.10</b>	Conóides .....	54
<b>4.11</b>	Helicóides .....	54
<b>4.12</b>	Faixa de Moebius .....	54
<b>4.13</b>	Direções de curvatura no cilindro .....	55
<b>4.14</b>	Direções de curvatura no cilindro .....	55
<b>4.15</b>	a) Superfícies sinclásticas ou elípticas possuem linhas principais de curvatura em todas as direções com a mesma orientação b) Para se planificar uma superfície não-desenvolvível, são necessários sucessivos cortes .....	56
<b>4.16</b>	Superfícies anticlásticas ou hiperbólicas possuem linhas principais de curvatura positivas e negativas simultaneamente .....	56
<b>4.17</b>	Geratriz paralela a $\pi_2$ .....	59
<b>4.18</b>	Geratriz paralela a $\pi_3$ .....	59
<b>4.19</b>	Geratriz paralela a $\pi_2$ e $\pi_3$ .....	59
<b>4.20</b>	1ª família de geratrizes do HP .....	59
<b>4.21</b>	1ª e 2ª família de geratrizes do HP .....	59
<b>4.22</b>	Curvaturas nulas do HP .....	60
<b>4.23</b>	Curvaturas principais do HP .....	60
<b>4.24</b>	Composição de quatro Módulos HP com vértices extremos apoiados em colunas	61

<b>4.25</b>	Composição de quatro Módulos HP em taça ou guarda-chuva .....	61
<b>4.26</b>	HP em Shed .....	62
<b>4.27</b>	Conóide .....	62
<b>4.28</b>	Represa .....	62
<b>4.29</b>	Barraca HP em lona têxtil .....	63
<b>4.30</b>	HP em estrutura tubular reticulada .....	63
<b>4.31</b>	Modelo virtual genérico de HP em estrutura tubular reticulada espacial .....	64
<b>4.32</b>	Cobertura do Orio Sports Centre, Japão em HP tubular espacial .....	64
<b>4.33</b>	Cobertura de anfiteatro da cidade de Fort. Lauderdale, Flórida .....	65
<b>4.34</b>	Residência do engenheiro Ronei Lombardi Filgueiras, especialista em superfícies anticlásticas .....	66
<b>4.35</b>	Cobertura em HP de ponto de ônibus .....	67
<b>4.36</b>	<i>Stand</i> da Expo Plaza na EXPO de 1985. Osaka .....	67
<b>4.37</b>	Vista de topo Modelo Plano .....	68
<b>4.38</b>	Vista de topo Modelo HP .....	68
<b>4.39</b>	Vista frontal do declive referente à cada módulo do Modelo HP .....	69
<b>4.40</b>	Montagem do Modelo Plano .....	69
<b>4.41</b>	Montagem do Modelo HP .....	69
<b>5.1</b>	a) Teia de aranha em conformação de Hiperbolóide b) As pétalas dos hibiscos são melhor estruturadas pela presença da dupla curvatura, assim como as folhas do boldo c) A dupla curvatura presente nas folhas de alface confere um enrijecimento de suas bordas .....	72
<b>5.2</b>	Modulação no abacaxi .....	76
<b>5.3</b>	Malha hexagonal nas colméias .....	76
<b>5.4</b>	Modulação na Cana do Mato .....	76
<b>5.5</b>	Modulação no milho indiano .....	76
<b>5.6</b>	Padrões modulares organizados por malhas .....	76
<b>5.7</b>	Malha e modulação nas escamas de cobra .....	76
<b>5.8</b>	Modulação nas pétalas da agave .....	77
<b>5.9</b>	Variações sobre a mesma malha, ou os mesmos princípios .....	77
<b>5.10</b>	Espiral da concha do náutilus .....	78
<b>5.11</b>	Espiral na margarida .....	78

<b>5.12</b>	Cultura de fungos sobre gordura talhada seguindo padrões modulares .....	79
<b>5.13</b>	Princípio de ramificação binária no reino vegetal .....	79
<b>5.14</b>	Padrões no corte do repolho .....	79
<b>5.15</b>	Estruturas geodésicas naturais .....	80
<b>5.16</b>	A irregularidade nas dunas também segue padrões .....	80
<b>5.17</b>	Galhos das árvores aparentemente aleatórios .....	81
<b>5.18</b>	Modulação das formações rochosas .....	81
<b>5.19</b>	Princípio de semelhança .....	84
<b>5.20</b>	Princípio de semelhança .....	84
<b>5.21</b>	Princípios geométricos e de semelhanças da couve flor .....	85
<b>5.22</b>	Embora tenham a mesma malha triangular, os flocos de neve são sempre diferentes um do outro .....	86
<b>5.23</b>	Princípio de semelhança na folha .....	87
<b>5.24</b>	Princípio de semelhança nos galhos .....	87
<b>5.25</b>	Formas geradas por computador através da geometria fractal .....	87
<b>5.26</b>	Formas geradas por computador através da geometria fractal .....	88
<b>5.27</b>	Teto da cripta da igreja da colônia Güell em Barcelona, estruturada por nervuras e elementos inclinados .....	89
<b>5.28</b>	Maquete do esquema estrutural do terraço/cobertura do Parque Güell .....	90
<b>5.29</b>	Vista dos pilares e teto sob terraço do Parque Güell .....	90
<b>5.30</b>	Maquete do esquema estrutural na fachada da Casa Milá (La Pedrera) .....	91
<b>5.31</b>	Fachada da Casa Milá (La Pedrera) .....	91
<b>5.32</b>	Maquete do esquema estrutural do piso da Casa Milá (La Pedrera) .....	91
<b>5.33</b>	Fachada da Igreja da Sagrada Família .....	92
<b>5.34</b>	Corte transversal pela nave central a ser construída .....	92
<b>5.35</b>	Maquete da nave central a ser construída .....	92
<b>5.36</b>	Desenho em CAD das etapas para finalização dos pilares indicados na FIG. 5.34	92
<b>5.37-</b>	Modelo em gesso do capitel dos pilares em escala real .....	93
<b>5.38</b>	Desenhos em CAD da planta do capitel dos pilares mostrando as linhas estruturadoras e “topográficas” de sua superfície .....	93
<b>5.39</b>	Esquema em CAD das operações geométricas para obtenção da volumetria dos capitéis dos pilares .....	93

<b>5.40</b>	Fachada Norte de residência em Los Altos, Califórnia projetada por Bart Prince Engineering Associates, structural engineers. 1980-1983 .....	94
<b>5.41</b>	Vista interna .....	94
<b>5.42</b>	Fachada Sul .....	94
<b>5.43</b>	a) Museu Astronômico de Kihoku, Japão, projetado pelo arquiteto organicista Masaharu Takasaki b) Vista inferior da caixa de escada do edifício Crystal Light, do mesmo arquiteto - Tóquio, Japão c) Gavinhas de videira, em analogia com a estrutura tubular da escada ao lado .....	95
<b>5.44</b>	Vista interna do aeroporto de Stuttgart, Alemanha, projetado pelo escritório Gerkan, Marg+Partners .....	95
<b>5.45</b>	Coberturas projetadas por Santiago Calatrava a) Dossel entre edifícios BCE Place, Toronto, Canadá. 1987-1992 b) Maquete de cobertura para Bauschänzli restaurante - Zurique, Suíça. 1988 c) Aeroporto / estação ferroviária projetado por Santiago Calatrava para Lyons, França, 1989-1994 .....	96
<b>5.46</b>	Estação Ferroviária Oriente projetada por Santiago Calatrava em Lisboa, Portugal, 1993-1998 .....	97
<b>5.47</b>	Estádio Big Swan (Grande Cisne) projetado pela Nikken em Niigata, Japão. 1997-2001 .....	97
<b>5.48</b>	a), b) Sede da Swiss Re (“ <i>Erotic Gherkin</i> ”) projetado por Sir Norman Foster, Londres, 1997-2003 c) Detalhe da fixação da esquadria da Swiss Re d) Analogia com estrutura e modulação da flor do antúrio .....	98
<b>5.49</b>	Projeto de João Filgueiras Lima (Lelé) para capela de São José de Ribamar, Maranhão, 1997 .....	99
<b>5.50</b>	Estudo de braço robótico - Centro Ricerche Instituto Europeu de Design, Milão	100
<b>5.51</b>	Estudo de recipiente elástico - Centro Ricerche Instituto Europeu de Design, Milão .....	100
<b>5.52</b>	Estudo de materiais flexíveis - Centro Ricerche Instituto Europeu de Design, Milão .....	101
<b>5.53</b>	Estudo de estrutura sanfonada para painéis-parede para contêiner móvel. Centro Ricerche Instituto Europeu de Design, Milão .....	101
<b>5.54</b>	“Centrifugado - refúgio rotatório”. Cobertura pneumática móvel com 6m de diâmetro e 18 Kg de peso, idealizado por Dominik Baumüller .....	102
<b>5.55</b>	Sistemas em papéis flexíveis e resistentes à compressão por dobras, ou colagens alternadas .....	102
<b>5.56</b>	Embalagens e produtos que se utilizam de dobras ou curvaturas para adquirirem resistência .....	103
<b>5.57</b>	Utilização da Malha e Coordenação Modular para enrijecimento .....	103
<b>5.58</b>	Princípios naturais de enrijecimento .....	104

<b>5.59</b>	Princípios naturais de enrijecimento .....	104
<b>6.1</b>	a), b), c) O esqueleto humano como uma sofisticada estrutura mecânica predominantemente tubular d) Robô utilitário desenvolvido pela Honda com sofisticada Engenharia Mecatrônica .....	105
<b>6.2</b>	a) Desenhos do esqueleto humano feitos por Leonardo da Vinci b) Seção transversal do fêmur; c) Seção longitudinal do fêmur d) A fotografia microscópica da estrutura óssea também de seção circular (hiperbolóide) revela um princípio de semelhança .....	106
<b>6.3</b>	Sistema de proteção de combate ao incêndio incorporado à estrutura. NorConHouse em Hanover, Alemanha .....	107
<b>6.4</b>	Etapas construtivas dos pilares como sistema de captação de água de chuva do Hospital Sarah Kubitschek de Belo Horizonte .....	108
<b>6.5</b>	a) Atomium : restaurantes e mirantes esféricos interligados por circulações tubulares da Expo de Bruxelas, 1958 b) Gruas com conformação tubular em sua coluna principal .....	109
<b>6.6</b>	Geometria tubular dos bambus .....	110
<b>6.7</b>	Vista ampliada do tecido vascular do bambu .....	110
<b>6.8</b>	Utilização de andaimes de bambu em edificações modernas na China .....	111
<b>6.9</b>	O bambu como elemento de reforço e como fôrma permanente em laje de concreto .....	112
<b>6.10</b>	Coincidência do CC, CG e simetria radial das seções tubulares circulares .....	113
<b>6.11</b>	Simetria nos perfis de seção “I”, apenas quando comparados ao mesmo eixo coordenado .....	113
<b>6.12</b>	Simetria nos perfis tubulares de seção quadrangular em relação às coordenadas ortogonais, quando comparados na mesma posição .....	114
<b>6.13</b>	Assimetria nos perfis tubulares de seção quadrangular em relação às coordenadas, quando comparados em posições diferentes .....	114
<b>6.14</b>	Impedimento à rotação do ponto indicado pelos elementos vizinhos .....	115
<b>6.15</b>	Relativo impedimento à rotação do ponto indicado pelos elementos vizinhos .....	115
<b>6.16</b>	a) A força exercida pela pessoa indicada, para movimentar o conjunto será anulada nela mesma b) A força exercida pela pessoa indicada, será descarregada na primeira da fila .....	116
<b>6.17</b>	A força exercida será anulada nela mesma .....	116
<b>6.18</b>	Procedimentos para execução de perfis demonstrativos: a), b) Execução de um tubo de papel c) Canaleta em PVC para eletrificação com seção de perfil “C” d) Perfis experimentais concluídos .....	117
<b>6.19</b>	a) Tração em perfil tubular b) Tração em perfil “C” .....	118

<b>6.20</b>	Compressão em ambos os perfis .....	118
<b>6.21</b>	a) Torção em perfil tubular b) Torção em perfil “C” .....	119
<b>6.22</b>	Flambagem lateral por torção em perfil “C” .....	120
<b>6.23</b>	Montanha russa com <i>looping</i> em parafuso - Tóquio, Japão .....	121
<b>6.24</b>	Montanha russa suspensa do Bush Gardens. EUA .....	121
<b>6.25</b>	Roda gigante London Eyes. Inglaterra .....	121
<b>6.26</b>	Malabarismo em estrutura tubular rolante-cinética .....	122
<b>6.27</b>	a) Banqueta plástica montada b) Banqueta plástica desmontada .....	122
<b>6.28</b>	Estrutura pneumática em arco .....	124
<b>6.29</b>	Auditório em estrutura pneumática .....	125
<b>6.30</b>	Restaurante em estrutura pneumática .....	125
<b>6.31</b>	a) Catenária em arco parabólico, segundo ação da gravidade sobre a corrente tracionada b) A mesma geometria anterior também é a mais favorável para se vencer o peso próprio numa situação invertida, porém, com seus elementos comprimidos .....	127
<b>6.32</b>	Maquete do processo utilizado por Gaudí para o dimensionamento da igreja da Colônia Güell através dos arcos funiculares .....	127
<b>6.33</b>	Travamento do arco parabólico comprimido .....	128
<b>6.34</b>	Fluxo das cargas em abóbada .....	128
<b>6.35</b>	a) Fluxo das cargas em tubo cilíndrico b) Fluxo das cargas em tubo quadrangular .....	129
<b>6.36</b>	a) Parede de aquário em material acrílico b) Estações tubo da cidade de Curitiba com fechamento em vidro .....	130
<b>6.37</b>	Direção dos empuxos em seção circular .....	130
<b>6.38</b>	a) Detalhe genérico de viga treliçada em chapa dobrada b) Detalhe de viga treliçada do centro cultural Georges Pompidou .....	131
<b>6.39</b>	Centro Cultural Georges Pompidou .....	132
<b>6.40</b>	Permeabilidade visual do perfil tubular cilíndrico em relação aos outros tipos de seção .....	133
<b>6.41</b>	Mesma permeabilidade visual em qualquer uma das direções .....	133
<b>6.42</b>	A ausência de arestas no tubo de seção cilíndrica, ao contrário do de seção quadrangular, permite um melhor comportamento aerodinâmico, evitando mudanças bruscas na direção dos fluxos .....	134
<b>6.43</b>	O emprego dos perfis tubulares cilíndricos em projetos permite um aspecto final de acabamento dos seus elementos .....	134

<b>6.44</b>	Comparação do posicionamento de um perfil genérico com um tubular cilíndrico numa superfície HP, frente à reversibilidade de suas linhas e bordos .....	135
<b>6.45</b>	Estrutura composta por tetraedros empilhados em estrutura tubular .....	136
<b>7.1</b>	<b>A Gaudí.</b> Cripta da igreja Colônia Güell em Barcelona .....	139
<b>7.2</b>	<b>E. Torroja.</b> Hipódromo de Zarzuela, Madri. 1935 .....	141
<b>7.3</b>	<b>F. Candela.</b> Laboratório de estudos de raios cósmicos. Universidade do México. 1951 .....	141
<b>7.4</b>	<b>P. L. Nervi.</b> Cobertura da entrada da sede da UNESCO em Paris. 1953-1957 .....	141
<b>7.5</b>	<b>F. Otto.</b> Tenda em lona para orquestra na exposição federal de jardinagem de Kassel. 1955 .....	141
<b>7.6</b>	<b>F. Candela.</b> Igreja de Ntra. Mra. de la Soledad em Coyocán, México. 1956-1957 .....	141
<b>7.7</b>	<b>F. Candela.</b> Igreja de Santo Antônio das Huertas em Tacuba, México. 1957 .....	142
<b>7.8</b>	<b>F. Otto.</b> Tendões da feira internacional de Interbal,. Berlim, Alemanha. 1957 .....	142
<b>7.9</b>	<b>F. Candela.</b> Restaurante Los Manantiales em Xochimilco, México. 1957 .....	142
<b>7.10</b>	<b>L. J. Baucher.</b> Pavilhão de informações em Bruxelas. 1958 .....	143
<b>7.11</b>	<b>F. Candela.</b> Capela de Lomas de Cuernavaca, México. 1958 .....	143
<b>7.12</b>	<b>F. Candela.</b> Capela se São Vicente de Coyacàn, México. 1959-1960 .....	143
<b>7.13</b>	<b>F. Candela.</b> Capela de São José Obrero em Monterrey, México. 1959-1960 .....	143
<b>7.14</b>	<b>F. Otto.</b> Pavilhão da Alemanha na Expo 67 de Montreal. (cobertura em lona) 1965-1967 .....	143
<b>7.15</b>	<b>F. Otto.</b> Estádio para os jogos olímpicos de Munique. (cobertura em acrílico) 1969-1972 .....	143
<b>7.16</b>	Estruturas de dupla curvatura concebidas por Gaudí: a) Porta Finca Miralles estruturada por superfície de dupla curvatura b) Cobertura das escolas da Sagrada Família sob a forma de HP c) Pilar situado no parque Güell sob a forma hiperbólica .....	144
<b>7.17</b>	Escultura com superfície HP .....	145
<b>7.18</b>	Cobertura em HP do Court House Square. Denver, Colorado .....	145
<b>7.19</b>	Cobertura em HP do <i>hall</i> de entrada de um motel. Las Vegas, Nevada .....	146
<b>7.20</b>	Abrigo de chuva. Olanesti, Romênia .....	146
<b>7.21</b>	Cobertura metálica em HP .....	146
<b>7.22</b>	HP em madeira na Expo de Hanover 2000, Alemanha .....	146
<b>7.23</b>	Cobertura em HP da catedral de Santa Maria. São Francisco, Califórnia .....	146

<b>7.24</b>	Museu em Chinchester, UK, com estrutura de madeira em dupla curvatura .....	147
<b>7.25</b>	Estado de equilíbrio do filme de PVC com a presença da dupla curvatura indicada a caneta .....	147
<b>7.26</b>	Estação rodoviária de Predeal, Romênia, 1964 .....	147
<b>7.27</b>	Centro esportivo de Onesti, Romênia, 1966 .....	147
<b>7.28</b>	Reservatório de água de Möglingen, Alemanha. 1965 .....	147
<b>7.29</b>	Cobertura de aeroporto em HP (tenso estrutura) .....	148
<b>7.30</b>	Passarela de pedestre em hiperbolóide de revolução .....	149
<b>7.31</b>	Passarela em Curitiba de estrutura tubular reticulada hiperbólica .....	149
<b>7.32</b>	Igreja católica com cobertura em HP - Tóquio, Japão .....	150
<b>7.33</b>	Pavilhão da Philips projetado por Le Corbusier para a Expo de Bruxelas. 1958 ...	150
<b>7.34</b>	Projeto do <i>stand</i> da V & M do Brasil-Vallourec & Mannesmann Tubes no I CICOM de 2001 .....	151
<b>7.35</b>	Detalhes de projeto do produto desenvolvido durante pesquisa: a) Codificação e quantitativos dos elementos b) Disposição dos elementos para montagem c) Vista em detalhe das conexões d) Montagem .....	152
<b>7.36</b>	Monumento V & M - produto desenvolvido durante pesquisa: a) Detalhe da fabricação b) Detalhes de montagem c), d) Vistas gerais e), f) Vistas em detalhe	153
<b>8.1</b>	Caracterização do modelo $\alpha = 0^\circ$ composto por 4 módulos básico .....	155
<b>8.2</b>	Variando o empenamento da estrutura, porém mantendo a mesma distância entre os apoios, cada vez mais afasta-se da similaridade entre elas quanto à escala .....	156
<b>8.3</b>	As peças assinaladas se encontram na posição das direções de curvatura nula da superfície (paralelas ao plano horizontal) .....	158
<b>8.4</b>	Posicionamento das tipologias dos grupos de barras na estrutura de 4 módulos ...	159
<b>8.5</b>	Esquema genérico de apoio para as coberturas .....	160
<b>8.6</b>	Exemplo genérico da carga aplicada no meio do vão da estrutura .....	161
<b>8.7</b>	Exemplo genérico de cargas de mesmo valor aplicadas em todos os 289 nós da estrutura .....	161
<b>9.1</b>	Coreto em ferro fundido de MacFarlane .....	171
<b>9.2</b>	Boate itinerante em estrutura tubular .....	172
<b>9.3</b>	Estruturas treliçadas para palcos e eventos .....	172
<b>9.4</b>	Estrutura para estacionamento em perfil tubular .....	173
<b>9.5</b>	Escultura helicoidal constituída por tubos metálicos de seção quadrangular .....	173



<b>9.6</b>	Pente de ovos com sua superfície enrijecida pelas curvaturas .....	174
<b>9.7</b>	Presença das curvas reversas conforme no HP .....	174
<b>9.8</b>	Flexão provocada pela adição de uma carga .....	174
<b>9.9</b>	Maior resistência à flexão quando adicionada mais uma estrutura sobre a outra com a mesma carga .....	175
<b>9.10</b>	Sugestão de modelo de estrutura espacial em HP para ser investigado .....	175
<b>9.11</b>	Proposição de uso para o modelo simulado, com revestimento em vidro e painéis de alumínio .....	177
<b>9.12</b>	Maquete de massa do modelo simulado, com revestimento em vidro e painéis de alumínio .....	178
<b>9.13</b>	Proposição de acoplamento de módulos do modelo anterior .....	179
<b>9.14</b>	Proposição do modelo com revestimento em vidro .....	180
<b>9.15</b>	Proposição invertida do modelo estrutural com revestimento em vidro e painéis de alumínio .....	180
<b>9.16</b>	Proposição de aplicação do modelo simulado em iluminação zenital de pátios cobertos a) Vista geral aérea b) Corte esquemático transversal c) Corte esquemático em diagonal .....	181
<b>9.17</b>	Módulo em “taça” composto por quatro HP .....	182
<b>9.18</b>	Possibilidade de acoplamento de módulos em “taça” .....	182
<b>9.19</b>	Proposta de residências desmontáveis com a utilização do módulo “taça” .....	183
<b>9.20</b>	Variações de <i>layout</i> para residências desmontáveis com a utilização dos módulos “taça” .....	184
<b>9.21</b>	Possibilidade de utilização na vertical .....	185
<b>9.22</b>	Proposta para torres constituídas por acoplamentos de HP na vertical .....	185

## LISTA DE TABELAS

<b>4.1</b>	Comparativo entre Modelo Plano e Modelo HP quanto à flexão .....	70
<b>7.1</b>	Listagem cronológica da utilização dos HP na arquitetura .....	140
<b>8.1</b>	Dados relativos às declividades e à área de cobertura .....	159
<b>8.2</b>	Resultados com carga concentrada .....	163
<b>8.3</b>	Resultados com carga distribuída nos 289 nós .....	166

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações gerais

Este trabalho tem como enfoque principal a discussão formal da concepção estrutural face às novas tecnologias provenientes dos processos industriais, dos quais, pela própria natureza, a estrutura metálica representa um produto derivado desse processo e que, por uma série de limitações, ainda se encontra pouco desenvolvida.

Esta fase de transição e de aprendizado na realidade brasileira gera muitas vezes uma certa insegurança nos profissionais da engenharia e da arquitetura. Tal insegurança é geralmente proveniente do desconhecimento frente às possibilidades dessas “novas tecnologias” que não raras vezes são vistas com um certo preconceito.

*"Essas possibilidades da estrutura metálica são conhecidas pelo arquiteto?*

*Não, e nem pelo engenheiro brasileiro. Estamos engatinhando no conhecimento da estrutura metálica, ainda estamos na fase 'vi, gostei, é interessante, está na moda'. Os conhecimentos não estão amadurecidos, mas estamos aprendendo."*<sup>1</sup>

Por outro lado, porém, indubitavelmente, não só no Brasil, mas em todo o mundo, hoje se vive uma nova fase com novas possibilidades construtivas e conceptivas, sejam elas pelo advento de novos materiais, de novas tecnologias, pela evolução científica em todas as áreas com a evidente interdependência e multidisciplinaridade de todas as ciências, pelas novas problemáticas sociais, espaciais, naturais e estruturais da sociedade, pela efemeridade e/ou mobilidade de alguns espaços ou construções e organizações sociais e por que não dizer pela virtualidade deles.

Aliado a tudo isso, a maior facilidade no acesso e na democratização das novas ferramentas computacionais permite hoje uma manipulação de condicionantes cada vez mais complexos de projetos, antes nunca experimentados. E sobretudo, a velocidade da comunicação aliada à possibilidade humana de compilar esta contemporaneidade materializando-se em ações que

---

<sup>1</sup> MEDEIROS, *Finestra Brasil*, out.-nov.-dez. 2003, p.45

atuam diretamente e mais rapidamente sobre o nosso cotidiano, fazem da nossa época um momento ímpar na história.

A seguir tem-se um trecho extraído da entrevista realizada pela arquiteta Beatriz de Abreu e Lima ao engenheiro *designer* de estruturas Charles Walker, que trabalha para a empresa inglesa Ove Arup, uma das mais importantes empresas de engenharia do mundo:

*“Charles Walker: Ao longo dos últimos quatro, cinco anos, a maioria das estruturas com as quais venho trabalhando tem características totalmente amorfas. O problema está em como descrever uma geometria amorfa. Hoje temos novas ‘ferramentas’, principalmente da indústria de jogos computacionais e animação; ferramentas realmente poderosas para descrever geometrias amorfas, como curvas Spline<sup>2</sup> e superfícies NURBS<sup>3</sup>. Uma superfície NURB é uma superfície B-spline não-uniforme e racional; vem da Geometria Projetiva, que descreve os parâmetros de uma superfície por meio de uma equação matemática. O resultado é uma superfície NURB totalmente amorfa que, no entanto, possui precisão em termos de Engenharia. Assim, com estas ‘ferramentas’ podemos produzir formas digitalmente, e com os programas de análise numérica disponíveis - como os programas para Análise em Elementos Finitos - podemos analisar digitalmente uma geometria. No final deste processo está a manufatura integrada por computador (Computer Integrated Manufacturing - CIM), em que os componentes de um sistema são fabricados diretamente a partir da informação digital. Isto possibilita que o projeto seja inteiramente executado*

---

<sup>2</sup> Spline: curva de forma livre que conecta uma série de pontos de controle com uma curva suave. Mudanças nos pontos de controle resultam em mudanças na curva. B-spline e Bezier são exemplos de curvas spline.

<sup>3</sup> NURBS (Non-Uniform Rational Bézier Spline): tipo de curva de forma livre que usa B-splines e permite verificação de valor de cada ponto da superfície. Um segundo aspecto da tecnologia digital que tem um impacto crítico sobre a arquitetura é o fato de que programas como Softimage, 3D Studio Max, Alias e Maya são sistemas NURBS baseados em cálculos. Isto contrasta com outros programas cartesianos muito usados, tais como o Auto-Cad, e apesar de serem versáteis, é muito difícil desenhar curvas fluidas com eles. São programas que se baseiam em coordenadas pontuais para cada ponto, linha ou plano no sistema de coordenadas X, Y, Z. Em contraste, em um sistema de modelagem baseado em NURBS, as Non-Uniform Rational Bézier Spline são a base para a geração de formas. Um sistema de modelagem NURBS é bem diferente. Mediante o uso de fórmulas algorítmicas as linhas e as superfícies são ajustadas e recalculadas continuamente. É um sistema inerentemente mais dinâmico: superfícies e objetos são desenvolvidos em uma relação mutáveis com a superfície. (in IMPERIALE, Alice. *New flatness: surface tension in digital architecture*. Birkhäuser, 2000)

*utilizando-se informações digitais, de maneira que os desenhos bidimensionais - que constituem um processo analógico - nunca são produzidos. Utilizamos arquivos tridimensionais do tipo ' dxf' ou, quando modelando superfícies, arquivos ' iges' , pois os arquivos ' dxf' não contêm as descrições de uma superfície. Hoje em dia, é possível projetar digitalmente, analisar digitalmente e fabricar digitalmente. Na verdade, não é necessário recorrer a descrições cartesianas, tais como desenhos bidimensionais. Percebemos que quando projetamos estruturas tridimensionais complexas, as tradicionais descrições cartesianas do espaço arquitetônico, tais como plantas, cortes e fachadas, tornam-se menos relevantes.”<sup>4</sup>*

Quando Walker é indagado sobre sua participação no projeto do grande Domo da Casa de Ópera de Cingapura (uma superestrutura espacial amorfa com dupla curvatura, possuindo 7000 nós únicos e diferentes, onde cada perfil tubular foi fixado em angulações também diferentes), comenta que os desenhos tradicionais não ajudariam em nada a não ser para concluir: “*Bem, são 100 m de comprimento por 60 m de largura*”<sup>5</sup>. E o que seria imprescindível seriam os arquivos digitais em 3 D contendo as coordenadas nodais de todas as conexões (FIG. 1.1 e FIG. 1.2).



FIGURA 1.1 – Vistas em detalhe do projeto do grande Domo da Casa de Ópera de Cingapura, uma superestrutura tubular espacial amorfa com dupla curvatura  
FONTE - a) Disponível em: <[http://www.vitruvius.com.br/entrevista/walker/walker\\_03.jpg](http://www.vitruvius.com.br/entrevista/walker/walker_03.jpg)> Acesso em: 12 abr. 2003; b) foto gentilmente cedida por Charles Walker.

<sup>4</sup> Walker, 2003.- 2 Engenharia na Era Digital.

<sup>5</sup> Ibidem.



FIGURA 1.2 – Vistas gerais do projeto do grande Domo da Casa de Ópera de Cingapura, uma superestrutura tubular espacial amorfa com dupla curvatura  
FONTE - Fotos gentilmente cedidas por Charles Walker.

Pode-se perceber, no próximo trecho desta entrevista, que estes novos reflexos não atingem apenas o circuito restrito dos escritórios de projeto, mas chegam também para revolucionar o próprio canteiro de obras, o que pode ser observado quando o entrevistado é indagado sobre a montagem dessa estrutura:

**“BAL:** *E como a estrutura é locada? Com o GPS ?*

**C W:** *Não, nada disso. Os nós são marcados com uma seta indicando norte para que na obra, alguém possa segurá-los na posição correta e encaixá-los no sistema, como um quebra-cabeça. Então, o nó é identificado, posicionando com a seta do Norte apontando para direção correta e instalado. Depois é feita a leitura do código de barras existente em cada nó, para que sua instalação seja registrada em um sistema monitorador, pois, de outro modo, não é possível perceber se um nó deixou de ser instalado. Este tipo de logística e os programas computacionais utilizados para lidar com as partes do sistema são bastante comuns e muito usados nas indústrias, para administrar estoques. As empresas de encomenda expressa, por exemplo, possuem programas computacionais para rastrear encomendas. Apesar de ser, logisticamente, algo complexo, isto é totalmente comum hoje em dia.”*<sup>6</sup>

Esta realidade, pelo menos aparentemente tão distante, nos faz refletir sobre a nossa capacitação técnica inserida num mundo cada vez mais globalizado.

Nestes últimos anos têm-se tido alguns exemplos de encomendas de grandes projetos como, por exemplo, o Guggenheim, do Rio de Janeiro, e o Museu da Música, feitas a arquitetos de renome internacional, cujas obras provavelmente seriam feitas por parcerias ou *joint venture* internacionais.

Tais iniciativas tenderão a ser cada vez mais freqüentes e, dependendo de como forem conduzidas, podem vir a ser positivas, desde que se efetivem como um intercâmbio de tecnologia e cultura; mas poderão ser extremamente perigosas caso haja total dependência tecnológica, o que causaria impossibilidade de capacitação e de aprimoramento de *know how*. Esse intercâmbio já é uma realidade internacional. Porém, um novo conceito que começa a despontar seria o trabalho de equipe virtual, cujos integrantes, localizados nas mais variadas regiões do planeta, quase não mantêm contato físico entre si.

---

<sup>6</sup> Walker, 2003.- 2 Engenharia na Era Digital.

*“...isso já acontece nos projetos aeroespaciais há algum tempo, envolvendo, é claro, uma tecnologia de ponta. O projeto de um ônibus espacial inclui equipes de projeto na Inglaterra, na Alemanha, na França, na Espanha; todos projetando partes diferentes e trabalhando a partir de uma complexa maquete tridimensional que é armazenada em algum computador central.”*

*“...Quando eu envio um fax com um desenho para alguém, o fax contém uma parte ínfima de informação. Mas eu também posso enviar um e-mail contendo cinquenta desenhos que representam milhares de horas de trabalho e informações sobre o projeto. Isto é uma coisa totalmente nova. Quando trabalhamos, digamos, com Ben Van Berkel que está na Holanda, nós nos correspondemos regularmente, via e-mail, enviando maquetes eletrônicas sofisticadas contendo a geometria completa do projeto. É fácil se comunicar desta maneira. Então, quando nos reunimos, precisamos apenas verificar uma lista de pendências. É claro que o contato pessoal sempre será necessário, certo? Existe toda uma linguagem corporal e questões sensoriais que são importantes. No entanto, pode-se ter uma equipe virtual em que o engenheiro estrutural está em um país, o arquiteto em outro, o engenheiro mecânico em um terceiro país e os empreiteiros em algum outro lugar. 7*

O fato é que, nesses “novos tempos”, as palavras-chave são: flexibilidade, multidisciplinaridade e trabalho em equipe. Esse último talvez seja o que mais preocupa, visto que a vocação de trabalho integrado ainda não está introjetada na cultura brasileira, assim como já acontece há anos em alguns países estrangeiros, em especial no Japão.

É impossível desenvolver tecnologia sem a troca de experiências e, no momento em que se vive, de iminente transformação dos processos construtivos, faz-se imprescindível a aproximação e o envolvimento cada vez maior destes dois profissionais: o arquiteto e o engenheiro. Ambos os profissionais trabalham com o mesmo objetivo e com o mesmo objeto. Intuição e razão fazem parte do ser humano, ambos são faces da mesma moeda. A diferença está apenas na formação, que estimula preferencialmente um ou outro, e é preciso desenvolver esse equilíbrio. É possível se aproximar do “belo”, seja pela arte ou pela matemática, seja pela intuição ou pela razão, mas atingi-lo, somente com essa fusão (FIG. 1.3).

---

<sup>7</sup> Walker, 2003. - 6 Fronteiras.





FIGURA 1.3 – Características complementares do pensamento humano  
 FONTE - Firmo, 1995. p.53.

Esta revolução na qual se está vivendo tem propiciado e induzido tal encontro, pois, diante de limitações e frente à amplitude do universo de possibilidades, já se começa a entender que só se superam deficiências com o intercâmbio de conhecimentos e vivências.

*“A remoção da engenharia e de engenheiros do processo de desenho gradualmente foi subtraindo do arquiteto o conhecimento tecnológico geral. O progresso da ciência dos materiais, geometria, metodologia de construção e estratégias de resistência pode tornar o arquiteto mais livre: a ciência da arquitetura não está em guerra com a arte da arquitetura.*

*Alguns arquitetos e clientes temem - erroneamente - que a proximidade com a tecnologia da engenharia limite a expressão artística. Mais perigoso ainda para a liberdade artística é ficar dependente de uma linguagem cujo tempo já passou. Da mesma forma que um arquiteto Vitoriano reclamava que no Palácio de Cristal não havia lugar para estátuas, um arquiteto contemporâneo pode abraçar a arte e se perder da nova consciência. A nostalgia seja ela flagrante e vigorosa, ou escondida atrás do olhar irônico, originado de auto-referência, fica muito bem em um programa de televisão de meia hora, daqueles a que você assiste após um dia de trabalho ou de uma sessão de ginástica. Mas poucos irão querer que a nostalgia defina sua experiência de mundo: nostalgia é covardia. Ao invés disto, podemos ter a beleza do desenho pensado e racional no qual a eficiência e a complexidade se fundem, o paradigma orgânico intencional concretizado por meios automáticos e mecânicos; podemos ter estruturas que são 99% de inspiração e somente 1% de perspiração, espaços tão intrincados e tão lúcidos quanto representações gráficas computadorizadas de geometria com mais dimensões, construção que gera uma arquitetura tão rica quanto a própria vida.”<sup>8</sup>*

<sup>8</sup> ROBBIN, 1996. p.117-118. (Tradução de Litany Pires Ribeiro)

Muito se fala e muito se vê sobre construções industrializadas, mas pouco se sabe a respeito. Essas deficiências estão generalizadas em dois universos. Tanto em nível profissional, quanto no nível acadêmico, tanto de arquitetura quanto de engenharia. Informações técnicas relativas à construtibilidade são escassas e muitas vezes restritas aos fabricantes e às universidades onde pesquisas são realizadas. Não fazem parte do dia-a-dia nem tão pouco da formação dos profissionais.

Revistas e livros de arquitetura possuem muitos conceitos e imagens, mas poucos dados técnicos; ao contrário, os de engenharia possuem mais dados técnicos e pouca conceituação.

Em face de todo esse distanciamento, o presente trabalho, desenvolvido numa Faculdade de Engenharia Civil por um profissional de formação em Arquitetura, se propõe, através de imagens, estabelecer uma linguagem de comunicação sob uma ótica estruturada em conceitos que concebem um projeto, abordar o tema da questão estrutural tubular metálica, restringindo-o ao universo das superfícies de dupla curvatura, em especial os parabolóides hiperbólicos.

As estruturas de dupla curvatura, devido a suas características geométricas, conferem naturalmente ao seu comportamento estrutural uma eficiência superior às superfícies planas. Percebe-se um subaproveitamento das vantagens estruturais e comportamentais de tais estruturas no panorama da construção civil metálica brasileira.

Este trabalho tem como objetivo promover a transposição do raciocínio do comportamento estrutural das cascas e membranas isotrópicas para as estruturas tubulares reticuladas, conformadas nestas superfícies de dupla curvatura, investigando suas vantagens e possibilidades estruturais, pelos aspectos geométricos de seus elementos ou pelas suas disposições e arranjos físicos, com o intuito de obter múltiplas combinações que permitam ser utilizadas nos mais variados setores da construção civil.

As estruturas de dupla curvatura, que agregam naturalmente um rico potencial de *design*, encontram nos perfis tubulares cilíndricos vantagens significativas, fazendo destes um dos melhores aliados quanto às questões estruturais e de montagem, visto que sua seção transversal possui simetria radial, ou seja, simetria em todas as direções, favorecendo as ligações entre as barras que se posicionam de maneiras reversas e variáveis no espaço.

Aliado às vantagens da forma, tem-se que o mercado brasileiro apresenta-se carente de certos equipamentos semelhantes aos “produtos de prateleiras” ou seriados, para a utilização imediata em projetos variados e/ou especificações, através de catálogos, a exemplo do mercado internacional (FIG. 1.4).



FIGURA 1.4 – Exemplo de catálogo de produtos de prateleira, ou seriados  
FONTE - Arquivo pessoal. Kotobuki, 1994.

Um fato curioso é que, com o domínio da tecnologia do ferro fundido, a “Arquitetura de catálogos”, que teve início na Grã-Bretanha, em 1830-40, com a publicação dos primeiros catálogos, foi bastante consumida pelo Brasil entre meados do século XIX e início do século XX (FIG. 1.5).



FIGURA 1.5 – Ilustração do *show room* de peças em ferro fundido; muitas delas instaladas no Brasil - Catálogo de MacFarlane & Co., 1882-83  
 FONTE - COSTA, 2001.p.30-31.

*"... e os catálogos foram um dos principais responsáveis pela difusão das peças de ferro fundido no mundo todo. No final do século XIX, quando perdiam gradativamente o mercado europeu, os industriais voltaram-se para o exterior com agressividade, usando seus livros como armas de venda e sedução."*

*"No Brasil os catálogos constituem, em alguns casos, quase toda a documentação conhecida de edifícios importantes, como o Teatro de Fortaleza, que teve seus arquivos destruídos, assim como a Estação Da Luz que perdeu os arquivos no incêndio de 1946."<sup>9</sup>*



FIGURA 1.6 – Pilares e grades em ferro fundido de MacFarlane & Co na Estação da Luz em São Paulo  
 FONTE - COSTA, 2001.p.114-115.

<sup>9</sup> COSTA, Cacilda Teixeira. p.66,83.

## 1.2 Estruturação do trabalho

No **capítulo 2**, “Industrialização”, num primeiro momento – item 2.1 –, faz-se uma breve e superficial reflexão sobre o estado em que se encontra a construção civil no Brasil e quais seriam os impactos que essa transformação pela industrialização pode gerar caso ocorra de uma forma rápida e não planejada.

Comenta-se o fato histórico que despertou a atenção do mundo sobre a sistemática da racionalização (que constitui o ponto principal do conceito da industrialização) dos procedimentos construtivos. Destaca-se a importância de absorver este conceito para a realidade brasileira e, através de várias citações, apresenta-se a dicotomia existente entre a qualidade construtiva e a qualidade arquitetônica, que infelizmente nem sempre andam juntas.

O conceito de “qualidade” é inerente aos processos industriais, uma vez que permite racionalização e controle de todos os procedimentos. Cabe aqui ressaltar que esse conceito adotado pela indústria, na construção civil, não esgota o significado da palavra, permitindo uma outra abordagem quase sempre deixada em segundo plano, e que está intimamente relacionada à qualidade arquitetônica.

No **capítulo 3**, “Coordenação Modular”, procura-se recuperar um conceito de extrema importância para a racionalização de todos os processos projetivos relacionados com a indústria que equivocadamente se perderam. É estranho constatar que esta disciplina, que antes fazia parte dos cursos de Arquitetura, hoje foi banida de sua grade curricular nacionalmente, num momento em que se faz imprescindível.

Se a forma de construir mudou ou está mudando, a sua forma de projetar também, e infelizmente ainda não se está acostumado a ela. Para essa nova forma projetiva, o controle na obra não é mais tão maleável quanto uma moldagem do concreto e da alvenaria diretamente no canteiro de obras. Ao contrário, o controle se faz pela sua representação gráfica com todos os elementos, seja ela cartesiana ou não, e na indústria de seus componentes. A obra passa a ser exclusivamente o local da montagem. E isto só é possível com a coordenação das partes, dos módulos. Também neste capítulo tenta-se desmistificar o procedimento projetivo para a

industrialização, que por muitas vezes ao se observar o objeto já edificado, pode parecer complicado por não se entender a lógica construtiva. Mostra-se, com exemplos visuais, que esta sistemática é acessível a todos e que seu grau de complexidade depende da habilidade do manipulador.

É preciso resgatar o trabalho com malhas, visto que, numa obra 100% industrializada, ela estará presente na planta, na fachada, em suas junções, bordas e emendas de interfaces de todos materiais arquitetônicos.

É no **capítulo 4**, portanto, que o tema principal desta pesquisa se faz mais presente. O capítulo tem como título - forma x geometria x desempenho estrutural. Procurou-se destacar a importância da geometria como a ferramenta que irá predestinar o comportamento de uma estrutura qualquer, ou seja, a importância do *design*.

Também se descreve o conceito das superfícies hiperbólicas não raramente presente nas cascas estruturais, observando-se os aspectos da geometria e do comportamento dos parabolóides hiperbólicos. Finalmente, apresenta-se um experimento qualitativo utilizando-se dessa estrutura.

No **capítulo 5**, “A Geometria Natural”, através de exemplos da natureza, evidencia que todo o princípio de sistematização e racionalização, desejado pela indústria, sempre esteve presente na natureza servindo como fonte eterna de aprendizado. É intenção que, com as imagens apresentadas, se perceba que o estudo pormenorizado da natureza e como ela se estrutura, pode ser de vital importância para uma melhor compreensão dos procedimentos projetivos e construtivos da arquitetura e engenharia. Dessa forma, é possível com esse estudo uma evolução nos procedimentos conceptivos, visto que hoje têm-se instrumentos que propiciam coordenar e manipular complexidades jamais imaginadas na história.

*“Algumas dezenas de engenheiros e arquitetos concordam - pensamento atualmente considerado como revolucionário - que a geometria impulsiona a arquitetura. A falta de conhecimento de poliedros complexos, geometria quadridimensional, fractais, topologia de bifurcações tubulares e coisas afins – tendo o cubo e o octaedro como as únicas opções de formas*

*geométricas – é restringir as estruturas com tal rigor que nem mesmo a natureza demanda, apesar da rigorosa doutrina de otimização. Há também considerações estéticas. Os amantes da tecnologia irão se maravilhar com fileiras após fileiras de tetraedros, mas para o público em geral elas parecerão mecânicas e monótonas, somente mais um exemplo do trabalho estrutural da Torre Eiffel. Para que ficar olhando para uma coisa que você já viu? Mas a crítica contra a arquitetura mecanicista, quando tratada de maneira honesta, não é a de que a geometria seja estranha às estruturas da humanidade, não se pode evitar usar a geometria em estruturas; a crítica é de que a geometria que está sendo usada tem pelo menos 100 anos de idade e tenta parecer nova em outro contexto totalmente diferente.”<sup>10</sup>*

Analisando as superfícies da natureza, percebe-se que sua complexidade formal e geométrica extrapola a Geometria Euclidiana a qual se está acostumado, e que a sua representação por estes meios nem sempre é suficiente para a sua compreensão, pois sempre ficará faltando uma “certa” dimensão.

*“Uma fonte pouco provável, mas promissora de novas geometrias para estruturas é a geometria quadridimensional – a geometria de quatro dimensões espaciais (o tempo não é uma delas). Embora os estudantes de engenharia e arquitetura sejam continuamente comandados a manter os pés no chão – na terra sólida, com suas imutáveis dimensões de comprimento, altura e largura -, os matemáticos têm estudado por mais de cem anos o espaço delimitado por quatro (e não três) linhas mutuamente perpendiculares com intercessão em um ponto. Os objetos neste espaço não podem mais ser construídos na terra, da mesma forma que nem todas as dimensões de um cubo tri-dimensional podem ser expressas em uma folha de papel. O cubo pode, entretanto, ser desenhado de forma efetiva em uma folha de papel, como quando um cubo aberto projeta sua sombra sobre o tampo de uma mesa. Quando projetadas em um espaço tri-dimensional, as figuras geométricas de quatro dimensões aparecem como uma rica fonte de novas e fascinantes formas.”<sup>11</sup>*

---

<sup>10</sup> ROBBIN, 1996. p.81. (Tradução de Litany Pires Ribeiro)

<sup>11</sup> Ibidem. p.87. (Tradução de Litany Pires Ribeiro)

Percebe-se ainda que, por trás de toda estrutura da natureza, existe sempre uma lógica em busca do elemento padrão, mesmo quando essa lógica não se faz visível aos olhos ou escapa à capacidade de percepção.

No **capítulo 6**, através de vários exemplos práticos e vivenciais de fácil apreensão, demonstram-se as vantagens possibilitadas pela utilização dos tubos de seção circular, sejam elas relativas ao seu comportamento estrutural, ou aos seus aspectos utilitários, técnicos; e até mesmo os mais sutis, como os aspectos estéticos, são decorrentes de sua conformação geométrica.

Apresenta-se no **capítulo 7**, “Construções hiperbólicas”, - item 7.2 -, uma resenha com o levantamento em ordem cronológica atributiva ao início dos parabolóides na arquitetura até 1972. São mostrados, numa série de figuras, alguns exemplos de aplicações das superfícies de dupla curvatura.

Finalmente exemplifica-se, com uma pequena estrutura, uma superfície em parabolóide hiperbólico construída em perfis tubulares de seção circular que foi idealizada e executada durante este trabalho.

No **capítulo 8**, “Investigação Comportamental Comparativa”, é descrito um experimento de simulação em que, através de alguns parâmetros quantitativos, avaliou-se o comportamento estrutural de vários modelos construídos por tubos metálicos de seção circular. A partir das análises, podem-se comparar as diferenças comportamentais entre diversas proposições decorrentes de certas variações formais.

Finalmente o **capítulo 9** apresenta algumas proposições ou possibilidades de utilização de estruturas tubulares na conformação derivada do experimento simulado no capítulo anterior, bem como outros exemplos de articulação de módulos que poderão ser investigados em futuros trabalhos.



## 2 INDUSTRIALIZAÇÃO

### 2.1 Panorama geral da realidade construtiva brasileira

#### 2.1.1 Introdução

*“Do ponto de vista macroeconômico, o que impulsionou o uso mais intensivo dos sistemas industrializados no Brasil foi a internacionalização da economia. Nos últimos anos, com a chegada de empreendedores estrangeiros, habituados à utilização dos pré-fabricados e a obras rápidas, a demanda cresceu muito. Isso ocorreu notadamente no ramo hoteleiro, o de shoppings e hipermercados.”<sup>1</sup>*

Atualmente a realidade construtiva brasileira está passando por um processo de transformação significativa, seja pela:

- **inovação tecnológica** - substituição das técnicas da tradição construtiva pelas novas tecnologias industriais importadas já iniciadas em alguns setores construtivos ou nichos de mercado;
- **tradição** - busca e resgate de técnicas construtivas locais e do passado, almejando um menor impacto e otimização na utilização dos recursos humanos e naturais, (conseqüentemente energéticos);
- **tradição x inovação** - tentativa da incorporação de novas tecnologias concomitantemente com as usuais.

Esta última realidade é muito significativa no panorama construtivo brasileiro e pode ser interpretada como uma fase de transição para a assimilação e maturação dos novos procedimentos construtivos em que o tradicional gradativamente incorpora as novas técnicas e materiais ainda numa ótica conservadora. Não cabe aqui neste estudo identificar estes motivos, porém fatores, culturais, elevados custos dessas novas tecnologias que são importadas quase sempre sem adaptações à realidade brasileira e sobretudo deficiências de *know-how* são os principais fatores que vêm dificultando a sua implantação. Talvez o maior equívoco dessa mistura de tecnologia que geralmente acarreta patologias provenientes da

---

<sup>1</sup> MEDEIROS, *Téchne*, out. 2003. p.41

incompatibilidade destes sistemas reside numa fase anterior ao projeto, a saber: a ausência de uma postura conceitual e coerente de projeto e a falta de clareza dos princípios globais que geram e fomentam a necessidade específica de cada projeto. Essas reflexões devem ser efetivamente conduzidas pela equipe de trabalho, bem antes do primeiro traço. Dessa forma, os imprevistos e/ou transformações decorrentes do processo poderão ser analisados segundo critérios previamente definidos, sem “ferir” seus princípios originais.

### ***2.1.2 Tradição x inovação***

De um outro lado, porém, existem tentativas justamente na coexistência e casamento intencional na manipulação de procedimentos e tecnologia díspares: *high-tech* com o *low-tech*, simultaneamente. Esta tendência construtiva, entretanto, pode-se dizer que é praticamente nula no Brasil, mas pode ser encontrada em alguns exemplos pontuais de alguns países de Primeiro Mundo, onde domínio e maturidade tecnológica e a preocupação com o meio ambiente são preceitos já incorporados em sua cultura, como a Alemanha, por exemplo.

*"Países pobres ou em desenvolvimento ainda não têm uma noção clara do que seja construção sustentável. Nós também. Apesar disso, há poucos e bem informados profissionais na vanguarda de pesquisas para tornar nossas construções mais racionais, econômicas e, sobretudo, produzidas com materiais que possam ser reciclados ou que causem menos impacto ambiental. Presenciamos na última década a chegada de materiais ditos 'tecnológicos' voltados para a industrialização das obras como o gesso acartonado, estruturas em frames, vidros de última geração, revestimentos refratários e outros materiais, contudo continuamos, como se diz, perdulários em energia e água."*<sup>2</sup>

Pode-se dizer que essa característica de unir e justapor as técnicas ou tecnologias tradicionais de baixo impacto, juntamente com o que há de mais tecnológico, representa hoje uma tendência inovadora, a ser almejada como um exemplo para gerações futuras.

*"O que está sendo feito hoje no mundo no campo da construção sustentável? Esse assunto 'pegou' ou não passa de modismo tecnológico?"*

---

<sup>2</sup> SAYEGH, 2003. p.28.

*A melhor maneira de responder isso é dar exemplos. No Japão, há um prédio de uma empresa de telefonia que utiliza água da chuva na descarga dos banheiros e todo o material orgânico é digerido por bactérias. O gás metano resultado dessa digestão é utilizado para derreter latinhas de alumínio. Existe um hotel em Taurus, perto do Novo México, EUA, totalmente autônomo. As paredes da edificação são feitas de pneus, uma parte da energia é captada em baterias fotovoltaicas, o jardim interno é adubado biologicamente com os dejetos orgânicos tratados. O lixo produzido na edificação não deve sair da edificação, ou seja, eficiência total. Em Nova Iorque há um poço de 400 m de profundidade de onde é retirada água 10 °C mais fria para resfriar o prédio, o que garante uma economia de 50% de energia. As melhorias para o meio ambiente e conforto das habitações podem ser fantásticas. A situação dos Estados Unidos, no entanto, é contraditória e resume um pouco como as pessoas encaram o assunto. Enquanto se desenvolvem as melhores pesquisas, o mercado consumidor desperdiça recursos naturais como nenhum outro”.<sup>3</sup>*

Apesar dessas diversidades de posturas apontadas, existe um ponto em comum entre todas elas. Atualmente todos buscam a racionalização dos seus métodos e procedimentos construtivos (ver item 2.2 – Racionalização, neste capítulo). E o principal veículo responsável pela disseminação deste conceito foi, sem dúvida nenhuma, a industrialização.

### **2.1.3 Precauções para nossa realidade**

A industrialização da construção civil é, no Brasil um fenômeno recente que começou extremamente defasado quando comparado com outros países, como EUA, Japão, e vários outros da Europa. Tem-se, por exemplo, o edifício *Empire State* nos Estados Unidos que foi construído de 1929 á 1931<sup>4</sup>.

O Brasil tem como tradição e cultura construtiva o artesanal. O setor da construção civil já vem exercendo um papel há anos de absorvedor da grande massa de mão-de-obra não especializada, analfabeta ou semi-analfabeta. Isso só é possível pelas características de nossos procedimentos artesanais de construção que permitem um aprendizado rápido de pessoas sem a menor qualificação.

---

<sup>3</sup> SAYEGH, 2003. p.29.

<sup>4</sup> BUILDINGS, 1994. p.52.

Esses dados nos fazem pensar em como se deve mudar este panorama construtivo, uma vez que a construção civil ainda exerce um papel de promover um certo equilíbrio social e econômico em nossa sociedade.

Quando se pensa na evolução da tecnologia construtiva da arquitetura brasileira, um fator importante a ser considerado seria o impacto sócio-econômico e os problemas que podem ser causados decorrentes dessas transformações tecnológicas. Por exemplo, o maior percentual da mão-de-obra não especializada trabalha na construção civil. O fato mais importante a ser considerado reside em como será feita a capacitação desta mão-de-obra, em que velocidade, e como essas rápidas transformações nos procedimentos construtivos devem ser implantadas, a fim de minimizar estes impactos.

Numa visão mais ampla, tem-se que, tecnologia se refere a todo um conhecimento adquirido e a habilidade de uma sociedade em manipular técnicas apreendidas e incorporadas. Se tem hoje uma defasagem entre a técnica (geralmente importada e restrita a poucos) e conhecimento (adquirido, vivenciado e amadurecido pela sociedade). Sem a visão crítica de todo o processo, a mão-de-obra brasileira como um todo (pedreiros, técnicos, arquitetos, engenheiros, etc) tenderá a ficar cada vez mais excluída deste processo, ou se tornará meramente repetidora de procedimentos preestabelecidos. Neste caso, o analfabetismo representa um dos maiores fatores responsáveis pela exclusão social, usurpador do direito à cidadania, que deve ser prioritariamente combatido. Alguns países investem pesado no potencial humano de sua sociedade, não apenas com uma visão paternalista exclusivamente do governo, mas também empresarial e humanística. Face às necessidades de mudanças e atualizações, várias empresas, ao invés de substituírem seu quadro de funcionários por outros mais qualificados, assumem também parte da responsabilidade social na capacitação e remanejamento de sua mão-de-obra.

A tecnologia de um povo só faz sentido se seus benefícios puderem ser revertidos para este povo da forma mais abrangente possível.

## 2.2 Racionalização

### 2.2.1 Um dado histórico

Um grande exemplo das vantagens da racionalização nos processos construtivos, que refletiu diretamente na transformação do processo construtivo mundial a caminho da industrialização, aconteceu há mais de três séculos, e teve origem no Japão.

A predominância da madeira como elemento construtivo nas habitações japonesas antigas (e também largamente utilizada nos dias de hoje) propiciava inúmeros incêndios em toda a extensão do país, por vários motivos: estreita aproximação entre as edificações, frequência de terremotos, existência no interior das casas de um sistema de aquecimento à base de carvão e fogo, etc. Devido a um incêndio de grandes proporções em Tóquio, adotou-se em 1657 para todo o Japão um sistema de medida que padronizou e regulamentou todas as dimensões construtivas, incluindo portas e janelas, distância entre pilares, etc. Este novo sistema se derivou do existente método *kiwari-ho* (normatização para proporcionalidade da madeira) que estabeleceu como unidade de medida fundamental o *ken* (seis pés japoneses), ou seja 1.818 mm, e que corresponde ao comprimento de um tatame tipo *inakama* (1.818 x 909 mm). Esta medida de racionalização do sistema construtivo, através da modulação, simplificou e barateou consideravelmente todas as construções no Japão, revolucionando o sistema e despertando a atenção de todo o mundo (FIG. 2.1).



FIGURA 2.1 – A racionalização do sistema construtivo japonês através da padronização de todas as dimensões, despertou a atenção de todo o mundo, pela afinidade com o conceito da industrialização  
FONTE - Arquivo pessoal. Fotos tiradas no Fukagawa Edo Museum. Tóquio, Japão.

### ***2.2.2 Por que a industrialização? Isso realmente é importante para nós?***

Será que se deve almejar industrialização exclusivamente para ficar moderno, para poder se comparar aos países de Primeiro Mundo? Existem vantagens reais na industrialização? Isto realmente é importante?

A industrialização planejada e não especulativa, indiscutivelmente, agrega vantagens reais, pois a racionalização dos procedimentos pode representar uma otimização do uso dos recursos naturais, e uma acessibilidade de produtos a um número maior de pessoas, pois a industrialização permite a redução de custos dos produtos e do tempo de construção, além de ser possível também um controle de qualidade superior, já que este pode ser realizado na fábrica.

*“A construção de habitações populares na Europa até a década de 50, no pós-guerra, era muito ruim. O esquema de fundações, pilares de concreto e tijolinhos cerâmicos não atendiam às mínimas condições de conforto. Então alguns centros de pesquisa começaram a trabalhar em projetos de casas como se fossem carros. A construção virou tecnologia e nasceram as noções de desempenho. Tudo é testado. Dessa maneira se cria espaço para inovações tecnológicas e não se engessa a construção.”<sup>5</sup>*

Pode-se perceber que pelo menos o conceito da industrialização traz intrínseca a possibilidade real de uma melhoria significativa na edificação brasileira, seja ela na sua qualidade final ou na sua capacidade de um alcance social maior.

Faz-se necessária uma intenção política de melhoria para as nossas construções e principalmente um plano de preparação e recolocação desta massa significativa de mão-de-obra não especializada, para que se possa garantir uma certa estabilidade social, principalmente nesta fase de transição. Deixar essa iniciativa de responsabilidade social para o setor privado não surtirá nenhum efeito significativo, já que são raras as empresas que investem no conteúdo humano quanto à capacitação e qualificação de sua mão-de-obra, pois tal postura não representa uma cultura de nossas empresas privadas, ao contrário do que aconteceu no processo de industrialização do Japão, por exemplo.

---

<sup>5</sup> SAYEGH, 2003. p.31.

Um extraordinário exemplo brasileiro que comprova a eficácia da industrialização na construção civil, com função social, apontando soluções que poderiam ser seguidas em outros setores, está na iniciativa do CTRS (Centro de Tecnologia da Rede Sarah Kubitschek), cuja auto-suficiência para o desenvolvimento de suas pesquisas, projetos, produção e montagem possibilita a execução de obras de altíssimo nível, para toda a sociedade, não somente em qualidade técnica, mas antes de tudo em qualidade arquitetônica.

### **2.2.3 Qualidade construtiva x qualidade arquitetônica**

*“... A qualidade arquitetônica está ligada aos padrões individuais de conforto e estética, e à manipulação e uso dos materiais, não sendo mensurável por processos precisos de avaliação. Quantificar qualidade arquitetônica é praticamente impossível, visto ser resultante de fatores subjetivos. Como afirma HANS HOLLEIN:*

*‘ A arquitetura é simultaneamente memória, símbolo, forma e expressão. Arquitetura é um meio de equilíbrio da temperatura do corpo, uma espécie de membrana protetora. A arquitetura é determinação e organização do espaço, do ambiente. Arquitetura é um elemento condicionador de estados psicológicos. ’*

*SULLIVAN disse: ‘ O arquiteto é um poeta que usa materiais em vez de palavras ’. Wright acreditava que ‘ os materiais eram presentes na natureza para serem explorados pela sensibilidade humana, que por ventura era também um presente da natureza. ’*

*Qualidade construtiva, por outro lado, é resultante do processo de execução, podendo ser avaliada e quantificada numericamente.*

*‘ A qualidade da obra construída exige a presença de dois componentes da arquitetura: seus elementos específicos, (espaço, estrutura, forma, luz) que asseguram à obra a presença e fatores externos (políticos, econômicos, sociais, funcionais, contextuais) que fornecem pertinência, critérios indispensáveis para a apropriação coletiva do edifício ’ (HENRY CIRIANI).*

*A industrialização permite obras muitas vezes com qualidade construtiva adequada, mas nem sempre de qualidade arquitetônica significativa. O grande desafio para os arquitetos é conseguir conciliar o sistema subjetivo e*

*individual da qualidade arquitetônica com a precisão construtiva rigorosa, normatizada dos processos industriais.”*<sup>6</sup>

*“ ‘ O conselho mais comum para a construção de um projeto em aço é que é sempre melhor trabalhar em fábrica do que no campo. Do ponto de vista de um fabricante, a primeira ordem para um negócio é que qualquer tipo de design mantenha sua proposta de montagem mais simples possível. Trabalhar no campo, em posições difíceis ou sob tempo ruim, pode levar à necessidade de refazer o trabalho ou, pior ainda, à baixa qualidade ou insegurança. Se você puder executar na fábrica, faça-o. Normalmente os custos são menores, a segurança é maior e os imprevistos são enormemente minimizados’ . (ZIMMERMAN,1995:30).”*<sup>7</sup>

*“Essa diferença faz com que a obra industrializada tenha alta qualidade construtiva final, pois o controle tecnológico da edificação é desenvolvido em fábrica, permitindo precisão milimétrica, pequena margem de erro, grande margem de acertos, com redução significativa de perdas”.*<sup>8</sup>

***“Parece contraditório, mas são feitos muitos ensaios no campo da habitação popular e não no desenvolvimento de grandes obras. Essas pesquisas, de certa forma, melhoram o desempenho das habitações populares?”***

*Arquitetura e engenharia nunca foram prioridade. O governo brasileiro considera bom nosso nível de construção. É verdade, o máximo que fazem é investir em habitação popular. Aqui no Brasil tudo acontece de cabeça para baixo. Os prédios caríssimos, as casas enormes, as mansões não têm normas, mas casa para pobre, sim. A CEF criou um manual, junto com o IPT, para casas populares. Para mim, é um contra-senso. Não devemos standardizar um tipo de construção "para pobres". Construção é desempenho e o foco é o bem-estar do homem. Colocar gente em Cingapur não pode ser um ideal, uma meta.”*<sup>9</sup>

---

<sup>6</sup> SANTOS, 1996. p.192-193.

<sup>7</sup> Ibidem. p. 213.

<sup>8</sup> Ibidem. p. 196.

<sup>9</sup> SAYEGH, 2003. p.30-31.



## 3 COORDENAÇÃO MODULAR

### 3.1 O conceito

*“O termo módulo vem do latim ‘modulus’ (pequena medida) e tem sido sempre usado em edificações desde o tempo de Vitruvius (primeiro século AC). O módulo corresponde basicamente a uma unidade de medida em edificações da qual todas as dimensões são derivadas.*

*No templo clássico greco-romano, o módulo era o diâmetro da coluna, e nos templos chineses ele era a extensão da tesoura. Na arquitetura clássica o módulo não era uma medida absoluta, pois variava de acordo com o tamanho de cada edificação. O módulo ou a modulação pretendia controlar a proporção estética visual e não era subordinado a nenhum outro material ou instrumento humano de medição.*

*A industrialização contemporânea das edificações tem novamente se prontificado a buscar uma medida simplificadora que possa ao mesmo tempo ser uma unidade conveniente para a arquitetura, o design, bem como uma unidade prática para a produção industrial. Devido a essa analogia com a ‘ordem’ clássica, a essa medida chamamos de ‘módulo’; a compreensão da coordenação de todas as atividades em uma edificação e de seus componentes em conformidade com essa unidade de medida chamamos de Coordenação Modular. Isso difere do módulo passado pelo fato de não ser uma função estética, mas sim uma medida prática e funcional que está longe de ser uma medida relativa ao tamanho de cada edificação, mas, sim, de uma medida absoluta.”<sup>1</sup>*

Somente uma sistematização racionalizada baseada neste novo conceito de módulo, ou a busca de princípios padronizados de articulação e combinação de módulos, tem força suficiente para atingir a produção em larga escala, agregando as inúmeras vantagens preconizadas pela industrialização. Como apresentado anteriormente, a reconstrução total da cidade de Tóquio após o incêndio e a revolução construtiva que o país experimentou após 1657 só foram possíveis com a adoção do módulo KEN, ou seja, com o princípio da Coordenação Modular.

---

<sup>1</sup> ENGEL, 1991. p. 54. (Tradução de Maria Beatriz Andrade Ramos)

*“Este novo significado contemporâneo para o módulo, no entanto, teve uma relevante origem no Japão, onde, nestes últimos 200 ou 300 anos, as habitações de toda a nação foram construídas com base na coordenação modular, representando um exemplo único na história mundial da arquitetura. Sem dúvida nenhuma o módulo do KEN é um extraordinário fenômeno na arquitetura sem nenhuma equivalência em qualquer lugar do mundo, e apesar de toda sua complexidade, mas com clareza, não se pode contestar que ele é único dentre todas as medidas da arquitetura, modulação, padronizações do passado e do presente.”*<sup>2</sup>

*“...Tudo que arquitetura contemporânea tem perseguido até os dias de hoje sem muito sucesso, emerge da lógica japonesa: uma unidade universalmente aplicável na vida das pessoas, bem como em suas edificações, uma distância padronizada para construção e economia, um módulo para coordenação estética, no sistema de medida decimal derivada da subdivisão do número 6, e um comprimento relacionado com as proporções humanas, como também um elo entre cidade e o planejamento doméstico...”*<sup>3</sup>

Essa “arte” de compor módulos denomina-se **Coordenação Modular**, e esta se faz imprescindível para qualquer projeto que envolva uma produção industrial.

## **3.2 A malha**

Analisando atentamente a construção japonesa que despertou a atenção do mundo pela revolução construtiva gerada, pode-se entender a existência de um “elemento” de fundamental importância que sistematiza toda essa organização de arranjo modular : a malha. (FIG.3.1).

---

<sup>2</sup> ENGEL, 1991. p.54. (Tradução de Maria Beatriz Andrade Ramos)

<sup>3</sup> Ibidem. p. 54-55.

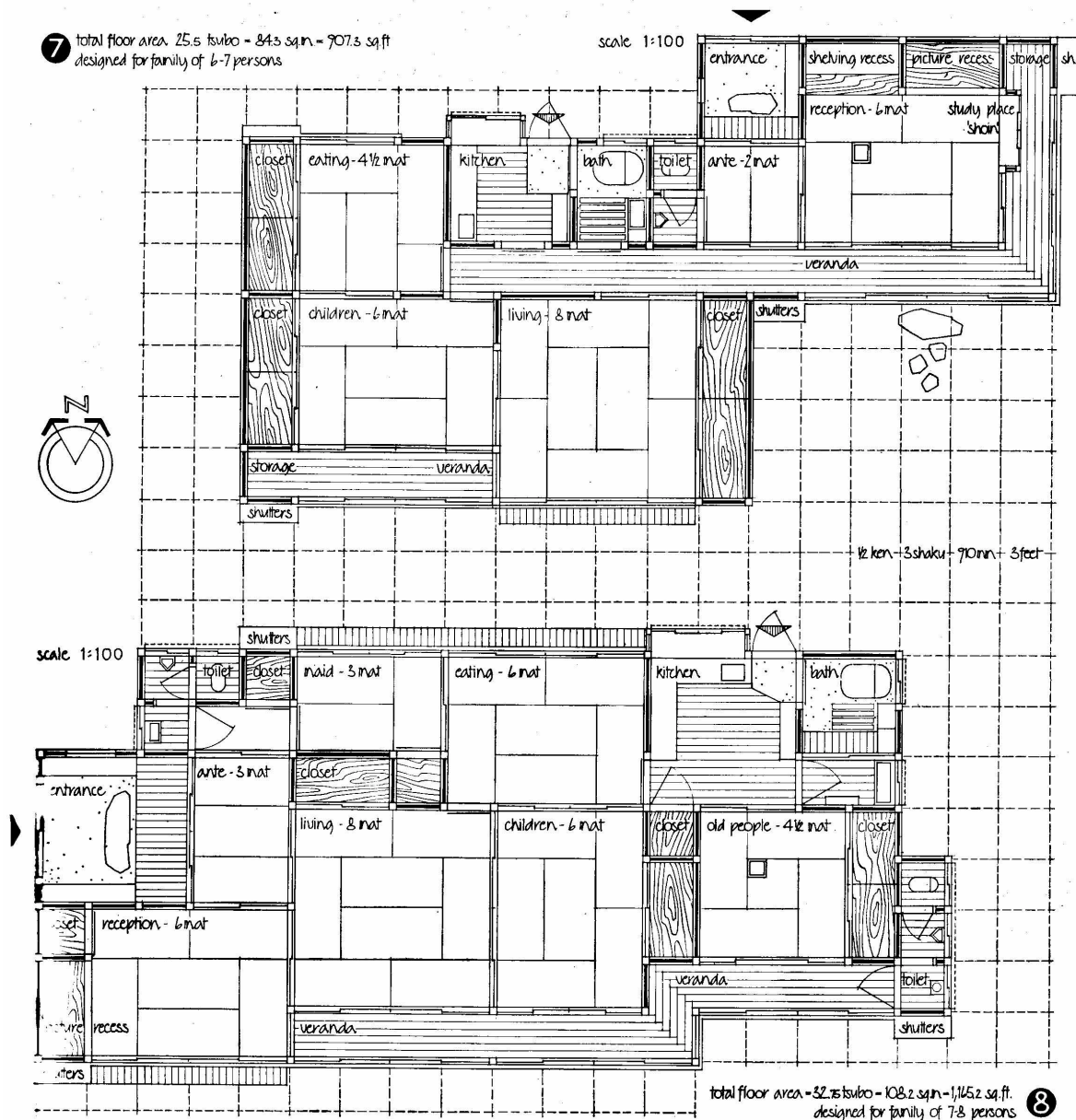


FIGURA 3.1 - Exemplo típico de residência japonesa estruturada pela malha  
 FONTE - ENGEL, 1991.p.89.

No exemplo da casa japonesa, a malha estruturadora baseia-se em um sistema reticulado de quadrados de arestas correspondentes a 1/2 KEN, cuja combinação de módulos retangulares de 1x1/2 KEN (tamanho padrão do tatame japonês) define toda a organização espacial da casa japonesa. Módulo e malha estão intimamente ligados, uma vez que o módulo define praticamente toda malha, permitindo o máximo de composições possíveis entre eles.

As vantagens de trabalhar com malhas é mais evidente quando se analisa o exemplo a seguir:

Todo o complexo da sede do Governo de Tóquio ocupa uma área total de 27.500 m<sup>2</sup> no bairro de Shinjuku, Tóquio, Japão, e possui 381.000 m<sup>2</sup> de área construída em um lote de 42.940 m<sup>2</sup>. Este grande projeto foi idealizado pelo escritório do Kenzo Tange, e sua obra teve início em abril de 1988 com término em março de 1991, ou seja, 2 anos e 11 meses. Refletindo sobre esses dados, é de se espantar que, em apenas dois anos e onze meses, edificaram-se 381.000 m<sup>2</sup> o que corresponderia a uma média aproximada de 352 m<sup>2</sup> construídos por dia ininterruptamente. Como coordenar tamanha complexidade para obter o máximo de eficiência? (FIG. 3.2 e FIG. 3.3).

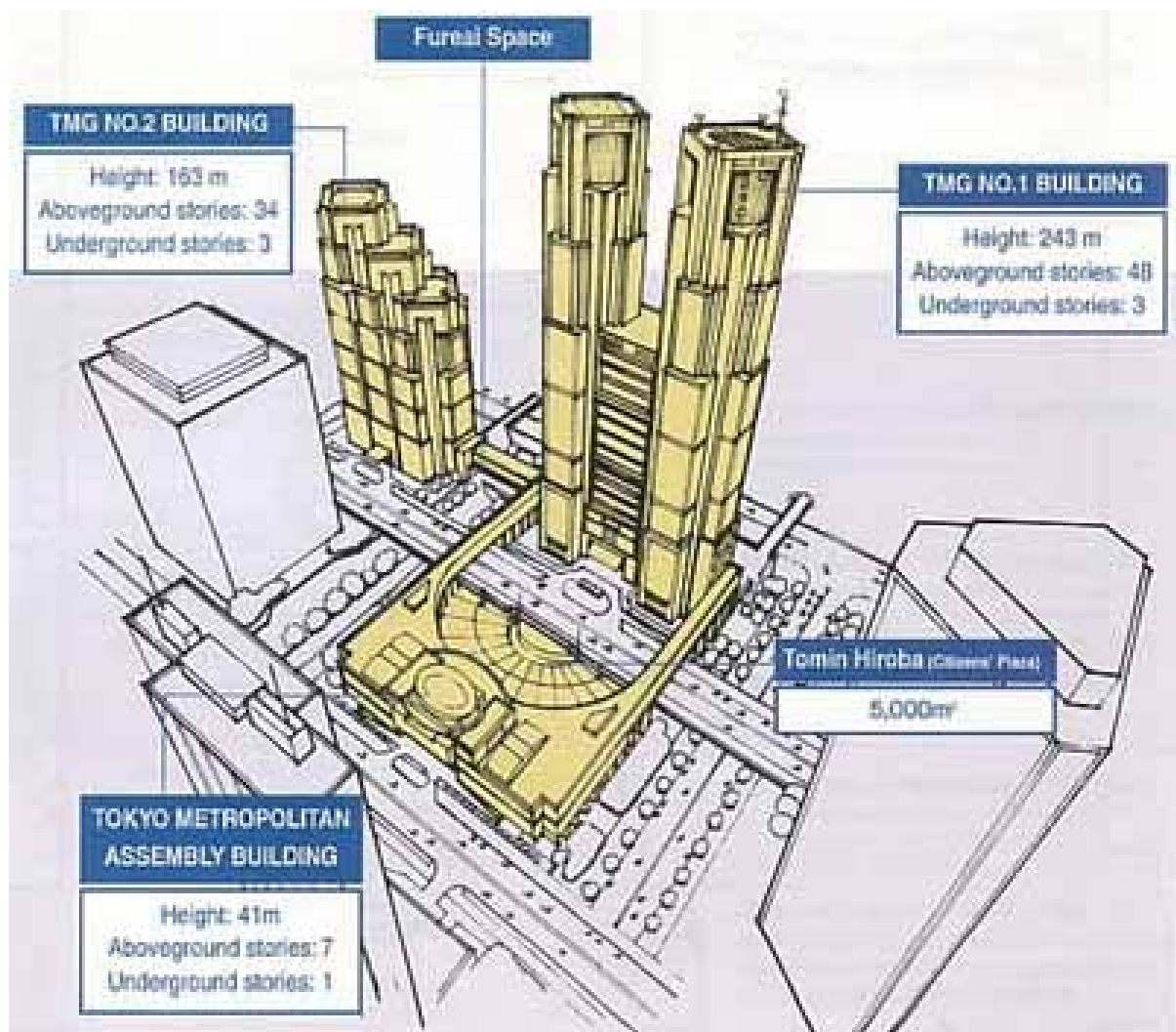


FIGURA 3.2 – Visão geral do complexo da Sede do Governo de Tóquio, Japão  
FONTE - TOKYO METROPOLITAN GOVERNMENT, 1994. p.1



FIGURA 3.3 – Vista parcial aérea da edificação TMG Nº 1 Building do complexo da Sede do Governo de Tóquio, Japão  
FONTE - NIKKEI, 1991.p.6.

Uma vez definida a predominância da tipologia de uso e a população da edificação (como exemplo o TMG nº 1, edificação mais verticalizada do complexo FIG. 3.3.), estabeleceu-se um módulo funcional básico que comporta um *layout* típico de estações de trabalho para a população prevista (FIG. 3.4) medindo 3.200 x 3.200 mm. Esta “célula mãe” por sua vez definiu a malha total desta edificação bem como a do TMG nº 2 (FIG. 3.2) como mostra a FIG. 3.5 (a malha localizada na parte inferior da figura corresponde ao TMG nº 2, e as superiores correspondem ao TMG nº 1).

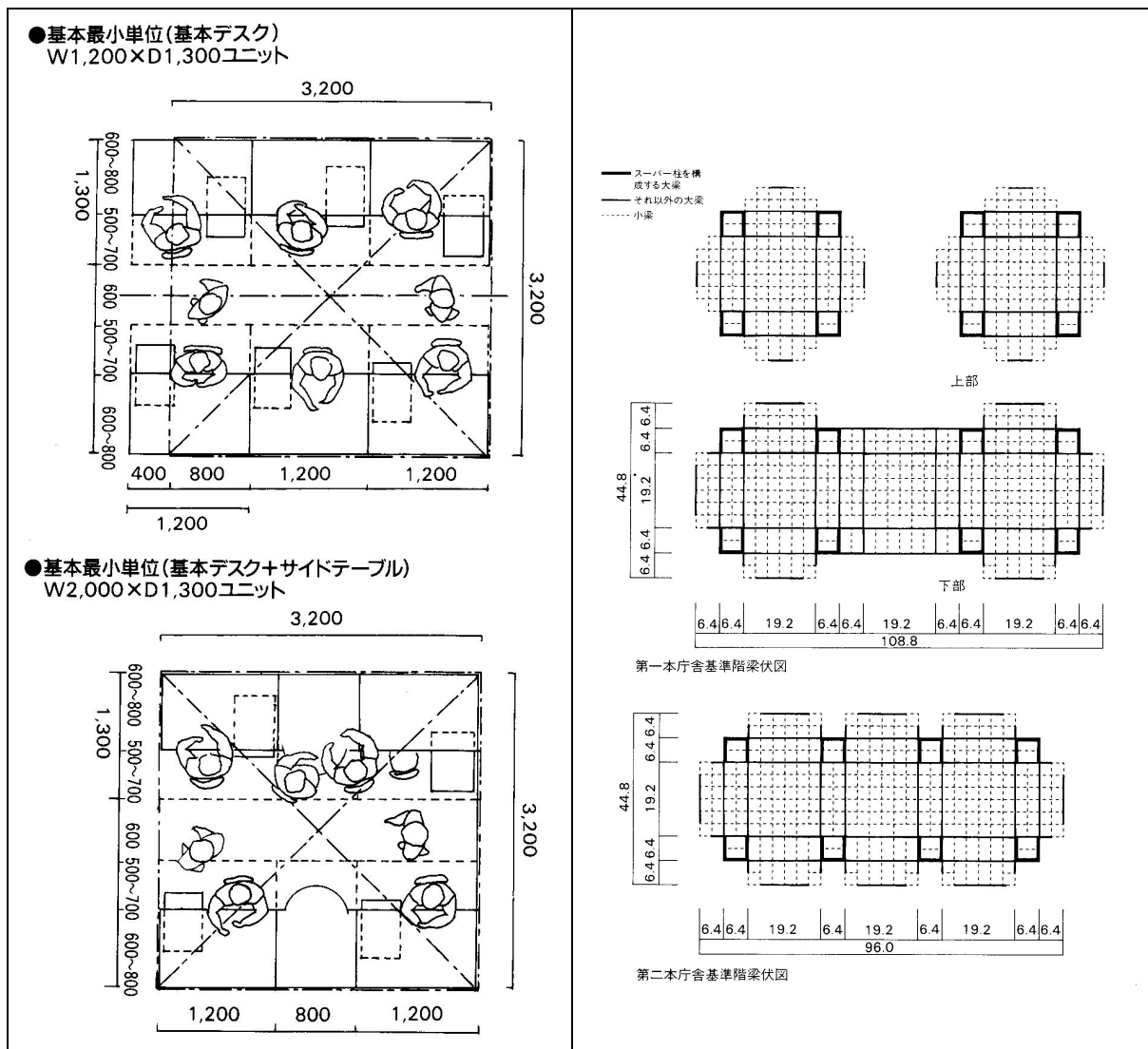


FIGURA 3.4 – “Célula mãe” do layout típico  
FONTE - NIKKEI, 1991.p.68.

FIGURA 3.5 – Definição da malha estruturadora  
FONTE - NIKKEI, 1991. p.81.

A definição da malha é de suma importância, pois ela serve como elo de intercâmbio facilitador entre a coordenação funcional, volumétrica e, principalmente, estrutural da edificação. É sobre ela que são lançadas as concepções estruturais, que automaticamente estarão guardando relações de proporcionalidade entre si. Definido o partido da edificação, faz-se o zoneamento do uso interno seguindo as metragens requeridas, e por fim detalha-se a planta dos pavimentos recuperando o princípio da “célula mãe”, ou tipologia funcional que definiu toda a malha (FIG. 3.6 e 3.7).



FIGURA 3.6 – Zoneamento interno e planta  
 FONTE - NIKKEI, 1991.p.69.

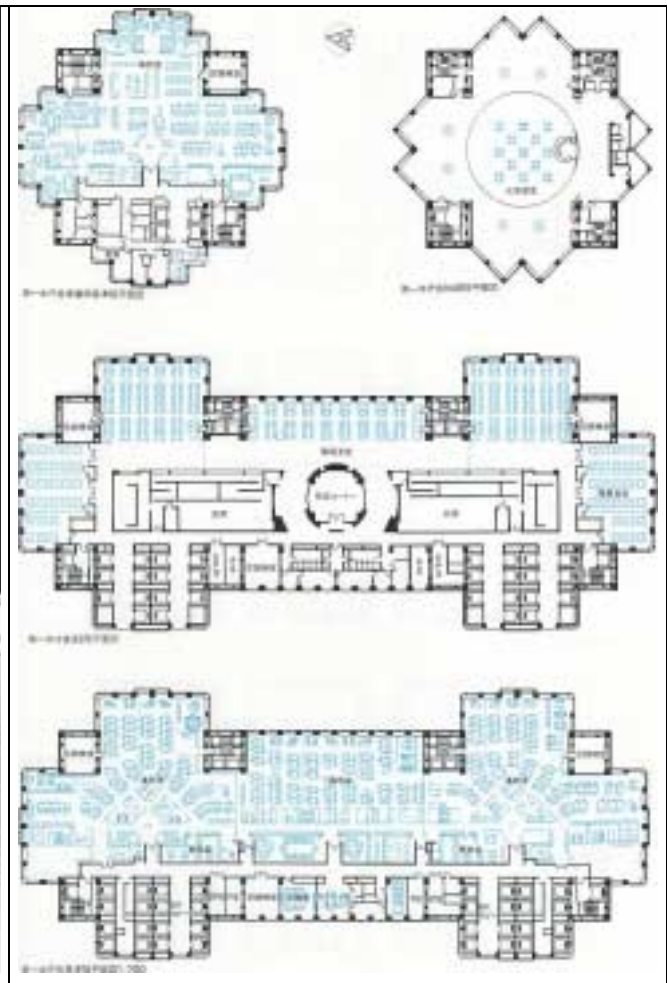


FIGURA 3.7 – Planta dos pavimentos tipos  
 FONTE - NIKKEI, 1991.p.115.

Este raciocínio definido em planta também é aplicado na vertical, para definição da modulação dos painéis de fechamento em uma nova malha, que segue novos princípios determinados pelas alturas de piso a piso da edificação. Sempre há uma busca por elementos padronizados que, segundo combinações entre si, vão “tecendo a linguagem” das fachadas obedecendo às exigências e limitações de projeto (FIG. 3.8 - 3.10). A malha desempenha um papel fundamental de disciplinador ou catalisador da grande parte das variáveis e condicionantes tanto de pequenos quanto de grandes projetos.

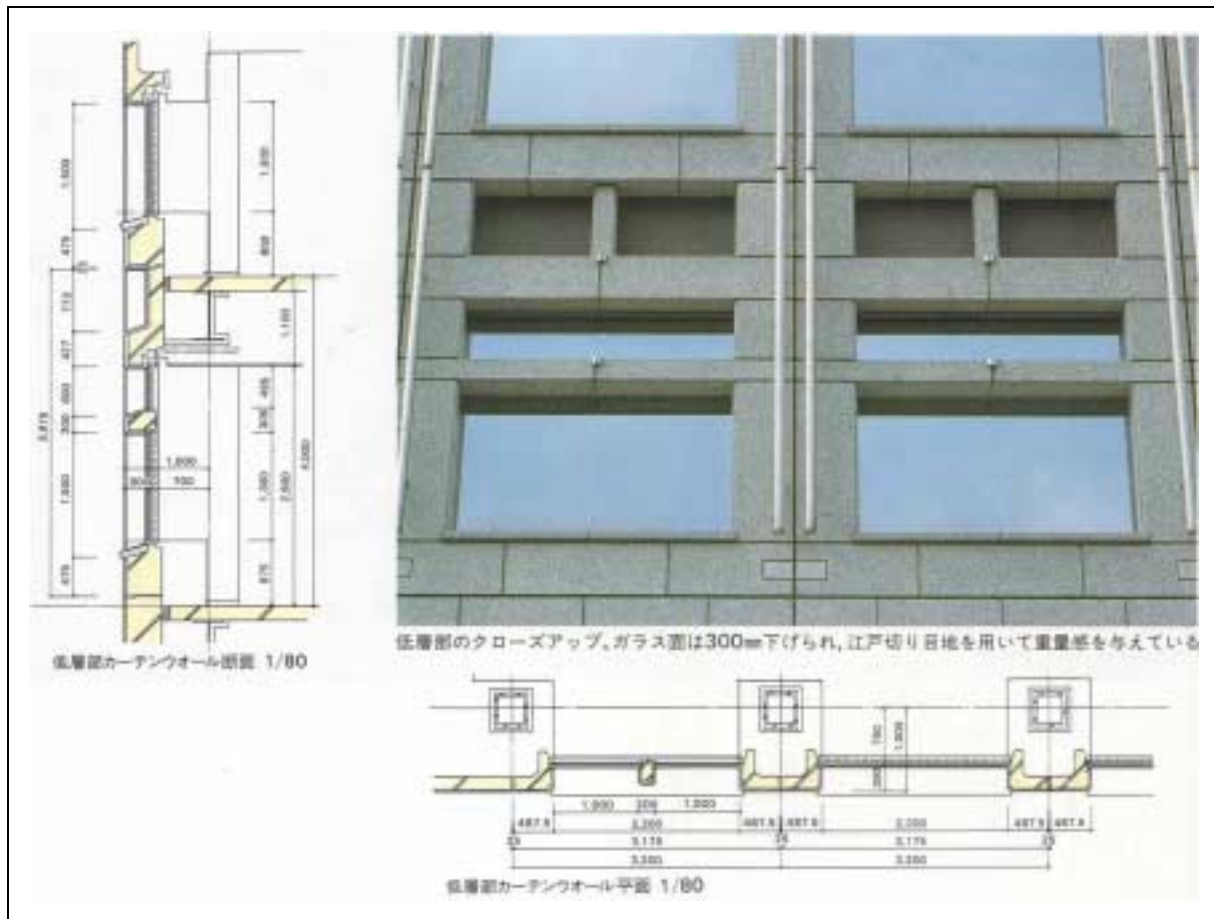


FIGURA 3.8 – Modulação dos painéis de fechamento.  
 FONTE - NIKKEI, 1991.p.128.



FIGURA 3.9 – Etapas construtivas / Painéis de fechamento  
 FONTE - NIKKEI, 1991.p.103,106.












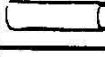
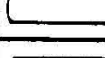
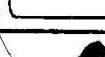











FIGURA 3.10 – Vista parcial térrea da edificação TMG N° 1 Building do complexo da Sede do Governo de Tóquio, Japão  
FONTE - NIKKEI, 1991.p.9.

O trabalho com malhas, ao contrário do que se possa pensar, não “banaliza” os projetos arquitetônicos, gerando volumetrias monótonas e repetitivas. A malha não “engessa” a criatividade dos projetistas, muito pelo contrário, ela permite infindáveis combinações e arranjos agregando ainda ao trabalho uma operacionalidade que possibilita fácil manipulação e controle das variáveis de projeto (cálculo de áreas, quantitativos de elementos, etc.).

Para desmistificar e demonstrar que o trabalho de Coordenação Modular sobre malhas não representa uma sistemática complicada de projetos e limitadora da criatividade humana, é ilustrado a seguir um trabalho realizado com alunos com formação em técnica de edificações. Este trabalho foi realizado em 1997 no curso de suplementação em pré-moldados realizado pelo CEFET-MG, módulo III, na disciplina “A arquitetura dos pré-moldados”, e teve como tema: “A concepção da arquitetura no processo industrial”.

Inicialmente, foi solicitado aos estudantes que se organizassem em grupo. Cada equipe recebeu uma folha A-4 de papel milimetrado, juntamente com uma planilha, como mostra a FIG. 3.11. Cada planilha era composta por cinco colunas, sendo que a primeira delas continha desenhos de tubos estruturais de vários tamanhos, algumas tipologias de conexões e painéis de fechamento. A segunda coluna apresentava a nomenclatura e as dimensões dos objetos apresentados na primeira coluna. A terceira coluna codificava todos os itens apresentados, e finalmente a quarta listava os quantitativos disponíveis de cada elemento. A quinta coluna era destinada ao preenchimento pelos grupos formados, relativo ao quantitativo das peças utilizadas. Pediu-se a cada grupo que apresentasse uma proposta volumétrica (tridimensional) qualquer, utilizando-se dos elementos listados na planilha. Ficaria a cargo de cada equipe a liberdade total ao quantitativo de utilização das peças, desde que respeitasse as quantidades totais disponíveis. Cada equipe deveria apresentar sua proposta com desenhos produzidos a mão livre sobre o papel milimetrado, utilizando-se do quadriculado como elemento de medição e modulação das propostas. Os papéis milimetrados deveriam conter todas as informações que se julgasse necessárias para a compreensão global do objeto representado a mão livre sob forma de desenhos projetivos de plantas, cortes e fachadas. Esses desenhos por sua vez deveriam conter a representação e a codificação de cada elemento utilizado da planilha. (FIG. 3.12).

Símbolo Symbol	Artigo Article	Nº Nr.	DISPONÍ- VEL	USADAS	
	Conexão 6 pontas 6 way connector	C1	0		
	Conexão 5 pontas 5 way connector	C2	19		
	Conexão 4 pontas 4 way connector	C3	22	2	
	Conexão Cantoneira box corner	C4	30	30	
	Conexão Cruzeta cross	C5	6		
	Conexão "T" "T" connector	C6	22		
	Conexão Cotovelo elbow	C7	24		
	Conexão 2 pontas 2 way connector	C8	4	4	
	Conexão 45° diagonal	C9	6		
	Tubo tube 3cm	T1	50	16	
	Tubo tube 7 "	T2	98	20	171
	Tubo tube 15 "	T3	35	12	
	Tubo tube 25 "	T4	8		
	Mancal pequeno hole coupling		4		
	Roda F(loating) wheel		8		
	Banda de rodagem tread		8		
	Calota hub cap		8		
	Trava da Roda steering lock				
	Mancal grande steering joint		8		
	Painel panel 8x8	P1	16		
	Painel panel schwarz/black 16x16	P2	6		

Lucas Samuel  
Renato Romualdo  
Tatiana Tironi

Total

FIGURA 3.11 – Planilha de quantitativos de elementos tubulares e conexões  
FONTE - Arquivo pessoal.

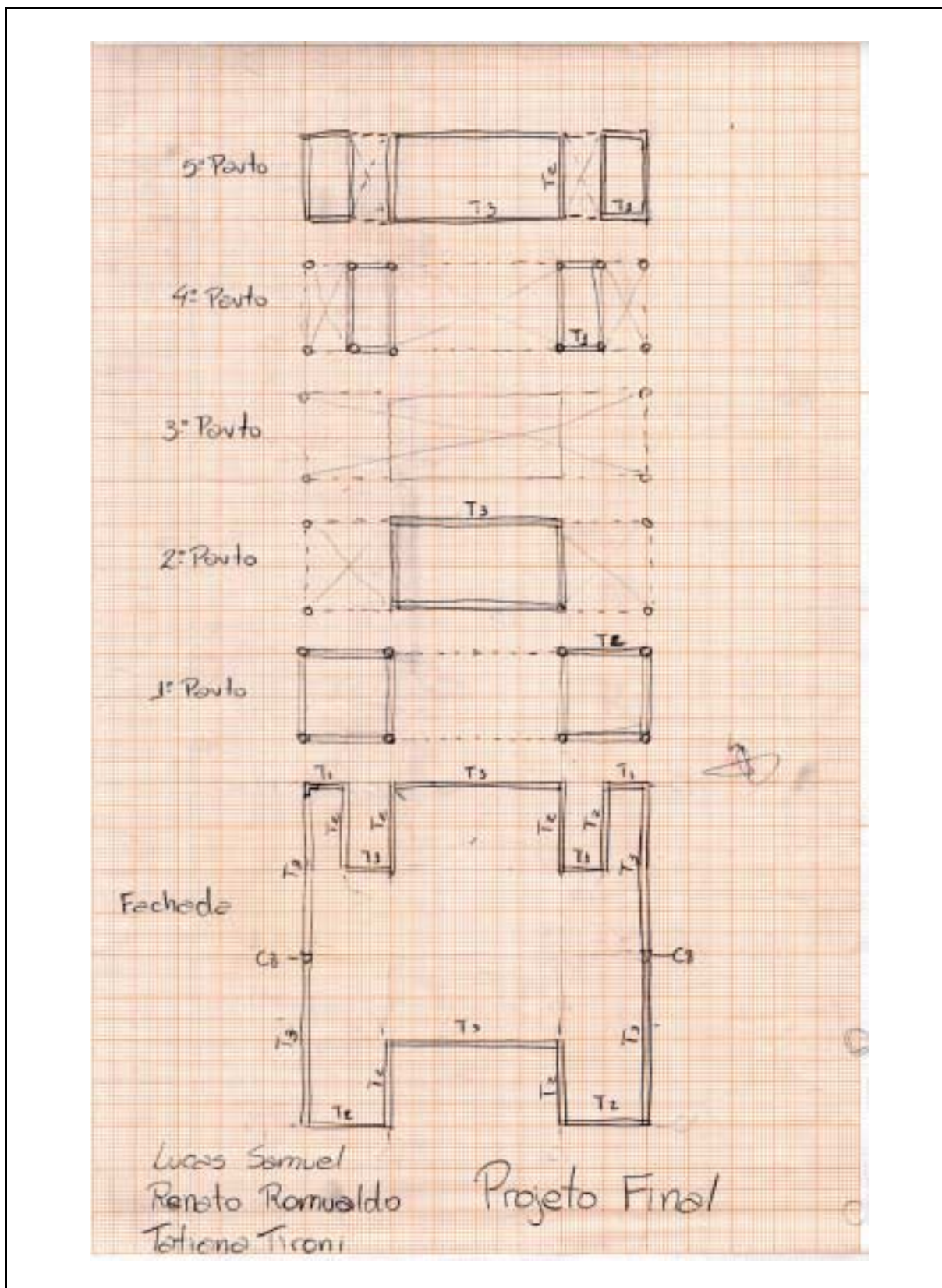


FIGURA 3.12 – Projeto de forma elaborado por uma equipe de alunos  
 FONTE - Arquivo pessoal.

Cada grupo deveria apresentar também um croqui volumétrico da proposta (FIG. 3.13), e finalmente lançar na quinta coluna da planilha o quantitativo de cada peça utilizada (FIG.3.12).

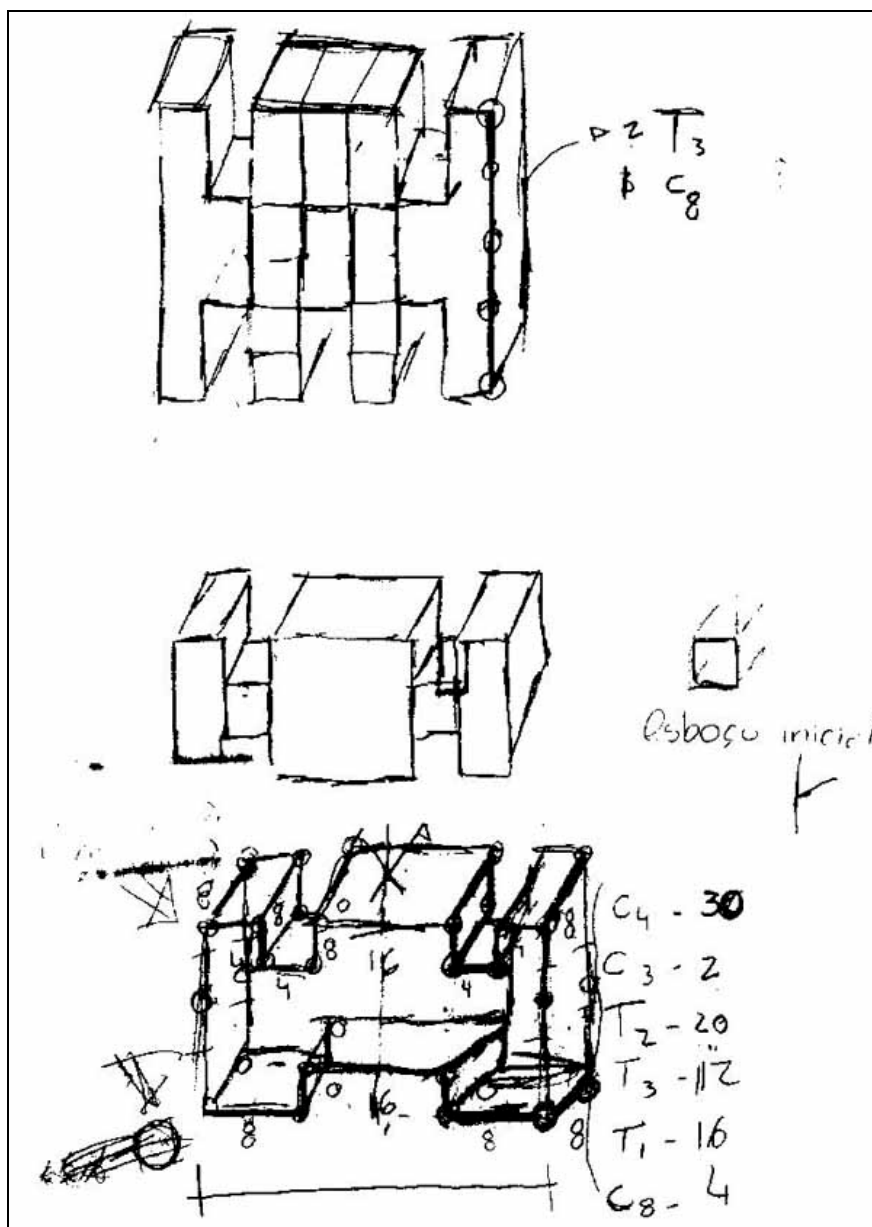


FIGURA 3.13 – Croqui volumétrico da proposta de forma dos alunos  
 FONTE - Arquivo pessoal.

Essa atividade foi realizada em sala de aula em apenas 4 horas/aula, tamanha a facilidade com que o quadriculado do papel milimetrado permitiu projetar com traços a mão livre e sem a utilização do escalímetro.

O que os alunos não sabiam é que os objetos da planilha recebida de fato existiam sob a forma de um *kit* plástico e poderiam ser facilmente manipulados.(FIG.3.14).

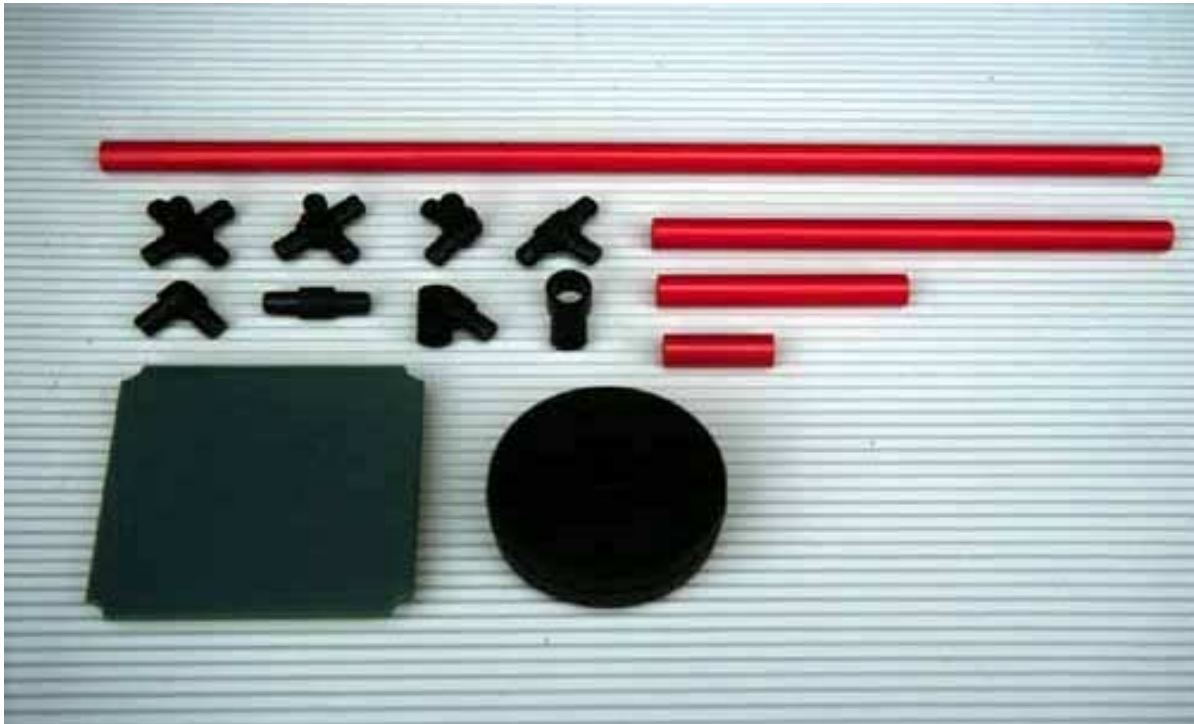


FIGURA 3.14 – *Kit* plástico (Mini Quadro 350) dos elementos da planilha da FIG. 3.11  
FONTE - Arquivo pessoal.

Esse *kit* foi apresentado à turma na aula seguinte para a finalização da segunda etapa prática deste trabalho:

Com o intuito de criar uma forma didática para simulação das implicações práticas decorrentes do processo de industrialização, foi sugerido às equipes trocarem entre si seus projetos, como se cada uma tivesse “encomendado” o projeto à outra.

Cada equipe agora desempenharia o papel de uma construtora, que seria responsável pela montagem dos objetos reais projetados, utilizando-se do *kit* e seguindo apenas as informações e representações gráficas recebidas.

Antes de se iniciar a montagem, um outro grupo ficaria de posse de todos os componentes plásticos, os quais deveriam ser “vendidos” ao grupo responsável pela montagem. Este por sua vez, preliminarmente, de posse de sua planilha de quantitativos, deveria “comprar” as peças necessárias para iniciar a execução de sua obra.

Os resultados finais dos objetos criados e montados pelas equipes podem ser vistos nas FIG. 3.15, 3.16, e 3.17.

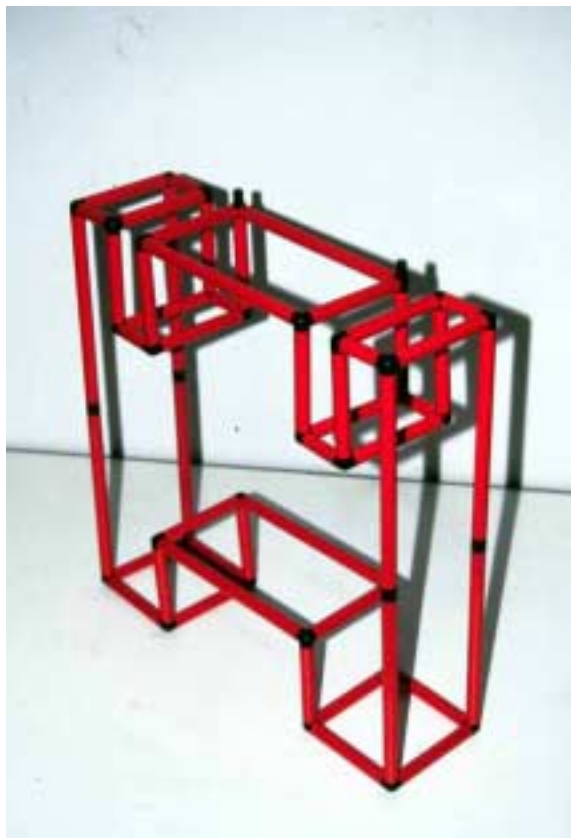


FIGURA 3.15 – Objeto criado pela equipe de alunos (projeto das FIG. 3.12 - 3.13)  
FONTE - Arquivo pessoal.



FIGURA 3.16 – Objeto criado pela equipe de alunos  
FONTE - Arquivo pessoal.

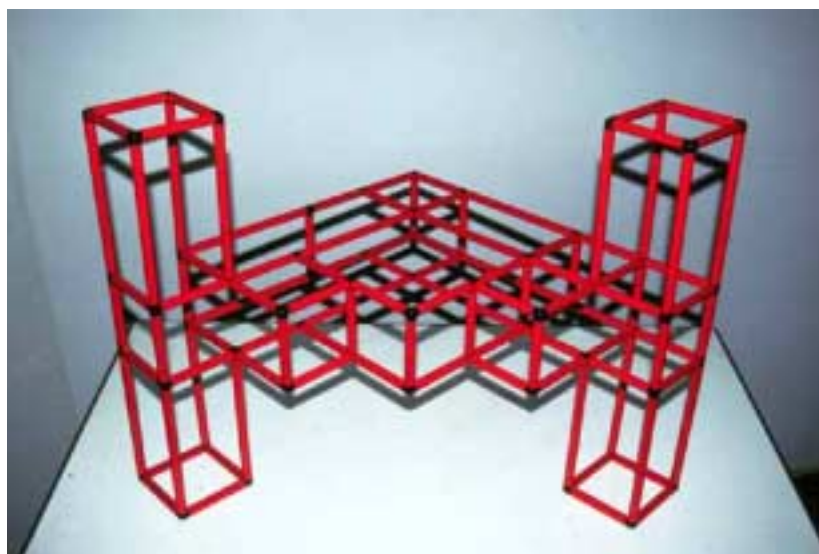


FIGURA 3.17 – Objeto criado pela equipe de alunos  
FONTE - Arquivo pessoal.

O mais fascinante dessa dinâmica é perceber que facilmente qualquer pessoa com formação técnica de desenho pode, através das malhas numa sistemática modular, gerar vários projetos distintos entre si, utilizando-se dos mesmos objetos.

O mais importante deste experimento foi ainda propiciar às pessoas a vivência da responsabilidade envolvida na representação, codificação e sobretudo na quantificação dos objetos a serem produzidos pela indústria. Não foram raras as equipes que tiveram algumas peças sobrando e também outras que seriam obrigadas a “encomendar” novas peças negligenciadas na planilha de quantitativos.

Na industrialização o prédio tem que chegar “pronto”, mas desmontado na obra. Não há espaço e tempo para erros. Uma falha na previsão e na revisão de material, com certeza, irá comprometer o cronograma de uma obra. Peças especificadas a mais ou a menos poderão representar sérios prejuízos a todo o processo.

Um outro fato curioso que deve ser comentado é que, na concepção industrial, cada objeto tem seu local definido e não pode ser substituído por outro de uma forma improvisada, na falta deste. Na FIG. 3.15, há dois pinos salientes no topo do objeto. A equipe que projetou esta peça não dispunha de quantitativo suficiente para a conexão C-4 e, para contornar o problema, lançou mão de duas peças C-3 para substituir as duas faltantes. Estes tipos de ajustes contradizem o princípio da industrialização, que por conceito não admite erro, sendo este um resquício herdado da construção artesanal.

Esta sistemática de projeto facilmente apreendida pelos alunos é a mesma (guardadas as proporções) em se tratando de projetos reais e em escalas maiores, como visto no exemplo anterior da prefeitura de Tóquio.

Observando a estrutura tubular do *hall* de entrada do edifício apresentado na FIG. 3.18, por exemplo, percebe-se que a similaridade formal de sua estrutura pode ser conseguida com a mesma metodologia utilizada pelos alunos.





FIGURA 3.18 – *Hall* de edificação em estrutura tubular de seção circular. Tóquio, Japão  
FONTE - Arquivo pessoal.

# 4 FORMA x GEOMETRIA x DESEMPENHO ESTRUTURAL

## 4.1 Introdução

### 4.1.1 A responsabilidade formal e geométrica

A responsabilidade para se projetar uma estrutura é muito grande, pois envolve várias fases, como: projeto de seu *design*, projeto de dimensionamento, projeto de detalhamento dos componentes e ligações, projeto de prevenção a incêndios, projeto de fabricação, projeto de montagem e outros, dependendo de seu porte e/ou complexidade.

Tamanho responsabilidade pode ser facilmente percebida pela especificidade das normas existentes, como também pelo conservadorismo de algumas delas. Mas o que será focado neste capítulo está relacionado com uma outra responsabilidade pouco enfatizada que antecede todo o processo quantitativo e que está associada à fase inicial da concepção do *design*: a responsabilidade formal e geométrica.

Analisando o conceito de forma, tem-se o seguinte:

*"Forma: limite ou estrutura visível de um corpo; realização material de toda construção manifestada através das múltiplas combinações obtidas pelas linhas, superfícies e volumes".<sup>1</sup>*

Como se pode ver, forma é como um objeto se estrutura e se organiza espacialmente. A forma como uma estrutura se organiza no espaço está intimamente ligada a sua estabilidade e ao seu desempenho estrutural. De acordo com a escolha da conformação geométrica de uma estrutura, já estará se definindo se ela terá um melhor ou pior desempenho estrutural para o resto de sua vida útil.

---

<sup>1</sup> FAMIH, 1990.

Segundo o Engº Ronei Lombardi Filgueiras o desempenho estrutural de um elemento físico depende primariamente de sua geometria: “quanto maior a riqueza geométrica de uma superfície, tanto mais plenamente serão satisfeitas essas condições”.<sup>2</sup>

Têm-se inúmeros exemplos para demonstrar isso, dentre eles o clássico da folha de papel. Ao posicionar uma tira de papel na horizontal, ela irá fletir devido à ação da gravidade (FIG. 4.1), mas se for feita uma curva ou mesmo um vinco nesta folha ao longo de seu eixo, a mesma poderá ganhar rigidez suficiente para manter-se na horizontal, suportando seu peso (FIG. 4.2).



FIGURA 4.1 – Ação da força da gravidade sobre tira de papel plana  
FONTE - Arquivo pessoal.

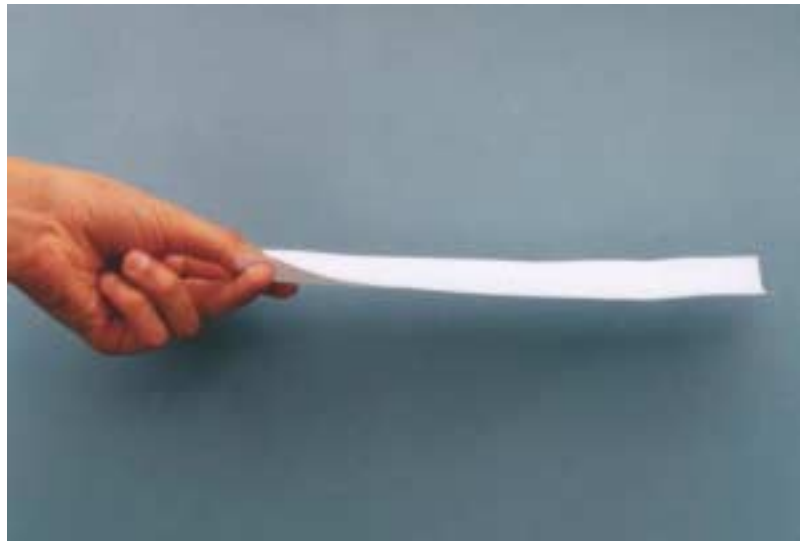


FIGURA 4.2 – Ação da força da gravidade sobre tira de papel enrijecida pela curvatura  
FONTE - Arquivo pessoal.

Pode-se citar inúmeros outros exemplos, mas o que se deve salientar é que a conformação geométrica é o principal “ingrediente” para qualquer estrutura, mais importante até mesmo que o material desta.

Por exemplo, as FIG. 4.3 e 4.4 apresentam o pavilhão do Japão que foi construído a para Expo de Hanover (1 de junho a 31 de outubro) de 2000, projetado pelo arquiteto japonês Shigeru Ban. O pavilhão tem forma parecida como um Domo, que cobre uma área de 3.090 m<sup>2</sup>, estruturado por uma trama de 440 tubos de 20 m de comprimento e com 12 cm de diâmetro.

---

<sup>2</sup> FILGUEIRAS, s.d.



FIGURA 4.3 – Vista externa do pavilhão do Japão - Expo de Hanover 2000  
FONTE - AMBASZ, 2001.p.139.



FIGURA 4.4 – Vista interna do pavilhão do Japão - Expo de Hanover 2000  
FONTE - AMBASZ, 2001.p.137.

O que é de surpreender é que toda essa estrutura tubular não é constituída em aço, bambu, ou outro material usual aplicado na construção civil. Esse pavilhão foi completamente estruturado por tubos de papelão reciclado, pesando 100 quilos cada um <sup>3</sup>. Uma estrutura similar de papelão do mesmo arquiteto foi montada no Jardim das Esculturas do Museu de Arte Moderna de New York – MoMA, em 2000. (FIG. 4.5, FIG. 4.6).

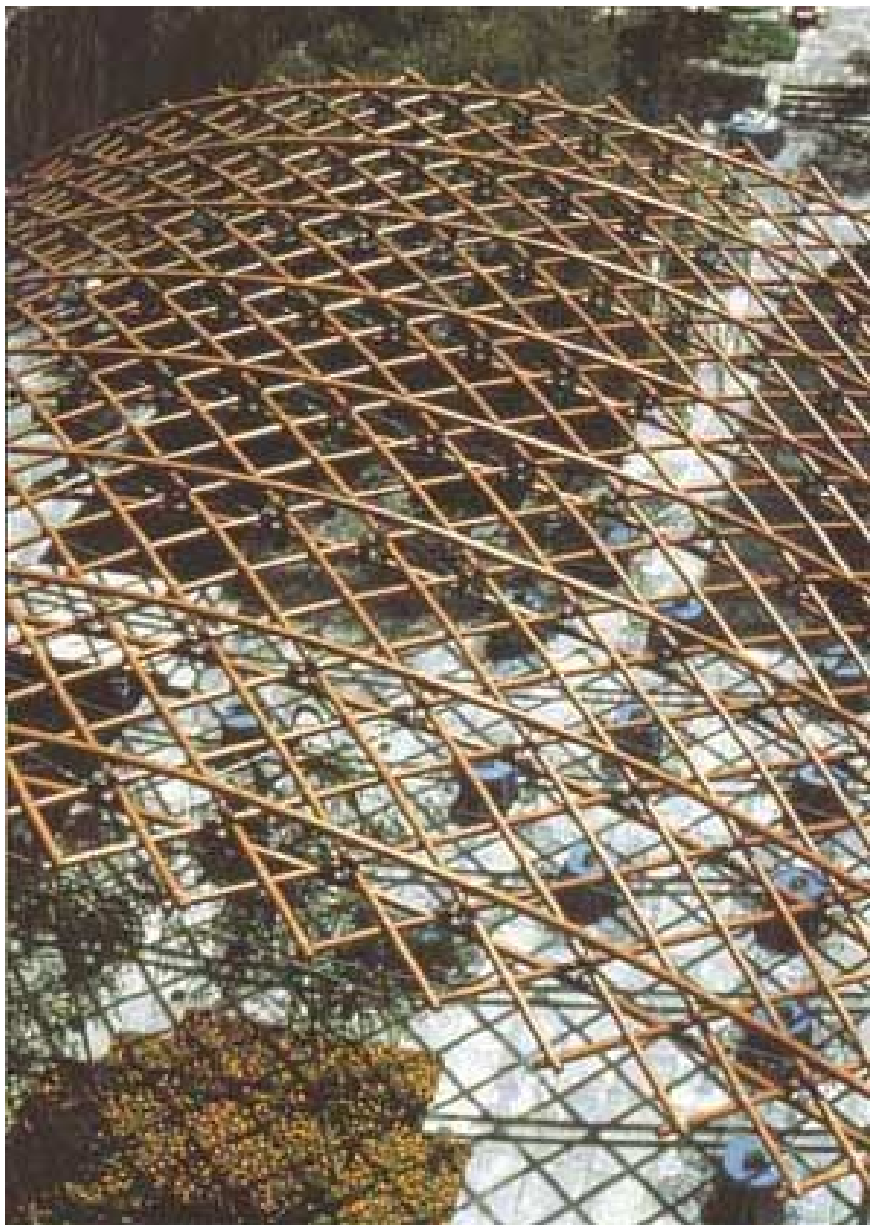


FIGURA 4.5 – Vista aérea da estrutura em tubos de papelão montada no Jardim das Esculturas do MoMA em N.Y. em 2000  
FONTE - AMBASZ, 2001. p.130.

---

<sup>3</sup> Dados quantitativos extraídos de IKUBO, 2003.



FIGURA 4.6 – Detalhe da estrutura em tubos de papelão montada no Jardim das Esculturas do MoMA em N.Y. em 2000, similar à executada no pavilhão do Japão - Expo de Hanover, 2000  
FONTE - AMBASZ, 2001. p.132,128.

#### ***4.1.2 Qualitativo x quantitativo***

Os exemplos apresentados no item anterior ilustram com precisão que a forma ou a disposição espacial geométrica predispõe a rigidez de qualquer estrutura antes mesmo de seu material de constituição.

Pode-se fazer uma otimização na resistência de qualquer material segundo delineamento formal que é definido para ele, além de seu arranjo e combinação espacial. É como se a etapa de *design* fosse análoga a um “pré-cálculo” qualitativo que posteriormente definirá o quantitativo. Isso reforça a importância do projeto de *design* das estruturas.

*“Uma coisa é conceber estrutura, outra é dimensioná-la para que seja capaz de suportar as condições de trabalho às quais estará submetida. Conceber é compreender, entender e ser capaz de explicar.*

*Conceber algo não significa necessariamente materializá-lo.*

*A concepção da estrutura é anterior ao seu dimensionamento, ou seja, a sua quantificação. É uma atitude ao mesmo tempo metódica e intuitiva.*

*Conceber uma estrutura é ter consciência da possibilidade da sua existência; é perceber a sua relação com espaço gerado; é perceber o sistema ou sistemas capazes de transmitir as cargas ao solo, da forma mais natural; é*

*identificar os materiais que, de maneira mais adequada, se adaptam a esses sistemas.*

*Não se pode imaginar uma forma que não necessite de uma estrutura, ou uma estrutura que não tem uma forma.*

*Toda forma tem uma estrutura e toda estrutura tem uma forma.*

*Dessa maneira, não se pode conceber uma forma sem se conceber automaticamente uma estrutura e vice-versa.*

*É muito comum ver-se a arquitetura como a criadora de formas que aparentemente possam existir independentes de sua estrutura, dos materiais de que são feitas e do processo de sua construção.*

*Na verdade a concepção de uma forma implica na concepção de uma estrutura e, em conseqüência, dos materiais e processos para materializá-la. A estrutura e a forma são um só objeto, e, assim sendo, conceber uma implica em conceber a outra e vice-versa.*

*A forma e a estrutura nascem juntas.*

*Logo, quem cria a forma cria a estrutura.*

*O ato de desenhar um pequeno compartimento de um edifício compromete o autor com a solução da estrutura que lhe dará sustentação.*

*O que acontece é que nem sempre o criador da arquitetura tem consciência de que seu ato criador dos espaços está intrínseco o ato criador da estrutura.*

*Quando o criador da forma não se preocupa com o ato gêmeo da concepção estrutural, delegando ao profissional sua função, corre o risco de ver seu projeto totalmente desfigurado.*

*O profissional que vem de fora, por mais boa vontade que tenha, nunca conseguirá responder adequadamente aos anseios daquele que viveu o momento íntimo da criação da forma.”<sup>4</sup>*

*“Não é o cálculo que concebe uma forma, mas sim o esforço idealizador da mente humana.*

*O cálculo existe para comprovar e corrigir o que se intuiu.”<sup>5</sup>*

*“A intuição é um processo essencialmente sintético: leva à compreensão imediata, rápida e direta das idéias analisadas mais ou menos conscientemente durante um certo lapso de tempo.*

---

<sup>4</sup> REBELLO, 2000. p.26-27

<sup>5</sup> Ibidem. p.27.

*Resultará num caminho satisfatório em direção ao conhecimento se reunir duas condições: deverá se basear em uma farta experiência prévia e será necessário verificá-lo com muito cuidado.*

*A prática pode resultar num refinamento extraordinário da intuição.”<sup>6</sup>*

*“Por outro lado, nunca se insistirá muito em que sem experiência, a intuição resultará numa ferramenta perigosa, uma vez que é impossível medir suas proposições. Em uma situação física qualquer e sobretudo no que se refere ao aspecto geométrico de uma estrutura, o leitor deve se precaver da idéia segundo a qual ‘O que se parece sentir deve se suceder’. É difícil acreditar, num primeiro momento, que os lados retos de uma abóbada cilíndrica se deslocam em direção ao centro quando são submetidas à ação de uma carga, porque a seção curva do cilindro sugere uma ação de arco, e ‘é de conhecimento de todos’ que os arcos apresentam um empuxo na direção para fora.”<sup>7</sup>*

*“O conhecimento qualitativo deve ser freqüentemente requisito prévio para o estudo quantitativo, pois raramente se desperta o interesse em um campo sem alguma compreensão prévia deste.”<sup>8</sup>*

*“Cabe lugar para pouca dúvida tanto na mente dos engenheiros como na dos arquitetos de que os modernos conceitos estruturais são usados de maneira adequada, somente quando o arquiteto possui uma compreensão exata das estruturas. Isso não significa que todos os arquitetos devam se tornar matemáticos; sugere-se simplesmente àqueles que se desejam expressar-se através das formas estruturais que devam primeiro se capacitarem para usar as ferramentas de análises quantitativas. Assim serão surpreendidos ao descobrirem, mais adiante, que sua intuição, cultivada freqüentemente, chegará às soluções estruturais ‘corretas’ sem muita articulação matemática.”<sup>9</sup>*

---

<sup>6</sup> SALVADORI, 1994. p.253.

<sup>7</sup> Ibidem.

<sup>8</sup> Ibidem. p.254.

<sup>9</sup> Ibidem.



## 4.2 As cascas

Dentro desse enfoque que busca analisar a conformação geométrica das estruturas e o seu reflexo no desempenho estrutural, não se pode deixar de lado o modelo estrutural das cascas, que “abandona a linha reta” e introduz a curvatura em sua superfície, a fim de melhorar seu desempenho estrutural.

Segundo o Engenheiro **Ronei Lombardi Figueiras** especialista em tais estruturas, em especial as superfícies hiperbólicas:

*“O homem, em sua caminhada evolutória, sempre sentiu a necessidade de condicionar o espaço em que vive, limitando-o através de elementos físicos em regiões espaciais, onde se abriga, trabalha, exerce as múltiplas atividades de sua existência.*

*As regiões espaciais são criadas, isoladas ou integradas, por meio de superfícies físicas às quais podemos fazer corresponder idealmente elementos geométricos. O planejamento e as técnicas de realização desses sistemas de micro-espacos são a razão de ser da arquitetura e da construção civil. Uma análise objetiva dos modelos utilizados ao longo da história humana para a realização das superfícies físicas, que são os contornos dos microespacos, nos permite classificá-los em dois grupos fundamentais:*

**1º- modelo essencialmente flexional ou arbitrário;**

**2º- modelo essencialmente não-flexional ou natural.**

*O primeiro modelo, criação arbitrária da mente humana, o mais largamente empregado na construção civil, é a realização física de superfícies de formas tais que o seu desempenho estrutural se dará principalmente através de solicitações flexionais.*

*O modelo não-flexional, também dito natural (porque as superfícies criadas pela natureza se enquadram nesse domínio) consiste na criação de elementos físicos cujo desempenho estrutural se dará com mínimas solicitações flexionais.*

*É interessante notar, como o faz Lev Zetlin, como o ser humano se condicionou, ao desenvolver suas técnicas construtivas, aos modelos flexionais: a solução universal adotada pela arquitetura humana, para a limitação de micro-espacos, foi o uso de superfícies físicas essencialmente planas, enrijecidas e apoiadas por elementos lineares essencialmente retos.*

*Foi criado desde a remota antiguidade o modelo flexional (Laje-Viga-Pilar) que é substancialmente o mesmo, ainda que substituamos os elementos Viga e Pilar por Arquitrave e Coluna, seus correspondentes clássicos.*

*O homem normalmente não se critica porque adota certos modelos; simplesmente acredita estar evoluindo na arte de construir quando introduz melhorias tecnológicas da confecção de seus elementos estruturais e também quando aprende a determinar com maior facilidade as solicitações flexionais que são despertadas naqueles elementos.*

*Modernamente, entretanto, o homem começa a considerar as intrínsecas diferenças entre os modelos arbitrários e os modelos não-flexionais, que sempre foram insinuados pela natureza; aprende, por exemplo, que o desempenho estrutural de um elemento físico depende primariamente de sua geometria. A busca da construção civil é a realização de sistemas de superfícies físicas e eficientes, seguras e econômicas; quanto maior a riqueza geométrica de uma superfície, tanto mais plenamente serão satisfeitas essas condições.*

*Desde épocas passadas, o homem tem usado eventualmente elementos construtivos que correspondem a superfícies geométricas mais ricas que o plano e os elementos lineares mais ricos que a reta.*

*Vemos, por exemplo, da arquitetura romana o uso das abóbadas, cúpulas e arcos, o que determinou, por conseqüência, os sistemas medievais românicos e góticos.*

*Todas essas considerações serão feitas para introduzimos os elementos físicos fundamentais dos modelos não-flexionais.*

*As membranas são estruturas laminares que podem ser consideradas realizações físicas de superfícies geométricas de curvatura média não nula, ou seja, de dupla curvatura. As membranas são, de modo geral, classificadas em dois tipos:*

### ***1º- Sinclásticas ou elípticas***

*São as que têm as curvaturas principais dirigidas segundo um mesmo sentido (como numa esfera ou elipsóide);*

### ***2º- anticlásticas ou hiperbólicas***

*São as que têm as curvaturas principais orientadas segundo sentidos opostos (como nos parabolóides hiperbólicos e conóides).*

*Os parabolóides hiperbólicos são superfícies anticlásticas, que podem trabalhar, portanto, exclusivamente com tensões de membrana e são também superfícies de dupla curvatura de tratamento analítico mais simples.*

*Quando analisamos esforços de membrana, só usamos as equações da estática. Se nossos cálculos forem valores relativamente baixos para as tensões, os alongamentos e encurtamentos na estrutura serão desprezíveis e teremos certeza de que qualquer deformação será desprezível. Portanto, o comportamento real de estrutura e as investigações teóricas convergem para a concordância, já que estas últimas se baseiam nas verdades abstratas da estática lógica e não em hipóteses nebulosas baseadas em simplificações das propriedades físicas do material.*

*Com membranas físicas podemos realizar de maneira eficiente e econômica o ideal para a construção civil: podemos criar micro-espacos, separados ou integrados através de plataformas, vedações, coberturas, contenções, etc, que sempre terão, além das vantagens estruturais, um apelo estético não subjetivo, posto que correspondem à condição de máxima simplicidade. Com associação dessas membranas poderemos construir uma miríade de obras: armazéns, galpões, auditórios, residências, enfim toda a gama de edificações.”<sup>10</sup>*

De acordo com o Engenheiro **Mario Salvadori**<sup>11</sup> denominam-se **estruturas resistentes pela forma** todas aquelas estruturas cuja resistência se obtém dando forma, ou moldando o material segundo as cargas que devem suportar. Para ele, as membranas que dependem da curvatura para suportar as cargas pertencem às categorias de estruturas nas quais a forma auxilia resistir às tensões de tração. Sua mobilidade e sua incapacidade para resistir a tensões de cisalhamento ou de compressão restringem o uso das membranas. Todas as desvantagens a serem evitadas no comportamento das membranas são consideradas na sua maioria como vantagens no comportamento das cascas delgadas.

Segundo Salvadori, se invertermos esta membrana, e a submetemos às mesmas cargas que definiram sua geometria original, esta passará a se comportar como uma estrutura tipo casca por estar sob compressão.

---

<sup>10</sup> FILGUEIRAS, sd.

<sup>11</sup> SALVADORI, 1994. p.186.

As cascas delgadas são estruturas resistentes pela forma, suficientemente delgadas para não desenvolverem tensões significativas (consideráveis) de flexão, porém suficientemente grossas para resistir cargas de compressão, corte e tração. Pode-se perceber que Salvadori e Filgueiras adotam duas terminologias –membranas e cascas delgadas–, diferenciadas entre si.

A fim de compreender o comportamento estrutural das cascas, é necessário antes se familiarizar com algumas características puramente geométricas apresentadas no item a seguir.

### 4.3 As superfícies hiperbólicas

#### 4.3.1 Superfícies regradadas

Para definir o que são superfícies hiperbólicas, tem-se antes que definir o que são superfícies regradadas. Diz-se que uma superfície é regradada, quando em qualquer ponto dela é possível passar uma reta contida nessa mesma superfície. Esta reta denomina-se de “**Geratriz**” e de “**Diretriz**” qualquer curva desta superfície que corte todas as retas nela contida. Geratriz, como o próprio nome sugere, é uma reta que **gera** a superfície apenas com o seu deslocamento no espaço, já o percurso a ser delineado é **direcionado** pela curva diretriz (FIG. 4.7).

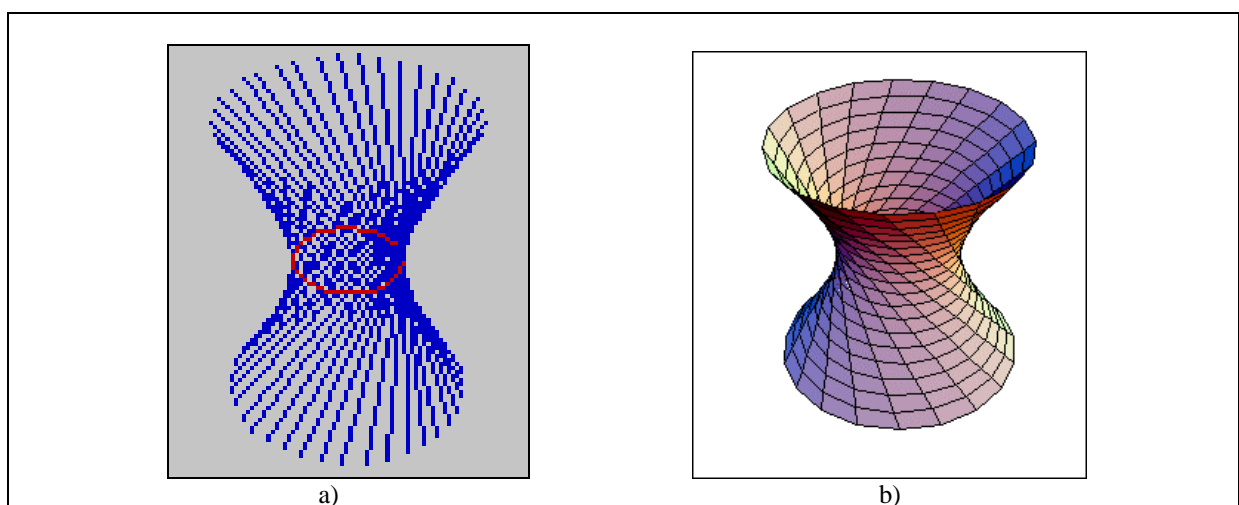


FIGURA 4.7 – Geratriz & diretriz do hiperbolóide de revolução

FONTE - a) Disponível em: <<http://www.faculty.fairfield.edu/jmac/rs/sixmodels.htm>>. Six types of Ruled Surfaces. Acesso em: 02 abr. 2002 b) Disponível em: <[http://cmf.lmc.fc.ul.pt/em\\_accao/superficies\\_regradadas/Superficies\\_regradadas2.htm](http://cmf.lmc.fc.ul.pt/em_accao/superficies_regradadas/Superficies_regradadas2.htm)>. O que são superfícies regradadas? Acesso em: 30 ago. 2001.

As superfícies regradas podem ser divididas em duas categorias:

- 1- desenvolvíveis ou desenroláveis;
- 2- não-desenvolvíveis ou empenadas.

#### 4.3.2 Superfícies regradas desenvolvíveis ou desenroláveis

De origem do termo francês “*developpable*”, estas superfícies permitem ser desenvolvidas ou planificadas, ou seja, toda a sua superfície curva pode ser desenrolada e contida em um plano. Para que isso seja possível, cada uma de suas geratrizes adotadas deve permitir que um único plano a contenha e que seja tangente a esta superfície, ou para cada par de geratriz adotada deve ser possível definir um plano. Têm-se como exemplo o cilindro e o cone (FIG. 4.8).

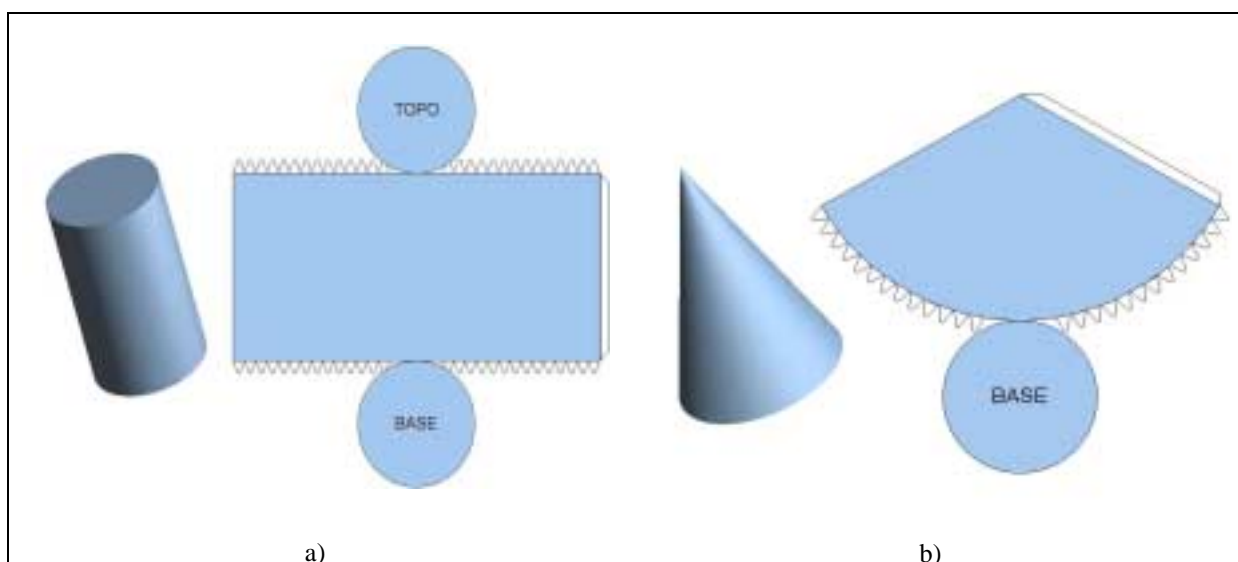


FIGURA 4.8 - Superfícies regradas desenvolvíveis ou desenroláveis a) Desenvolvimento do cilindro b) Desenvolvimento do cone

FONTE - Arquivo pessoal.

#### 4.3.3 Superfícies regradas não-desenvolvíveis ou empenadas

Ao contrário das superfícies regradas desenvolvíveis, nas empenadas, como o próprio nome sugere, não é possível obter o seu “desenvolvimento ou planificação”, sendo impossível desenrolá-la a ponto de conter toda esta superfície apoiada sobre um plano. Tal característica deve-se ao fato de que, se tomar um par de geratrizes (por mais próximas que elas estiverem) estas nunca poderão estar contidas em um mesmo plano, pois se tratam de retas reversas. Essas superfícies empenadas também são chamadas de **superfícies hiperbólicas** ou de **dupla**

**curvatura**, pois suas diretrizes são reversas entre si, gerando o efeito de “empenamento” e, por conseguinte o aparecimento da dupla curvatura (onde suas curvaturas principais estão orientadas segundo sentidos opostos) em sua superfície. Pode-se citar, como exemplo, os hiperbolóides de revolução de uma só folha (FIG. 4.7) os parabolóides hiperbólicos ou selas (FIG. 4.9), os conóides (FIG. 4.10), os helicóides (FIG. 4.11) e a faixa de Moebius (FIG. 4.12).

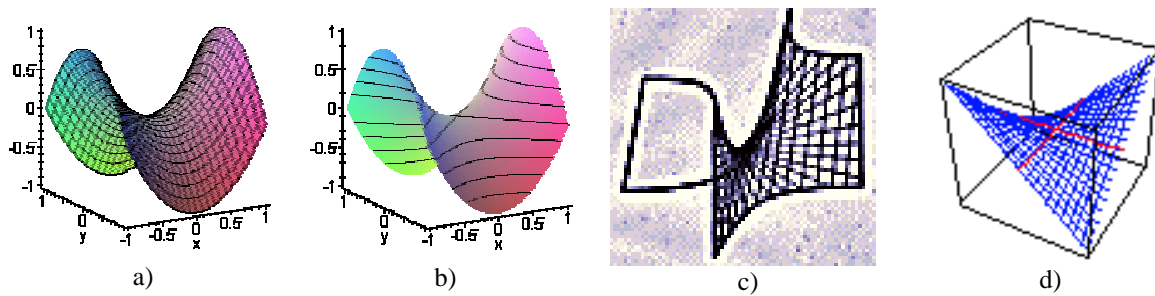


FIGURA 4.9 – Parabolóides Hiperbólicos

FONTE - a),b) Disponível em: <<http://theory.lcs.mit.edu/~edemaine/hypar/>> Erik Demaine's Folding and Unfolding Acesso em: 02 abr. 2002 c),d) Disponível em: <<http://www.faculty.fairfield.edu/jmac/rs/saddles.htm>>. Saddle (hypar) Surfaces. Acesso em: 02 abr. 2002.

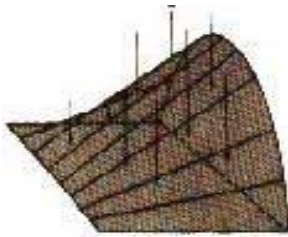


FIGURA 4.10 – Conóides  
FONTE - SALVADORI, 1994,p.217.



FIGURA 4.11 – Helicóides  
FONTE - Disponível em: <<http://www.faculty.fairfield.edu/jmac/rs/sixmodels.htm>>. *Six types of Ruled Surfaces*. Acesso em: 02 abr. 2002.



FIGURA 4.12 – Faixa de Moebius  
FONTE - ESCHER, 1988.p.72.

Cabe aqui salientar que nem todas as superfícies não-desenvolvíveis são consideradas empenadas, hiperbólicas, ou de dupla curvatura. Superfícies cujas **curvaturas principais** são todas dirigidas segundo um **mesmo sentido**, como, por exemplo, as esferas ou os elipsóides também não são desenvolvíveis, pois para obter a sua planificação seria necessário cortá-las em vários “gomos”. Estas superfícies são chamadas de **sinclásticas** ou **elípticas** Em contrapartida, as superfícies cujas **curvaturas principais** são orientadas em **sentidos opostos** são denominadas de **anticlásticas** ou **hiperbólicas**.<sup>12</sup> É o caso dos exemplos mostrados nas FIG. 4.7, e FIG. 4.9-4.12

<sup>12</sup> FILGUEIRAS, sd.

Para compreender melhor estes conceitos, foi necessário recorrer a algumas explicações de Mario Salvadori. Segundo ele, para visualizar as curvaturas de uma superfície, deve-se cortar a mesma com um plano perpendicular a ela. Por exemplo: a FIG. 4.13 mostra que no caso de um cilindro, um plano perpendicular paralelo a ele o corta segundo uma reta, que, acusa uma falta de curvatura, ou curvatura nula nesta secção. Conseqüentemente, num corte perpendicular a ele aparecerá uma curvatura significativa. No entanto, um outro corte em qualquer direção definirá uma outra curvatura menor. Percebe-se, então, que à medida que o plano de corte rotaciona em torno desta reta vertical perpendicular ao cilindro, as secções vão adquirindo valores que variam do zero em uma determinada direção até um valor máximo na direção perpendicular a ela. As duas direções perpendiculares entre si cujas curvaturas definem respectivamente valores máximos e mínimos (no exemplo do cilindro este valor mínimo é o zero) são denominadas de **direções principais da curvatura da membrana**.<sup>13</sup>

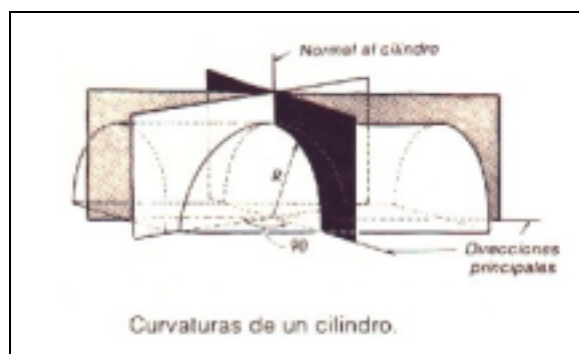


FIGURA 4.13 – Direções de curvatura no cilindro  
 FONTE - SALVADORI, 1994.p.173.

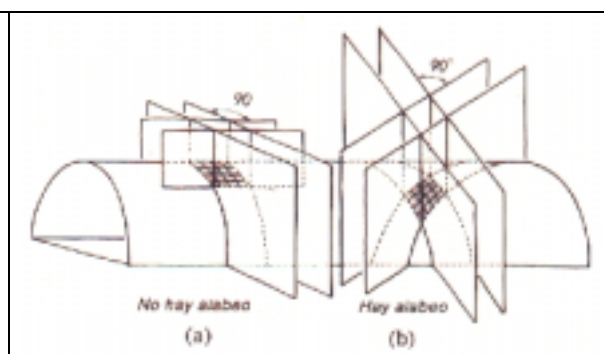


FIGURA 4.14 – Direções de curvatura no cilindro  
 FONTE - SALVADORI, 1994.p.175.

Definindo um par de planos paralelos entre si, dispostos perpendicularmente a outro par de planos idênticos ao primeiro, obtém-se um conjunto de interseção de planos, semelhante ao “jogo da velha”, quando visto de topo. Posicionando este conjunto de planos, no mesmo cilindro alinhado com suas direções principais, a superfície resultante no cilindro contida dentro do quadrado gerado pela interseção desses planos, definirá uma superfície cujas bordas não são reversas, ou seja, não empenadas (FIG. 4.14a). No entanto, qualquer posição deste conjunto não paralelo às direções principais resultará numa superfície de bordos reversos com características semelhantes ao empenamento (porém com possibilidade de desenvolvimento em um plano), como pode ser visto na FIG. 4.14b. Assim uma superfície pode apresentar

<sup>13</sup> SALVADORI, 1994. p.172-175.

características de empenamento em certas direções e não apresentar em outras. A única superfície sem estas características em nenhuma direção é a esfera, pois seus pares de linhas arqueadas e paralelas entre si são idênticos em todas as direções. Estas propriedades geométricas das curvaturas observadas até o momento não são privilégio exclusivo destes exemplos. Todas as superfícies cortadas por planos que passam pela perpendicular a ela em um ponto, segundo suas direções principais, definirão duas direções perpendiculares, contendo curvaturas máximas e mínimas respectivamente. Normalmente se descobrem as direções principais de curvatura em uma superfície qualquer, quando identificada aquela direção que acusar ausência de empenamento na superfície. Pode-se assinalar com pequenas linhas cruzadas as direções principais de curvatura sobre a superfície de uma membrana, obtendo, assim, uma malha das **linhas principais de curvatura**. No caso do cilindro obtém-se uma malha retangular com lados paralelos e perpendiculares ao seu eixo.<sup>14</sup>

Numa cúpula esférica, por exemplo, todas as intersecções com um plano normal definem curvaturas idênticas para baixo, em todos os pontos (FIG. 4.15a). Em contrapartida, se esta cúpula for invertida, têm-se obviamente todas as curvas orientadas para cima. É convencional chamar as curvaturas voltadas **para baixo de curvaturas positivas**, e as voltadas **para cima de curvaturas negativas**.<sup>15</sup>

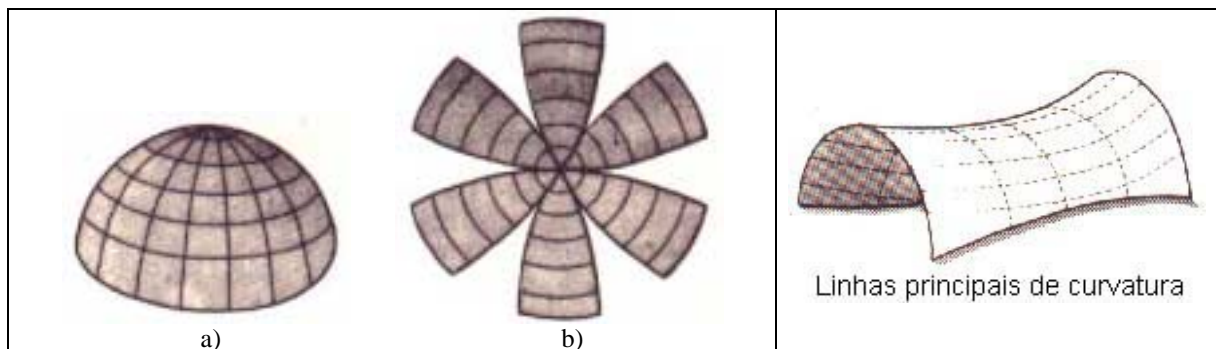


FIGURA 4.15 – a) Superfícies sinclásticas ou elípticas possuem linhas principais de curvatura em todas as direções com a mesma orientação b) Para se planificar uma superfície não-desenvolvível, são necessários sucessivos cortes  
 FONTE - SALVADORI, 1994.p.187.

FIGURA 4.16 – Superfícies anticlásticas ou hiperbólicas possuem linhas principais de curvatura positivas e negativas simultaneamente  
 FONTE - SALVADORI, 1994.p.175.

As curvaturas resultantes da rotação no plano de corte podem ser positivas ou negativas em todas as direções como no exemplo anterior, caracterizadas como **superfície sinclástica** ou

<sup>14</sup> SALVADORI, 1994. p.172-175.

<sup>15</sup> Ibidem. p.188.



**elíptica**, ou também positivas em algumas direções e negativas em outras. Este é o caso das superfícies **anticlásticas ou hiperbólicas**, tema deste item (4.3.3 *Superfícies regradas não-desenvolvíveis ou empenadas*), como mostra o modelo genérico da FIG. 4.16.

Todas as superfícies que tiverem curvaturas positivas ou negativas, mas apresentarem curvatura nula (igual a 0) em uma direção, são denominadas de superfícies **desenvolvíveis**, é o caso do cilindro e do cone. Essas superfícies podem ser aplainadas sem a introdução de sucessivos cortes. Já as superfícies de curvaturas positivas ou negativas em todos os pontos são denominadas de superfícies **não-desenvolvíveis**, pois são impossíveis de serem planificadas sem cortá-las em uma série de direções (FIG. 4.15b). Sua rigidez e resistência mecânica provêm em grande parte da resistência às deformações que tendem a aplainá-las, ou reduzir suas curvaturas. As superfícies desenvolvíveis são evidentemente menos rígidas e resistentes que as sinclásticas.<sup>16</sup>

## 4.4 Parabolóide hiperbólico

### 4.4.1 Caracterização

Este trabalho adotou preferencialmente o parabolóide hiperbólico como objeto de pesquisa. O parabolóide hiperbólico, ou sela, é uma superfície infinita em três dimensões cujas secções transversais definem uma parábola (cortes verticais) e uma hipérbole (cortes horizontais), conforme FIG. 4.9a e 4.9b. Em geral eles possuem duas direções de curvaturas nulas, o que vale dizer duas direções segundo as quais sua superfície coincide com duas retas que se cruzam (FIG. 4.9b e 4.9d). Pode-se dizer que o parabolóide hiperbólico é um caso particular do conóide (FIG. 4.10), quando sua diretriz se transforma em uma reta. Isto quer dizer que, quando as diretrizes de uma superfície regradada são duas retas reversas, a superfície gerada é o parabolóide hiperbólico (FIG. 4.9d).

---

<sup>16</sup> SALVADORI, 1994. p.188.

O termo *Hypar* (oriundo da palavra inglesa *hyperbolic paraboloid*) é internacionalmente conhecido, e foi introduzido pelo arquiteto Heinrich Engel em 1967 no seu livro *Structure System* (página 215) para designar uma parcela finita cortada desta superfície<sup>17</sup> Na versão em português foi adotada a terminologia de “HP”<sup>18</sup>, a qual será utilizada no texto a partir de agora. Apesar da sua aparente complexidade formal, o HP pode ser facilmente obtido geometricamente através de suas linhas reversas, como demonstra o Engenheiro. Ardevan Machado em seu livro “Desenho na engenharia e arquitetura” a seguir:

*“Vamos admitir o quadrilátero reverso ABCDA, conforme FIG. 4.17, em que o lado AB pertence ao plano  $\pi_2$ ; o lado BC pertence ao plano  $\pi_3$  e os lados CD e DA pertencem ao plano  $\pi_1$ .*

*Os planos  $\pi_1$ ,  $\pi_2$  e  $\pi_3$  são os planos horizontal, vertical e de perfil da Geometria Descritiva. Se admitirmos uma geratriz paralela ao plano  $\pi_2$ , plano diretor, essa geratriz estará contida em um plano frontal. Deslocando-se este plano frontal paralelamente ao plano  $\pi_2$ , ele irá dividir os segmentos proporcionais ou iguais. Assim, se dividirmos por exemplo em oito partes iguais os segmentos BC e AD, obteremos os pontos traços desses segmentos, com os planos frontais e, unindo-se estes pontos, obteremos as retas geratrizes da superfície hiperbolóide parabólica, conforme FIG. 4.17. Estas geratrizes paralelas ao plano  $\pi_2$  são a 1ª família de geratrizes da superfície.*

*Isto porque se admitirmos o plano  $\pi_3$  como plano diretor, FIG. 4.18, resultam as geratrizes indicadas, paralelas ao plano  $\pi_3$ , da mesma superfície, que são a 2ª família de geratrizes.*

**Observação:** *O plano  $\pi_1$  não pode ser plano diretor, pois os lados AD e DC pertencem a  $\pi_1$ , o que implicaria na geração de dois planos, cuja intersecção seria a reta BD.*

*A FIG. 4.19 é a representação da superfície hiperbolóide-parabólica, consideradas simultaneamente as duas famílias de geratrizes, paralelas aos planos  $\pi_2$  e  $\pi_3$ .*

*Admitindo-se então um cubo ABCDEFGH, podemos considerar o quadrilátero reverso AHCF, cujos vértices do cubo e cujos lados são as diagonais das faces do cubo.*

---

<sup>17</sup> DEMAINE, Erik. Erik Demaine's Folding and unfolding.

<sup>18</sup> ENGEL, 1981. p.214.

Admitindo-se o plano ABEF para plano diretor, e dividindo-se AH e FC em 15 partes iguais, e unindo-se os pontos de divisão, obtemos a 1ª família de geratrizes da superfície hiperbolóide-parabólica, conforme FIG. 4.20.

Na FIG. 4.21, foi admitido para plano diretor também o plano ADHE, e representadas as duas famílias de geratrizes da superfície hiperbolóide-parabólica.”<sup>19</sup>

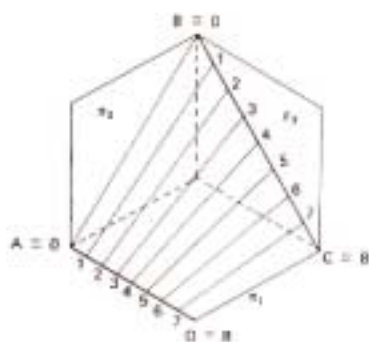


FIGURA 4.17–Geratriz paralela a  $\pi_2$   
 FONTE - MACHADO, 1980.p.142.

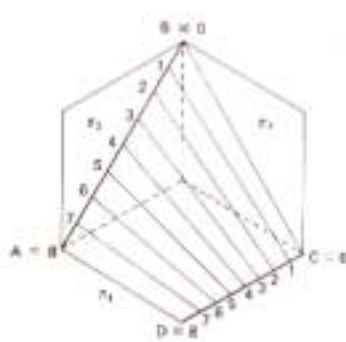


FIGURA 4.18–Geratriz paralela a  $\pi_3$   
 FONTE - MACHADO, 1980.p.143.

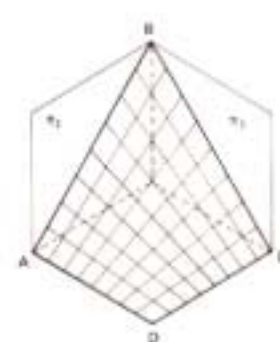


FIGURA 4.19–Geratriz paralela a  $\pi_2$  e  $\pi_3$   
 FONTE - MACHADO, 1980. p.143.

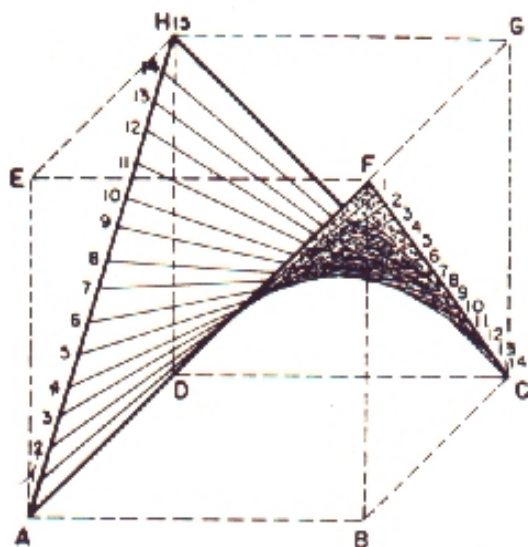


FIGURA 4.20– 1ª família de geratrizes do HP  
 FONTE - MACHADO, 1980.p.143.

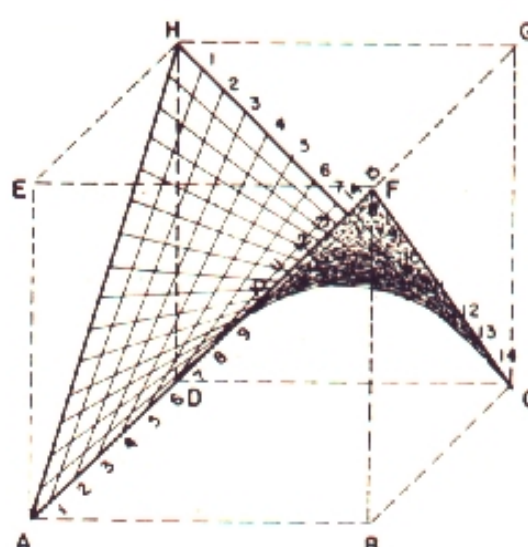


FIGURA 4.21– 1ª e 2ª famílias de geratrizes do HP  
 FONTE - MACHADO, 1980.p.143.

<sup>19</sup> MACHADO, 1980. p.142-143.

Pode-se também obter facilmente um HP através de equações matemáticas que podem ser classificadas segundo suas coordenadas retangulares, cilíndricas ou esféricas, explicitadas seqüencialmente a seguir:

$$kz = x^2 - y^2 \quad (\text{Equação 1})$$

$$kz = r^2 \cos 2.t \quad (\text{Equação 2})$$

$$r = k \sec.t \cot \quad (\text{Equação 3})$$

Numa analogia a sela de montar, o HP possui uma curvatura para baixo na direção transversal ao cavalo, e uma outra curvatura para cima no seu sentido longitudinal. Conforme indicado na FIG. 4.23 se estes planos de corte forem rotacionados em torno de um eixo vertical essas curvaturas tenderão a diminuir gradualmente até se inverterm de valores (as curvas positivas se tornarão negativas, e as negativas positivas). É importante salientar que, neste momento de transição, as duas curvaturas **se anulam nas duas direções**. Os parabolóides hiperbólicos ou selas em geral possuem duas direções de curvaturas nulas, o que vale dizer duas direções segundo as quais sua superfície coincide com duas retas que se cruzam (FIG. 4.22). Pode-se facilmente identificar a parte mais elevada de uma cúpula, bem como de uma abóbada cilíndrica, porém, na realidade, fica difícil definir a parte superior de um HP (FIG. 4.23).<sup>20</sup>

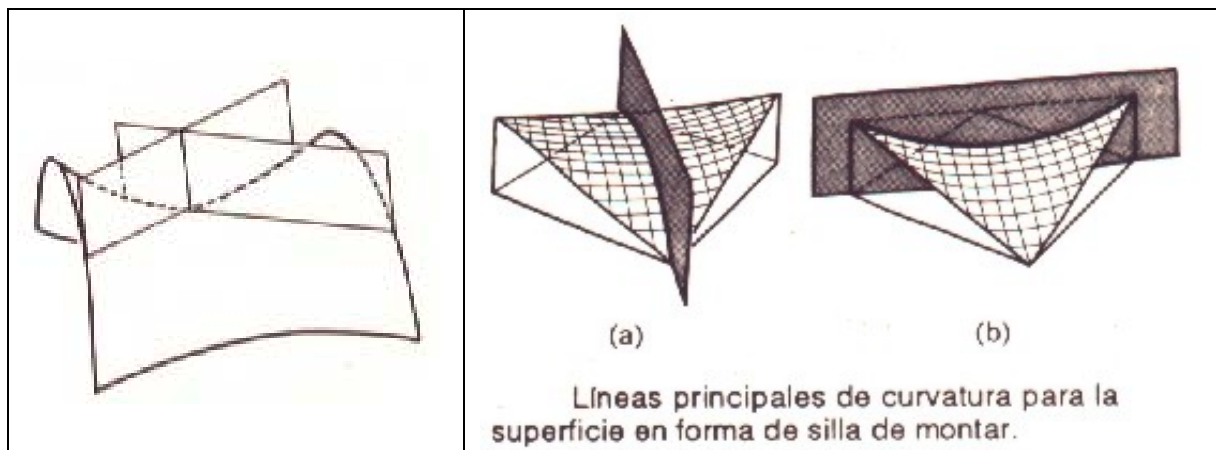


FIGURA 4.22– Curvaturas nulas do HP  
 FONTE - SALVADORI, 1994. p.187.

FIGURA 4.23– Curvaturas principais do HP  
 FONTE - SALVADORI, 1994. p.189.

O comportamento estrutural dos HPs depende diretamente de suas condições de apoio. Quando uma casca com forma de HP se apóia nos dois pontos do arco parabólico de curvatura positiva (voltada para baixo), como mostra a FIG. 4.23a, a transferência de carga a esses

<sup>20</sup> SALVADORI, 1994. p.188.

apoios se faz por meio de tensões de corte. Mas a existência da curvatura negativa voltada para cima (FIG.4.23b) confere à casca uma resistência adicional sobretudo contra a flexão. Se a casca tende a fletir, as parábolas com curvaturas voltadas para baixo, tendem a aplainar-se, mas as parábolas com a curvatura para cima resistirão a esta deformação, pois suas tensões de tração estabilizarão as tensões de compressão nas outras. Se os HPs se apóiam completamente ao solo (FIG. 4.22), sua interseção com este formará no plano duas hipérbolas opostas, com as curvaturas voltadas para fora, de forma que a área de projeção da cobertura terá dois lados curvos e duas empenas retas.<sup>21</sup>

É muito comum utilizar-se de combinações de segmentos de HP para se construir coberturas. Uma das mais utilizadas é a composição de quatro módulos, com os vértices externos apoiados em colunas (FIG. 4.24).

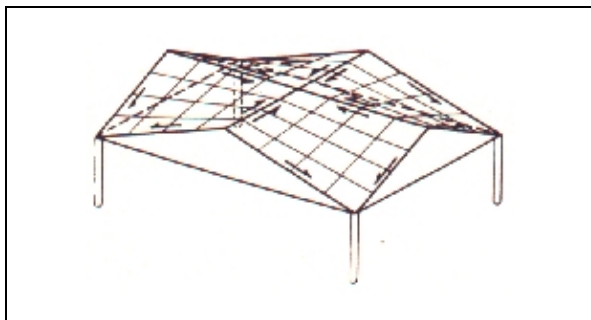


FIGURA 4.24 – Composição de quatro Módulos HP com vértices extremos apoiados em colunas  
FONTE - SALVADORI, 1994.p.217.

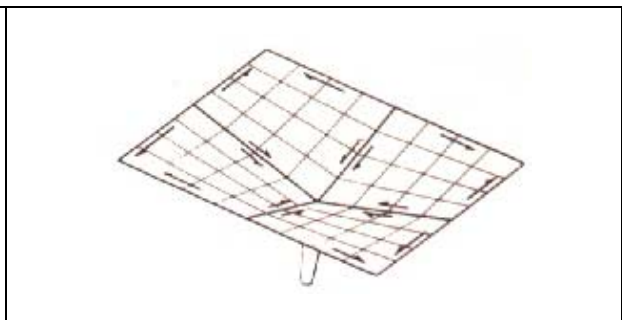


FIGURA 4.25 – Composição de quatro Módulos HP em taça ou guarda-chuva  
FONTE - SALVADORI, 1994.p.217.

Neste caso, a presença dos tirantes horizontais impedirá a abertura dos pilares e as vigas horizontais internas, por compressão de igual magnitude, estarão em equilíbrio. A mesma combinação de quatro módulos pode ser usada como uma “taça” ou “guarda-chuva” invertido, apoiado em uma coluna central (FIG. 4.25). Neste caso, os elementos de rigidez horizontais e externos serão submetidos à tração e em equilíbrio com o módulo adjacente. Por sua vez, este modelo se encontra equilibrado internamente, dispensando a utilização de tirantes. Em qualquer uma das combinações, a forma da casca sustentará o peso dos elementos horizontais (bordas na taça, e a cruz interna para o de 4 pilares), por conseguinte, a casca desenvolverá tensões de flexão. Também poderá sofrer flexão a zona central plana, ou seja, onde não há curvatura significativa para contribuir na sustentação das cargas por meio das tensões de

<sup>21</sup> SALVADORI, 1994. p.213-214.

membrana. Para se cobrir áreas de formas variadas, pode-se adotar várias combinações de HP. É necessário, no entanto, analisar cuidadosamente cada uma dessas combinações para determinar se estará equilibrada interiormente. Uma combinação tipicamente desequilibrada consiste em dois módulos dispostos como “SHED” (FIG. 4.26).<sup>22</sup>

Os HPs também são utilizados como elementos de trechos bastante verticalizados ou como superfícies verticais. Nesses casos seu comportamento é totalmente diferente daqueles analisados anteriormente e semelhante ao comportamento das placas delgadas carregadas em seu próprio plano, de forma análoga às vigas esbeltas. Os variados mecanismos por meio dos quais os HPs resistem às cargas, constituem mais um exemplo da estreita relação existente entre o comportamento das cascas e as condições de apoio.<sup>23</sup>

Algumas das maiores cascas do mundo foram construídas para resistir não só às cargas verticais, mas também as horizontais. Os muros de contenção submetidos ao empuxo horizontal da terra podem-se constituir também na forma dos conóides verticais (FIG. 4.27). Já foram construídas paredes de represas com altura de até 250 metros, com curvaturas tanto nas secções verticais como nas horizontais, e com espessuras de somente poucas dezenas de centímetros (FIG. 4.28). Nessas represas, a relação entre o raio de curvatura e a espessura gira em torno de 400 ou mais. Esses tipos de cascas ainda são consideradas como delgadas, mesmo que suas espessuras possam ser superiores a um metro em sua base.<sup>24</sup>

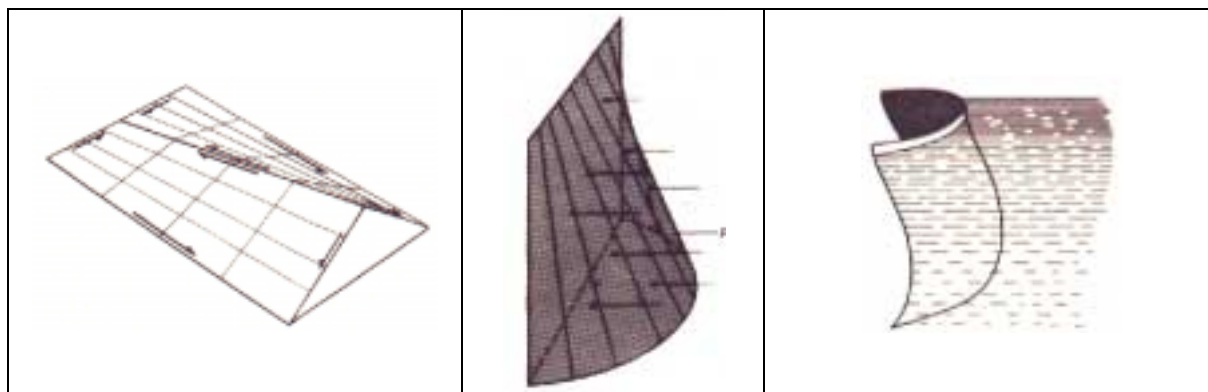


FIGURA 4.26 – HP em Shed  
FONTE - SALVADORI, 1994. p.217.

FIGURA 4.27 – Conóide  
FONTE - SALVADORI, 1994. p.217.

FIGURA 4.28 – Represa  
FONTE - SALVADORI, 1994. p.217.

<sup>22</sup> SALVADORI, 1994. p.216.

<sup>23</sup> Ibidem.

<sup>24</sup> Ibidem. p.218-220.

#### 4.4.2 Proposta de investigação –objeto de estudo

Como dito anteriormente, o objeto de estudo deste trabalho parte da análise do comportamento estrutural do parabolóide hiperbólico e terá, como enfoque principal a comparação do desempenho de várias estruturas similares entre si, numa abordagem preferencialmente qualitativa.

Todos os exemplos comentados neste capítulo e todas as bibliografias encontradas sobre o tema analisam um HP constituído como um elemento de “massa” rígida, normalmente de concreto, tijolos ou blocos, maciços. Geralmente são cascas isotrópicas e, em algumas bibliografias, pode-se encontrar o HP como tenso-estruturas constituídas por lonas têxteis que possuem o comportamento estrutural completamente diferente das cascas, devido a sua extrema leveza, que as obrigam a trabalhar sempre à tração (FIG. 4.29).

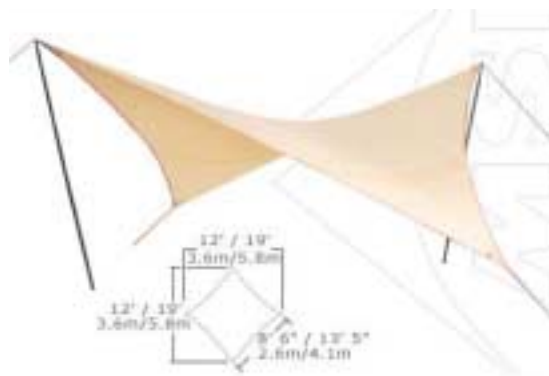


FIGURA 4.29 – Barraca HP em lona têxtil  
FONTE - Disponível em: <<http://www.ops.dti.ne.jp/~tetk/amusement/camp/moss/parawing.html>>. Acesso em: 24 fev.2002.

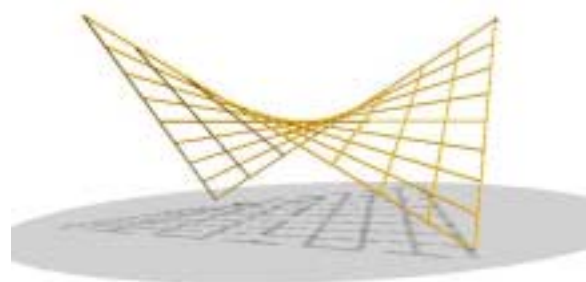


FIGURA 4.30 – HP em estrutura tubular reticulada  
FONTE - Arquivo pessoal.

No entanto, o objeto a ser investigado é uma estrutura metálica tubular reticulada com a conformação de um parabolóide hiperbólico, ou seja, enrijecida pela presença da dupla curvatura (FIG. 4.30).

Foram raros os exemplos encontrados de estruturas conforme o objeto de estudo. Alguns destes exemplos podem ser vistos nas. FIG. 4.31, a 4.36.

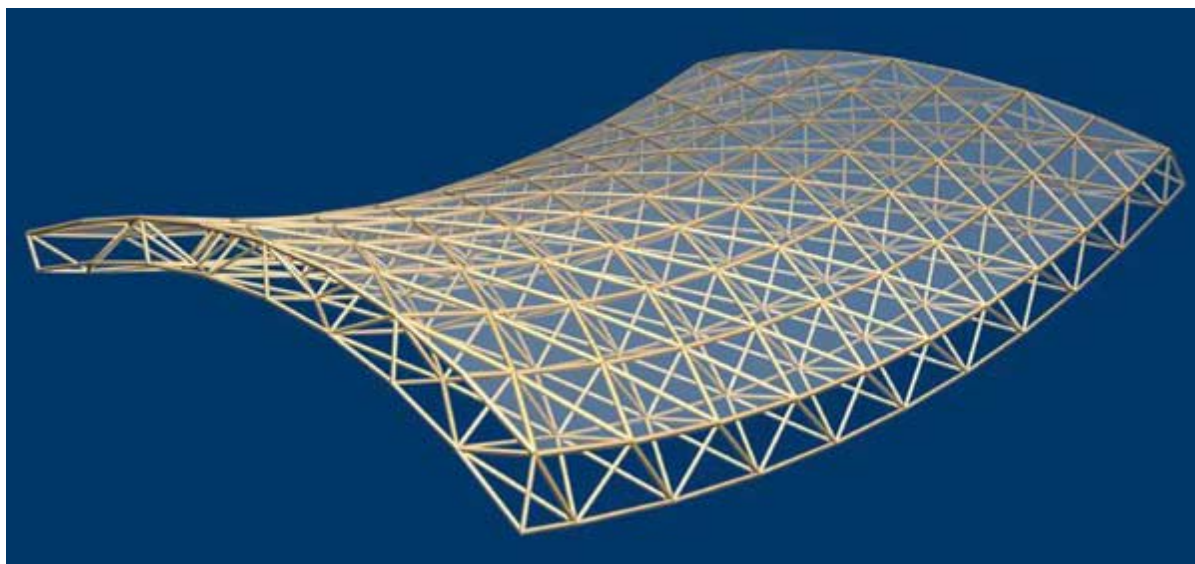


FIGURA 4.31 – Modelo virtual genérico de HP em estrutura tubular reticulada espacial

FONTE - Disponível em: <<http://www.conservatek.com/hm/spectraSET02.htm>>. Acesso em: 14 nov. 2003.

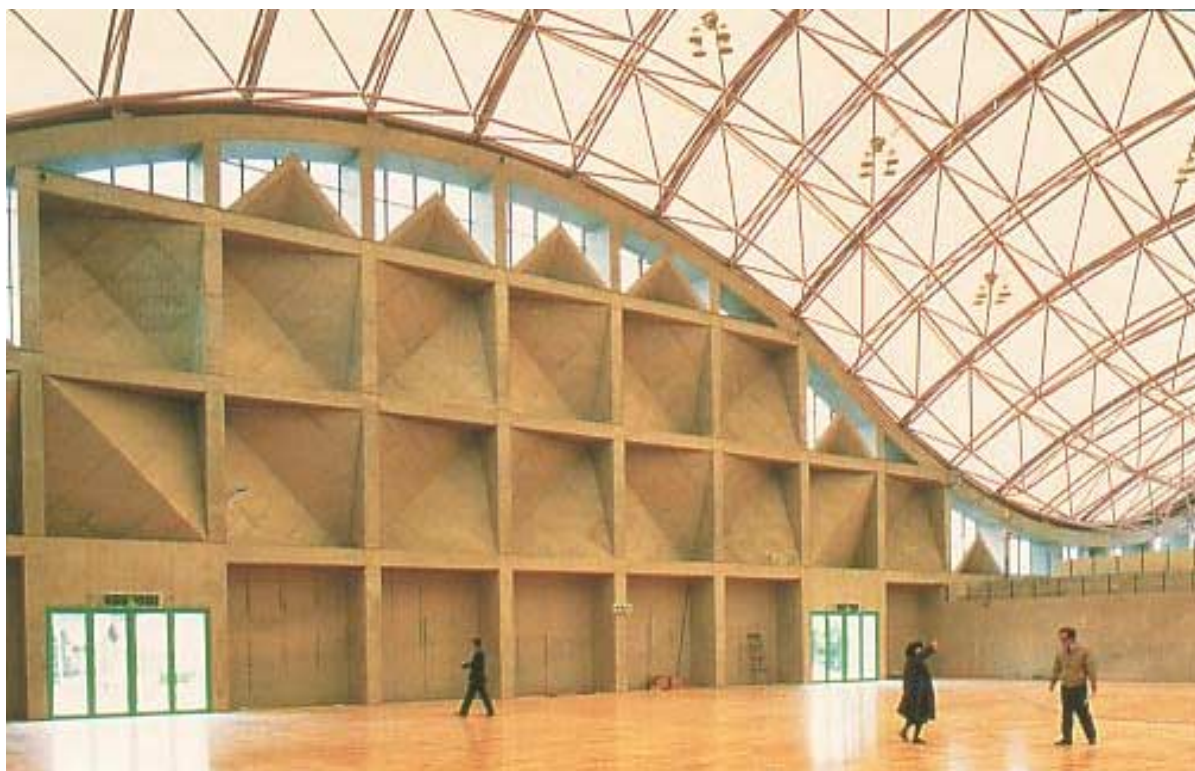


FIGURA 4.32 – Cobertura do Orio Sports Centre, Japão em HP tubular espacial

FONTE - KUROKAWA, 1993.p.101.





FIGURA 4.33– Cobertura de anfiteatro da cidade de Fort. Lauderdale, Flórida  
FONTE - Disponível em: <<http://www.starnetint.com/>>. (Project Number:2771) Acesso em: 07 set. 2002.



FIGURA 4.34– Residência do engenheiro Ronei Lombardi Filgueiras, especialista em superfícies anticlásticas  
FONTE - Arquivo pessoal.

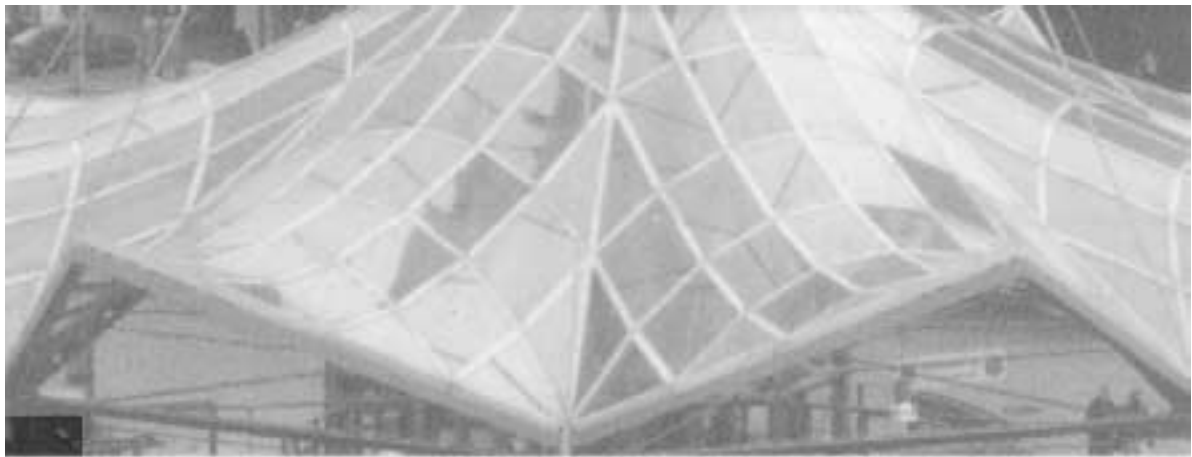
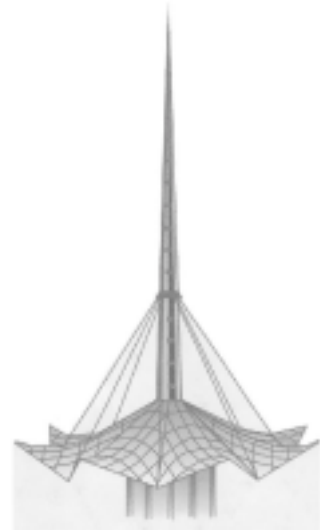


FIGURA 4.35–Cobertura em HP de ponto de ônibus

FONTE - a) Disponível em: <<http://home.arcor.de/nachtzaehne/seiten/20/stadt/kleppunt.htm>>. Acesso em: 25 nov. 2003; b),c) RÜTER, 1997.p.capa.



FIGURA 4.36– Stand da Expo Plaza na EXPO de 1985 – Osaka

FONTE - EXPO'85 ARCHITECTURE, 1995.p.84.

### 4.4.3 Experimento comprobatório

Com o propósito de demonstrar as vantagens estruturais das superfícies hiperbólicas sobre as superfícies planas, foi elaborado neste trabalho um experimento de caráter qualitativo realizado por meio de maquetes, mas de grande eficácia para a compreensão da eficiência estrutural dessas superfícies.

Preliminarmente, foi confeccionado em papelão Paraná nº 60, com espessura de aproximadamente 1 mm, um módulo plano quadrangular de 19,5 cm x 19,5 cm (entre os eixos de suas arestas periféricas), composto por sete barras verticais e sete barras horizontais, equidistantes umas das outras, formando uma grade quadriculada plana de malha de 3,25 x 3,25 cm (todas as barras possuem a largura de 0,7 cm). Mais três módulos idênticos foram construídos, totalizando-se 4 módulos que foram justapostos e fixados lado a lado, formando um quadrado maior de 40 cm x 40 cm, conforme indicado na FIG. 4.37. Esta montagem foi denominado de “**Modelo Plano**”. De uma maneira análoga, construiu-se um outro modelo composto por 4 módulos de HP idênticos, formando um quadrado maior, também de 40 cm x 40 cm quando visto em projeção de topo (FIG. 4.38). Esta montagem denominou-se de “**Modelo HP**”.

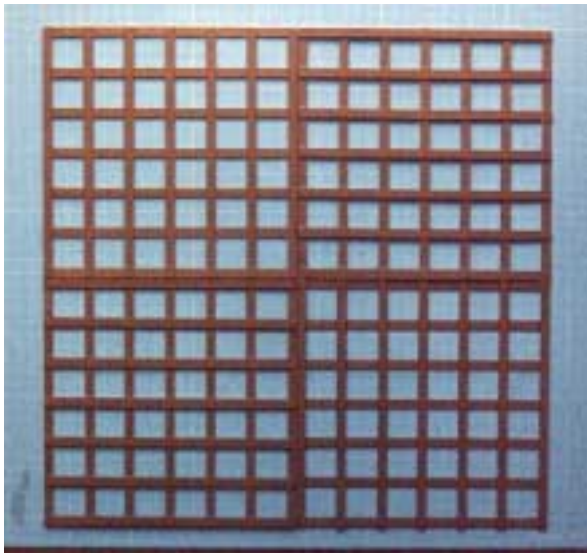


FIGURA 4.37 – Vista de topo Modelo Plano  
FONTE - Arquivo pessoal.



FIGURA 4.38 – Vista de topo Modelo HP  
FONTE - Arquivo pessoal.

Por se tratar de uma superfície HP, os módulos, quando vistos frontalmente, foram construídos com um declive de 6,5 cm de altura para 19,5 cm de projeção horizontal, conforme indicado na FIG. 4.39.

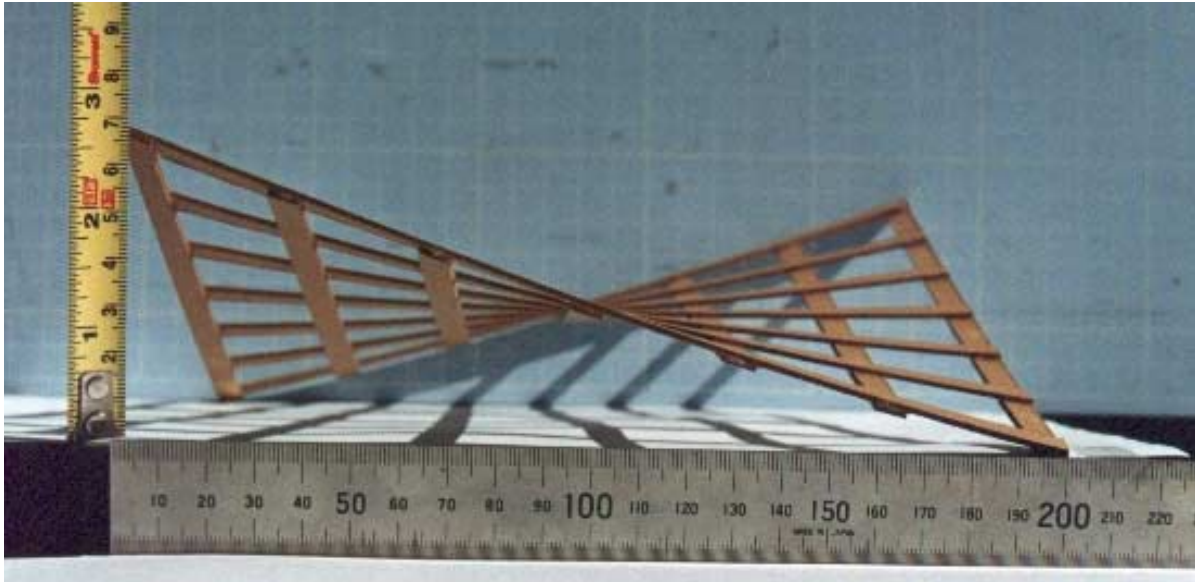


FIGURA 4.39 – Vista frontal do declive referente a cada módulo do Modelo HP  
FONTE - Arquivo pessoal.

Cada modelo finalmente foi erguido e apoiado sobre 4 pontos articulados posicionados exatamente no meio de cada aresta de borda do quadrado maior, originado pelos 4 módulos, conforme indicado nas FIG. 4.40 e FIG. 4.41.



FIGURA 4.40 – Montagem do Modelo Plano  
FONTE - Arquivo pessoal.



FIGURA 4.41 – Montagem do Modelo HP  
FONTE - Arquivo pessoal.

Em cada um dos modelos confeccionados, aplicaram-se cargas concentradas idênticas em seu centro geométrico, e com o auxílio de um deflectômetro, mediram-se seus respectivos deslocamentos no ponto de aplicação da carga. Os resultados obtidos podem ser vistos comparativamente na TAB. 4.1.

TABELA 4.1  
Comparativo entre Modelo Plano e Modelo HP quanto à flexão

<b>Cargas (gramas)</b>	<b>0 g</b>	<b>50 g</b>	<b>100 g</b>	<b>150 g</b>	<b>200 g</b>	<b>250 g</b>
<b>Deslocamento de Flexão Modelo Plano (mm)</b>	0,0	1,74	3,71	5,73	8,97	9,26+ (~0,5)
<b>Deslocamento de Flexão Modelo HP (mm)</b>	0,0	0,10	0,58	1,39	2,15	2,92

FONTE - Decorrente da Investigação.

Analisando os dados obtidos, fica fácil perceber como a geometria ou os aspectos plásticos de *design* dos elementos, ou estruturas, bem como suas disposições e arranjos físicos, constituem-se um determinante de vital importância para o enrijecimento de sistemas estruturais.

## 5 A GEOMETRIA NATURAL

### 5.1 Eficiência energética x eficiência geométrica

Se o objetivo da engenharia é sempre buscar o máximo de eficiência das estruturas, (que acarreta economia da utilização de material e, conseqüentemente, da energia contida na sua produção), pergunta-se de onde veio todo este conhecimento intuitivo e este aprendizado que possibilitaram a gerações consecutivas a proposição de inovações estruturais baseadas no desempenho em função da forma. Pode-se dizer que as primeiras estruturas que utilizaram ao máximo a geometria de seus elementos como forma de enrijecimento (usando e abusando das superfícies hiperbólicas) foram construídas num passado anterior ao aparecimento do homem e continuam sendo “construídas” até hoje pela “mãe natureza” (tanto nas estruturas orgânicas como nas inorgânicas). Não é raro encontrar tais superfícies hiperbólicas a todo momento, como nos galhos de árvores, numa folha, numa pétala de flor, em teias de aranha, etc.

A dupla curvatura dos HPs, por exemplo, está muito presente nas pétalas e folhas dos vegetais, pois permite uma maior estabilidade a elas para que se mantenham em balanço sob a ação do vento. Se fossem planas, por exemplo, provavelmente seriam mais espessas (consumindo mais matéria e conseqüentemente mais energia) para vencerem o mesmo vão, ou simplesmente seriam menores e com menos área exposta (FIG. 5.1).



a)

b)



c)

FIGURA 5.1 – **a)** Teia de aranha em conformação de Hiperbolóide **b)** As pétalas dos hibiscos são melhor estruturadas pela presença da dupla curvatura, assim como as folhas do boldo **c)** A dupla curvatura presente nas folhas de alface confere um enrijecimento de suas bordas  
FONTE - Arquivo pessoal.

A conformação da pétala do hibisco e da folha do boldo é análoga ao experimento da FIG. 4.2.



Todo conhecimento humano está intimamente ligado à observação e à vivência dos fenômenos que estão à sua volta, e sem dúvida nenhuma a observação da natureza serviu e vem servindo como fonte inspiradora de muitos que se propuseram a estudá-la. Os grandes inventores e cientistas buscaram na observação da natureza soluções e teorias para explicações e comprovações de muitas de suas teorias.

Um rápido e superficial olhar sobre a natureza pode ser que não revele a complexidade e a criteriosa engenhosidade na qual está estruturada, mas um olhar atento e pormenorizado e até mesmo microscópico, através de suas formas, padrões, geometrias, estruturas, arranjos e disposições, cor, textura etc, pode revelar valiosos segredos, que por muitas vezes já estão incorporados intuitivamente, porém ainda não compreendidos à luz da razão. Portanto, o estudo científico da natureza representa uma fonte eterna e inesgotável de conhecimentos para serem revelados.

Pode-se dizer que a natureza é infalível no seu propósito, tamanha a precisão e a complexidade em sua evolução, transformação e mutações que estão presentes em toda superfície do planeta, de uma forma harmônica e sincronizada. Seu rigor geométrico sempre busca a solução mais econômica energeticamente, seja no seu metabolismo ou “queima” energética, ou seja no emprego de sua matéria constituinte. Economia e eficiência são as palavras de ordem dos reinos mineral, vegetal e animal.

Segundo Tarragó<sup>1</sup>, a atividade construtiva do homem se inscreve dentro de um processo global de conformação e evolução através da observação da natureza, considerando os saltos qualitativos, que representam a intervenção da inteligência do homem através da história. O princípio da menor ação para o mundo inorgânico, e o princípio da economia das substâncias para o mundo orgânico representam as leis fundamentais que regem as estruturas da natureza, formuladas por Matila Ghyka que aborda os aspectos compositivos e construtivos, dos quais pode-se apresentar algumas citações:

---

<sup>1</sup> TARRAGÓ, 1977. p.36-40.

*“ ‘Esta economia de substância, realizada com um êxito extraordinário especialmente nas plantas, nos pássaros, nos animais corredores, deriva não de um princípio de mecânica comum, senão de uma necessidade teológica, a ‘luta’ contra o peso, para permitir as plantas alcançar a luz, os pássaros a voar e os animais a correr ou saltar. A Arquitetura Gótica tratou de uma maneira análoga o problema do empuxo vertical, luta contra o peso; realizando igualmente uma economia de material muito grande levando em consideração as grandes alturas alcançadas.’* <sup>2</sup>

*‘ C. CULMAN<sup>3</sup>, o fundador da Estática Gráfica, já havia destacado que os ossos humanos e animais se manifestam como um sistema, alcançando o máximo da resistência com o emprego mínimo de matéria; a disposição das células nas porções esponjosas dos ossos que tem que sustentar grandes esforços revelaram, por exemplo, os diagramas que a Estática Gráfica prevê precisamente, como curvas de resistência máxima à tração e flexão. O exame microscópico dos caules das plantas demonstra também que a problemática da máxima resistência com o mínimo de matéria pode ser resolvido mediante soluções que honrariam um bom engenheiro de estradas.’* <sup>4</sup> <sup>5</sup>

Ainda segundo Tarragó, pode-se dizer que a atividade construtiva humana, em termos gerais, busca este objetivo que se pode definir como o terceiro princípio da conformação das estruturas da natureza (os dois primeiros correspondem a princípios citados por Matila Ghyka) e que tem sido formulado repetidamente pelos construtores e teóricos mais importantes deste campo de conhecimento do qual pode-se destacar três citações:

*“ ‘... Lei de espiritualização, enfim o desejo (desideratum) tem como base o emprego da mínima quantidade de matéria, fazendo-a trabalhar uniformemente em todas as regiões e ao máximo de sua resistência.’* <sup>6</sup>

---

<sup>2</sup> GHYKA, 1927. p.172.

<sup>3</sup> Carlos Culmann, engenheiro alemão (1821 – 1881), criador da estática gráfica cujos princípios foram esboçados por Lamé em 1826.

<sup>4</sup> GHYKA, 1927. p.172.

<sup>5</sup> TARRAGÓ, 1977. p.40.

<sup>6</sup> CARDELLACH, 1910. p.16.

*'... Mas se nós quisermos julgar as estruturas segundo sua eficácia, teremos que estabelecer que só haverá valor, se com uma inversão no emprego mínimo de matéria ou energia, pudermos proporcionar o maior rendimento possível.'*<sup>7</sup>

*'... A história das estruturas mostra uma clara tendência de cobrirmos maiores espaços, com o emprego de menos material.'*<sup>8</sup> ”<sup>9</sup>

## **5.1 A coordenação modular na natureza**

*“Sobre o uso de estruturas do tipo colméia Gabriel cita Frank Lloyd Wright: ‘Estou convencido de que um corte transversal em uma colméia apresentará mais fertilidade e flexibilidade no que diz respeito ao movimento humano do que um quadrado. O ângulo obtuso (120 graus) é mais apropriado ao movimento humano de ir e vir do que o ângulo reto. Este fluxo e movimento são, neste tipo de design, uma característica que se presta de forma admirável à vida como ela deve ser vivida nele.’ O próprio Gabriel conclui: ‘Na arquitetura, é necessário que se distinga o que é feito por uma boa razão daquilo que é feito por força do hábito.’ Cômodos ortogonais são simplesmente o resultado de hábito; abandoná-los é um sacrifício que não gera perdas. Cômodos ortogonais baseados em vigas e colunas verticais são instáveis e demandam juntas rígidas e outros tipos de suporte; e construir colunas verticais interiores acima de um cômodo grande sobre um chão mais baixo é um trabalho difícil. Mas, como sintetiza Gabriel, tais dificuldades podem ser bastante minimizadas com colunas oblíquas – substituindo-se a matriz quadrada instável por uma matriz rígida triangular.”*<sup>10</sup>

Da mesma forma que foi observado no capítulo anterior, a natureza também “brinca” com módulos e malhas. Apresenta-se a seguir uma série de imagens, em que estes conceitos estarão explicitamente demonstrados (FIG. 5.2 a 5.8).

---

<sup>7</sup> HELCKE & OTTO, 1969. (F. Otto elaborou um conceito mais amplo de “estruturas mínimas” em ROLAND, 1973. p.3.)

<sup>8</sup> Felix Candela, prólogo do livro ROLAND, 1973. p.v.

<sup>9</sup> TARRAGÓ, 1977. p.40.

<sup>10</sup> ROBBIN, 1996. p.93-95. (Tradução de Litany Pires Ribeiro).



FIGURA 5.2 – Modulação no abacaxi  
 FONTE - Arquivo pessoal.

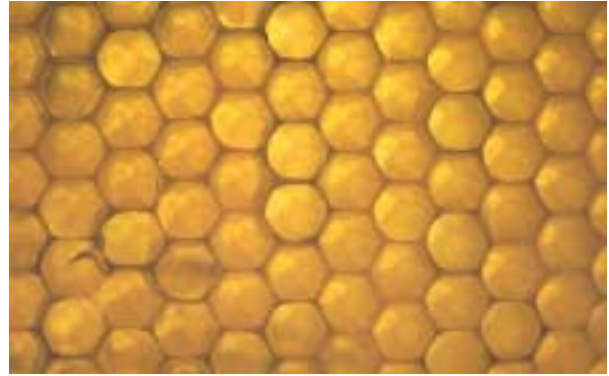


FIGURA 5.3 – Malha hexagonal nas colméias  
 FONTE - NEILL, 1993.p.76.



FIGURA 5.4 – Modulação na cana do mato  
 FONTE - JOBIM, 1991. p.78.



FIGURA 5.5 – Modulação no milho indiano  
 FONTE - NEILL, 1993. p.79.



FIGURA 5.6 – Padrões modulares organizados por malhas  
 FONTE - NEILL, 1993. p.52.



FIGURA 5.7 – Malha e modulação nas escamas de cobra  
 FONTE - NEILL, 1993. p.88.



FIGURA 5.8 – Modulação nas pétalas da agave  
FONTE - NEILL, 1993. p.25.

A mesma malha estrutural, por exemplo, pode permitir vários arranjos ou composições naturais. Porém, muitas vezes chegando a um grande refinamento e a uma sofisticação, que extrapola a capacidade de apreensão da lógica humana, exigindo-nos auxílio muitas vezes de ferramentas computacionais (FIG. 5.9 a 5.15).

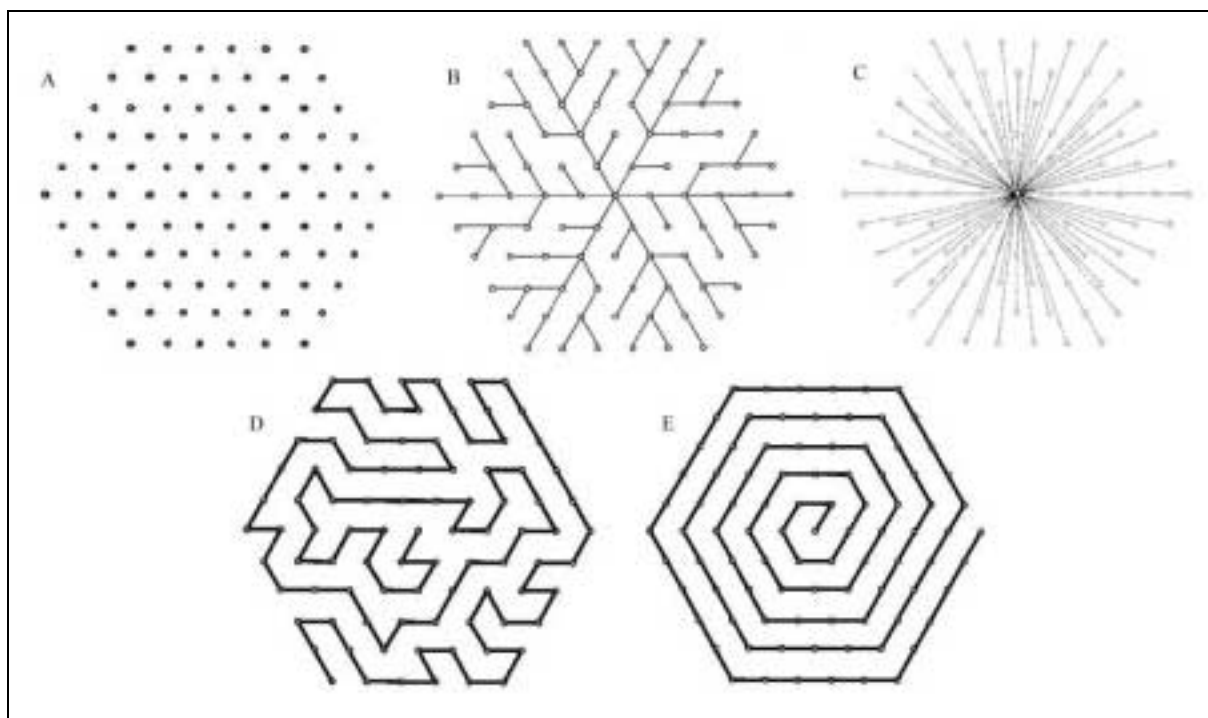


FIGURA 5.9 – Variações sobre a mesma malha, ou os mesmos princípios  
FONTE - NEILL, 1993. p.60, 49, 61.

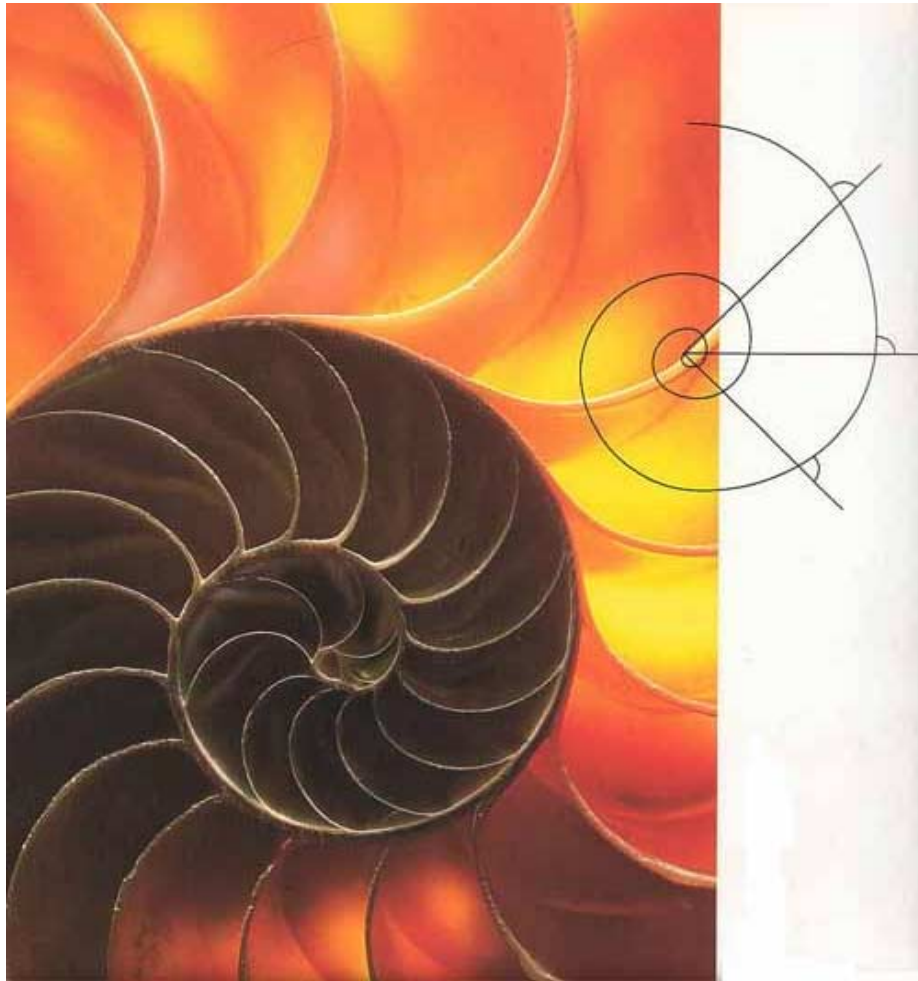


FIGURA 5.10 – Espiral da concha do náutilus  
FONTE - NEILL, 1993. p.20.

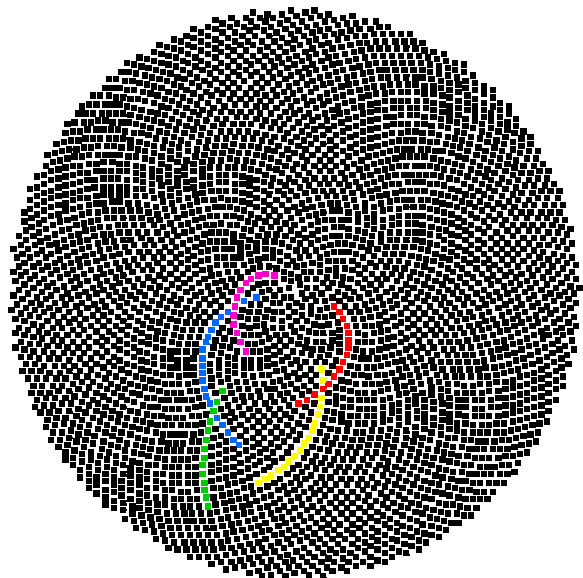


FIGURA 5.11 – Espiral na margarida  
FONTE - Disponível em: <<http://www.mcs.surrey.ac.uk/Personal/R.Knott/Fibonacci/fibnat.html>>. Acesso em: 24 mar. 2003. Crédito fotográfico de Tim Stone.

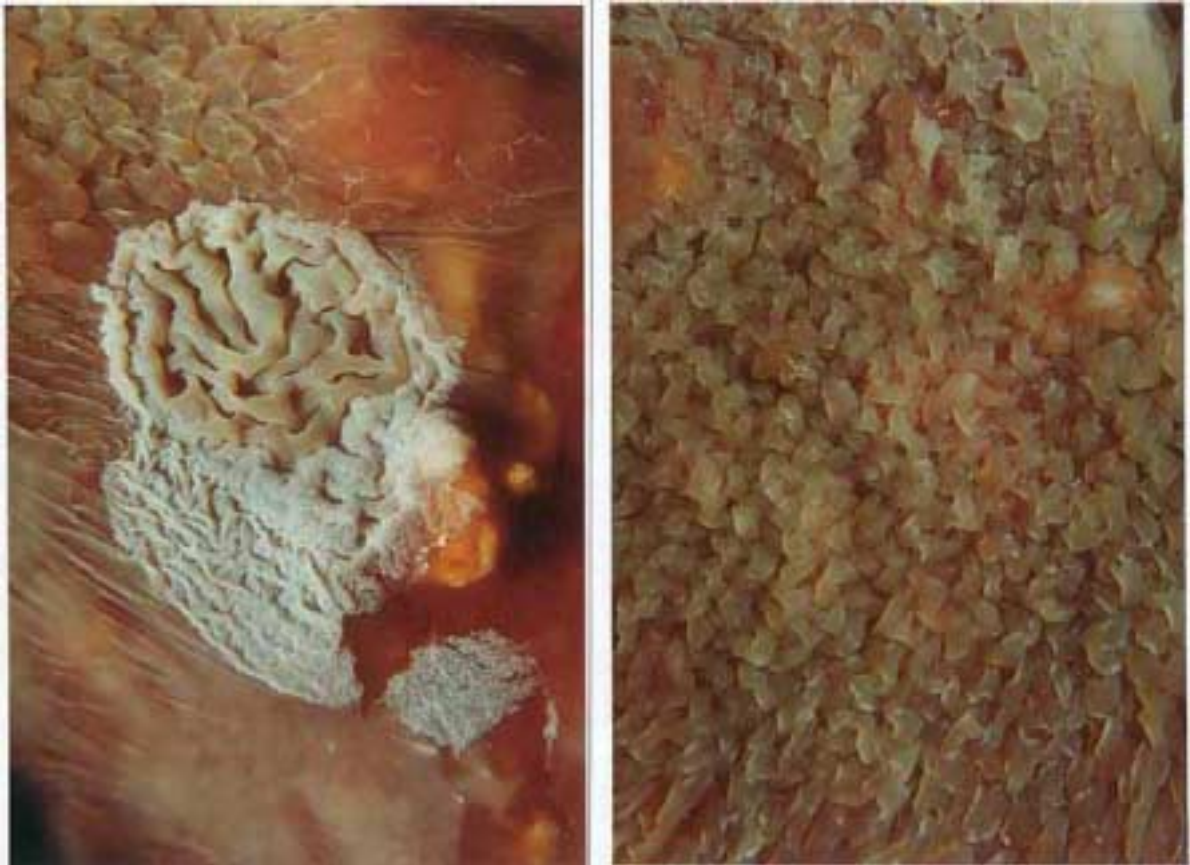


FIGURA 5.12 – Cultura de fungos sobre gordura talhada seguindo padrões modulares  
FONTE - Arquivo pessoal.

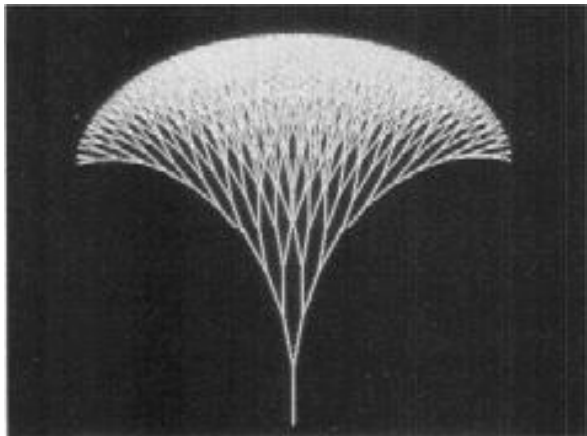


FIGURA 5.13 – Princípio de ramificação binária no reino vegetal  
FONTE - Disponível em: <[http://www.rsch.tuis.ac.jp/~naka/naka/scola/member/chapter4\\_html/024.gif](http://www.rsch.tuis.ac.jp/~naka/naka/scola/member/chapter4_html/024.gif)>.  
Acesso em: 24 fev. 2002.

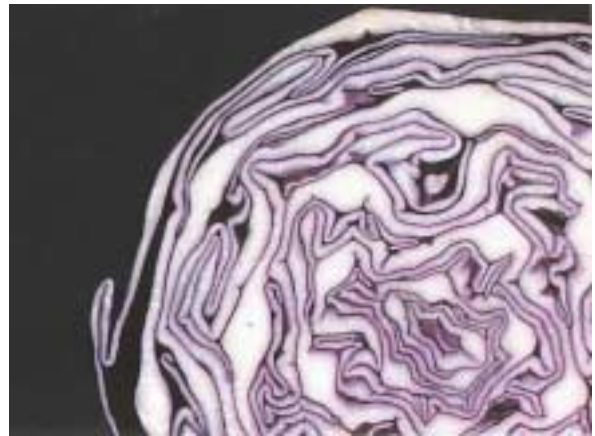


FIGURA 5.14 – Padrões no corte do repolho  
FONTE - DESIGN, 1993.

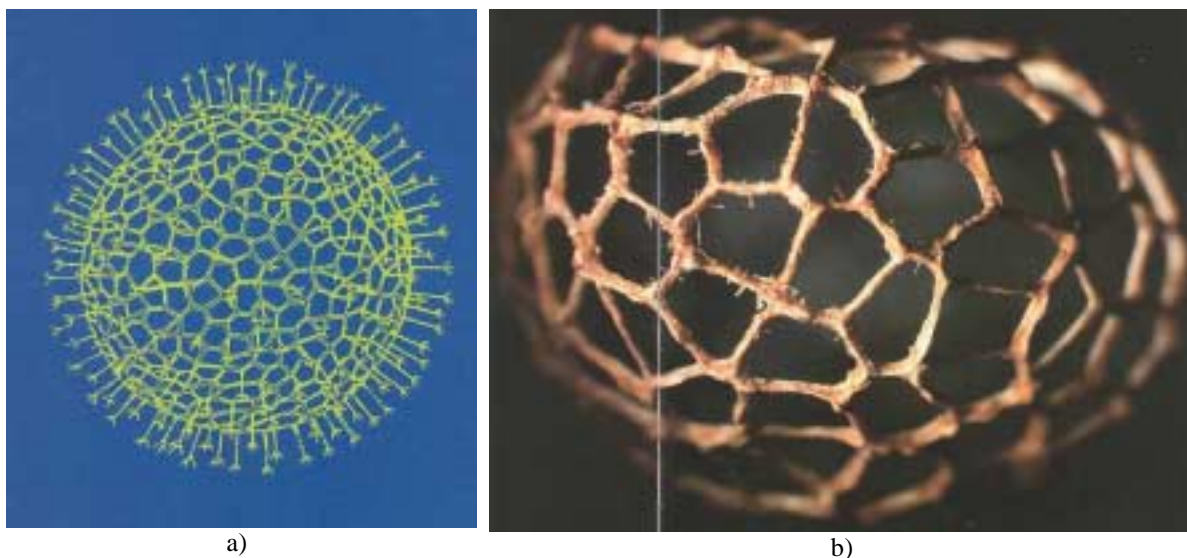


FIGURA 5.15 – Estruturas geodésicas naturais  
 FONTE - a) DESIGN COME, 1993. p.4 b) DESIGN COME, 1993. p.4.

Alguns exemplos até podem parecer aleatórios e caóticos mas todos eles seguem um determinado padrão (FIG. 5.16 a 5.18). Certos ramos da ciência, como a teoria do caos, a teoria fractal, estudam esses aspectos.

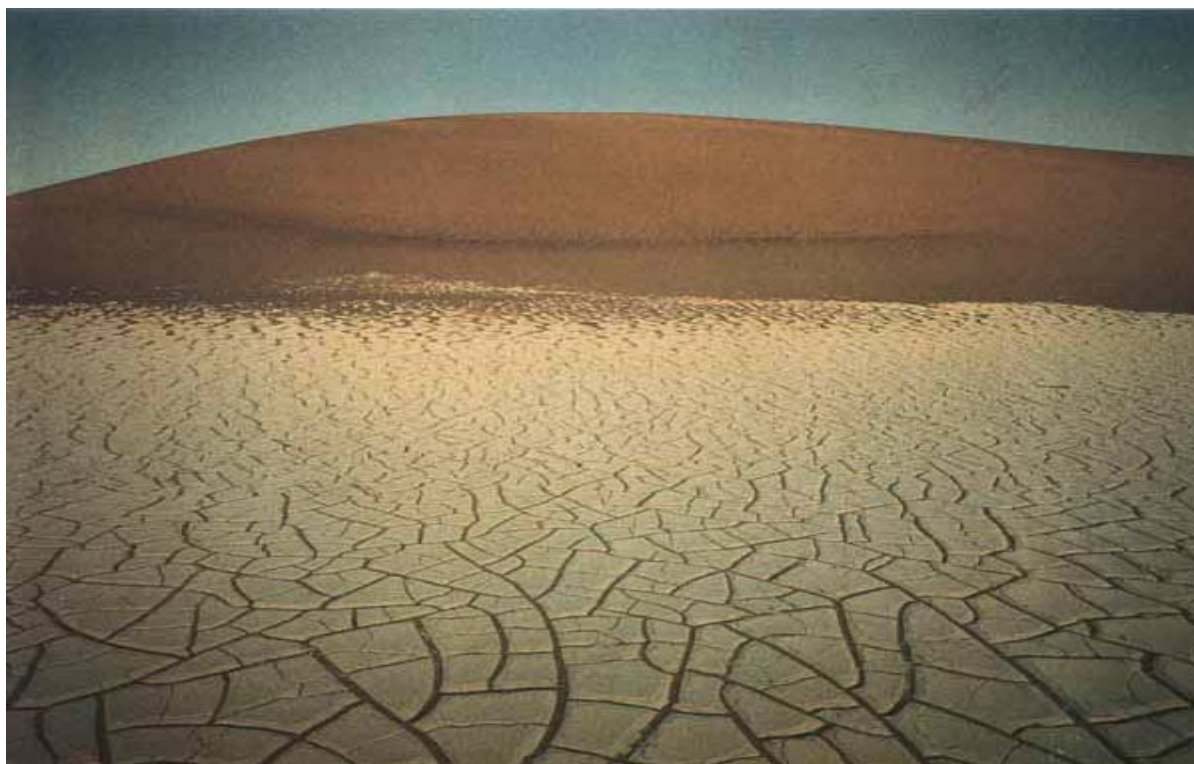


FIGURA 5.16 – A irregularidade nas dunas também segue padrões  
 FONTE - NEILL, 1993.p.84.



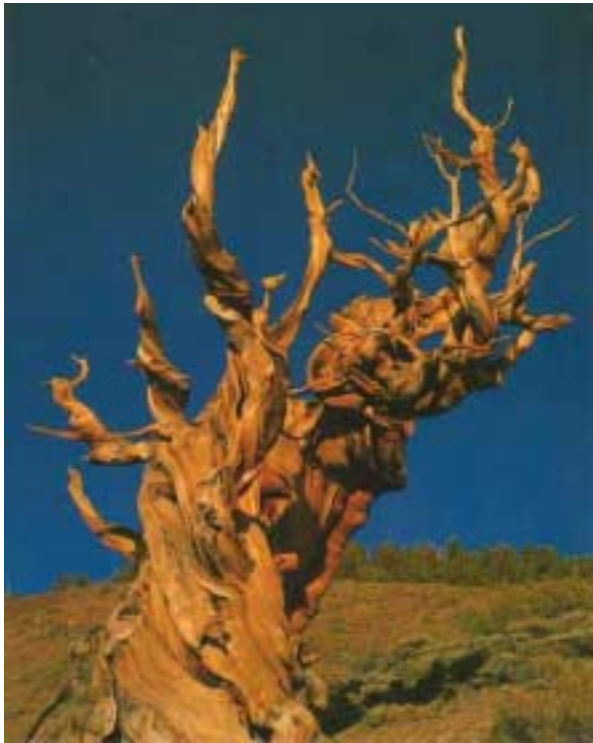


FIGURA 5.17 – Galhos das árvores aparentemente aleatórios  
FONTE - NEILL, 1993. p.27.



FIGURA 5.18 – Modulação das formações rochosas  
FONTE - VASCONCELOS, 2000. p.57.

Este conceito de modulação das malhas, sejam elas homogêneas ou não, em progressões aritméticas, ou geométricas, etc, sempre será encontrada na natureza, pois ela “trabalha” com um princípio fundamental que é a busca pelo padrão ou padrões.

Curiosamente da mesma forma, toda tentativa para se viabilizar industrialmente a produção de qualquer objeto deverá, antes de tudo, analogamente à natureza, buscar os princípios que definem estes padrões.

Se a estrutura humana for analisada como um produto industrial, será observado que tamanha sofisticação e particularidade de seus “componentes” provavelmente inviabilizariam economicamente a sua “produção”. Levando em consideração que os seres humanos têm simetria em relação à um eixo vertical, o máximo de repetitividade encontrada, é em número 2, e mesmo assim de uma forma espelhada, o que caracteriza que cada uma das “peças” é praticamente exclusiva. Imagine-se todo o esforço que seria necessário para se produzir formas para cada uma delas.

Mas como o ser humano não é um único no planeta, a natureza sabiamente os “banalizou” como um produto em série, para viabilizar a “construção” da raça humana. É claro que cada ser humano como indivíduo é único, mas pode-se grosseiramente afirmar que a sua terceira vértebra, por exemplo, é igual à de qualquer uma da de sua espécie. Isso quer dizer que são análogos à pré-fabricação, pois constituem, e são constituídos, de módulos que seguem padrões da natureza.

Em resumo, a natureza trabalha com **Coordenação Modular**, e esta é a grande lição.

## 5.1 Geometria Fractal

*“Como é possível se descrever com precisão o escarpamento do cume de uma montanha, as formas onduladas e espiraladas de uma nuvem, ou o intrincado desenho dos galhos de uma árvore?”*

*A geometria clássica – com suas curvas suaves e linhas retas – não é capaz de absorver as formas irregulares da natureza. Nos meados de 1970, Benoit B. Mandelbrot, um matemático que trabalhava no Centro de Pesquisas T. J. Watson da IBM, desenvolveu uma geometria capaz de analisar e quantificar as encostas, os ondamentos, as espirais e as ramificações da natureza. A esta nova vertente da matemática ele deu o nome de geometria fractal, nome originado do Latim fractus, que significa “fraturado, fragmentado ou quebrado.” Desde então, cientistas e matemáticos têm usado os fractais para buscar uma ordem nas estruturas naturais que haviam, por muito tempo, desafiado a análise.*

*Nem toda forma irregular é um fractal. Para que se encaixe nesta categoria, uma forma deve apresentar o que Mandelbrot chamou de auto-semelhança, o que quer dizer que os detalhes devem ser muito similares ao todo. Um litoral rochoso é um exemplo clássico de padrão fractal. Tome uma fotografia aérea de um litoral e amplie uma seção desta foto dez vezes. A figura resultante será ainda a de um litoral – uma linha sinuosa com baías e promontórios. Agora tome uma seção desta foto ampliada e amplie-a novamente; o resultado será ainda bem parecido com a foto original em escala total. Após várias ampliações, a linha denteada do litoral ainda parecerá ser a mesma.*

*As mensurações do comprimento deste mesmo litoral ainda revelam outra característica dos fractais. No caso dos fractais, comprimento deixa de ser uma simples medida – o comprimento do fractal dependerá do padrão usado para medi-lo. Suponha que você tenha medido o litoral com imagens de satélite. Você obteria uma determinada resposta. Se você medisse toda a extensão do litoral com suas próprias mãos, de joelhos, usando uma régua, o resultado seria um número bem maior – porque você mediu minúsculas baías, as quais o satélite não foi capaz de detectar. Se você seguisse uma formiga em seu percurso ao longo de cada pequena reentrância do litoral, o resultado obtido seria um número ainda maior. Os litorais, como quaisquer outras formas fractais, têm reentrâncias, sobre reentrâncias. Seu comprimento dependerá do tamanho das reentrâncias que se está medindo.*

*Os matemáticos descobriram um sistema para ser utilizado quando se fala em fractais. Para se quantificar as reentrâncias e irregularidade de um fractal, os matemáticos lhe atribuíram um valor numérico conhecido como dimensão fracionária ou fractal. Basicamente a dimensão fracionária é uma forma de mostrar até que ponto uma determinada forma ou linha preenche um espaço. Segundo os matemáticos, um linha reta tem uma dimensão, a superfície plana tem duas dimensões, e um sólido tem três dimensões. Uma linha irregular, como a linha que representa o litoral da Califórnia, recebe dimensões fracionárias de aproximadamente 1.3 – que preenche mais espaço que uma linha reta, mas que realmente não preenche uma superfície plana. Se o litoral fosse ainda mais irregular, suas dimensões fracionárias ficariam próximas de 2; se fosse mais reta, a dimensão fracionária ficaria perto de 1.*

*A análise da geometria fractal das forma naturais levou à criação de fractais forjados, ou seja, imagens geradas por computador que se assemelham às formas do mundo real. O computador gera uma imagem fractal da mesma forma que um pedreiro constrói um muro de tijolos. As instruções recebidas pelo pedreiro podem ser resumidas de forma bem simples: coloque uma camada de tijolos, outra camada sobre a primeira, desencontrando os tijolos, e repita a operação até que o muro esteja pronto. No âmago de qualquer fractal gerado por computador reside uma fórmula matemática similar. O computador faz um cálculo e marca um ponto, depois transfere o resultado do primeiro cálculo para os próximos pontos e repete o cálculo. Centenas de milhares de cálculos irão compor a imagem fractal. A precisão de uma imagem dependerá da fórmula matemática empregada.*

*Com o uso de diferentes fórmulas, os computadores têm gerado imagens que se assemelham a paisagens, nuvens e árvores. Estas criações demonstram que estruturas complexas e irregulares podem ser geradas por meio de uma simples repetição de uma escala após a outra.”<sup>1</sup>*

A seguir algumas imagens para uma melhor compreensão destes conceitos de auto-similaridade e também da íntima relação da geometria fractal com as malhas e modulações extremamente complexas, possíveis de se obter apenas com o auxílio de cálculos computacionais. Compreendendo melhor esses conceitos, aproxima-se da lógica industrial, que almeja sempre a busca de padrões, mas utiliza-se da criatividade (FIG. 5.19 - FIG. 5.26).

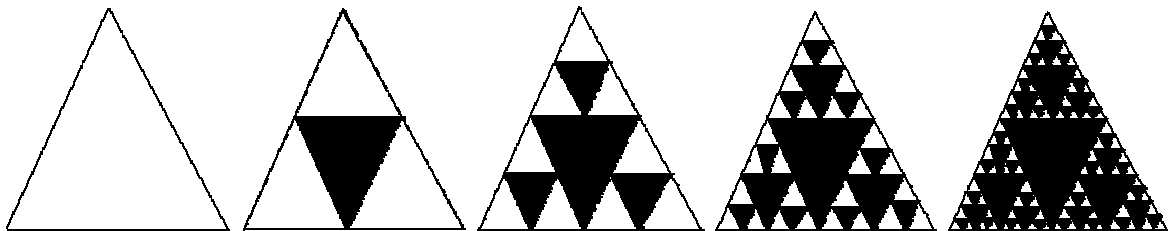


FIGURA 5.19 – Princípio de semelhança

FONTE - Disponível em: <<http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm2000/icm24/dimensaofracionaria.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2003. dimens4.gif – dimens8.gif.

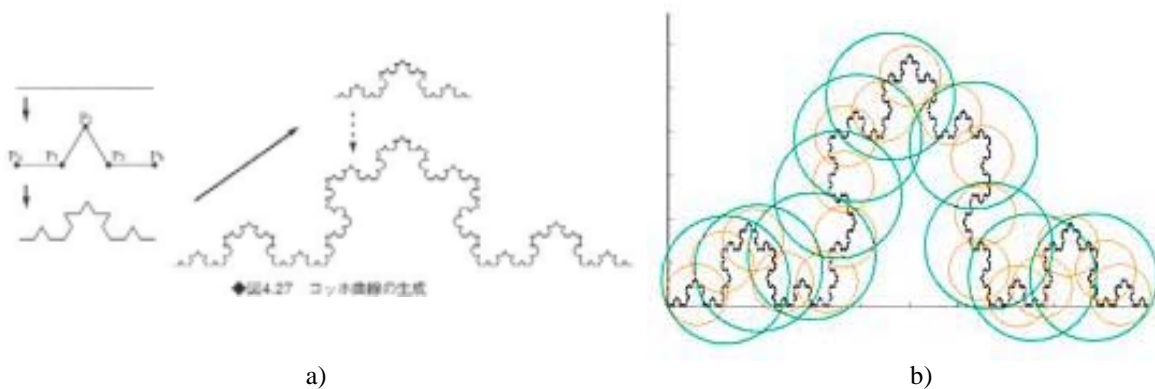


FIGURA 5.20 – Princípio de semelhança

FONTE - a) Disponível em: <[http://www.rsch.tuis.ac.jp/~naka/naka/scola/member/chapter4\\_html/025.gif](http://www.rsch.tuis.ac.jp/~naka/naka/scola/member/chapter4_html/025.gif)>. Acesso em: 24 fev. 2002 b) Disponível em: <<http://coco.ccu.uniovi.es/geofractal/capitulos/01/01-02.shtm>>. Acesso em: 24 fev. 2002

<sup>1</sup> NEILL, 1993. p.92-93. (Tradução de Litany Pires Ribeiro).

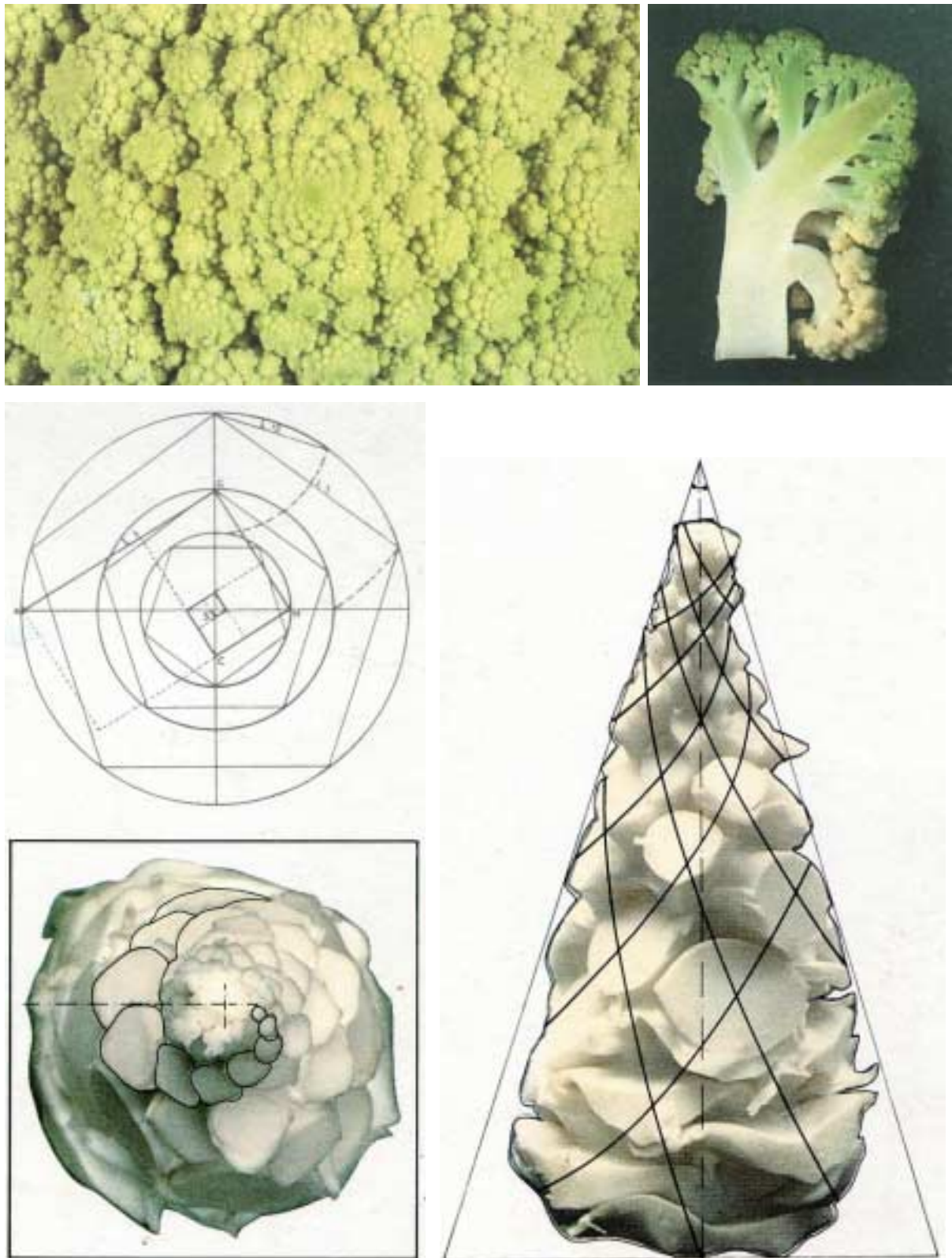


FIGURA 5.21 – Princípios geométricos e de semelhanças da couve flor  
FONTE - DESIGN, 1993. Investigação de Carmelo di Bartolo, Cynthia Carmenaty e Sharona Greenwald.

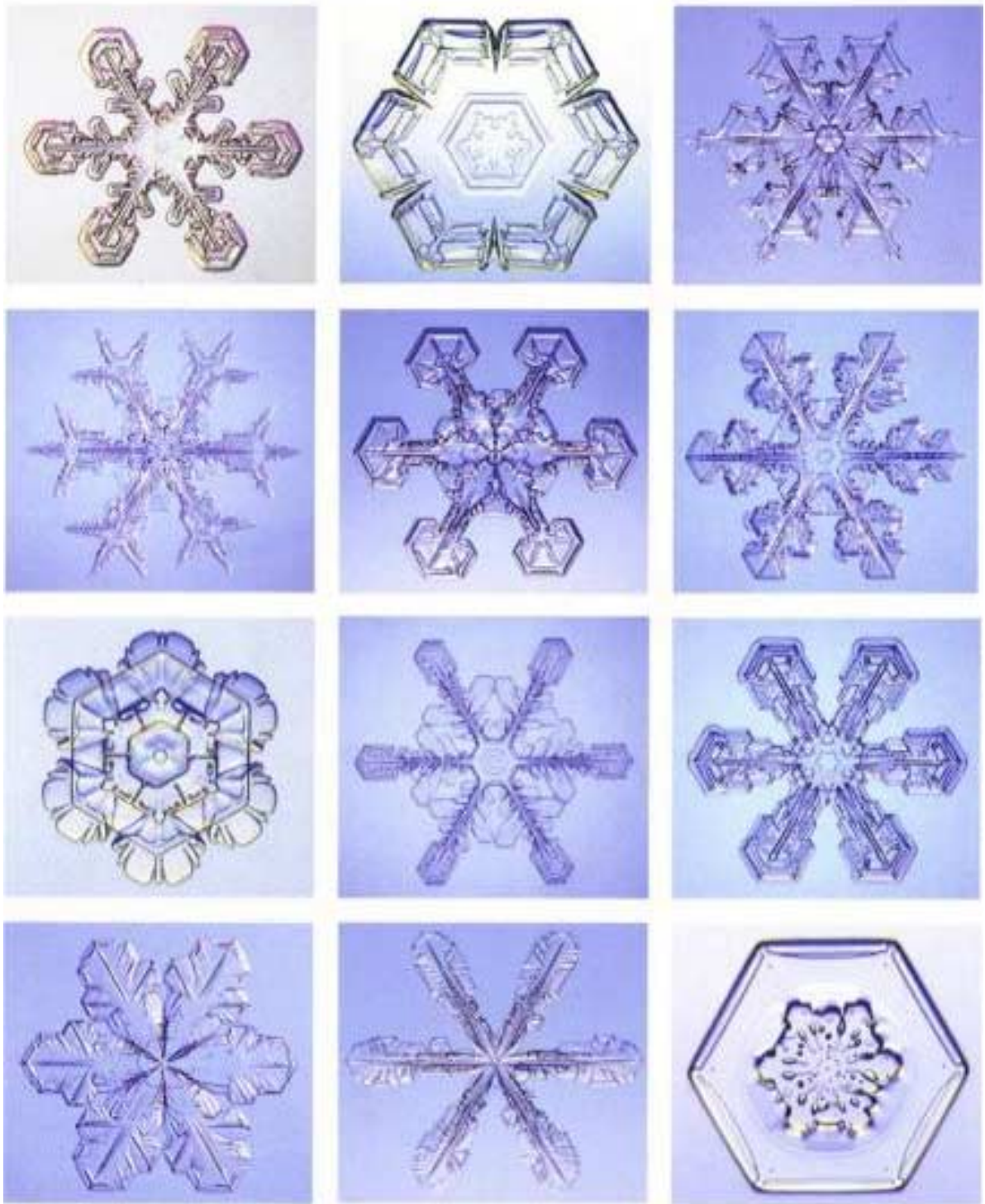


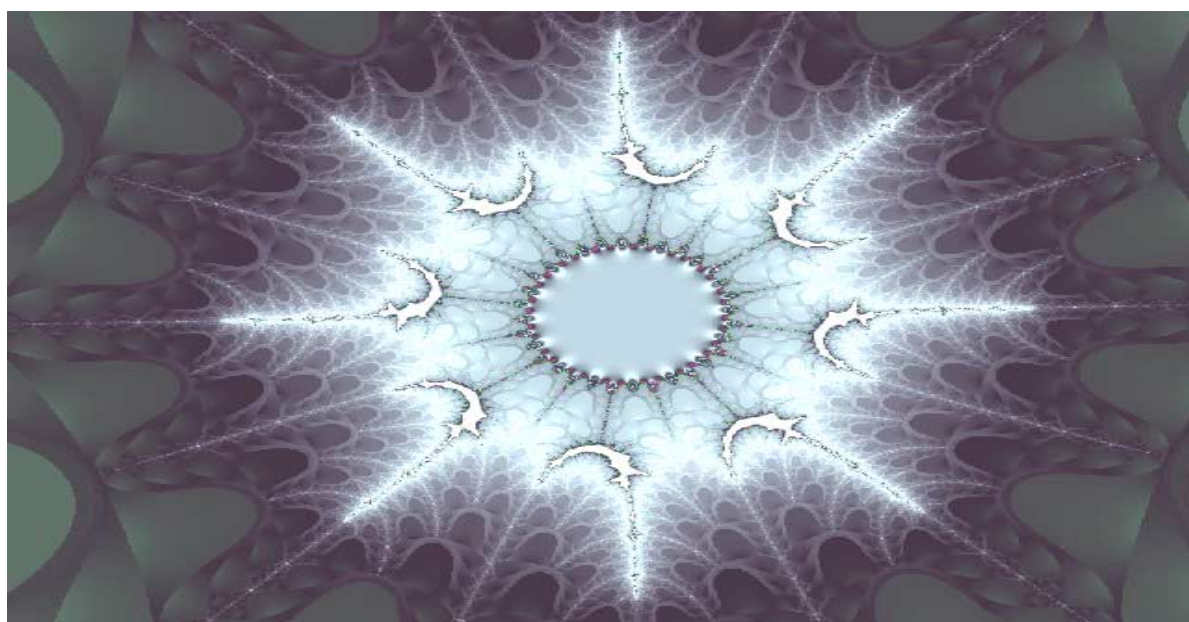
FIGURA 5.22 – Embora tenham a mesma malha triangular, os flocos de neve são sempre diferentes um do outro  
FONTE - Disponível em: <<http://www.its.caltech.edu/~atomic/book/book2.jpg>> - Acesso em: 24 nov. 2003.



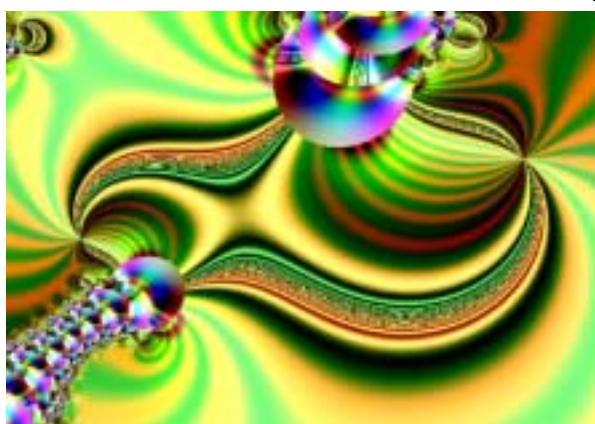
FIGURA 5.23 – Princípio de semelhança na folha  
 FONTE - NEILL, 1993. p.94.



FIGURA 5.24 – Princípio de semelhança nos galhos  
 FONTE - NEILL, 1993. p.104.



a)



b)



c)

FIGURA 5.25 – Formas geradas por computador através da geometria fractal  
 FONTE - a) Disponível em: <<http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm2000/icm24/frac5.htm>>. Acesso em 20/11/2003  
 b) Disponível em: <<http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm2000/icm24/fract17.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2003  
 c) Disponível em: <<http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm2000/icm24/fract33.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2003.

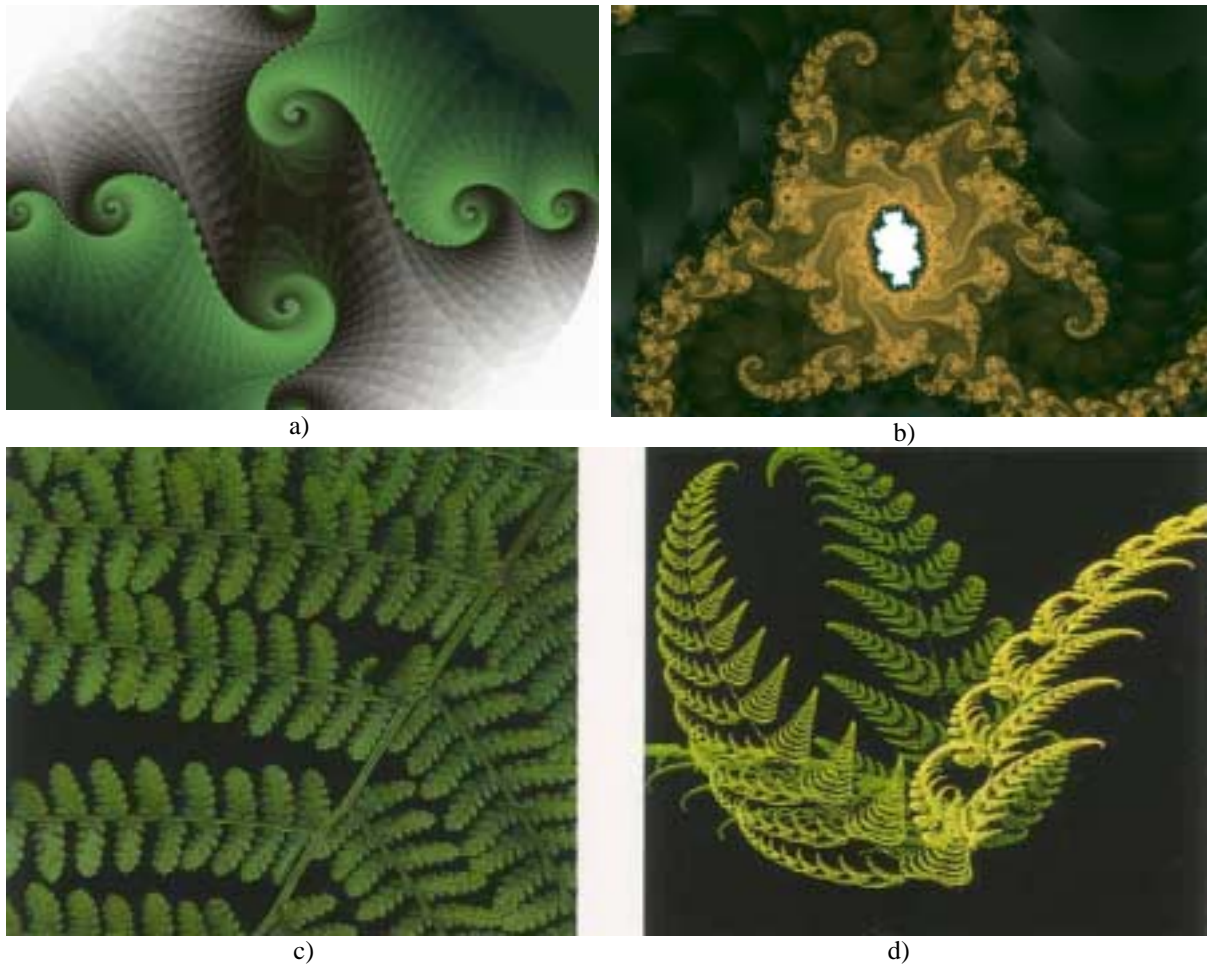


FIGURA 5.26 – Formas geradas por computador através da geometria fractal  
 FONTE - a) Disponível em: <<http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm2000/icm24/fract15.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2003 b) Disponível em: <<http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm2000/icm24/fract29.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2003 c),d) NEILL, 1993. p.15.

## 5.1 Design x natureza

De acordo com Yopanan Rebello:

*"Em outras áreas do conhecimento humano, o estudo sério de como a natureza resolve seus problemas de subsistência tem levado o ser humano a inventar, ou melhor, a reproduzir soluções naturais, construindo nos mais diversos tipos de objetos úteis para nossa existência. Infelizmente, nas áreas da arquitetura e da engenharia civil, essas analogias são vistas com certa desconfiança e, por isso, muitas das soluções formais estruturais que a natureza nos apresenta são simplesmente desconsideradas."*<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> REBELLO, 2000. p.199.



No entanto existem exceções. O arquiteto Gaudí foi um dos difusores e talvez o precursor dessas analogias, pois trabalhou exclusivamente com princípios da natureza na maioria de seus projetos. Mostra-se a seguir alguns exemplos de arquitetura em que formas e princípios da natureza estarão presentes. Inicia-se com Gaudí, apresentando alguns dos princípios construtivos de suas obras (FIG. 5.27 - 5.39) em seguida tem-se outros exemplos de diversos arquitetos (FIG. 5.40 - 5.49).

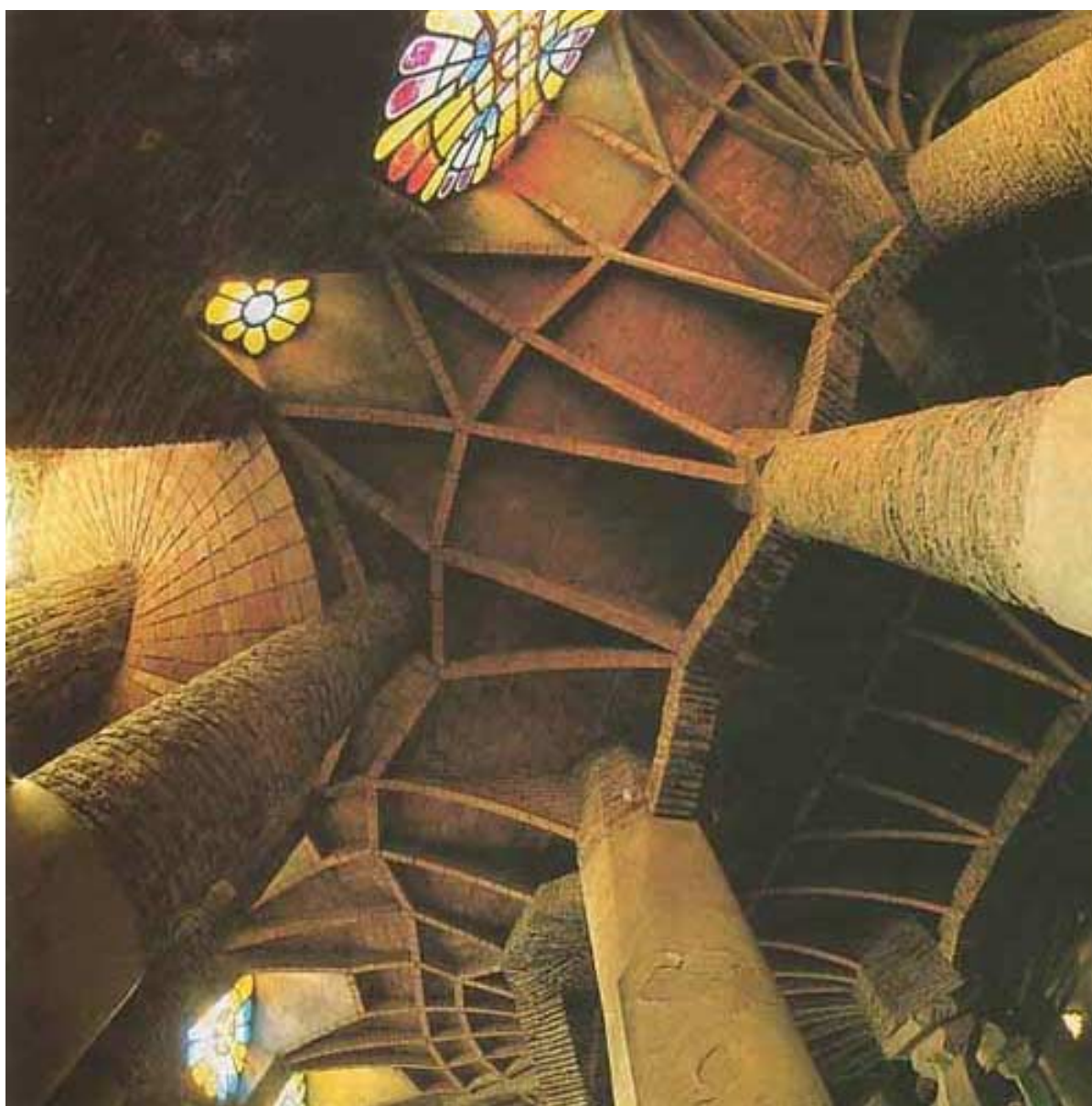


FIGURA 5.27 – Teto da cripta da igreja da colônia Güell em Barcelona, estruturada por nervuras e elementos inclinados

FONTE - RUTAS DEL MODERNISMO, 1995. p.10.

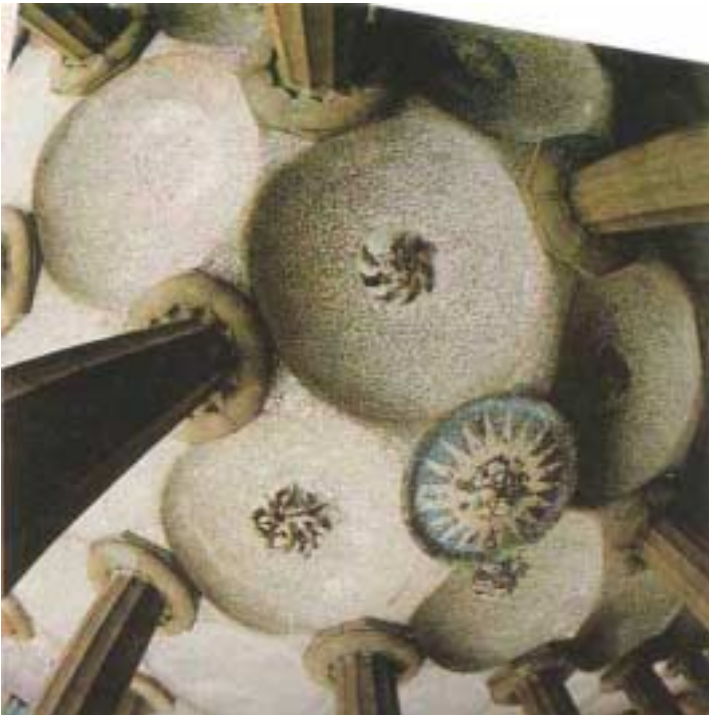


FIGURA 5.28 – Maquete do esquema estrutural do terraço/cobertura do Parque Güell

FONTE - Arquivo pessoal.



a)



b)

FIGURA 5.29 – Vista dos pilares e teto sob terraço do Parque Güell

FONTE - a) Arquivo pessoal b) RUTAS DEL MODERNISMO, 1995. p.2.



FIGURA 5.30 – Maquete do esquema estrutural na fachada da Casa Milá (La Pedrera)

FONTE - Arquivo pessoal.

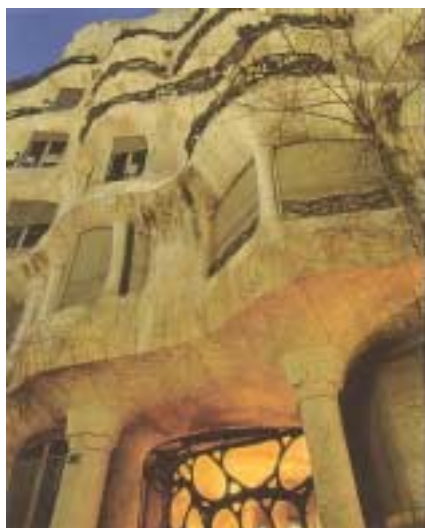


FIGURA 5.31 – Fachada da Casa Milá (La Pedrera)

FONTE - Calendário 2000. *La Barcelona de Gaudi*. Textura Ediciones. S.L.1999. FOTOGRAFIA: Miguel Raurich.



FIGURA 5.32 – Maquete do esquema estrutural do piso da Casa Milá (La Pedrera)

FONTE - Arquivo pessoal.



FIGURA 5.33 – Fachada da igreja da Sagrada Família  
 FONTE - Cartão postal. *Barcelona* N° 64. V.C.Ed. y Distr. FABREGAT.

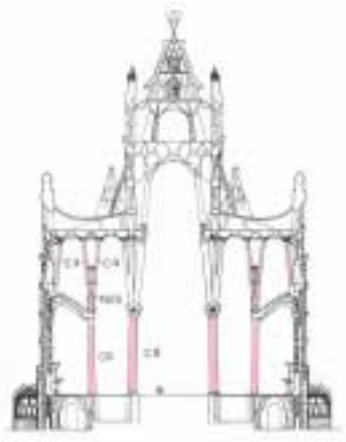


FIGURA 5.34 – Corte transversal pela nave central a ser construída  
 FONTE - GÓMEZ, 1996. p.106.



FIGURA 5.35 – Maquete da nave central a ser construída  
 FONTE - Arquivo pessoal.

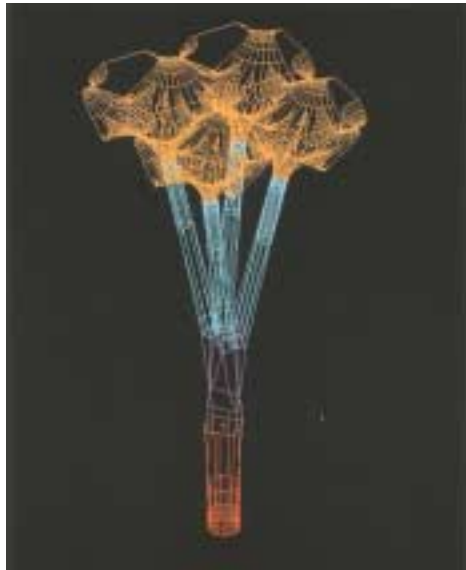


FIGURA 5.36 – Desenho em CAD das etapas para finalização dos pilares indicados na FIG. 5.34  
 FONTE - GÓMEZ, 1996. p.135,156.



FIGURA 5.37 – Modelo em gesso do capitel dos pilares em escala real  
 FONTE - GÓMEZ, 1996. p.157.

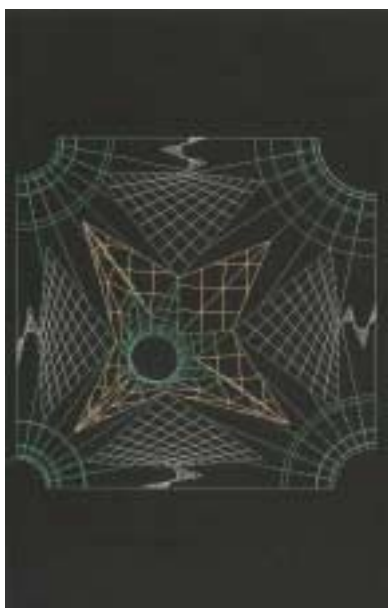


FIGURA 5.38 – Desenhos em CAD da planta do capitel dos pilares mostrando as linhas estruturadoras e “topográficas” de sua superfície  
 FONTE - GÓMEZ, 1996. p.153.

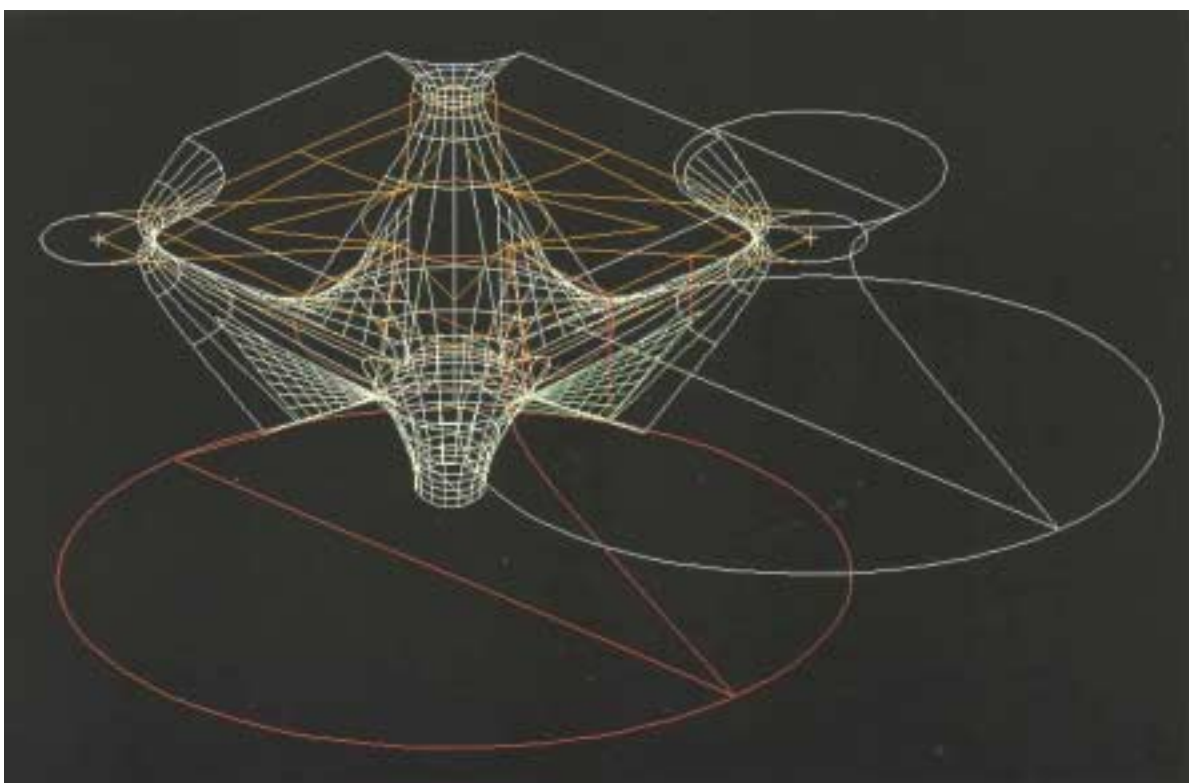
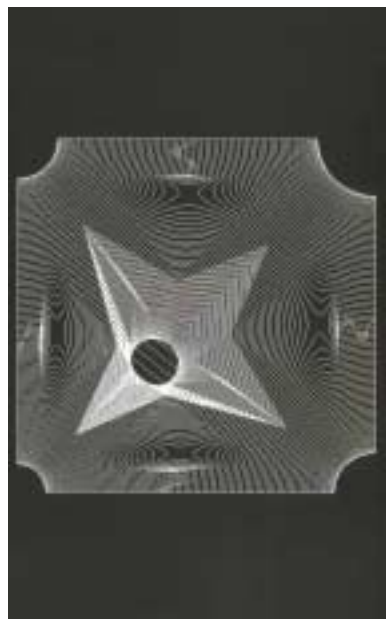


FIGURA 5.39 – Esquema em CAD das operações geométricas para obtenção da volumetria dos capitéis dos pilares  
 FONTE - GÓMEZ, 1996. p.151.



FIGURA 5.40 – Fachada Norte de residência em Los Altos, Califórnia projetada por Bart Prince Engineering Associates, structural engineers. 1980-1983  
FONTE - PRINCE, 1986. p.41.



FIGURA 5.41 – Vista interna  
FONTE - PRINCE, 1986. p.44.



FIGURA 5.42 – Fachada Sul  
FONTE - PRINCE, 1986. p.41.

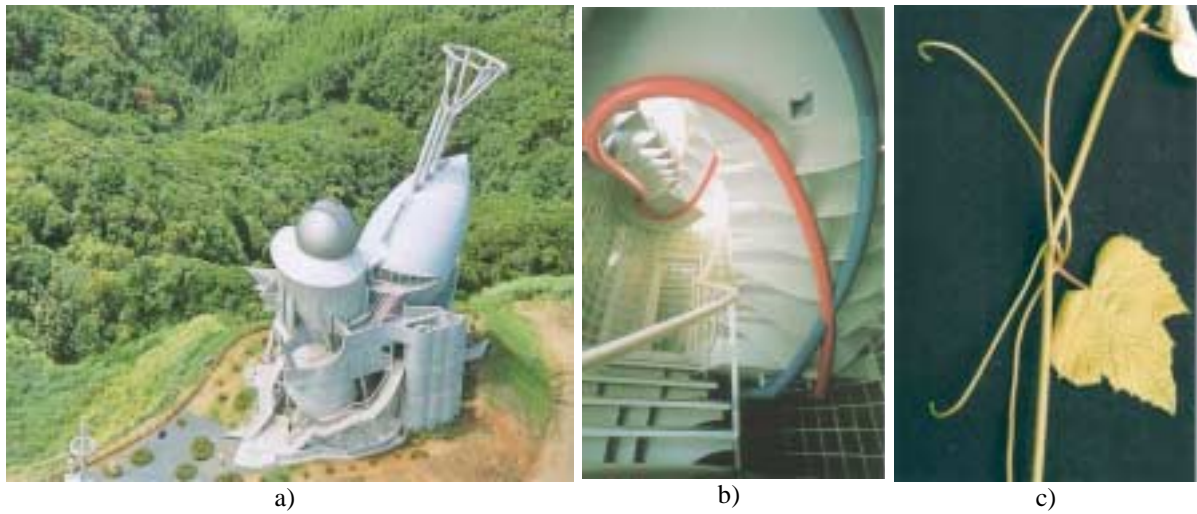


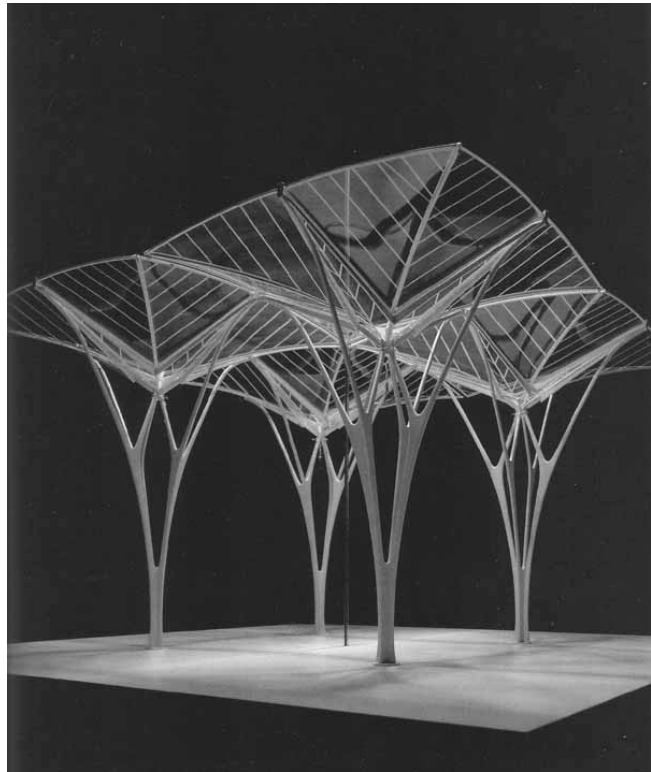
FIGURA 5.43 – a) Museu Astronômico de Kihoku, Japão, projetado pelo arquiteto organicista Masaharu Takasaki b) Vista inferior da caixa de escada do edifício Crystal Light, do mesmo arquiteto - Tóquio, Japão c) Gavinhas de videira, em analogia com a estrutura tubular da escada ao lado  
 FONTE - a) TAKASAKI, 1996. p.16 b) TAKASAKI, 1996. p.3 c) Arquivo pessoal.



FIGURA 5.44 – Vista interna do aeroporto de Stuttgart, Alemanha, projetado pelo escritório Gerkan, Marg+Partners  
 FONTE - MEYER, 2002. p.118.



a)



b)



c)

FIGURA 5.45 – Coberturas projetadas por Santiago Calatrava **a)** Dossel entre edifícios BCE Place, Toronto, Canadá. 1987-1992 **b)** Maquete de cobertura para Bauschänzli restaurante - Zurique, Suíça. 1988 **c)** Aeroporto / estação ferroviária projetado por Santiago Calatrava para Lyons, França, 1989-1994  
FONTE - TZONIS, 2001. p.84. b) TZONIS, 2001.p.91. c) TZONIS, 2001. p.157.





FIGURA 5.46 – Estação ferroviária Oriente projetada por Santiago Calatrava em Lisboa, Portugal, 1993-1998  
FONTE - TZONIS, 2001. p.195.



FIGURA 5.47 – Estádio Big Swan (Grande Cisne) projetado pela Nikken em Niigata, Japão. 1997-2001  
FONTE - COSTA, 2002. p.28,29.



a)



b)



c)



d)

FIGURA 5.48 – a), b) Sede da Swiss Re (“*Erotic Gherkin*”) projetado por Sir Norman Foster, Londres, 1997-2003 c) Detalhe da fixação da esquadria da Swiss Re d) Analogia com estrutura e modulação da flor do antúrio  
FONTE - a) Disponível em: <[http://www.artofthestate.co.uk/images/swiss\\_re\\_tower.jpg](http://www.artofthestate.co.uk/images/swiss_re_tower.jpg)>. Acesso em: 21 nov. 2003 b) Disponível em: <[http://www.30stmaryaxe.co.uk/pix/loc/img07\\_large.jpg](http://www.30stmaryaxe.co.uk/pix/loc/img07_large.jpg)> Acesso em: 21 nov. 2003 c) disponível em: <<http://jobs.blue-tank.com/2002JO30STM01/uploads/images/7large.jpg>> Acesso em: 21 nov. 2003 d) Arquivo pessoal.



FIGURA 5.49 – Projeto de João Filgueiras Lima (Lelé) para capela de São José de Ribamar, Maranhão, 1997

FONTE - Fotos gentilmente cedidas por Esequias Souza de Freitas.

Na área do *design* de objetos, embalagens, etc, essa influência da natureza da natureza pode ser percebida com mais freqüência, pois não é raro para esses profissionais buscarem na compreensão da mesma solução de *design*, seja como fonte inspiradora para a criatividade, ou em decorrência da indústria estar sempre buscando economias significativas em sua matéria-prima. Neste caso, é preferível gastar mais no projeto de um bom *design*, e até mesmo em tempo para elaboração de pesquisas, já que tal investimento reverterá em vantagens na economia de material, nos processos de fabricação e num melhor apelo visual aos seus consumidores. (FIG. 5.50 - 5.59)

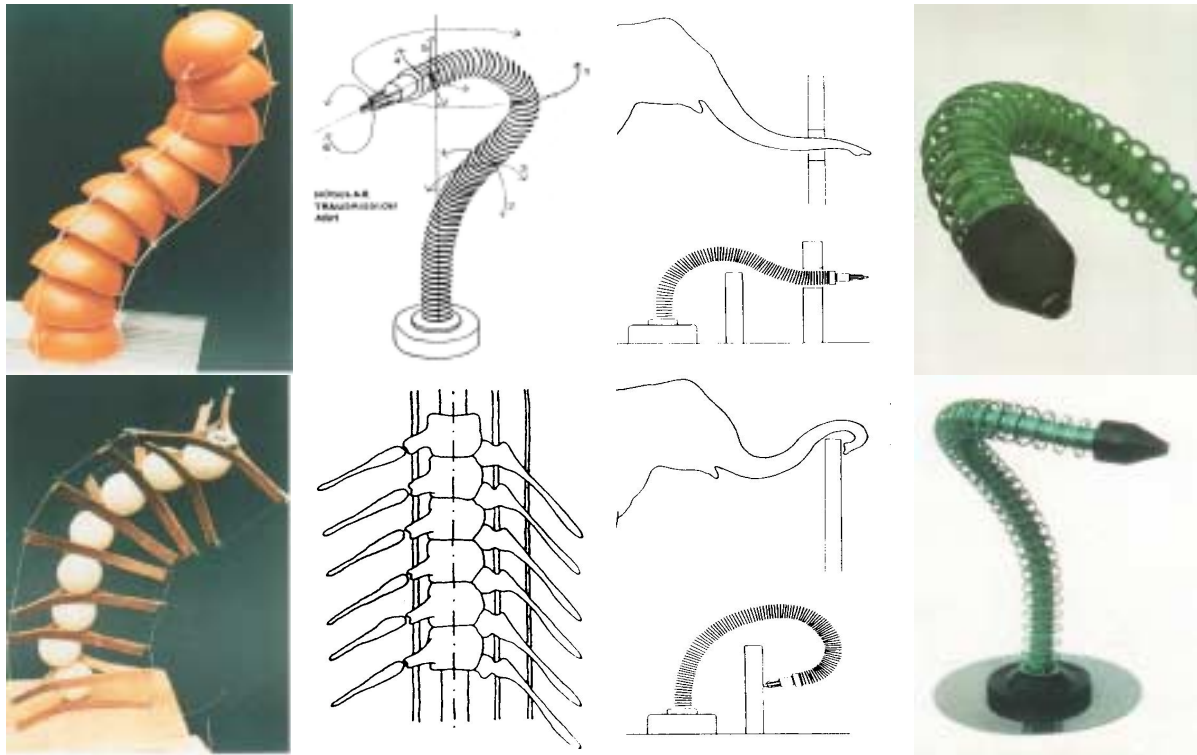


FIGURA 5.50 – Estudo de braço robótico - Centro *Ricerche* Instituto Europeu de Design, Milão  
 FONTE - DESIGN, 1993. Projeto de Carlo Bombardelli, Paolo Bodega, Emanuele de Dominicis e Anastassios.

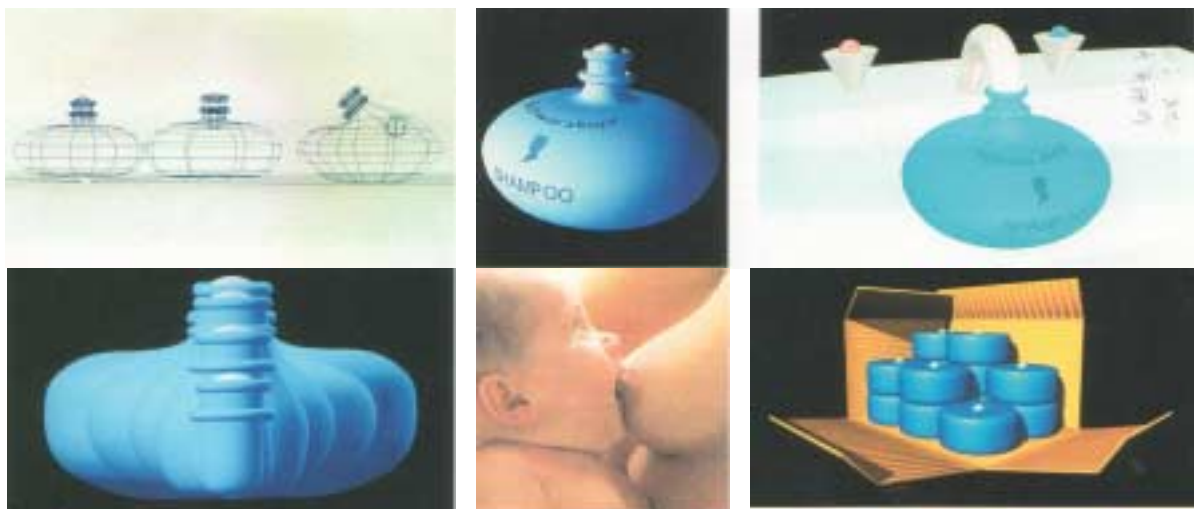


FIGURA 5.51 – Estudo de recipiente elástico - Centro *Ricerche* Instituto Europeu de Design, Milão  
 FONTE - DESIGN, 1993. Projeto de Jorg Cruel, Anna Luiza de As Cavalcanti, Luis Roberto Marques da Silveira.

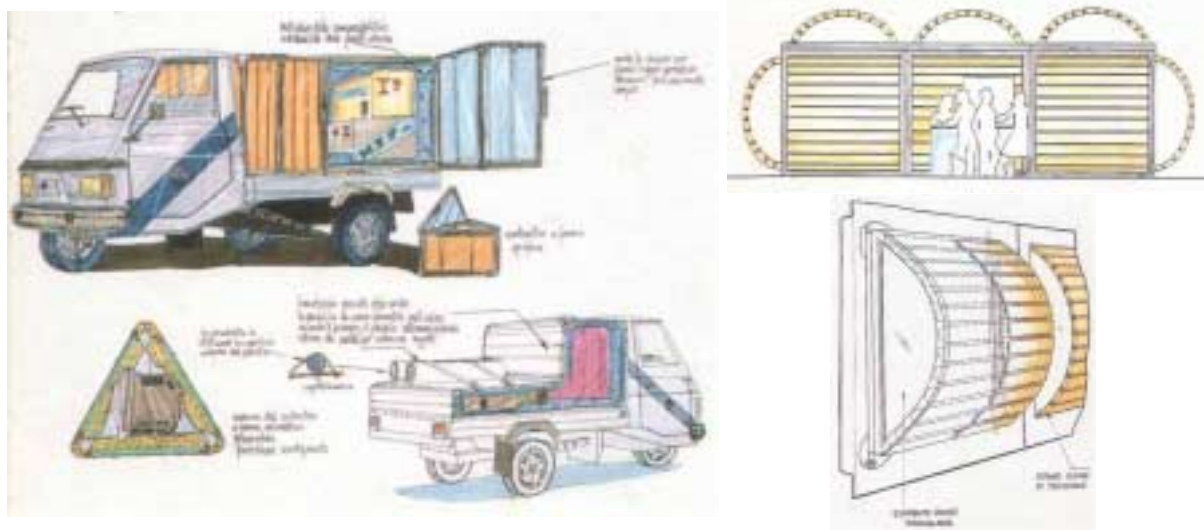
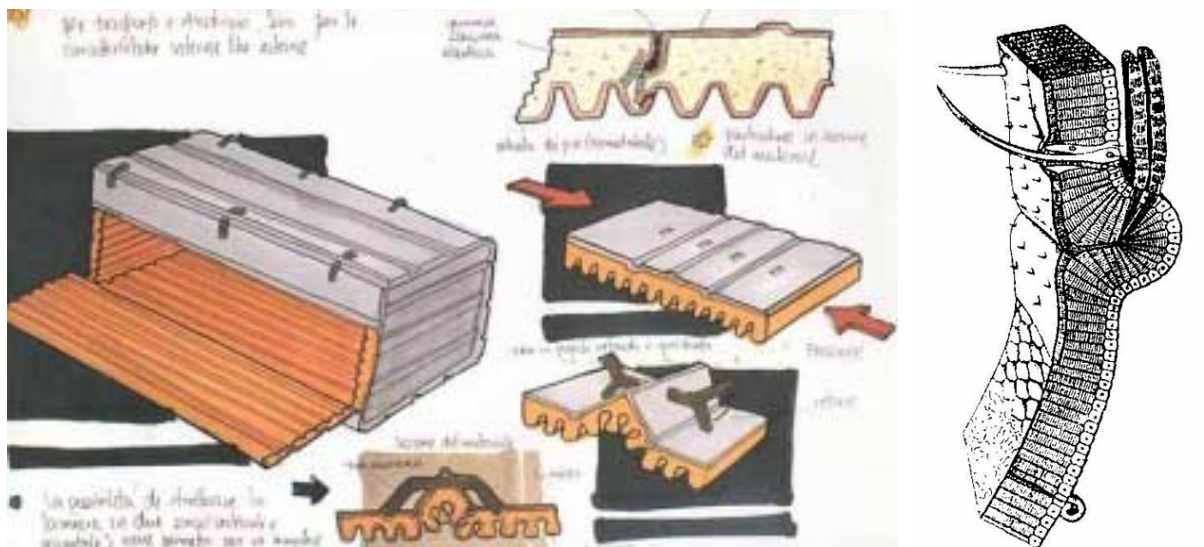


FIGURA 5.52 – Estudo de materiais flexíveis - Centro Ricerche Istituto Europeo de Design, Milão  
 FONTE - DESIGN, 1993. Investigação de Luisa Morfini, Jan Puylaert, Elisa Lewy e Franco Lodato.



FIGURA 5.53 – Estudo de estrutura sanfonada para painéis-parede para contêiner móvel. Centro Ricerche Istituto Europeo de Design, Milão  
 FONTE - DESIGN, 1993. Investigação de marcela Peraza, Gabriel Songel.

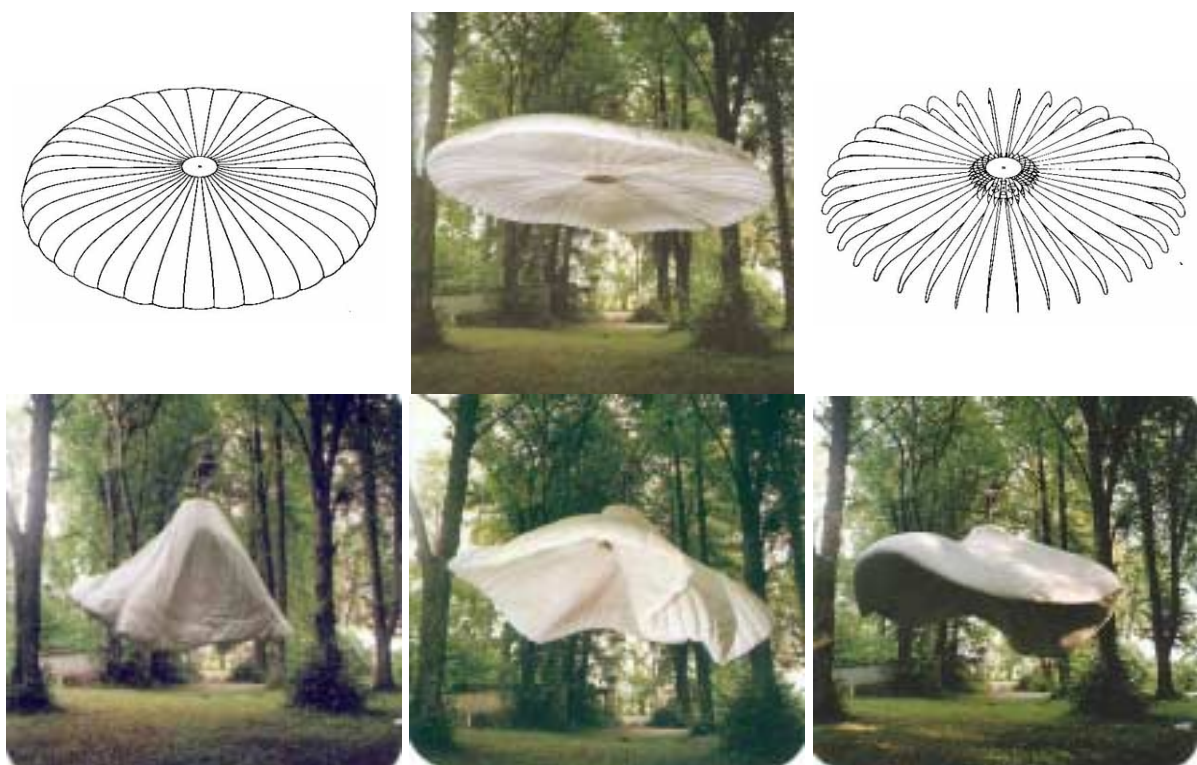


FIGURA 5.54 – “Centrifugado - refúgio rotatório”. Cobertura pneumática móvel com 6m de diâmetro e 18 Kg de peso, idealizado por Dominik Baumüller  
 FONTE - RICHARDSON, 2001. p.193-195.

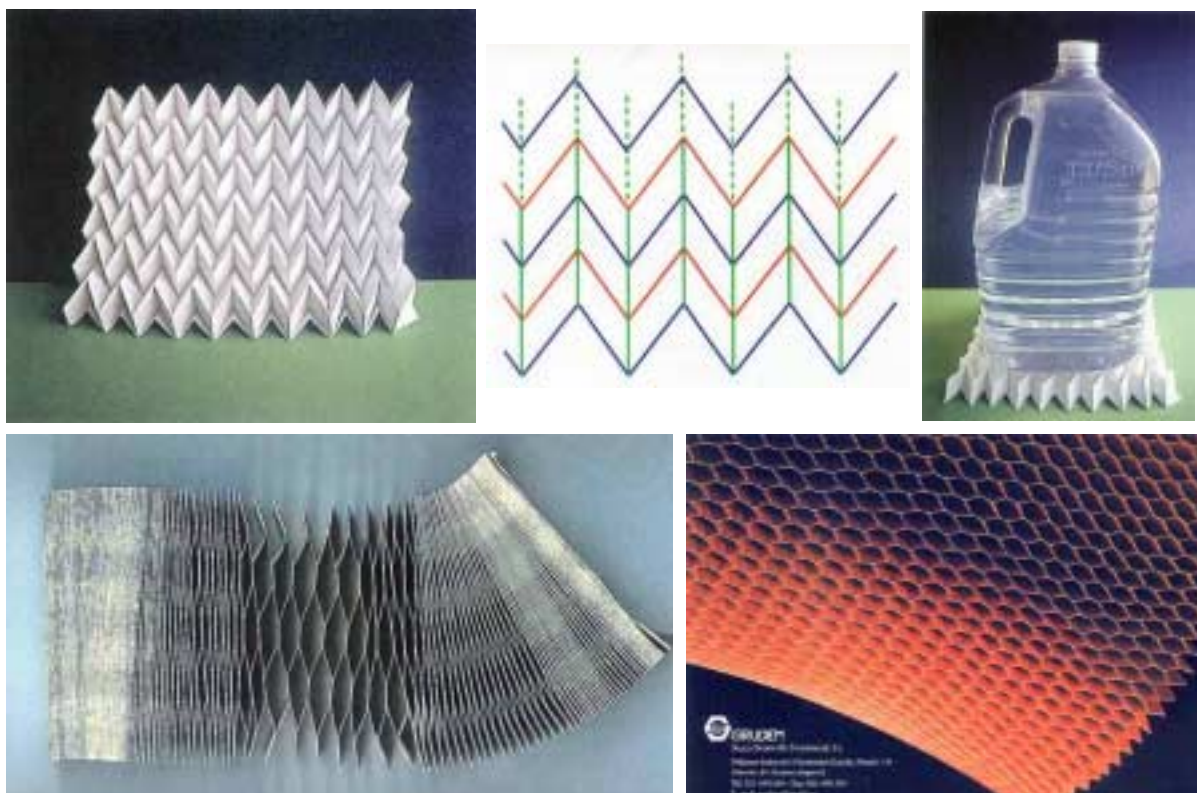


FIGURA 5.55 – Sistemas em papéis flexíveis e resistentes à compressão por dobras, ou colagens alternadas  
 FONTE - ROCHA, 2000. p.92,86,282,283.

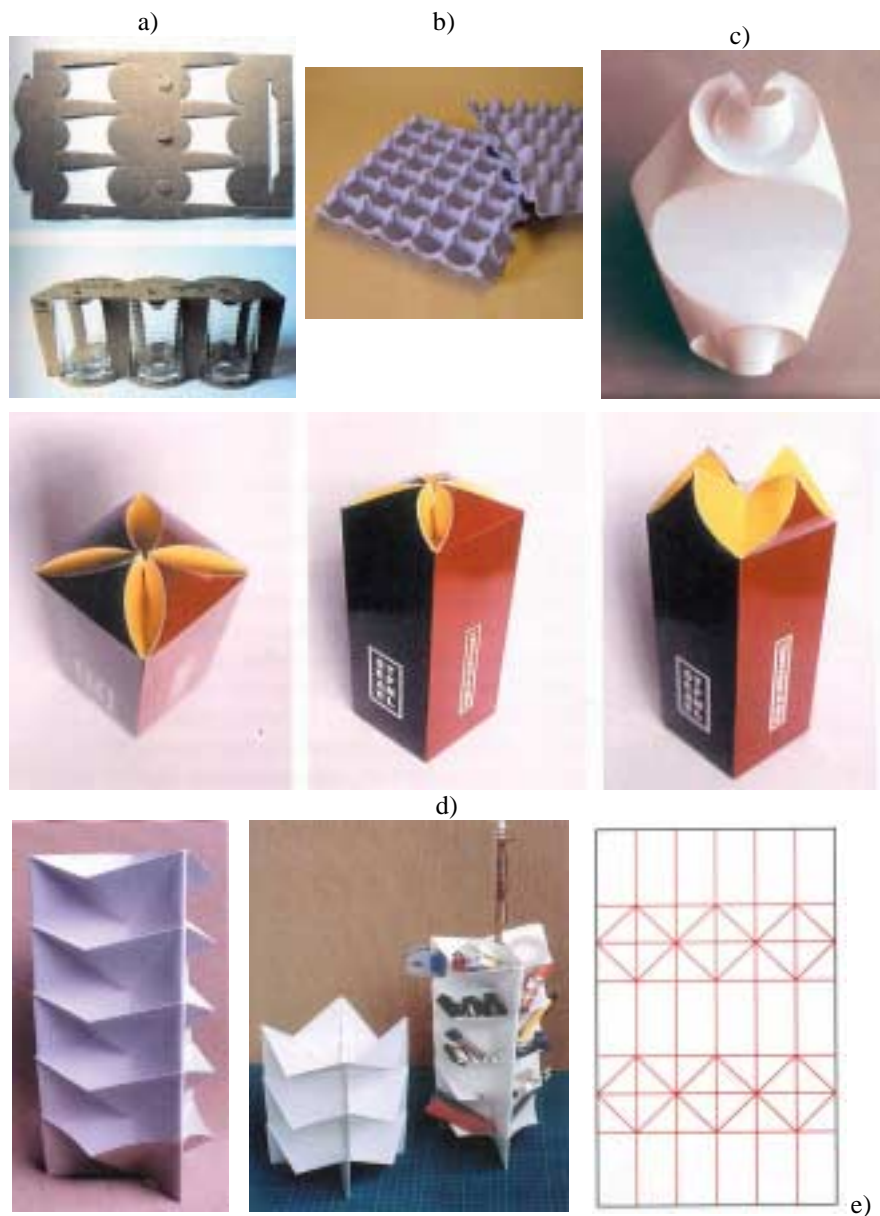


FIGURA 5.56 – Embalagens e produtos que se utilizam de dobras ou curvaturas para adquirirem resistência  
 FONTE - a) ROCHA, 2000. p.165 b) Arquivo pessoal c) ROCHA, 2000.p.310  
 d) ROCHA, 2000. p.164 e) ROCHA, 2000. p.113.

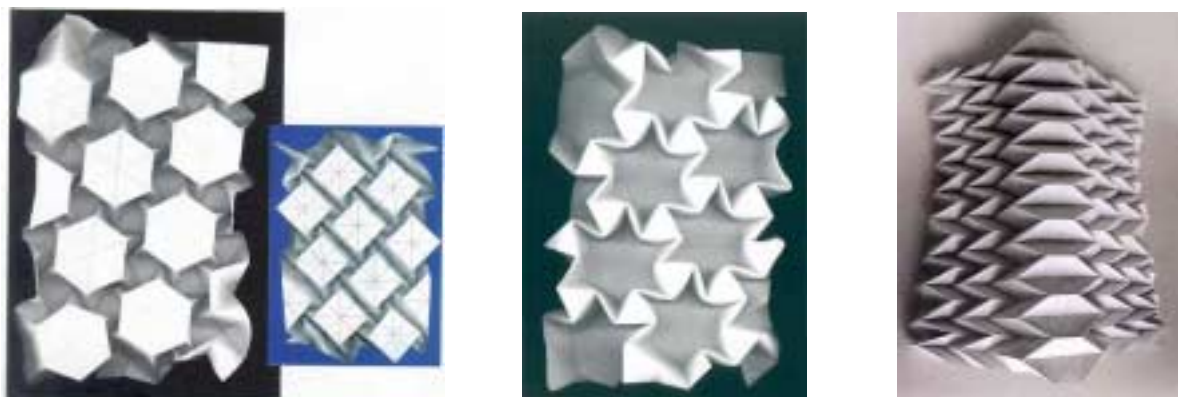


FIGURA 5.57 – Utilização da malha e Coordenação Modular para enrijecimento  
 FONTE - ROCHA, 2000. p.311,310,256.

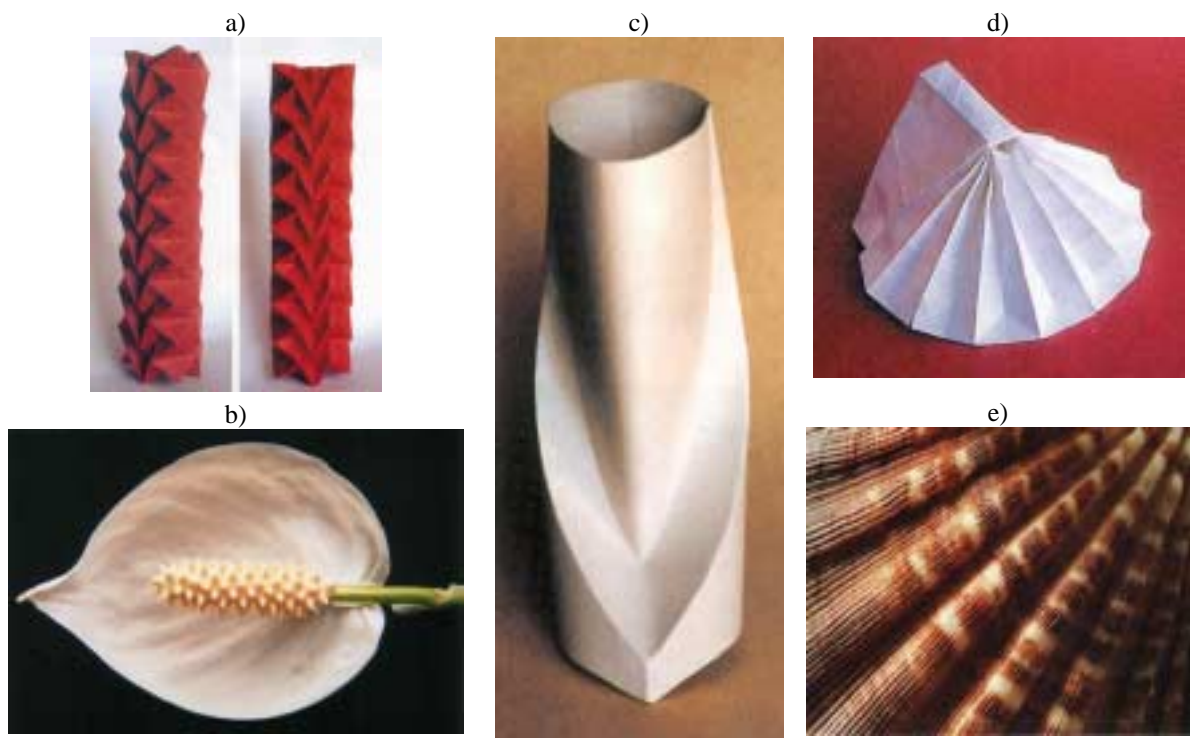


FIGURA 5.58 – Princípios naturais de enrijecimento

FONTE - a) ROCHA, 2000. p.306 b) Arquivo pessoal c) ROCHA, 2000. p.312 d) ROCHA, 2000.p.256 e) NEILL, 1993. p.43.

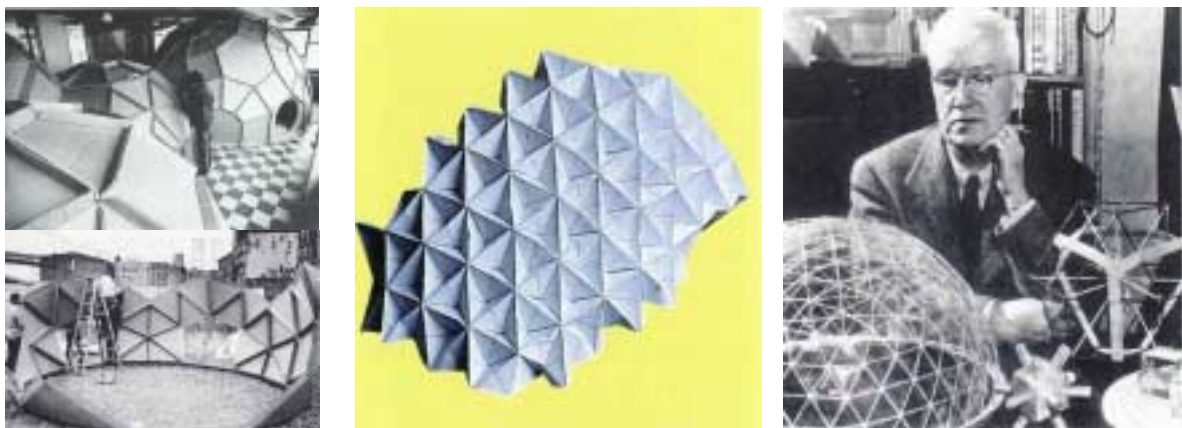


FIGURA 5.59 – Princípios naturais de enrijecimento

FONTE - ROCHA, 2000. p.191, 94, 95.



## 6 A SEÇÃO TUBULAR CIRCULAR

### 6.1 Aspectos de sua geometria

Se na simples observação da natureza pode-se extrair ensinamentos e perceber certas propriedades intrínsecas às “coisas”, ao analisar o esqueleto humano, por exemplo, observa-se um modelo de uma fascinante estrutura. Essa “construção” maravilhosa nunca está completamente estática, pois se trata de uma estrutura cinética bi-apoiada, e “ambulante”, superior a qualquer artefato similar da mais alta qualidade da engenharia mecatrônica (FIG. 6.1).

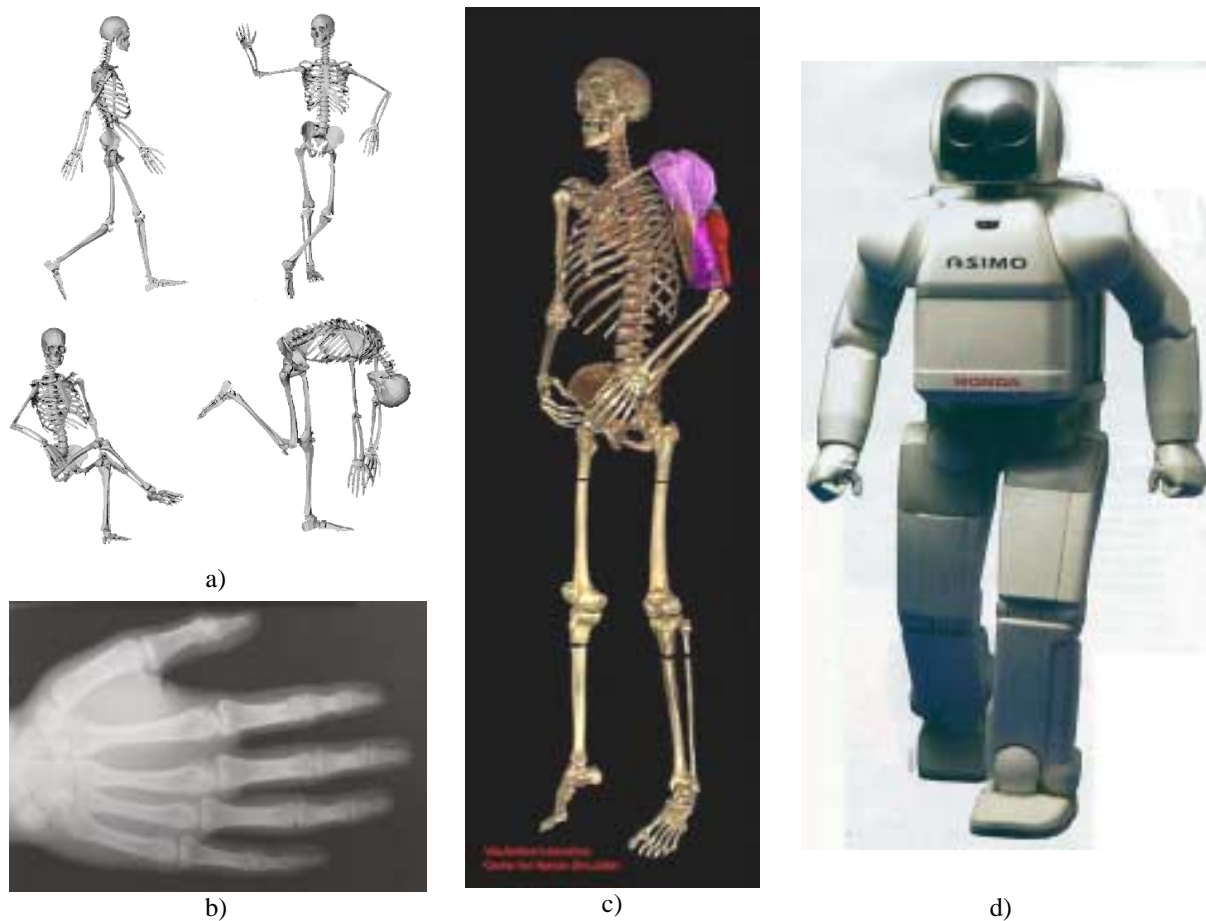


FIGURA 6.1 – a), b), c) O esqueleto humano como uma sofisticada estrutura mecânica predominantemente tubular d) Robô utilitário desenvolvido pela Honda com sofisticada Engenharia Mecatrônica

FONTE - a) Disponível em: <<http://www.inf.ufrgs.br/cg/vpat/image6.gif>>. Acesso em: 27 nov. 2003  
b) Arquivo pessoal c) Disponível em: <[http://www.uchsc.edu/sm/chs/gallery/images\\_pages/images\\_gifs/new/skFal.gif](http://www.uchsc.edu/sm/chs/gallery/images_pages/images_gifs/new/skFal.gif)>. Acesso em: 27 nov. 2003 d) MADE IN JAPAN, 2003. p.14.

Existem certos princípios que são inerentes à forma, e este é o tema primordial deste trabalho, ou seja, ressaltar certas propriedades e/ou qualidades constituintes da geometria ou volumetrias dos objetos. Assim como um objeto qualquer mediante uma solicitação de carga externa irá se comportar de acordo com as características mecânicas de seu material constituinte, este mesmo objeto também responderá à mesma solicitação segundo a geometria que lhe impuseram. Daí a importância do *design* consciente para se projetar estruturas.

Não é de se espantar, porém, que nossa estrutura óssea possua na sua maioria uma seção circular. E analisando-a microscopicamente, sua microestrutura também possui sua seção circular assemelhando-se a um hiperbolóide de revolução (FIG. 6.2). Tem-se então um princípio de semelhança análogo ao do fractal.

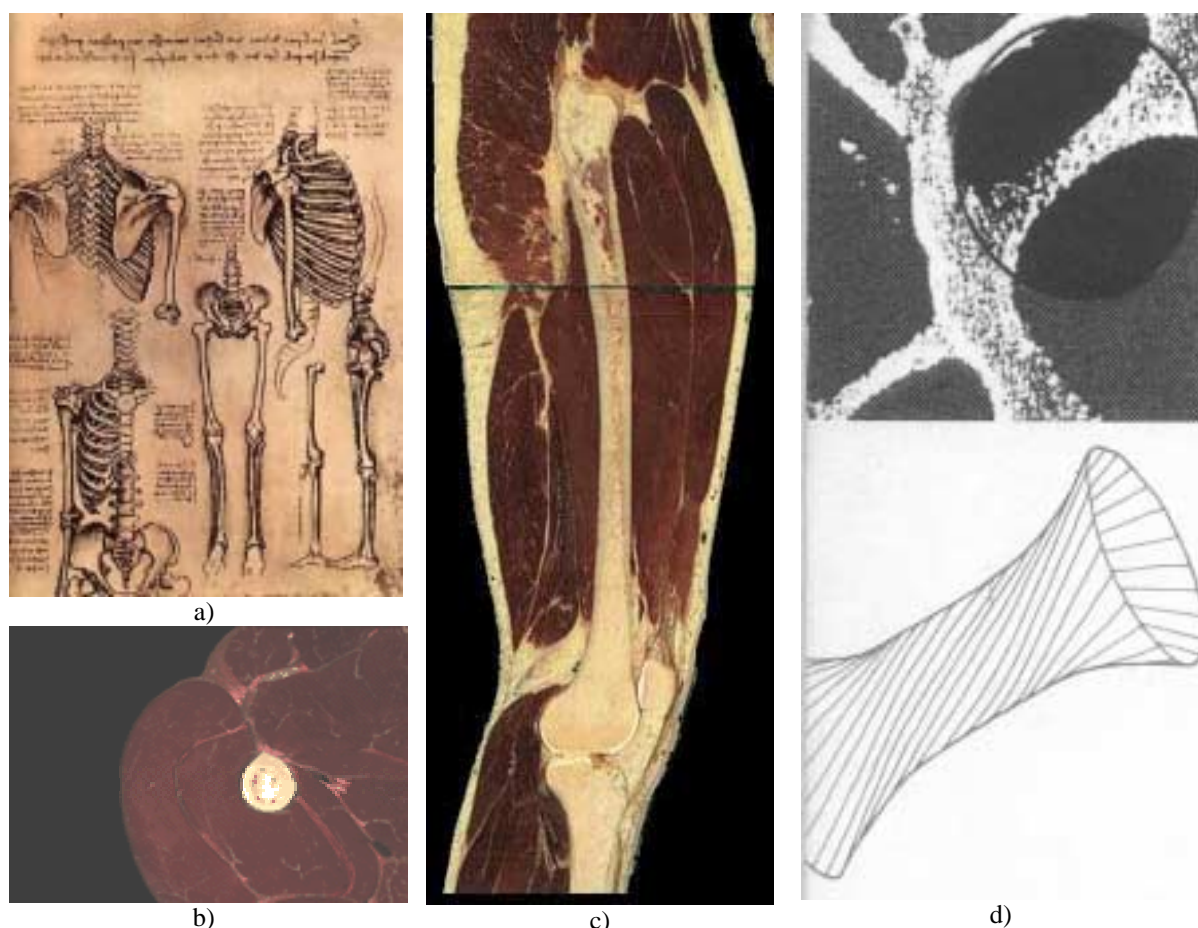


FIGURA 6.2 – a) Desenhos do esqueleto humano feitos por Leonardo da Vinci b) Seção transversal do fêmur; c) Seção longitudinal do fêmur d) A fotografia microscópica da estrutura óssea também de seção circular (hiperbolóide) revela um princípio de semelhança

FONTE - a) Disponível em: <<http://webmail.fe.up.pt/~ee93154/skeletonslv2.jpg>>. Acesso em: 27 nov. 2003

b) Disponível em: <[http://www.uchsc.edu/sm/chs/gallery/animation\\_pages/animation\\_gifs/ani.gif](http://www.uchsc.edu/sm/chs/gallery/animation_pages/animation_gifs/ani.gif)>. Acesso em: 27 nov. 2003 c) Disponível em: <<http://www.geocities.com/HotSprings/Spa/2603/AAApn6.JPG>>.

Acesso em: 27 nov. 2003 d) DESIGN COME, 1993. Investigação de Carlo Bombardelli e Carmelo di Bartolo.

A seção circular é a única seção ou arranjo geométrico possível capaz de abarcar o máximo de conteúdo com o mínimo de perímetro ou superfície. Isto é uma qualidade natural e inerente da circunferência que é utilizada pela natureza, nos caules e nas raízes das plantas, nas artérias e veias do corpo humano etc. Neles tem-se em comum a circulação de fluidos em seu interior possibilitado pela geometria tubular. Desta forma, a natureza economicamente cria o seu invólucro protetor estrutural utilizando o mínimo de matéria, permitindo o acondicionamento e a passagem de um fluxo máximo de substância. Tal característica nos permite o aproveitamento e a utilização do espaço interior da estrutura tubular para outros fins. O projeto NorConHouse, em Hanover, Alemanha, por exemplo, utilizou-se de suas estruturas tubulares aparentes para a passagem de água como um mecanismo de proteção de combate ao incêndio (FIG. 6.3). Vale a pena salientar que sua geometria circular define um menor fator de massividade (quando comparados a outros perfis com o mesmo consumo de material), que é preponderante para uma melhor resistência ao fogo.

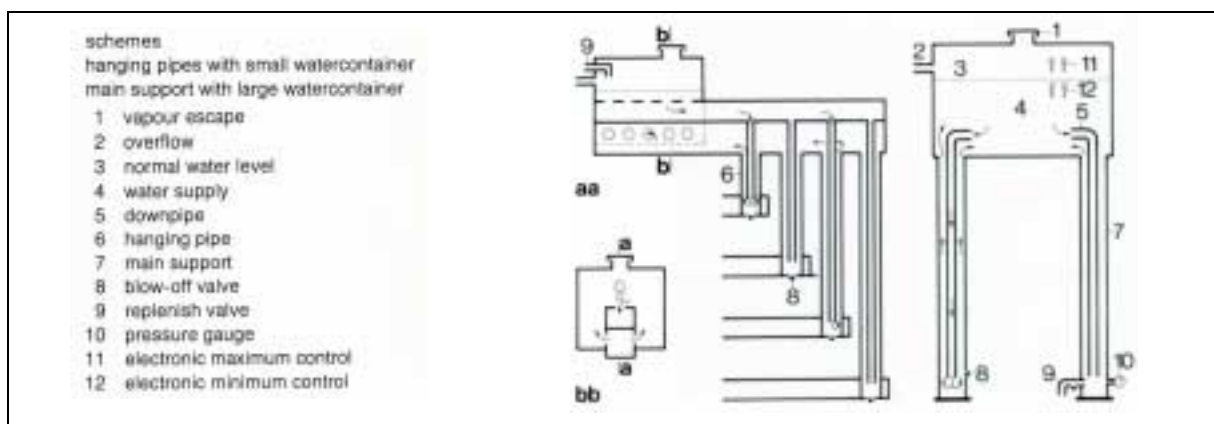


FIGURA 6.3 – Sistema de proteção de combate ao incêndio incorporado à estrutura. NorConHouse em Hanover, Alemanha

FONTE - INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1989. p.14,15.

Outra utilização bastante interessante dessa vantagem geométrica pode ser visto nos pilares projetados pelo arquiteto João Filgueiras Lima (Lelé) para os hospitais da rede Sarah Kubitschek. As FIG. 6.4a, - 6.4e, mostram as etapas construtivas do sistema de captação de água de chuva da unidade de Belo Horizonte. No topo de cada pilar corre uma calha de aço inoxidável (FIG. 6.4e) que encaminham as águas pluviais para os dutos de PVC posicionados no interior dos pilares, que prosseguirão por galerias subterrâneas (FIG. 6.4b), ou sob o solo (FIG. 6.4c). A FIG. 6.4f mostra uma vista aérea de toda essa cobertura captadora do hospital de Belo Horizonte.

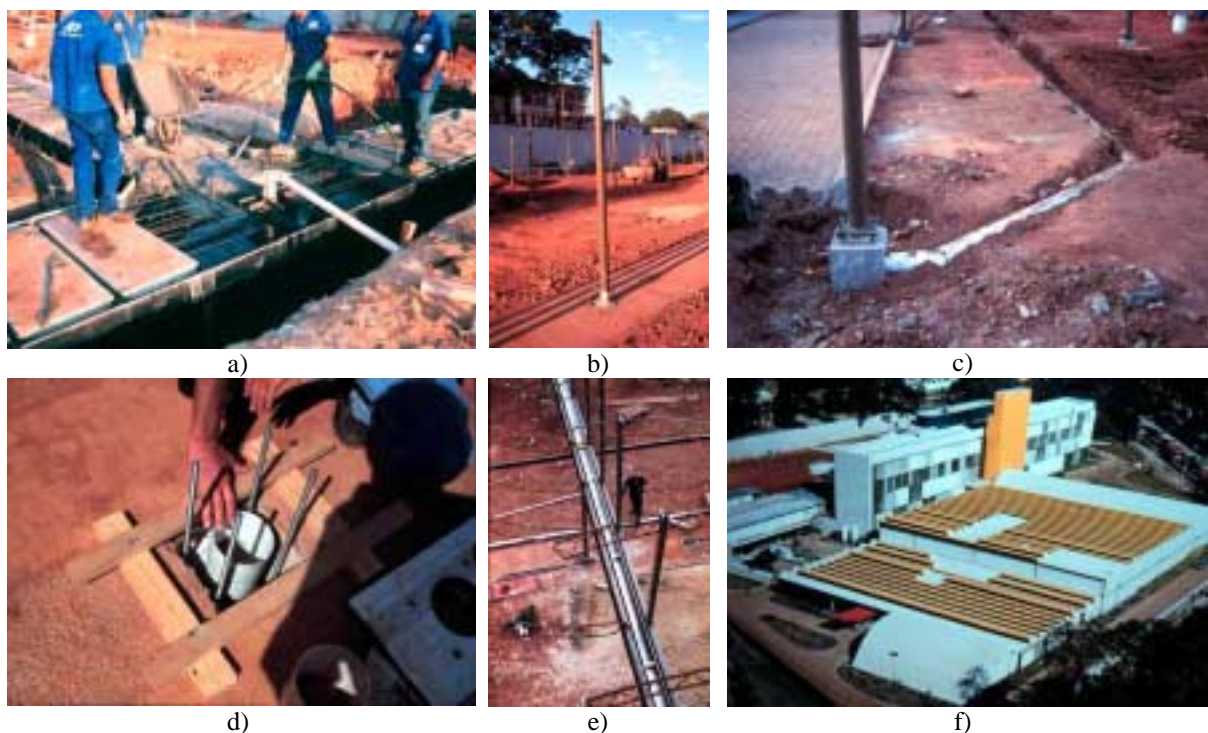


FIGURA 6.4 – Etapas construtivas dos pilares como sistema de captação de água de chuva do Hospital Sarah Kubitschek de Belo Horizonte  
FONTE - Arquivo pessoal.

Na engenharia civil os espaços internos dos pilares de perfis metálicos tubulares também podem ser aproveitados preenchendo-os de concreto, para otimizar seu desempenho estrutural à compressão, caracterizando-se, assim, como uma estrutura mista.

Muitas gruas responsáveis pela construção de edifícios altos no Japão possuem também uma conformação tubular em sua coluna principal, permitindo, assim, a utilização de seu interior (FIG. 6.5b).



a)



b)

FIGURA 6.5 – a) Atomium : restaurantes e mirantes esféricos interligados por circulações tubulares da Expo de Bruxelas, 1958 b) Gruas com conformação tubular em sua coluna principal  
 FONTE - a) BANHAM, 2001. p.40 b) Arquivo pessoal

O ótimo desempenho estrutural dos bambus quanto à compressão, torção, flexão e sobretudo quanto à tração é conferido pela sua volumetria tubular e pelos arranjos longitudinais de suas fibras que formam feixes de microtubos. Seus septos ou nós atuam como enrijecedores, mas ao contrário do que muitos acreditam, correspondem à parte mais frágil do bambu devido a organização de suas fibras. Diferente dos caules e das raízes das plantas, o bambu possui o seu interior oco, pois sua seiva circula periféricamente entre as fibras longitudinais constituintes de sua parede (Fig 6.6, e 6.7).

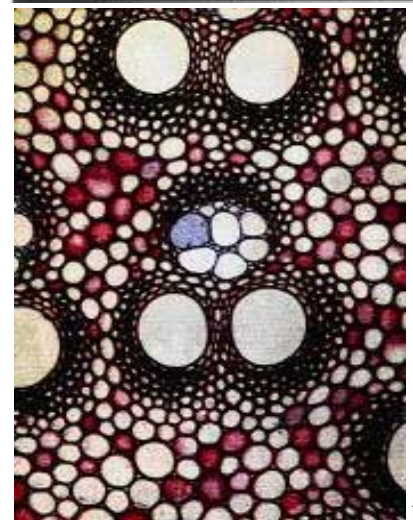
*“O colmo de bambu consiste em mais de 70% de fibras longitudinais, as quais não são uniformemente distribuídas na seção transversal. A distribuição das fibras é muito mais densa na parte externa (FIG.6.7b). O bambu é basicamente um material ortotrópico. Ele tem alta resistência ao longo do colmo e baixa resistência na direção transversal às fibras.”<sup>1</sup>*



FIGURA 6.6 – Geometria tubular dos bambus  
FONTE - RIKUYOSHA CREATIVE NOW, 1988. p.35.



a)



b)

FIGURA 6.7 – Vista ampliada do tecido vascular do bambu  
FONTE - a) LIESE, 1998 .p.23.  
b) SMITS, 2003. p.7.

Em função da facilidade de obtenção, algumas obras da engenharia o utilizam devido às grandes vantagens estruturais dessa planta. Na China, por exemplo, os andaimes de muitas edificações modernas são construídos até hoje exclusivamente com bambus, devido ao baixo custo, e à eficiência mecânica proporcionada pelas características físicas e geométricas (FIG. 6.8).

---

<sup>1</sup> SMITS, 2003. p.7.



FIGURA 6.8 – Utilização de andaimes de bambu em edificações modernas na China  
FONTE - Arquivo pessoal.

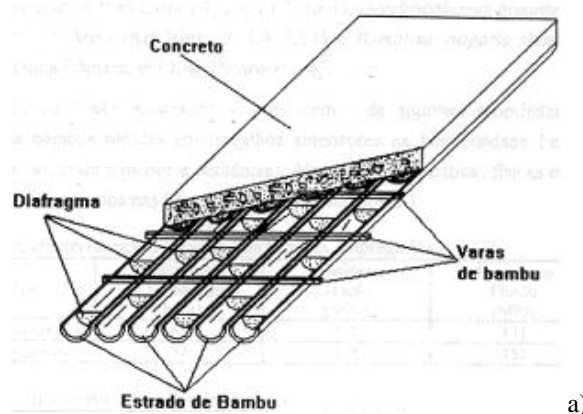
Mas não é só em edificações efêmeras que o bambu é utilizado. Devido a sua altíssima resistência à tração, o bambu já foi empregado em substituição ao aço para o reforço de estruturas de concreto, conforme estudos realizados na universidade de Concórdia, em Montreal, Canadá <sup>2</sup> (FIG. 6.9a). A FIG: 6.9b e 6.9c mostra um exemplo onde a estrutura provisória de bambu, construída para a estruturação e conformação da cobertura, acabou sendo incorporada definitivamente na edificação.

---

<sup>2</sup>GHAVAMI, K, & ZIELINSKI, Z.A.. 1988.

"O professor iraniano Khosrow Ghavami, especialista em estruturas metálicas e chefe da equipe que realizou os estudos, explica que o bambu tem 1200 utilizações em todas as áreas das atividades humanas e que se trata de um produto de eficácia comprovada do ponto de vista técnico e economicamente viável para a construção civil, por causa de seu baixo custo.

As principais vantagens do bambu quando empregado como reforço no concreto, segundo o professor, são as seguintes: apresenta baixa energia por unidade de tensão e possui alta resistência à tração, que chega a atingir 200 N/mm<sup>2</sup> (comparado com aço, requer energia 50 vezes menor). 'Tem, no entanto, duas desvantagens: possui baixo módulo de elasticidade e apresenta variação em seu volume pela absorção de água', afirma."<sup>3</sup>



a)



b)



c)

FIGURA 6.9 – O bambu como elemento de reforço e como fôrma permanente em laje de concreto  
 FONTE - a) SMITS, 2003. p.18 b) VITRA DESIGN MUSEUM, 2000. p.224 c) NIKKEI, v.19, n.529, 1995. p.135.

<sup>3</sup> Extraído de uma reprodução xerográfica de DC, 1992. p.24.



## 6.2 Resistência à compressão – flambagem

Levando em questão os aspectos geométricos, a seção circular propicia à estrutura uma ótima resistência à flambagem quando submetida à compressão, comparada às outras seções. Isso porque a sua configuração espacial a constitui como a única seção possível, de completa simetria em qualquer direção que passe pelo seu eixo, o CG (centro de gravidade), que se denomina de simetria radial.

Qualquer outro tipo de seção não é capaz de coincidir o centro de gravidade com o centro de torção (ou cisalhamento, CC) e ainda manter a simetria em relação a qualquer posição em que se encontrem os eixos coordenados (FIG. 6.10).

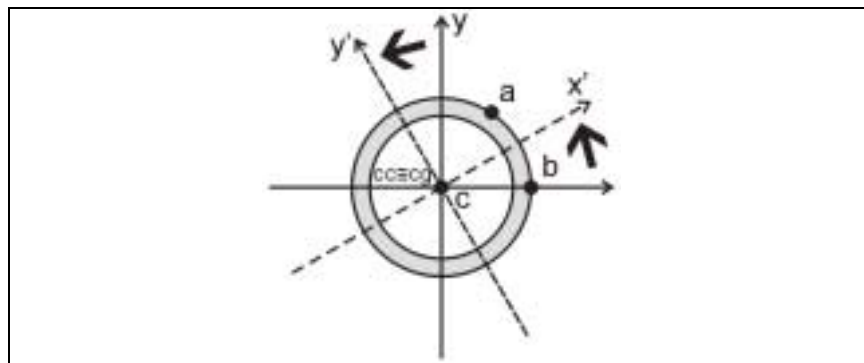


FIGURA 6.10 – Coincidência do CC, CG e simetria radial das seções tubulares circulares

FONTE - Arquivo pessoal.

O perfil “I”, por exemplo, tem o seu centro de gravidade (CG) coincidente com seu centro de torção ou cisalhamento (CC), mas, pelo fato de não ter simetria radial, possui diferenças geométricas quando comparadas as duas coordenadas ortogonais indicadas na FIG 6.11.

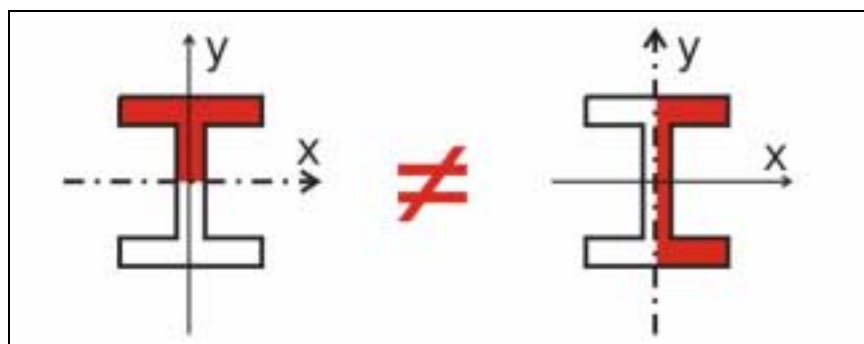


FIGURA 6.11 – Simetria nos perfis de seção “I”, apenas quando comparados ao mesmo eixo coordenado

FONTE - Arquivo pessoal.

Já um perfil tubular de seção quadrada, apesar de ter o seu CG coincidente com o CC e ter simetria em relação às coordenadas ortogonais indicadas na FIG. 6.12, pelo fato de não ter simetria radial, possui diferenças geométricas quando rotacionados, e comparados em diferentes posições entre si segundo as mesmas coordenadas (FIG. 6.13).

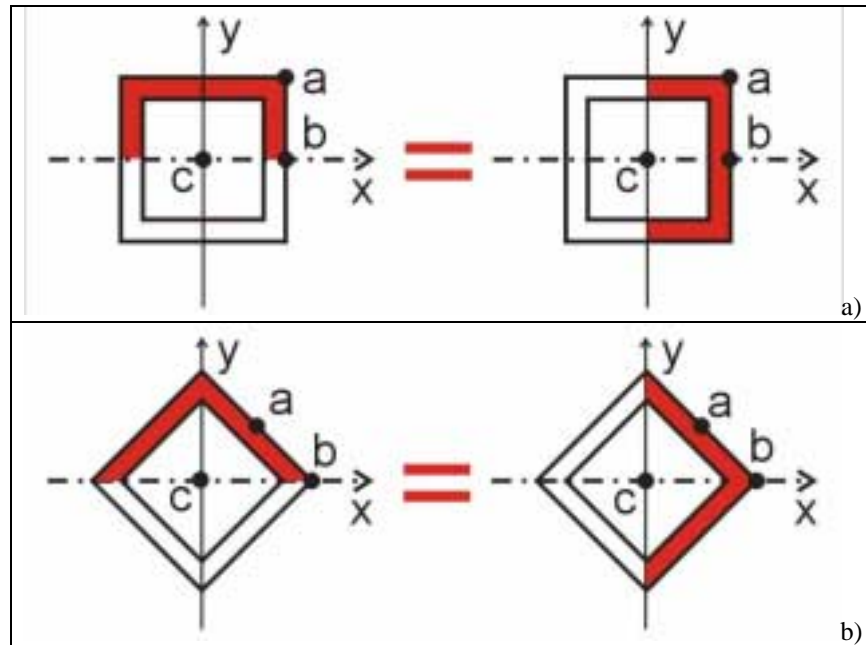


FIGURA 6.12 – Simetria nos perfis tubulares de seção quadrangular em relação às coordenadas ortogonais, quando comparados na mesma posição  
 FONTE - Arquivo pessoal.

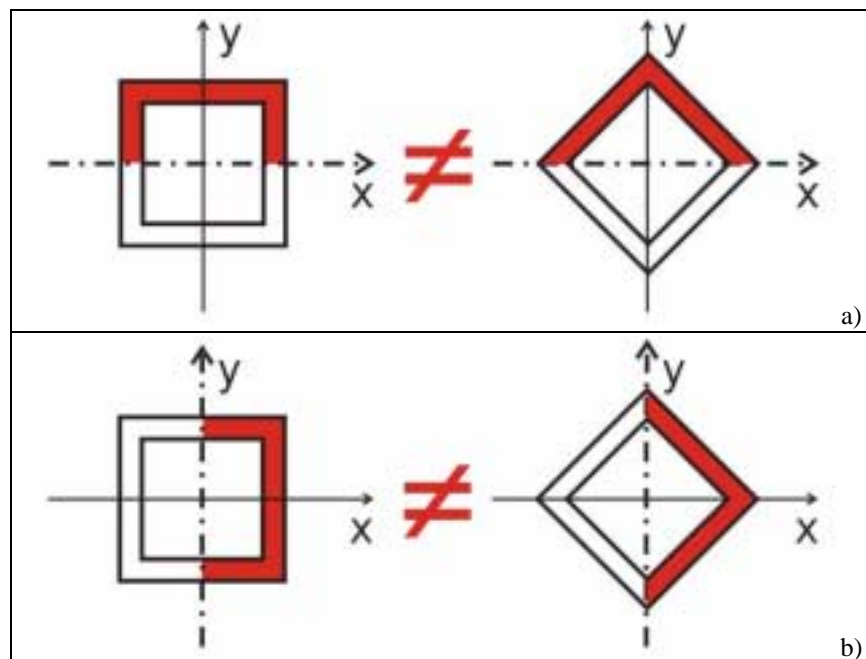


FIGURA 6.13 – Assimetria nos perfis tubulares de seção quadrangular em relação às coordenadas, quando comparados em posições diferentes  
 FONTE - Arquivo pessoal.

Em resumo, isso quer dizer também que a seção tubular circular é a única que possui todo e qualquer ponto de sua superfície equidistante do seu eixo ao centro; o que já não acontece nas outras seções, por exemplo, conforme indicado pela distância dos pontos “a” e “b” em relação a “c” nas FIG. 6.12a e 6.12b. Devido a sua simetria radial, aplicando uma força de compressão no centro geométrico de um tubo, perpendicular a sua seção circular, todas as tensões terão as mesmas distâncias para “caminharem”, evitando, assim, assimetrias, ou direções preferenciais para que ocorra flambagem.

Essa propriedade faz do tubo de seção circular a melhor geometria para utilização em pilares de edificações, seja oco ou com preenchimento de concreto, como citado anteriormente.

### 6.3 Resistência à torção

Pelas mesmas características geométricas citadas anteriormente, os tubos possuem também uma conformação mais favorável para a resistência à torção.

Considere a FIG. 6.14 como uma seção de um elemento tubular fixada em uma de suas extremidades. Ao tentar impingir uma força de rotação em torno de seu eixo no sentido horário, os elementos constituinte da parede do perfil, simbolizados na figura pela bola escura, tentarão impingir uma força imediatamente no seu elemento vizinho, que está exatamente à sua frente dificultando o seu movimento. Já na FIG. 6.15, o elemento indicado está menos impedido em seu movimento, pois seu “vizinho” não se encontra imediatamente à frente de sua direção de deslocamento.

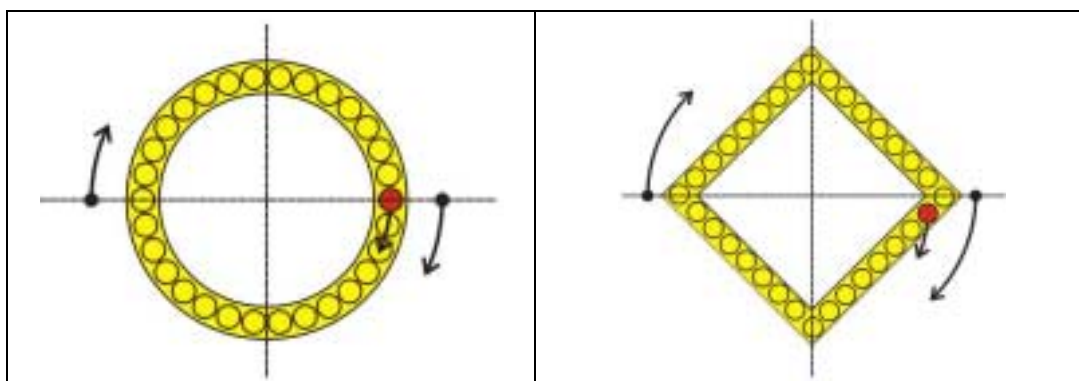


FIGURA 6.14 – Impedimento à rotação do ponto indicado pelos elementos vizinhos  
FONTE - Arquivo pessoal.

FIGURA 6.15 – Relativo impedimento à rotação do ponto indicado pelos elementos vizinhos  
FONTE - Arquivo pessoal.

Um raciocínio mais próximo pode ser obtido se alguém imaginar como parte integrante de uma fila circular, conforme mostra a FIG. 6.16a.

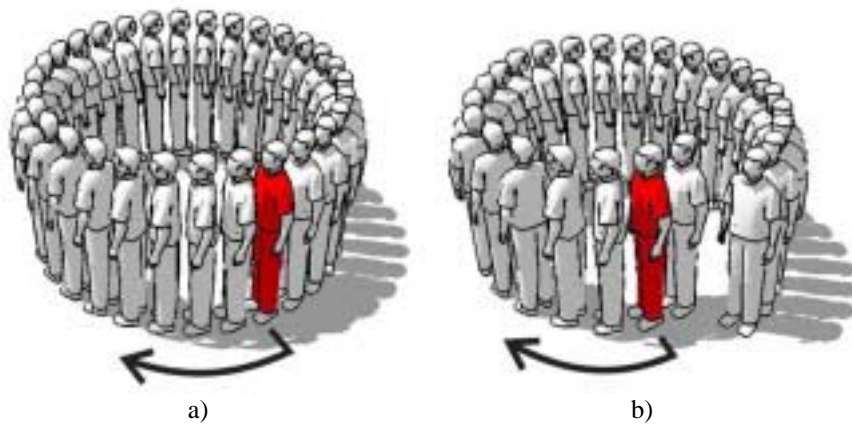


FIGURA 6.16 – a) A força exercida pela pessoa indicada, para movimentar o conjunto será anulada nela mesma b) A força exercida pela pessoa indicada, será descarregada na primeira da fila  
 FONTE - Arquivo pessoal.



FIGURA 6.17 – A força exercida será anulada nela mesma  
 FONTE - Arquivo pessoal.

Se essa fila estiver bastante apertada, não sobrando espaços entre as pessoas, qualquer tentativa de andar para frente será em vão, pois a pessoa à frente terá outra como obstáculo, que se apoiará em outra, e assim sucessivamente até chegar a ela mesma também como obstáculo a todo o conjunto. É como se a pessoa tentasse arrastar a si mesma: as forças se anulariam (FIG. 6.17).

A rotação da fila circular só seria possível, se todos os integrantes decidissem andar para frente simultaneamente no mesmo passo. Imagine agora a mesma fila anterior, porém na configuração da FIG. 6.16b, ou seja, uma seção aberta. Fica fácil perceber que, se qualquer integrante quiser prosseguir um passo à frente e tiver força suficiente para arrastar as pessoas, a pessoa do início da fila não terá obstáculo para se apoiar, e, conseqüentemente, será empurrada, permitindo o movimento de todo o conjunto.

É claro que as tensões em um perfil submetido à torção não se restringirão apenas a esta faixa de anel sugerida pelo exemplo citado, e sim ao longo de todo seu comprimento, mas tal comportamento real não invalida a compreensão desse modelo didático.

## 6.4 Um pouco de vivência

Se duas folhas de papel sulfite A-4 forem emendadas conforme a FIG. 6.18a, e em seguida enroladas em forma de um canudo com diâmetro aproximado ao diâmetro de um dedo, pode-se construir um tubo de papel de 59,4 cm de comprimento (FIG. 6.18b).

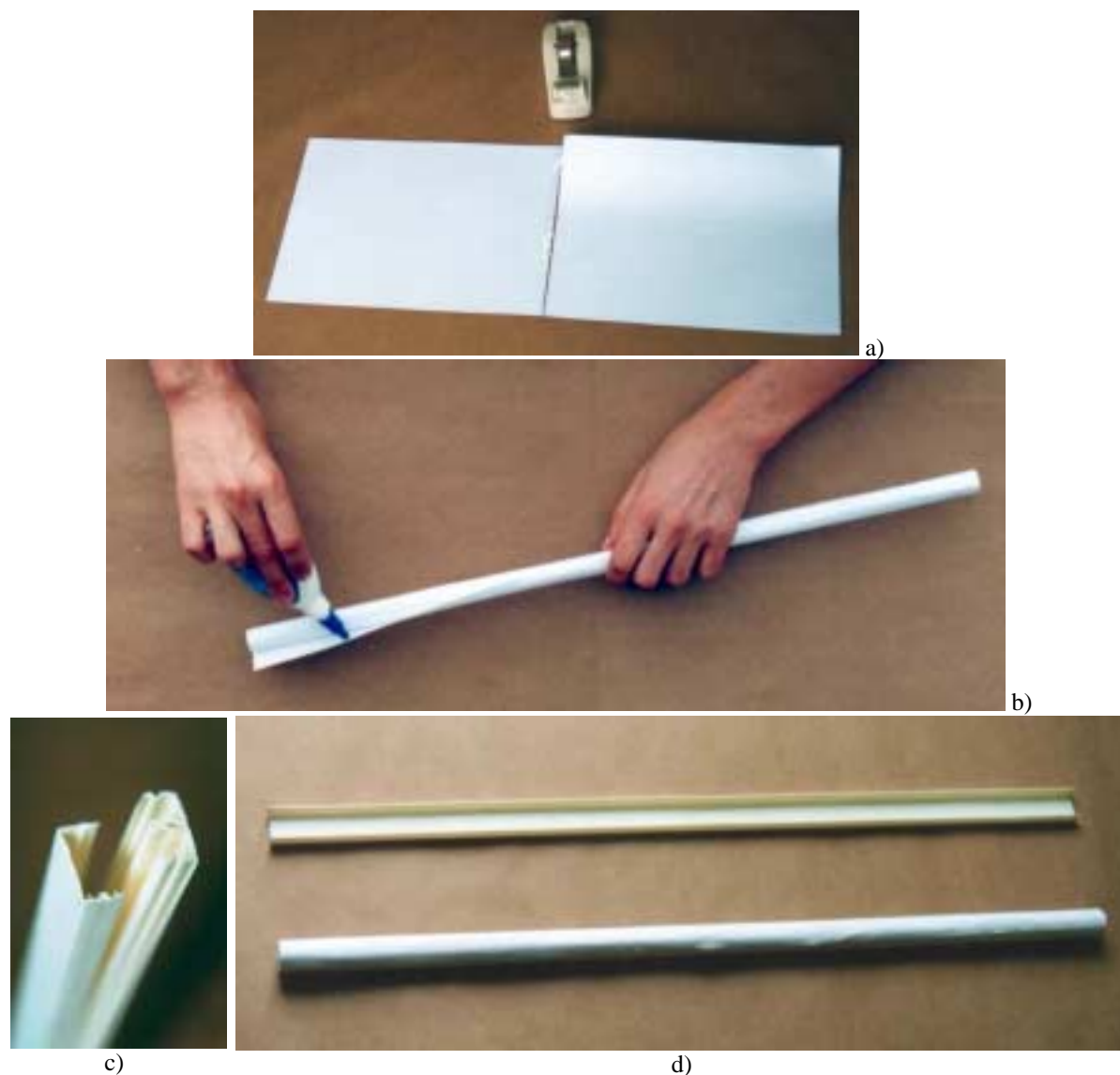


FIGURA 6.18 – Procedimentos para execução de perfis demonstrativos: **a)**, **b)** Execução de um tubo de papel **c)** Canaleta em PVC para eletrificação com seção de perfil “C” **d)** Perfis experimentais concluídos  
FONTE - Arquivo pessoal.

Por outro lado, tomando um perfil de canaleta elétrica em PVC, conforme a FIG. 6.18c, e utilizando a sua parte superior cortando-a em 59,4 cm, obtém-se agora um perfil de seção “C” com o mesmo comprimento do tubo de papel confeccionado (FIG. 6.18d).

Pode-se agora facilmente vivenciar as diferenças comportamentais qualitativas dos dois tipos de geometria dos perfis segundo algumas solicitações estruturais.

Se tracionados separadamente pode-se dizer que visivelmente ambos os perfis resistirão de uma forma análoga a esta solicitação (FIG. 6.19a e 6.19b).



a)



b)

FIGURA 6.19 – a) Tração em perfil tubular b) Tração em perfil “C”

FONTE - Arquivo pessoal.

Submetendo simultaneamente os dois perfis à mesma força de compressão, observa-se que o perfil “C” estará mais suscetível a flambar, como mostra a FIG. 6.20.



FIGURA 6.20 – Compressão em ambos os perfis

FONTE - Arquivo pessoal.

Os dois perfis se diferenciarão ainda mais no seu comportamento, se for aplicada uma força de torção em relação a seus eixos longitudinais. Pode-se observar na FIG. 6.21b como o perfil “C” se deformou mais facilmente e com menos força aplicada que no tubo de papel (FIG. 6.21a).



a)



b)

FIGURA 6.21 – a) Torção em perfil tubular b) Torção em perfil “C”.  
FONTE - Arquivo pessoal.

Esta estabilidade estrutural promovida pela geometria circular também é percebida quando todos esses esforços atuam simultaneamente, os quais denominados de esforços combinados. Ou seja, os perfis tubulares de seção circular representam a melhor geometria para resistir aos esforços combinados.

Um perfil tubular nunca sofrerá uma deformação com flambagem lateral por torção como mostra a FIG. 6.22, pois sua geometria o impede.

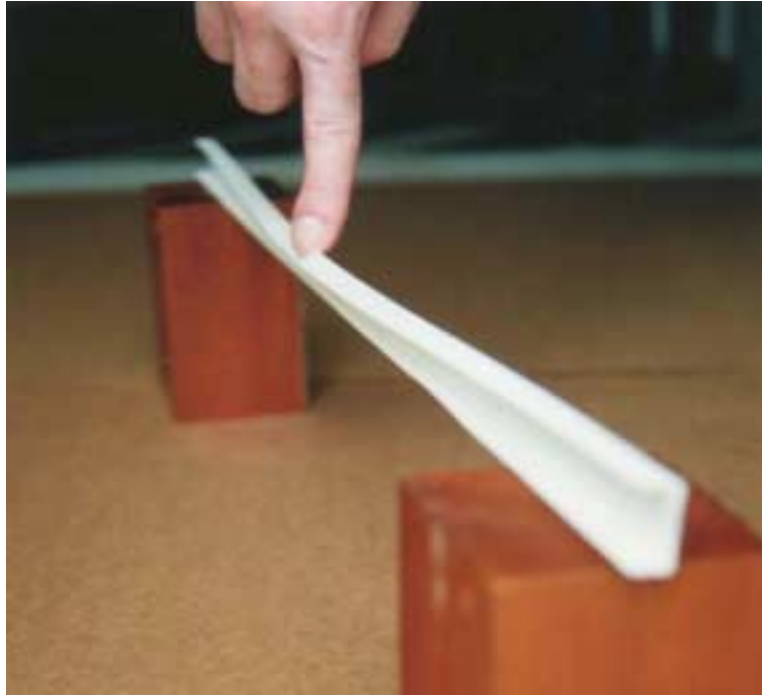


FIGURA 6.22 – Flambagem lateral por torção em perfil “C”  
FONTE - Arquivo pessoal.

É por todas essas características, citadas a partir do item 6.2, que a ossatura de nosso esqueleto se conformou preferencialmente em seções que se aproximam do cilindro, uma vez que a estrutura humana se comporta como uma estrutura mecânica repleta de movimentos complexos. A natureza sabiamente a conformou da maneira mais apropriada para resistir a esses eventos simultâneos de forças, acarretando “propositalmente” uma economia de substância.

Para se projetar uma estrutura que se movimenta, ou recebe forças que variam em intensidade e direções, faz-se necessária uma análise minuciosa e complexa da estrutura como um todo, simulando o maior número possível destas variações.

É por essas razões que hoje todas as montanhas russas de última geração são construídas com perfis tubulares de seção circular, que se contorcem no espaço e se aproximam cada vez mais de uma estética “delgada” e “limpa” (FIG. 6.23 e 6.24). Tem-se em Londres outro exemplo com um excelente resultado estético de estrutura que se move, a “London Eyes”, uma rodagigante (FIG. 6.25).





FIGURA 6.23 – Montanha russa com looping em parafuso - Tóquio, Japão  
 FONTE - Arquivo pessoal.



FIGURA 6.24 – Montanha russa suspensa do Bush Gardens. EUA  
 FONTE - WILSON, 1994. p.163.



a)

FIGURA 6.25 - Roda gigante London Eyes. Inglaterra  
 FONTE - a) Foto gentilmente cedida pela V&M do Brasil; b) LYALL, 1988 .p.168.



b)

Os elementos desse tipo de estrutura hora estarão sob esforços de tração, hora de compressão, etc, encontrando nas seções tubulares cilíndricas a geometria ideal para lidar com essas variações e com os esforços combinados (FIG. 6.26).



FIGURA 6.26 – Malabarismo em estrutura tubular rolante-cinética. Momix  
FONTE - MOMIX DANCE THEATRE, 2002. p.6.

Na FIG. 6.27a, observa-se uma banqueta plástica com um anel de alumínio. Observando agora a FIG. 6.27b, pode-se ver didaticamente a composição estrutural desse artefato industrial.

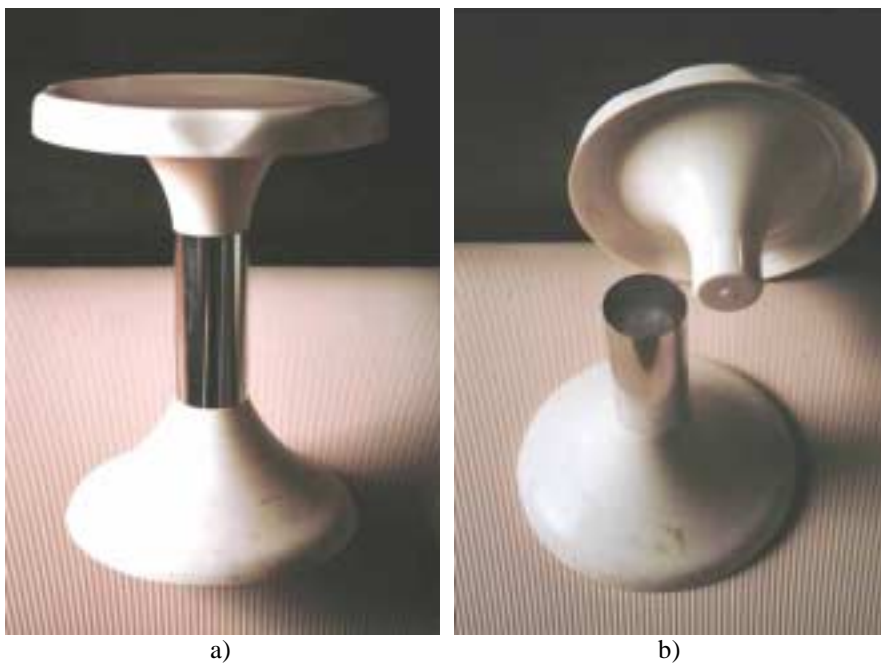


FIGURA 6.27 – a) Banqueta plástica montada b) Banqueta plástica desmontada  
FONTE - Arquivo pessoal.

Esse simples objeto se conformou espacialmente para atender a solicitações funcionais e utilitárias, adotando um aspecto visual ou formal, em sintonia com seus materiais e procedimentos construtivos. Se uma banqueta serve para sentar, sua parte superior se tornou

plana e mais larga para essa função. Tornou-se circular para permitir o acesso qualquer direção. Curvou-se sua borda para baixo a fim de enrijecê-la e simultaneamente propiciar um ponto de pega ao usuário. Concentrou-se toda a sua matéria plástica em direção ao centro afunilando-se sob a forma de uma seção de hiperbolóide (FIG. 4.7) para transmitir a carga, associando a um finíssimo tubo cilíndrico de alumínio, que por sua vez conectou-se novamente a uma outra seção de hiperbolóide, mas agora com o objetivo de redistribuir as tensões até atingirem o solo através de uma área de apoio maior.

Devido às características da seção circular citadas anteriormente foi possível a utilização de um tubo de alumínio de apenas **1 mm** de espessura, como elemento estrutural principal, capaz de suportar pessoas dos mais variados pesos. Deve-se enfatizar que os dois elementos de plástico também possuem pouca espessura (3 mm), com comportamento similar às cascas, viabilizado pela conformação hiperbólica.

Independentemente da qualidade estética conseguida, todo esse raciocínio envolvido na modelagem dessa banquetta por exemplo, denomina-se de: *design*. *Design* não é meramente uma preocupação do estético pelo estético, nem tão pouco apenas do funcional pelo funcional, e sim o raciocínio único e integrado dessas facetas que não devem ser abordadas como algo independente. Infelizmente a língua portuguesa não encontrou até hoje um termo que traduza com eficiência e amplitude a palavra *design*, pois seu significado não constitui meramente um desenho, nem um projeto.

Analisando um pequeno e corriqueiro objeto como esta banquetta pode-se aprender grandes conceitos que as indústrias de artefatos plásticos, embalagens, etc já atentaram e com os quais trabalham há muitos anos em função da economia proporcionada por um bom *design*.

O setor da construção civil em geral ignorou completamente esses conceitos (que num passado remoto eram considerados), devido à própria “evolução” das técnicas, que nos permitem hoje viabilizar configurações geométricas antinaturais.

Para se vencer grandes vãos no passado, quando ainda não existia o concreto nem o aço, a curvatura do arco era a solução. Pois era natural, intuitiva. Na natureza, encontram-se mais linhas curvas do que retas.

A FIG. 6.28 explicita com surpreendente clareza essa propriedade geométrica da linha curva, e como o tema deste capítulo é sobre as estruturas tubulares seção circular, tem-se aqui um ótimo exemplo a ser analisado.

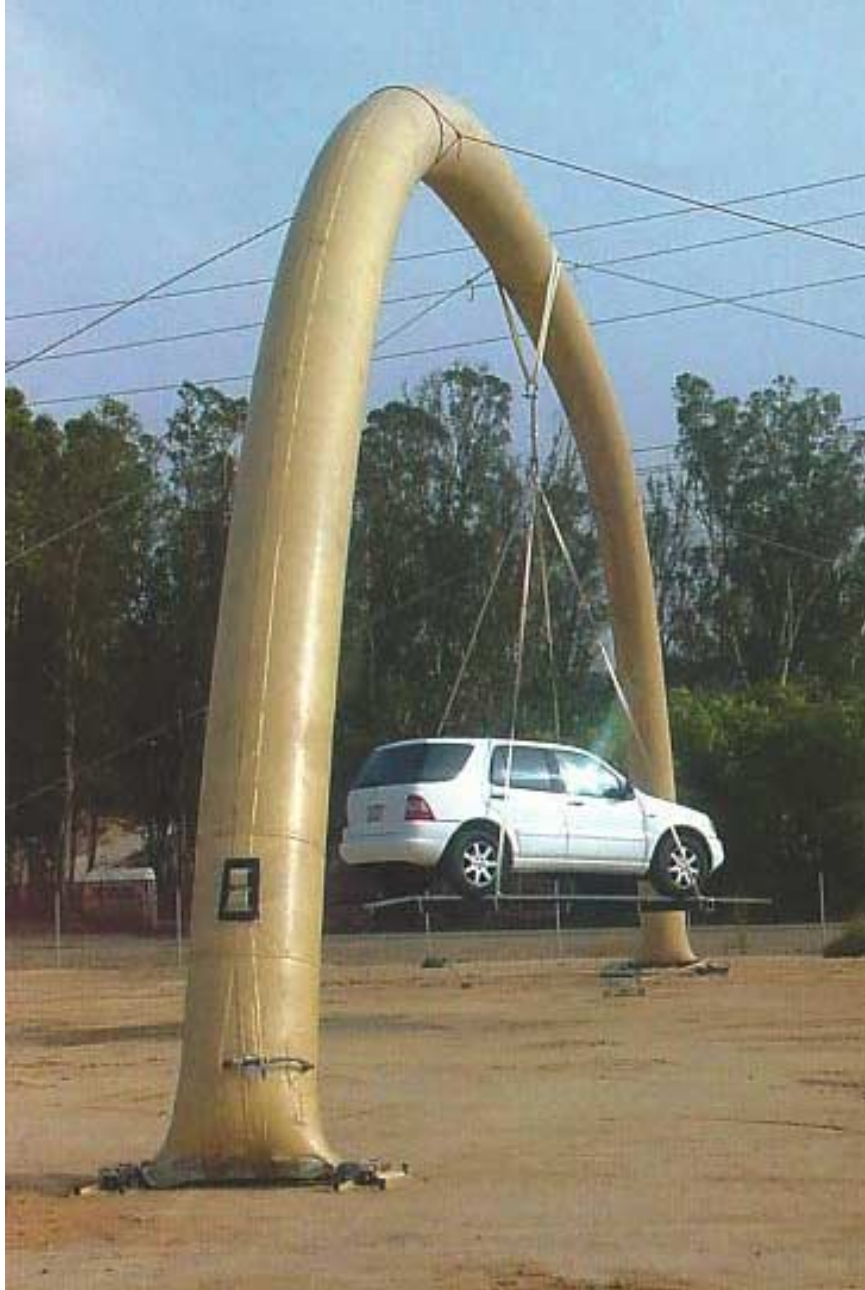


FIGURA 6.28 – Estrutura pneumática em arco  
FONTE - REVIEW, 2002. p.85.

A estrutura em arco apresentada que suporta todo o peso do carro é constituída exclusivamente por uma lona sintética e ar comprimido. Esses tipos de estrutura são caracterizados como estruturas pneumáticas e fazem parte do universo da arquitetura têxtil. Outros exemplos podem ser vistos nas FIG. 6.29 e 6.30.

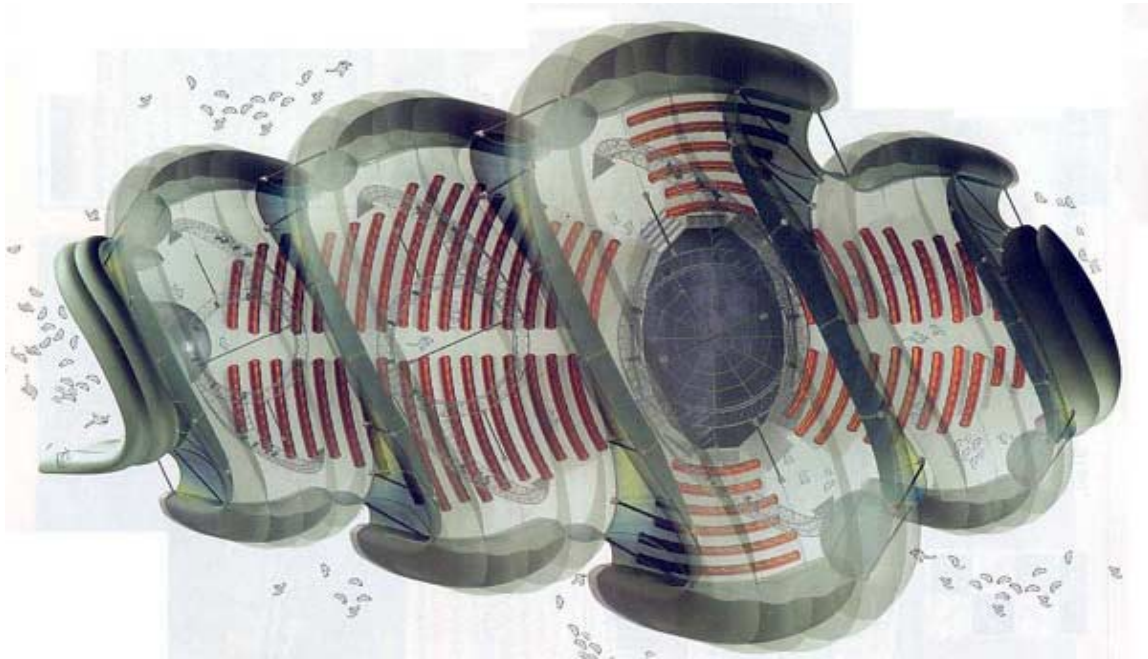


FIGURA 6.29 – Auditório em estrutura pneumática  
FONTE - KIMPLIAN, 2002. p.42,43.



FIGURA 6.30 – Restaurante em estrutura pneumática  
FONTE - KIMPLIAN, 2002. p.38.

Dois aspectos importantes valem a pena serem analisados nestas imagens:

1º Quando o ar pressurizado preenche todo o espaço longitudinal reservado para ele, naturalmente a lona se conformará em uma seção circular. Isto porque essa seção se caracteriza na mais estável para ela, ou seja, toda a sua superfície externa se conformará desta forma, para permitir a distribuição igualitária das tensões em sua superfície provocada pela pressão interna e pelo equilíbrio com a pressão externa. Isso quer dizer que nenhuma fibra de sua superfície estará trabalhando mais que as outras nesta conformação. É o mesmo raciocínio das bolhas de sabão que se mantêm esféricas, para a distribuição igualitária das tensões em toda a sua superfície, evitando, assim, assimetrias, além de envolver o máximo de ar com o mínimo de invólucro.

2º A conformação em arco parabólico é naturalmente a mais estável, pois propicia um “nivelamento” das tensões, ou seja, uma distribuição mais igualitária delas para que cheguem até o solo. É o mesmo princípio utilizado pelos romanos para vencerem grandes vãos através do empilhamento de pedras, princípio que viabilizou a construção de pontes, aquedutos, etc.

*“Nas ‘ artes ’, entretanto, os romanos foram notáveis. Na arquitetura os vãos livres eram vencidos pelos arcos e não por vigas retas, como os gregos. Os arcos, aprendidos com etruscos, permitiam vãos maiores. A descoberta dos arcos não deve ter sido óbvia. Entender que o último pedaço central, quando colocado, travava todos os demais, descarregando os esforços sobre as colunas, não é óbvio.*

*Os aquedutos romanos eram dotados de arcos, para vencer grandes vãos, e ainda hoje estão de pé. Vários deles tinham grande extensão, alguns chegaram a ter mais de 100 quilômetros, escavados em rocha e mantendo nível de escoamento.”<sup>4</sup>*

Se alguém segurar duas extremidades de uma corrente mantendo as mãos com um certo afastamento, essa corrente irá delinear espacialmente um arco parabólico devido à ação da gravidade, sobre o peso dessa, que a manterá na posição mais estável possível, conforme indicado na FIG. 6.31a. No entanto, se essa imagem for invertida, a mesma geometria será também a mais favorável para vencer o mesmo vão e suportar o peso próprio, sobre a ação da gravidade nessa nova posição (FIG. 6.31b). Este raciocínio denominado arcos funiculares

---

<sup>4</sup> LANDI, 2003.

pode ser utilizado em casos mais complexos que vão além do peso próprio, envolvendo cargas concentradas ou distribuídas sobre o arco, definindo novas geometrias conforme o carregamento.

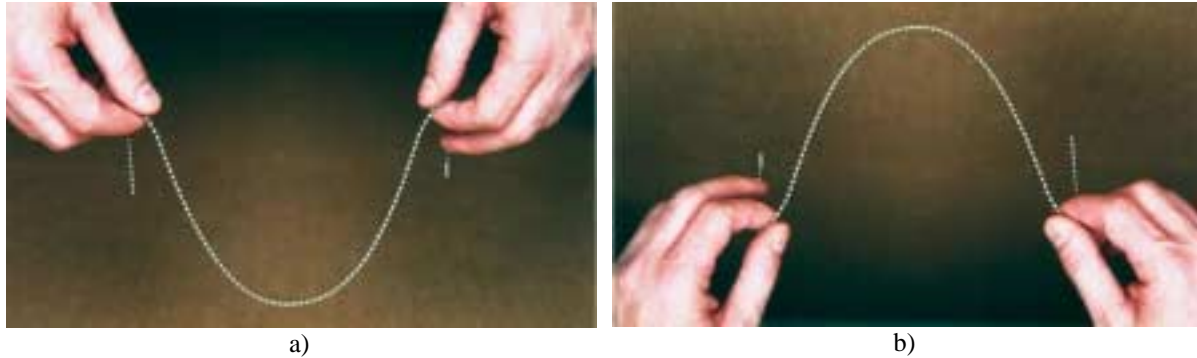


FIGURA 6.31 – a) Catenária em arco parabólico, segundo ação da gravidade sobre a corrente tracionada b) A mesma geometria anterior também é a mais favorável para se vencer o peso próprio numa situação invertida, porém, com seus elementos comprimidos

FONTE - Arquivo pessoal.

Esta metodologia foi utilizada pelo arquiteto catalão Gaudí, como sistemática de projeto e cálculo da igreja da Colônia Güell (FIG. 6.32).

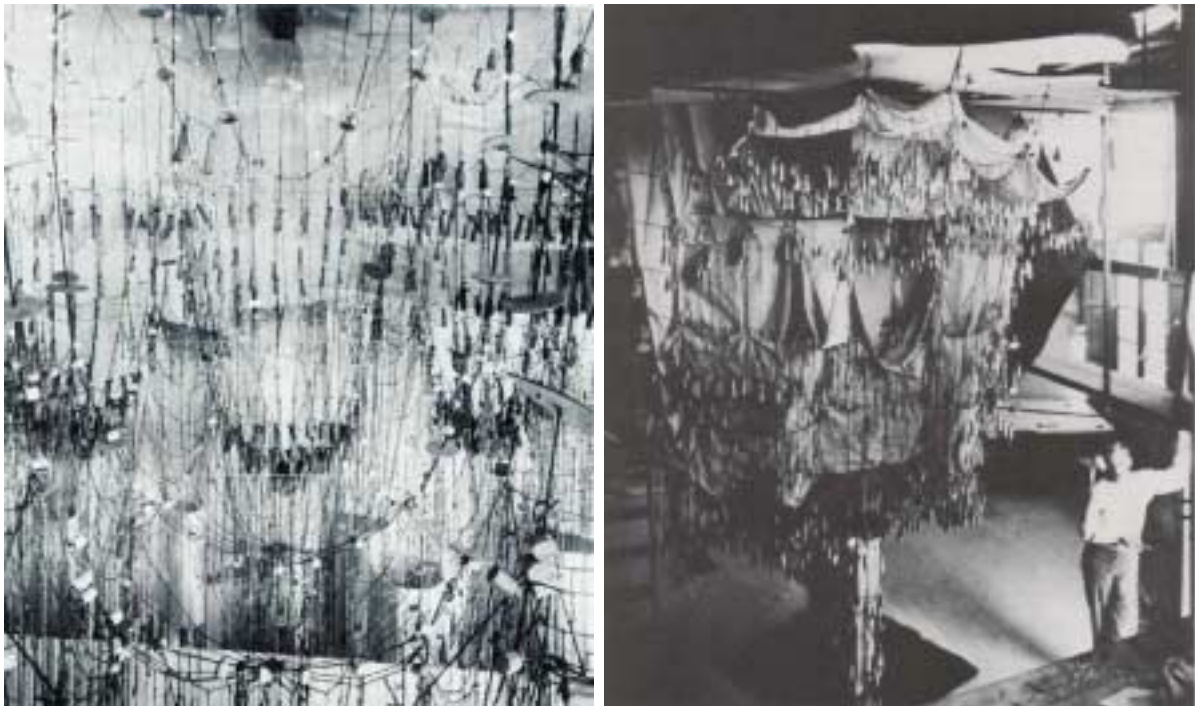


FIGURA 6.32 – Maquete do processo utilizado por Gaudí para o dimensionamento da igreja da Colônia Güell através dos arcos funiculares

FONTE - TARRAGÓ, 1977. p.28,29.

O segredo construtivo para a estabilidade desses arcos consistia no posicionamento final da última pedra em seu topo, que, pela sua geometria (tipo cunha), travava todo o sistema (FIG.6.33a), levando todos os esforços até atingirem o solo (FIG. 6.33b).

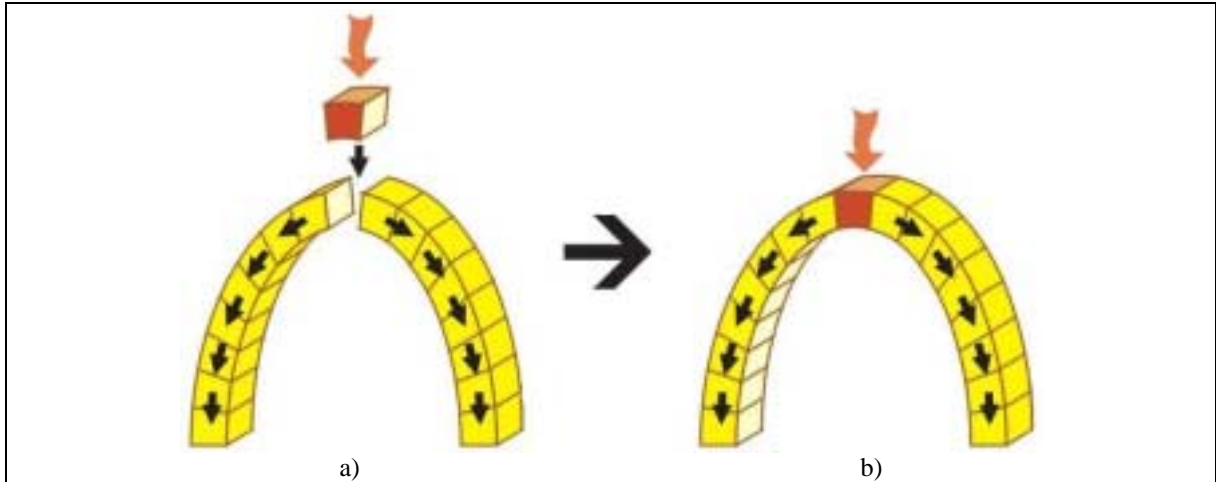


FIGURA 6.33 – Travamento do arco parábólico comprimido  
FONTE - Arquivo pessoal.

Esse raciocínio é análogo à uma abóbada, como mostra a FIG. 6.34.

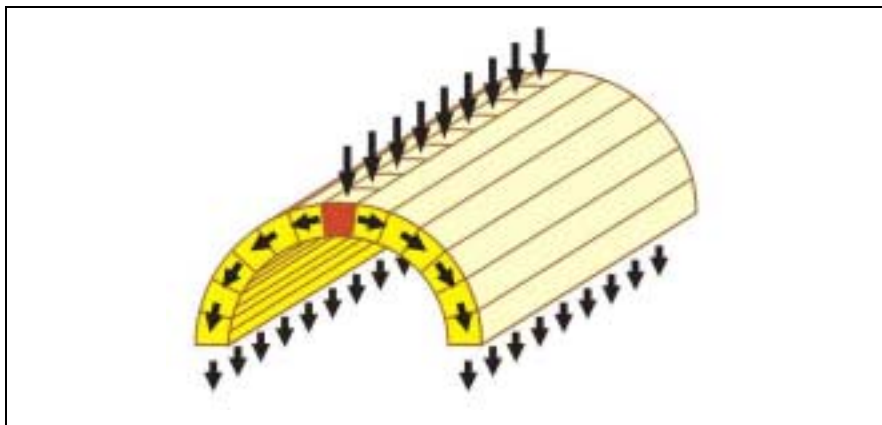


FIGURA 6.34 – Fluxo das cargas em abóbada  
FONTE - Arquivo pessoal.

Imagine esta abóbada refletida pela parte inferior, obtém-se uma imagem de um tubo de seção circular, conforme mostra a FIG. 6.35a, se aproximando do comportamento dos arcos funiculares, onde a flexão é minimizada.



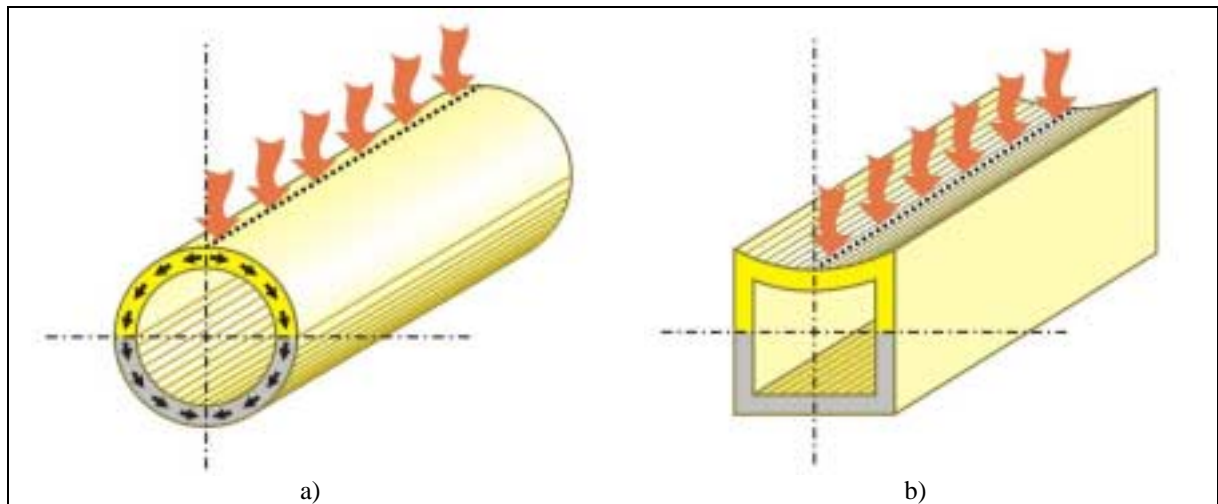


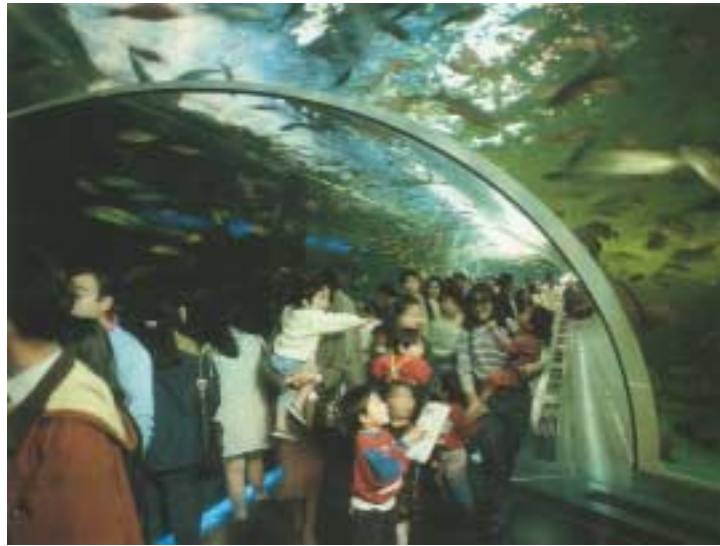
FIGURA 6.35 – a) Fluxo das cargas em tubo cilíndrico b) Fluxo das cargas em tubo quadrangular  
 FONTE - Arquivo pessoal.

No modelo apresentado da FIG. 6.35b, a parede do tubo de seção quadrangular no intuito de absorver a solicitação externa tenderá antes a sofrer uma flexão, assim como num modelo flexional<sup>5</sup>.

É por isso que, quando se quer transportar um desenho ou uma prancha em um formato maior, instintivamente a mesma é enrolada, pois esta geometria fará com que o papel adquira uma maior resistência e também uma melhor aerodinâmica em relação à ação do vento. É também por esse mesmo motivo que as indústrias laminadoras condicionam suas chapas metálicas em bobinas, para a estocagem e o transporte.

Pode-se tirar partido dessa característica, assim como o arquiteto e ex-prefeito de Curitiba Jaime Lerner, o fez, ao conceber esta volumetria para as estações tubos de ônibus sua cidade. Os vidros curvos como superfície de vedação adquirem maior resistência que os planos para cobrirem a mesma área (FIG. 6.36b).

<sup>5</sup> Este conceito de modelo flexional, assim como natural (FILGUEIRAS, 1980), está descrito no item 4.2.



a)



b)

FIGURA 6.36 – a) Parede de aquário em material acrílico b) Estações tubo da cidade de Curitiba com fechamento em vidro

FONTE - a) AQUASCAPES II, 1994. p.54; b) Arquivo pessoal.

A seção circular representa uma ótima geometria para absolver os empuxos do exterior para o interior, como também do interior para exterior (FIG. 6.37a e FIG. 6.37b respectivamente).

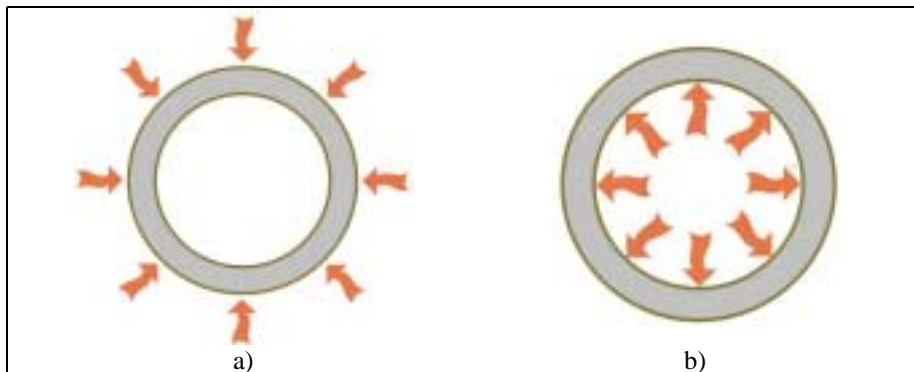


FIGURA 6.37 –Direção dos empuxos em seção circular  
 FONTE - Arquivo pessoal.

Se já foi mencionado várias vezes que a circunferência tem como característica envolver o máximo de conteúdo utilizando-se de um mínimo de perímetro, e que a seção tubular cilíndrica apresenta várias vantagens estruturais em relação às outras, ao adotar este tipo de perfil em projetos, se estará também economizando em área de exposição do perfil, seja ela para proteção contra corrosão ou combate a incêndio.

Entrando agora num campo mais sutil, porém numa abordagem ainda qualitativa (pois seria impossível quantificar tais aspectos), será analisada as propriedades estéticas e visuais da forma dos perfis tubulares.

A continuidade superficial de sua volumetria, desprovida de arestas ou rugosidades, propicia ao olhar do observador menos interferência ou “informações visuais”, transmitindo a ele uma sensação menos agressiva ou “ruidosa”. Esse discurso pode ser talvez melhor compreendido quando analisado comparativamente as FIG. 6.38a e 6.38b.

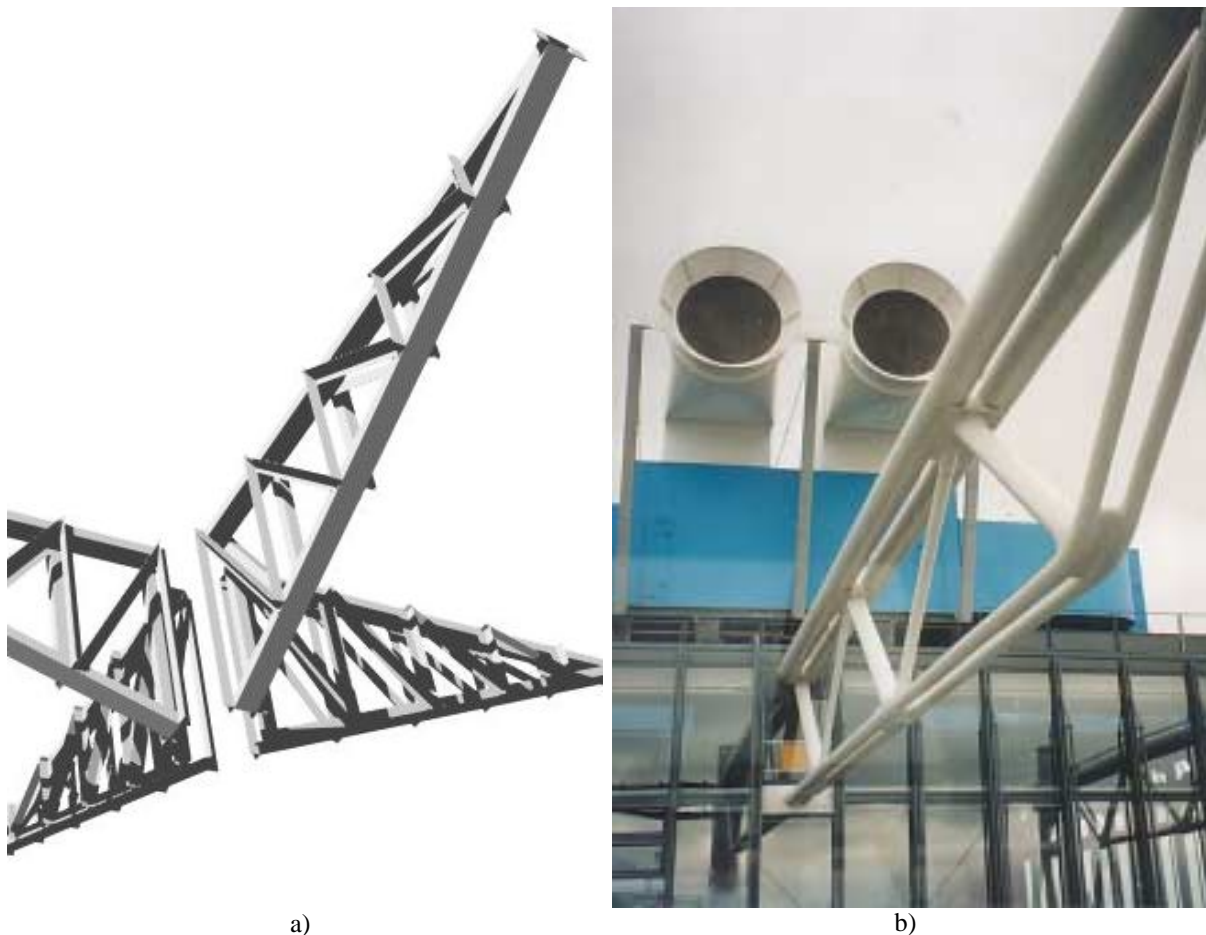


FIGURA 6.38 – a) Detalhe genérico de viga treliçada em chapa dobrada b) Detalhe de viga treliçada do centro cultural Georges Pompidou

FONTE - a) Arquivo pessoal; b) Foto gentilmente cedida pela V&M do Brasil.

Ambas as imagens mostram estruturas treliçadas. A primeira foi constituída por perfis de chapa dobrada em seção não circular a segunda por perfis tubulares. Pode-se perceber claramente que a segunda é mais “amena” aos olhos. Talvez esse seja também um dos motivos que levou a equipe de arquitetos do Centro Cultural Georges Pompidou a utilizar toda a sua estrutura em perfis tubulares, uma vez que a “linguagem” desejada para essa edificação *high-tech* com toda estrutura exposta já fosse de caráter agressivo. Qualquer outra alternativa poderia acentuar demasiadamente essa “agressividade”, a ponto de um desagrado coletivo. Pode-se ver, na FIG. 6.39, imagens desse polêmico projeto.

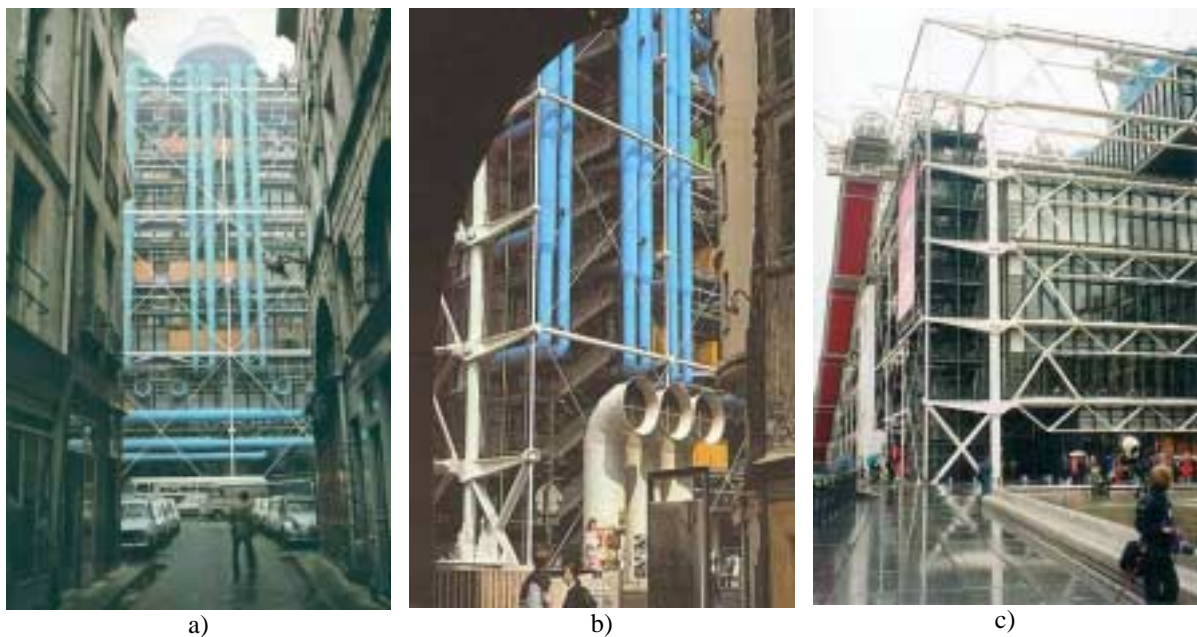


FIGURA 6.39 – Centro Cultural Georges Pompidou

FONTE - a) KRON, 1980. p.31; b) JENCKS, 1982. p.38. c) Foto gentilmente cedida pela V&M do Brasil.

Se alguém se posicionar em um pátio repleto de pilares ordenados à frente, ao tentar avistar uma paisagem ao longe (FIG. 6.40), pode notar que a interferência desses pilares sobre a paisagem será menor, caso eles sejam cilíndricos (caso **a**).

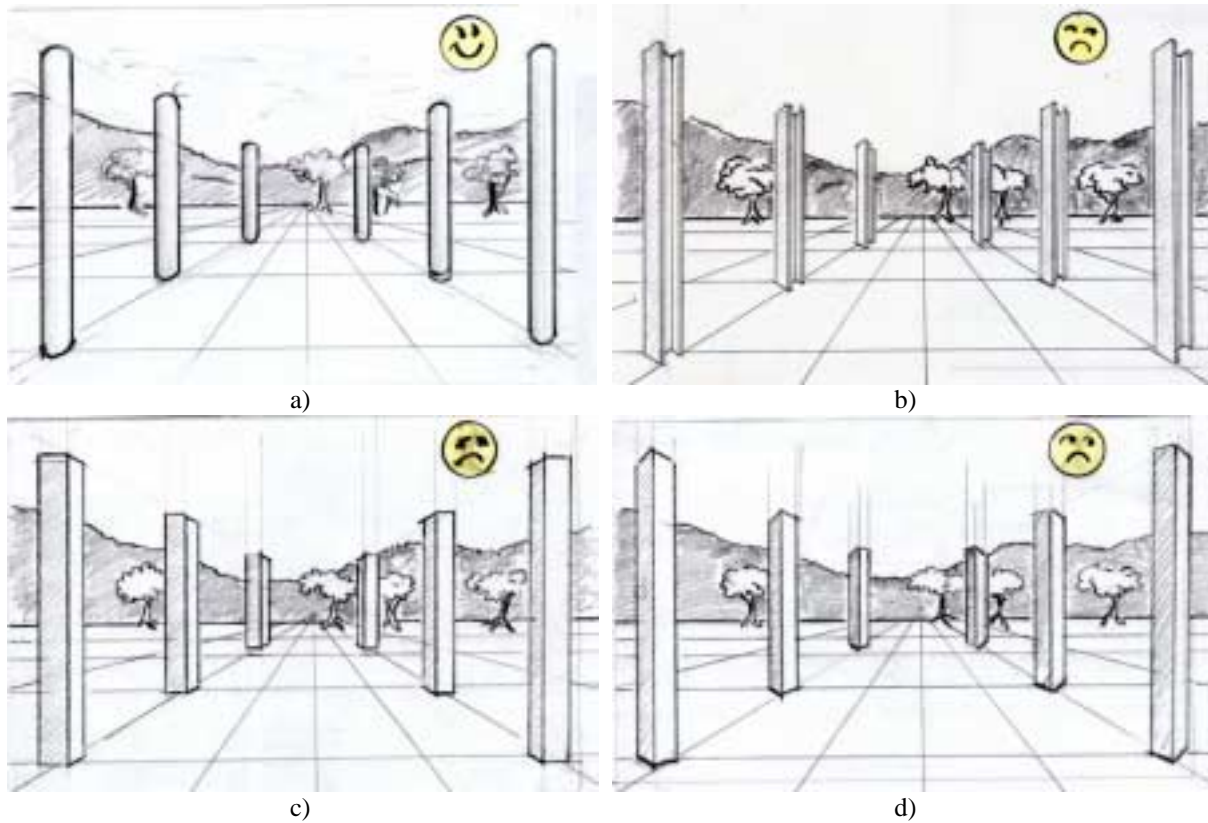


FIGURA 6.40 – Permeabilidade visual do perfil tubular cilíndrico em relação aos outros tipos de seção  
FONTE - Arquivo pessoal.

Semelhante a um efeito de aerodinâmica nos tubos, o “fluxo” das visadas, independentemente da direção, não encontrará arestas para oferecer resistências a ele (FIG. 6.41, 6.42).

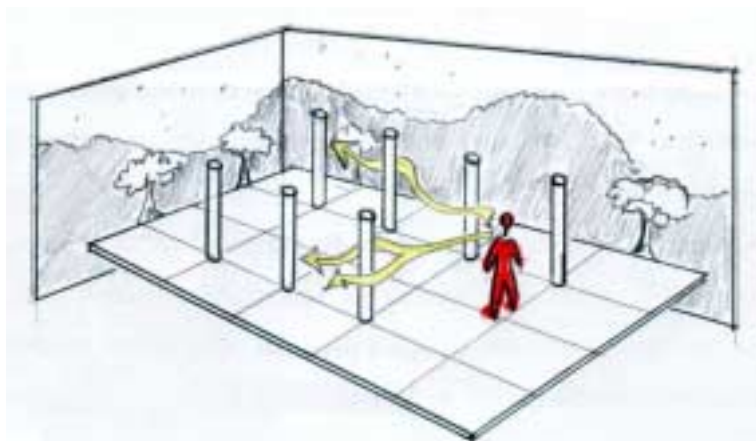


FIGURA 6.41 – Mesma permeabilidade visual em qualquer uma das direções  
FONTE - Arquivo pessoal.

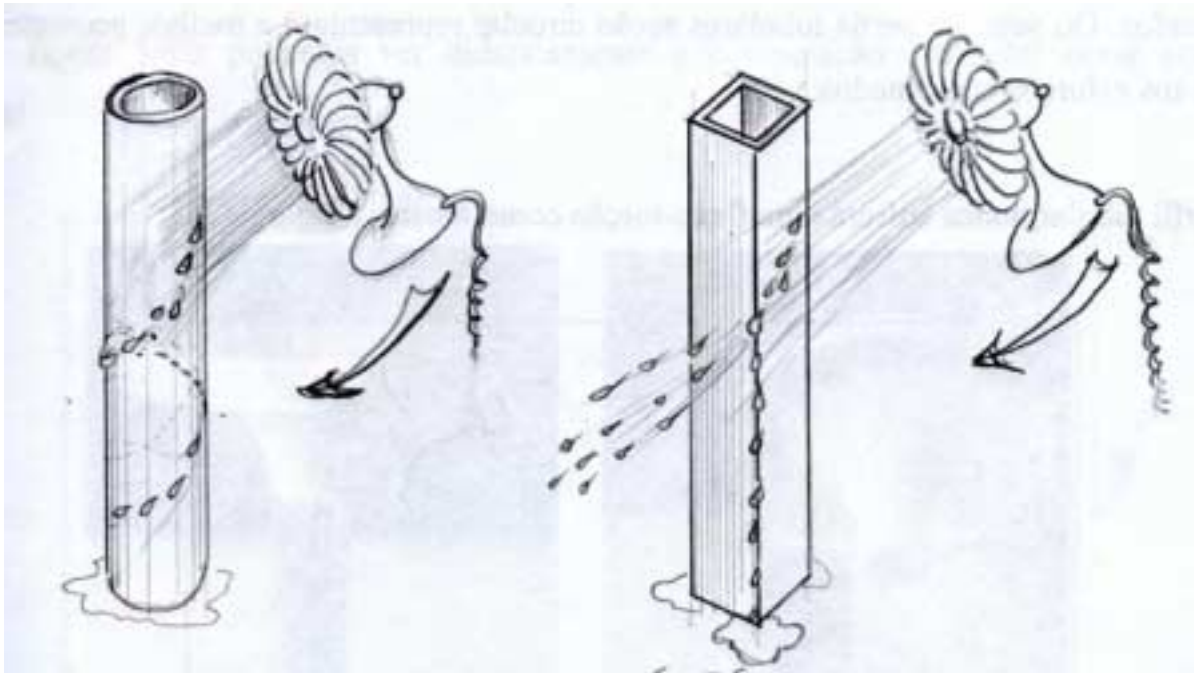


FIGURA 6.42 – A ausência de arestas no tubo de seção cilíndrica, ao contrário do de seção quadrangular, permite um melhor comportamento aerodinâmico, evitando mudanças bruscas na direção dos fluxos  
 FONTE - Arquivo pessoal.

Pode-se dizer que esse tipo de perfil possibilita uma maior “permeabilidade” visual. E isso traz consigo uma outra vantagem estética: dispensa a necessidade do uso de acabamentos, pois seu aspecto final já é acabado (FIG. 6.43).

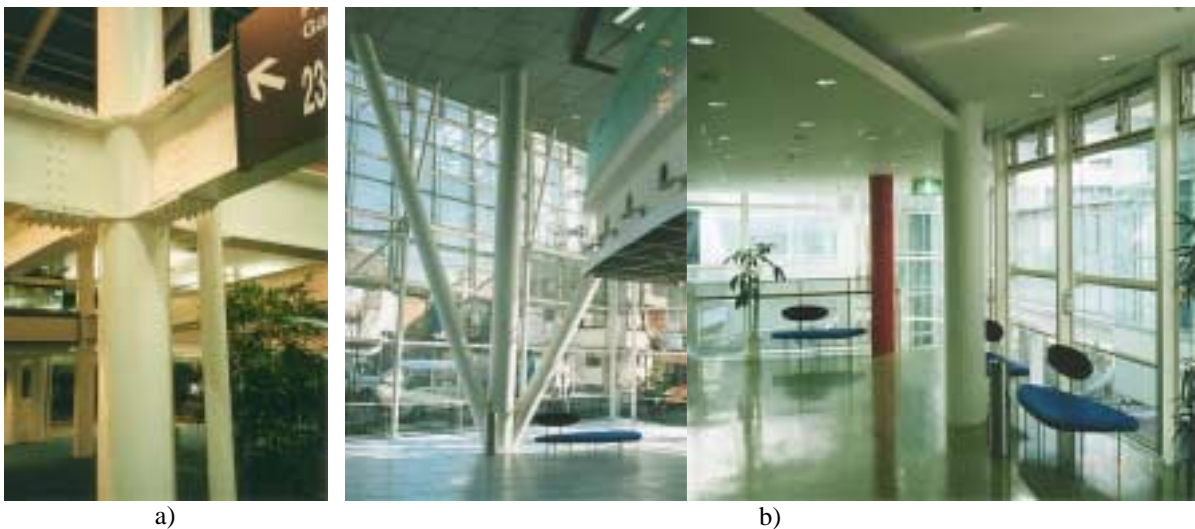


FIGURA 6.43 – O emprego dos perfis tubulares cilíndricos em projetos permite um aspecto final de acabamento dos seus elementos  
 FONTE - a) Foto gentilmente cedida pela V&M do Brasil; b) Arquivo pessoal.

Vale a pena salientar que não quer dizer que as outras seções não possam ser utilizadas aparentemente. Tudo irá depender da carga de expressividade intencional do arquiteto, ou seja, da linguagem a ser adotada em cada projeto.

Uma outra vantagem exclusiva desse tipo de perfil é que sua seção transversal simétrica em todas as direções favorece as ligações entre as barras que se posicionam de maneiras reversas e variáveis no espaço, fazendo dos tubos um dos melhores aliados neste aspecto, quanto às questões estruturais e de montagem (FIG. 6.44).

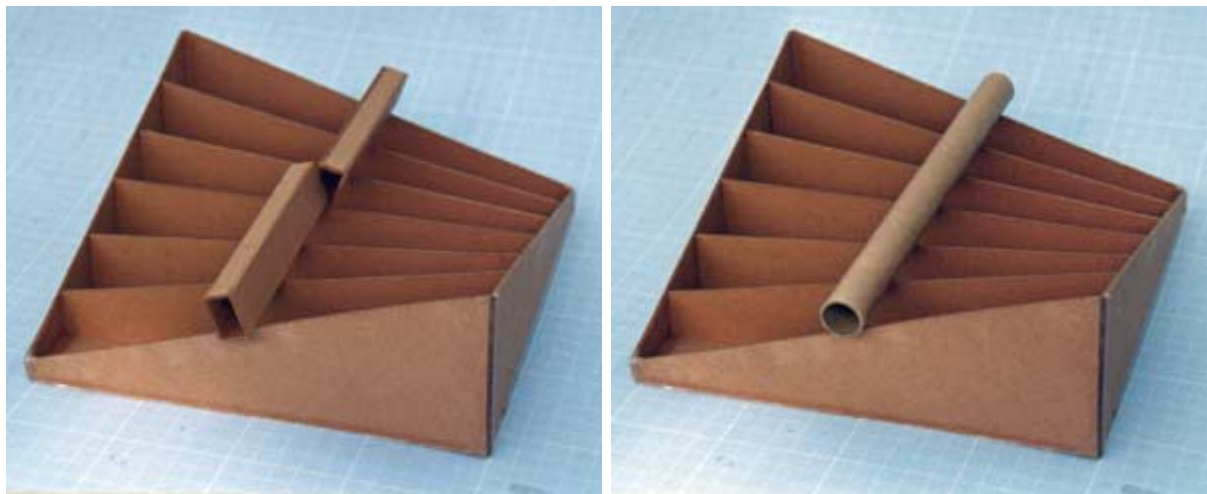


FIGURA 6.44 – Comparação do posicionamento de um perfil genérico com um tubular cilíndrico numa superfície HP, frente à reversibilidade de suas linhas e bordos  
FONTE - Arquivo pessoal.

A FIG. 6.45 apresenta uma gigantesca escultura no Japão projetada pelo arquiteto Arata Isozaki, 1986 a 1990. Sua estrutura foi toda construída com perfis tubulares cilíndricos que se articulam sob a forma de vários tetraedros regulares sobrepostos, gerando em seus bordos uma tripla espiral ascendente de 100 m de altura. Seu recobrimento com painéis triangulares de titânio sempre encontra apoio em toda extensão do perfil, independentemente da posição espacial imposta pelo giro da espiral. Analisando as arestas dessa grande estrutura, pode-se verificar sempre a existência de um ponto de contato constante entre os painéis e os perfis tubulares.

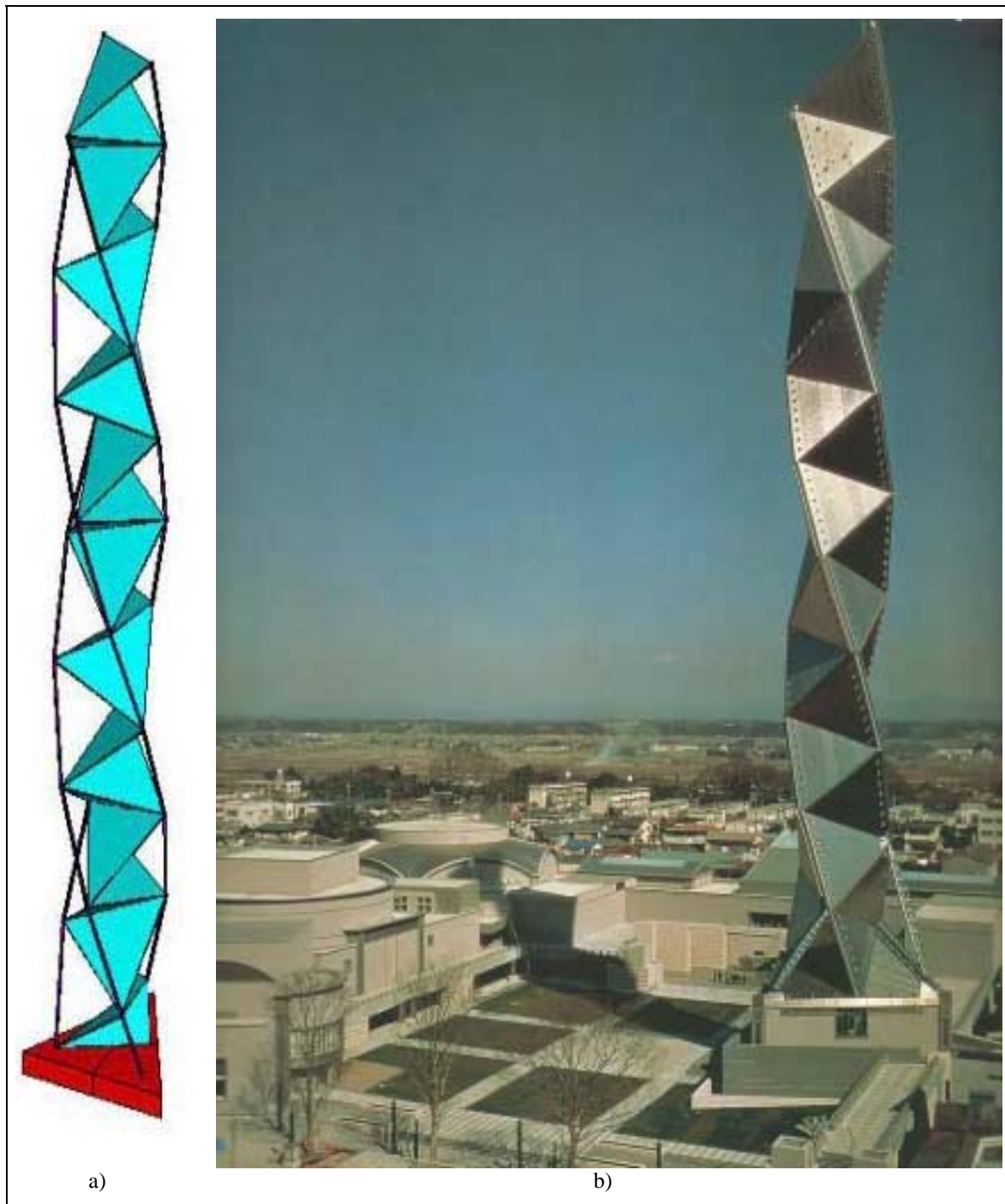


FIGURA 6.45 – Estrutura composta por tetraedros empilhados em estrutura tubular  
FONTE - a)Disponível em: <<http://home.hetnet.nl/~janmarcus/images/tetra-toren.jpg>> Acesso: 19 junho 2003 b) KUROKAWA, 1993. p.284.



## 6.5 Considerações finais - vantagens

De uma forma bem resumida, pode-se enumerar a seguir todas as vantagens dos perfis tubulares de seção circular sobre os demais, apresentados neste capítulo:

1. ótimo desempenho à compressão;
2. ótimo desempenho à torção;
3. ótimo desempenho à tração;
4. ótimo desempenho aos esforços combinados;
5. ausência de flambagem lateral com torção;
6. menor perímetro para maior conteúdo, o que representa economia e otimização na utilização desse material;
7. menor área para proteção contra incêndio e contra oxidação;
8. melhor resistência ao fogo pela menor massividade, quando comparado a outros com mesmo consumo de material;
9. possibilidade de utilização e aproveitamento de seu interior;
10. facilidade de condicionamento do concreto em seu interior, constituindo pilares reforçados de estrutura mista;
11. ótima resistência a impactos e empuxos (de fora para dentro e vice-versa);
12. aspecto visual “limpo” (menos poluição visual), menos agressivo, ameno ao olhar;
13. maior permeabilidade visual;
14. melhor desempenho aerodinâmico;
15. melhor acoplamento com outros elementos nos casos de posições reversas espacialmente.

## 7 ESTRUTURAS HIPERBÓLICAS

### 7.1 As primeiras estruturas HP

Como visto no capítulo 5, as primeiras estruturas anticlásticas ou de conformações hiperbólicas (de dupla curvatura) foram construídas pela natureza.

Não se pode precisar com exatidão o início destas estruturas na arquitetura, mas a arquitetura catalã, que tem **Gaudí** como seu expoente mais significativo, desenvolveu-se qualitativamente segundo este preceito natural, que podem ser comprovados na riqueza das obras deixadas por esse grande mestre.

Não é de se espantar que a primeira utilização do HP com finalidades estruturais em edificações seja atribuída a esse arquiteto catalão, na Cripta da Igreja Colônia Güell, em Santa Coloma de Cervelló, 1908-1914 (FIG. 7.1).

Antônio Gaudí influenciou e continua influenciando enormemente toda uma produção estrutural de grandes engenheiros e arquitetos estruturalistas. Segundo Tarragó, seus discípulos colaboradores, ajudantes e amigos, Francisco Berenger, Joan Ruió, Bellver, Josep María Jujol, Gilbert, Lluís Moncunill, Josep Puig, Cadafalch, Domenech Sugrañes e César Martinelli, sofreram diretamente suas influências pela proximidade. Entretanto, alguns outros também sofreram influência direta, como: Félix Candela, Frei Otto, José Antônio Fernandez Ordões. E, quanto às indiretas, por ser praticamente impossível citar, Tarragó identifica influências explícitas em alguns trabalhos de grandes arquitetos como: Le Corbusier, F. Lloyd Wright, Alvar Aalto, Richard Neutra, Josep L. Sert, etc<sup>1</sup>. Oscar Niemeyer e Santiago Calatrava não são citados, mas pode-se identificar sua influência, pela plasticidade e organicidade de suas formas.

---

<sup>1</sup> TARRAGÓ, 1977. p.46-48.



a)



b)



c)

FIGURA 7.1 – A **Gaudí**. Cripta da igreja Colônia Güell em Barcelona.

FONTE - a) TARRAGÓ, 1977. p.225 b), c) Disponível em: <<http://personal2.iddeo.es/ramoncuevas/pag12.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2003.

Na TAB. 7.1 tem-se o histórico do aparecimento dos primeiros HPs na arquitetura de acordo com Tarragó:

TABELA 7.1  
Listagem cronológica da utilização dos HPs na arquitetura

1908 - 1914	A. Gaudí	Cripta da igreja da Colônia Güell (Abóbadas revestidas de cerâmica).	1957	F. Candela , J. A.Ordoñez	Restaurante Los Manantiales em Xochimilco, México (H A).
1915 - 1926	A. Gaudí	Terceiro projeto da Sagrada Família	1958	L. J.Baucher, J. P. Blondel R. Sarger	Pavilhão de informação em Bruxelas (HA)
1933	B. Laffaille	Dupla curvatura em Dreux, França (em concreto armado).	1958	F. Candela	Capela de Lomas de Cuernavaca, México (HA).
1935	E. Torroja	Hipódromo de Zarzuela, Madrid (HA)	1959 - 1960	F. Candela , E. Mora	Capela de São. Vicente em Coyocán, México (HA).
1937	G. Baroni	Oficinas de Alfa Romeo em Milão (HA).	1959 - 1960	F. Candela, E. Mora	Capela de São José Operário em Monterrey, México (HA).
1938	G. Baroni	Oficinas de Alfa Romeo em Ferrara (HA).	1960	F. Candela	Nave industrial da Nacional Distribuidora S. A., México (HA).
1950 - 1951	J. L. Couter, P. Herbe, B. Laffaille	Igreja de Nossa. Sra. De França em Bizerta (HA).	1960	F. Candela	Fábrica Lamex AS, Ponte de Vigas, México (HA).
1951	F. Candela , J. G. Reina	Laboratórios de estudos de raios cósmicos. Universidade do México (HA).	1960	J. W. Storrs, J. G. Pierson	Pavilhão de exposição em Portland, Oregon, USA (HA).
1953 - 1957	P. L. Nervi	Marquise de entrada do edifício da Unesco em Paris (HA).	1963	F. Otto	Diversos pavilhões na Exposição Internacional de Jardinagem em Hamburgo (tecido).
1955	F. Otto	Diversos toldos para orquestra na Exposição federal de Jardinagem de Kassel (tecido).	1963	F. Otto	Pavilhão “Neve e Pedras” na Exposição Nacional Suíça em Lausana Exposição de 64 (tecido).
1955	F. Candela	Fábrica Jerdez em Tacuba, México (HA).	1965 - 1967	F. Otto	Pavilhão na Alemanha na Expo 67 de Montreal (tecido).
1955	F. Otto	Hangares e tendas para la Missão do Padre Schulte (tecido)	1968	F. Otto	Instituto de investigação de estruturas leves, Universidade de Stuttgart (madeira e pedra).
1956 - 1957	F. Candela, E. Mora	Igreja Nossa. Maria de la Soledad em Coyocán, México (HA).	1968	F. Candela	Pavilhões Esportivos dos Jogos Olímpicos do México (HA).
1957	F. Candela, E. Mora	Igreja de Santo. Antonio de las Huertas en Tacuba, México (HA).	1969- 1972	F. Otto	Cobertura dos Jogos Olímpicos de Munique (plástico)
1957	F. Otto	Diversos pavilhões e tendas na Feira Internacional de Interbau em Berlin (HA).			

FONTE - TARRAGÓ, 1977. p.48.

A seguir algumas outras imagens destes projetos em ordem cronológica (FIG. 7.2 - 7.15).



FIGURA 7.2 – **E. Torroja**. Hipódromo de Zarzuela, Madri. 1935

FONTE - Disponível em: <<http://www.ietcc.csic.es/centenario/Fip-Hipodromo.JPG>>. Acesso em: 17 dez. 2003.



FIGURA 7.3 – **F. Candela**. Laboratório de estudos de raios cósmicos. Universidade do México. 1951

FONTE - Disponível em: <[http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela\\_catalog\\_files/data/catalog1/36.jpg](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela_catalog_files/data/catalog1/36.jpg)> Acesso em: 17 dez. 2003.



FIGURA 7.4 – **P. L. Nervi**. Marquise da entrada da sede da UNESCO em Paris. 1953-1957

FONTE - SIEGEL, 1967. p.253.

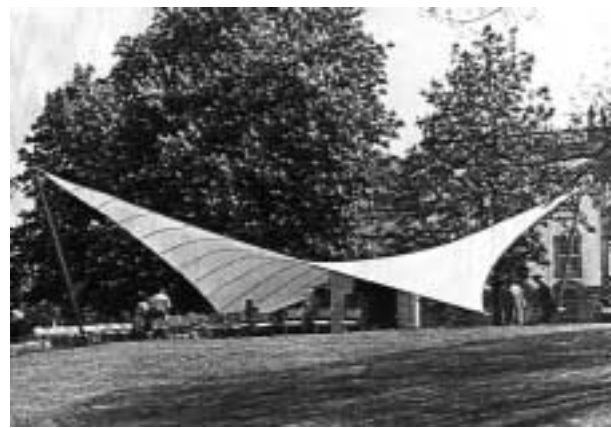


FIGURA 7.5 – **F. Otto**. Tenda em lona para orquestra na exposição federal de jardinagem de Kassel. 1955

FONTE - Disponível em: <<http://www.archinform.info/media/1/00000110.jpg>>. Acesso em: 17 dez. 2003.



a)



b)

FIGURA 7.6 – **F. Candela**. Igreja de Nossa. Maria. de la Soledad em Coyocán, México. 1956-1957

FONTE - a) Disponível em: <[http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela\\_catalog\\_files/data/catalog1/11.jpg](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela_catalog_files/data/catalog1/11.jpg)> Acesso em: 17 dez. 2003 b) Disponível em: <[http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela\\_catalog\\_files/data/catalog1/12.jpg](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela_catalog_files/data/catalog1/12.jpg)> Acesso em: 17 dez.2003.



a)



b)

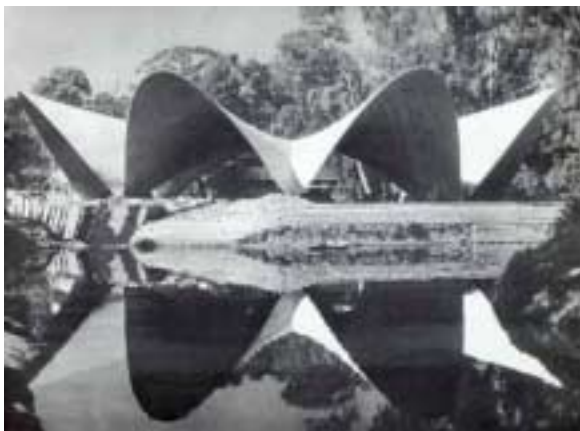
FIGURA 7.7 – **F. Candela**. Igreja de Santo Antônio de las Huertas em Tacuba, México. 1957

FONTE - a) Disponível em: <[http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela\\_catalog\\_files/data/catalog1/46.jpg](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela_catalog_files/data/catalog1/46.jpg)> Acesso em: 17 dez. 2003; b) disponível em: <[http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela\\_catalog\\_files/data/catalog1/47.jpg](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela_catalog_files/data/catalog1/47.jpg)>. Acesso em: 17 dez. 2003.



FIGURA 7.8 – **F. Otto**. Tendas da feira internacional de Interbal., Berlim, Alemanha. 1957

FONTE - Disponível em: <[http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela\\_catalog\\_files/data/catalog1/22.jpg](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela_catalog_files/data/catalog1/22.jpg)>. Acesso em: 17 dez. 2003.



a)



b)

FIGURA 7.9 – **F. Candela**. Restaurante Los Manantiales em Xochimilco, México. 1957

FONTE: a) SIEGEL, 1967. p. 269 b) Disponível em: <<http://www.ketchum.org/shellpix/groinv02.jpg>>. Acesso em: 17 dez. 2003.

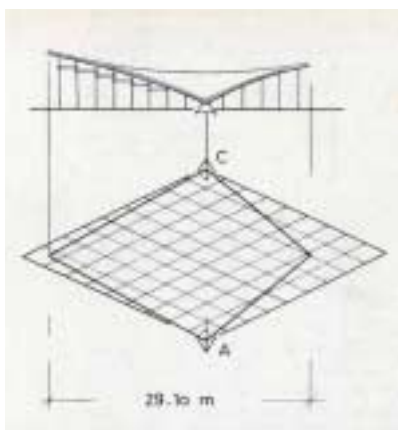


FIGURA 7.10 – **L. J. Baucher**. Pavilhão de informações em Bruxelas. 1958  
 FONTE - SIEGEL, 1967. p.265.



FIGURA 7.11 – **F. Candela**. Capela de Lomas de Cuernavaca, México. 1958  
 FONTE - Disponível em: <[http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela\\_catalog\\_files/data/catalog1/22.jpg](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela_catalog_files/data/catalog1/22.jpg)>. Acesso em: 17 dez. 2003.

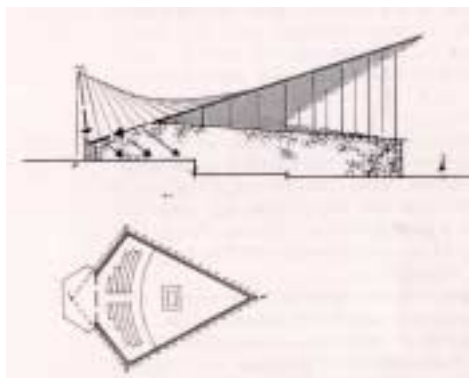


FIGURA 7.12 – **F. Candela**. Capela de São Vicente em Coyacán, México. 1959-1960  
 FONTE - SIEGEL, 1967. p.265.



FIGURA 7.13 – **F. Candela**. Capela de São José Operário em Monterrey, México. 1959-1960  
 FONTE - Disponível em: <[http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela\\_catalog\\_files/data/catalog1/44.jpg](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Candela/Catalog/Candela_catalog_files/data/catalog1/44.jpg)>. Acesso em: 17 dez. 2003.



FIGURA 7.14 – **F. Otto**. Pavilhão da Alemanha na Expo 67 de Montreal. (cobertura em tecido) 1965-1967  
 FONTE - Disponível em: <<http://freiotto.com/FreiOtto/FreiOttoNetzkonstruktionenGross.htm>>. Acesso em: 17 dez. 2003.



FIGURA 7.15 – **F. Otto**. Estádio para os jogos olímpicos de Munique. (cobertura em plástico) 1969-1972  
 FONTE - ROBBIN, 1996. p.23.

## 7.2 Usos e aplicações

Devido a estas diversas vantagens características desta forma, não é de se estranhar o aparecimento do HP em vários campos de aplicações construtivas ou não. Curiosamente estruturas reticuladas (metálicas ou não) com esta forma são raríssimas. Procura-se apresentar nas FIG. 7.16 - 7.33 algumas aplicações das superfícies de dupla curvatura em geral, preferencialmente em edificações.



a)



b)



c)

FIGURA 7.16 – Estruturas de dupla curvatura concebidas por Gaudí: a) Porta Finca Miralles estruturada por superfície de dupla curvatura b) Cobertura das escolas da Sagrada Família sob a forma de HP c) Pilar situado no parque Güell sob a forma hiperbólica

FONTE - a) Disponível em: <<http://www.gaudi2002.bcn.es/enimngs/mbadia/FINCA-2.jpg>>. Acesso em: 17 nov. 2003 b) TARRAGÓ, 1977. p.284 c) Disponível em: <<http://personal2.iddeo.es/ramoncuevas/park2.jpg>>. Acesso em: 17 nov. 2003.





FIGURA 7.17 – Escultura com superfície HP

FONTE - Disponível em: <<http://www.jorlando.com/JUB.htm>>. Acesso em: 20 fev. 2002.



a)



b)

FIGURA 7.18 – Cobertura em HP do Court House Square. Denver, Colorado

FONTE - a) Disponível em: <[http://nisee.berkeley.edu/thumbnail/6257\\_3021\\_0661/IMG0045.jpg](http://nisee.berkeley.edu/thumbnail/6257_3021_0661/IMG0045.jpg)>. Acesso em: 20 fev. 2002 b) Disponível em: <[http://nisee.berkeley.edu/thumbnail/6257\\_3021\\_0661/IMG0046.jpg](http://nisee.berkeley.edu/thumbnail/6257_3021_0661/IMG0046.jpg)>. Acesso em: 20 fev. 2002.



FIGURA 7.19 – Cobertura em HP do hall de entrada de um motel. Las Vegas, Nevada  
 FONTE - Disponível em: <[http://nisee.berkeley.edu/thumbnail/6257\\_3021\\_0661/IMG0074.jpg](http://nisee.berkeley.edu/thumbnail/6257_3021_0661/IMG0074.jpg)>. Acesso em: 20 fev. 2002.



FIGURA 7.20 – Abrigo de chuva. Olanesti, Romênia  
 FONTE - Disponível em: <<http://www.structurae.de/photos/mihailescu/olanesti01.jpg>>. Acesso em 22 jan. 2002.



FIGURA 7.21 – Cobertura metálica em HP  
 FONTE - Disponível em: <<http://home.hetnet.nl/~janmarcus/images/hypar.jpg>>. Acesso em 19 jun. 2003



FIGURA 7.22 – HP em madeira na Expo de Hanover 2000, Alemanha  
 FONTE - LYALL, 2002. p.207.



a)



b)



c)

FIGURA 7.23 – Cobertura em HP da catedral de Santa Maria. São Francisco, Califórnia  
 FONTE - a) Disponível em: <[http://nisee.berkeley.edu/thumbnail/6257\\_3021\\_0661/IMG0061.jpg](http://nisee.berkeley.edu/thumbnail/6257_3021_0661/IMG0061.jpg)>. Acesso em: 20 fev. 2002 b) Disponível em: <[http://nisee.berkeley.edu/thumbnail/6257\\_3021\\_0661/IMG0059.jpg](http://nisee.berkeley.edu/thumbnail/6257_3021_0661/IMG0059.jpg)> Acesso em: 20 fev. 2002; c) Disponível em: <<http://www.structurae.de/de/photos/img8824.php>>. Acesso em: 25 nov. 2003.



FIGURA 7.24 – Museu em Chinchester, UK, com estrutura de madeira em dupla curvatura  
 FONTE - Disponível em: <[http://www.structurae.de/photos/fir1341/peri\\_scaffolding\\_weald\\_2\\_1g.jpg](http://www.structurae.de/photos/fir1341/peri_scaffolding_weald_2_1g.jpg)>. Acesso em: 18 nov. 2003.

FIGURA 7.25 – Estado de equilíbrio do filme de PVC com a presença da dupla curvatura indicada a caneta  
 FONTE - Arquivo pessoal.



a)

b)

FIGURA 7.26.– Estação rodoviária de Predeal, Romênia, 1964

FONTE - a) Disponível em: <<http://www.structurae.de/photos/mihailescu/predeal02.jpg>> Acesso em: 18 nov. 2003 b) Disponível em: <<http://www.structurae.de/photos/mihailescu/predeal01.jpg>> Acesso em: 18 nov. 2003



FIGURA 7.27 – Centro esportivo de Onesti, Romênia, 1966

FONTE - Disponível em: <<http://www.structurae.de/photos/mihailescu/onesti01.jpg>> Acesso em 18 nov. 2003.

FIGURA 7.28 – Reservatório de água de Möglingen, Alemanha. 1965

FONTE - Disponível em: <<http://www.structurae.de/photos/106/moeglingen01.jpg>>. Acesso em: 18 nov. 2003.



a)



b)



c)



d)



e)

FIGURA 7.29 – Cobertura de aeroporto em HP (tenso estrutura)

FONTE - a) Disponível em: <<http://www.kiat.net/klia/images/mtb13.jpg>>. Acesso em: 22 jan. 2002; b) disponível em: <<http://www.kiat.net/klia/images/mtb11.jpg>>. Acesso em: 22 jan. 2002 c) Disponível em: <<http://www.kiat.net/klia/images/mtb4.jpg>>. Acesso em 22 jan. 2002 d) Disponível em: <<http://www.kiat.net/klia/images/mtb5.jpg>>. Acesso em: 22 jan. 2002 e) Disponível em: <<http://www.kiat.net/klia/images/mtb9.jpg>>. Acesso em: 22 jan. 2002.



FIGURA 7.30 – Passarela de pedestre em hiperbolóide de revolução  
FONTE - Disponível em: <[http://www.structurae.de/photos/ice/corporation\\_street01.jpg](http://www.structurae.de/photos/ice/corporation_street01.jpg)>. Acesso em: 25 nov. 2003.



FIGURA 7.31 – Passarela em Curitiba de estrutura tubular reticulada hiperbólica  
FONTE - Foto gentilmente cedida por Fernanda de Sousa Gerken.



FIGURA 7.32 – Igreja católica com cobertura em HP - Tóquio, Japão  
FONTE - Arquivo pessoal

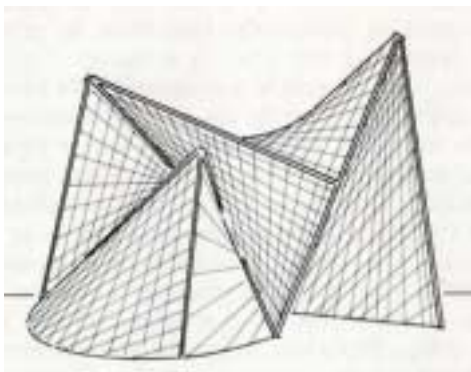


FIGURA 7.33 – Pavilhão da Philips projetado por Le Corbusier para a Expo de Bruxelas. 1958  
FONTE - SIEGEL, 1967. p.262,263

### 7.3 Exemplo de projeto e fabricação de produto

A partir das pesquisas desenvolvidas, foi realizada uma proposição de projeto de estrutura utilitária através do acoplamento de módulos regulares, em variadas disposições. Projetado inicialmente para o *stand* da V & M do Brasil-Vallourec & Mannesmann Tubes no I CICOM de 2001 (FIG. 7.34)., ocupando uma área quadrangular de 4.6m x 4.6m entre eixos de pilares, o projeto teve como premissa básica a obtenção do máximo efeito plástico dos tubos metálicos, com a fabricação do menor número de tipologia de peças possível. Para viabilizar tal condição, destaca-se a importância da Coordenação Modular como um procedimento indispensável para, através da combinação de módulos ou elementos padronizados, obter vários arranjos, sem, “cair na monotonia”, e evitando custos adicionais (FIG. 7.35).



FIGURA 7.34 – Projeto do *stand* da V & M do Brasil-Vallourec & Mannesmann Tubes no I CICOM de 2001  
FONTE - Arquivo pessoal.

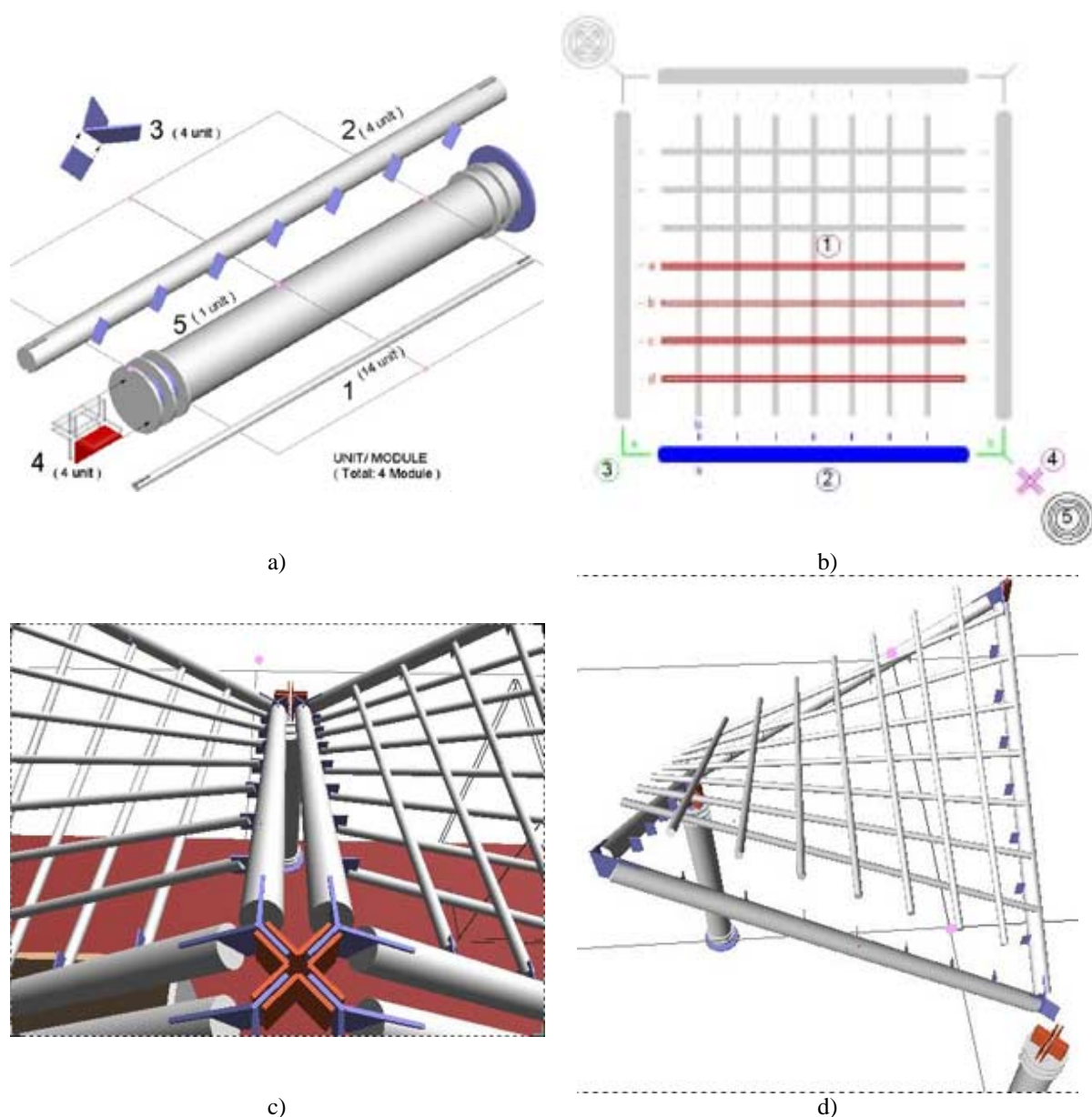


FIGURA 7.35 – Detalhes de projeto do produto desenvolvido durante pesquisa: **a)** Codificação e quantitativos dos elementos **b)** Disposição dos elementos para montagem **c)** Vista em detalhe das conexões **d)** Montagem  
 FONTE - Arquivo pessoal.

Cabe ressaltar que essa estrutura específica, composta por quatro módulos de HP, não foi concebida com nenhuma preocupação estrutural além do seu peso, mas sim com a necessidade de atender as implicações de um stand promocional: facilidade de transporte, de montagem, além de incorporar um apelo de “marketing visual” da empresa, utilizando-se do seu próprio produto. Posteriormente, uma outra estrutura idêntica foi produzida e doada à Prefeitura do Campus Universitário da escola de Minas de Ouro Preto e se encontra hoje erguida como “Monumento Vallourec & Mannesmann” em frente à Escola de Minas do Campus do Morro do Cruzeiro da UFOP-MG (FIG. 7.36).





a)



b)



c)



d)



e)



f)

FIGURA 7.36 – Monumento V & M - produto desenvolvido durante pesquisa: **a)** Detalhe da fabricação **b)** Detalhes de montagem **c), d)** Vistas gerais **e), f)** Vistas em detalhe  
FONTE - Arquivo pessoal.

# 8 INVESTIGAÇÃO COMPORTAMENTAL COMPARATIVA

## 8.1 Objetivo

Para aproximar e aprofundar as relações formais com o desempenho estrutural, dentro do universo escolhido, ou seja, o parabolóide hiperbólico (HP), e apresentada a seguir uma avaliação sobre qual seria a melhor relação de seu empenamento com o seu comportamento estrutural. Este capítulo tem como premissa básica se ater exclusivamente à abordagem qualitativa comparativa das estruturas propostas.

Tomando como exemplo o experimento comprobatório do item 4.5, pode-se comprovar que entre os dois modelos, modelo plano (FIG. 4.40) e o modelo HP (FIG. 4.41), este último apresentou-se mais “vantajoso” estruturalmente em relação ao primeiro, conforme os dados exibidos na TAB. 4.1.

Esses valores coletados foram de uma estrutura reduzida em papelão, com um declive de 6,5 cm de altura para 19,5 cm de projeção horizontal, conforme indicado na FIG. 4.39. Isso significa que sua aresta de borda fez com o plano horizontal um ângulo  $\alpha$  igual a  $18,43^\circ$ , denominado, a partir de agora de, “empenamento do HP”. Ficou provado neste caso que um empenamento igual a  $18,43^\circ$  possibilitou uma estrutura mais otimizada em relação a uma outra de empenamento zero. Este dado estimula a indagação sobre o que aconteceria com o desempenho estrutural do HP com a variação deste ângulo, como seria a relação de sua eficiência estrutural em relação ao seu grau de empenamento.

No intuito de parametrizar esta relação, propõe-se fazer uma investigação comportamental comparativa das estruturas HP em escala real e constituída por perfis tubulares metálicos de seção circular, nos mais variados ângulos. A partir desta investigação, cuja metodologia será apresentada a seguir, pretende-se avaliar qual HP seria mais eficiente.

## 8.2 Metodologia

Devido às vantagens citadas no item 6.5, em especial as indicadas na FIG. 6.44, todas as estruturas pesquisadas foram completamente idealizadas para perfis metálicos tubulares de seção circular. Estas estruturas foram modeladas dentro de um programa de cálculo estrutural<sup>1</sup> para poderem ser quantificadas e parametrizadas segundo seus desempenhos estruturais, tendo os pesos finais das estruturas versus suas áreas de projeção de recobrimento como parâmetro comparativo.

Analogamente ao experimento comprobatório - item 4.5 -, preliminarmente foi modelado no programa um módulo quadrangular de 8.000 x 8.000 mm (entre eixos) composto por 9 barras verticais e 9 horizontais, equidistantes umas das outras, formando uma grelha metálica reticulada plana de malha igual a 1.000 x 1.000 mm.

Seguindo a mesma modulação, mais três módulos foram modelados a partir das duas arestas perpendiculares existentes do primeiro módulo básico, totalizando quatro módulos que se fundem formando um quadrado maior de 16.000 x 16.000 mm, conforme indicado na FIG. 8.1. Esta modelagem será denominada de empenamento zero, ou seja, modelo:  $\alpha = 0^\circ$ .

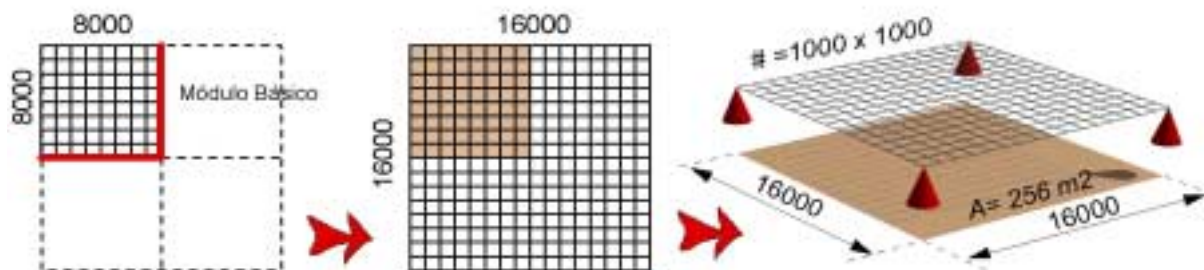


FIGURA 8.1 – Caracterização do modelo  $\alpha = 0^\circ$  composto por 4 módulos básico  
FONTE - Arquivo pessoal.

Construíram-se mais oito modelos denominados  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 40^\circ$ ,  $\alpha = 50^\circ$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\alpha = 70^\circ$  e  $\alpha = 80^\circ$ , correspondentes à angulação entre suas barras de bordo e o plano horizontal, caracterizando-se, assim, o seu grau de empenamento.

---

<sup>1</sup> Cypecad 3 D metálica

Se, nessas novas estruturas, fossem fixadas suas áreas de projeção em  $256\text{m}^2$  conforme a do modelo  $\alpha = 0^\circ$ , ou seja,  $16.000 \times 16.000 \text{ mm}$ , para cada novo empenamento maior que zero, suas barras de bordo (juntamente com as outras) cresceriam de tal forma que delineariam estruturas de proporções cada vez maiores, afastando-se consideravelmente da estrutura original quanto ao parâmetro de similaridade de escala. A FIG. 8.2 ilustra melhor este raciocínio:

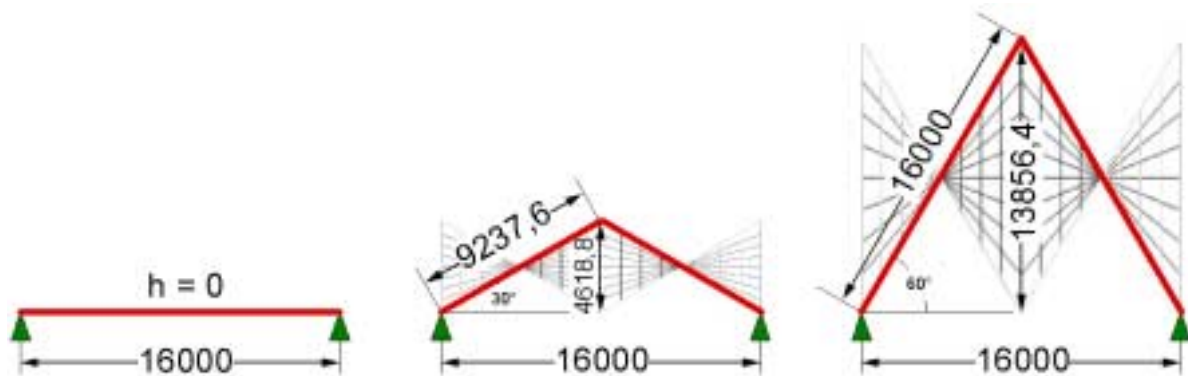


FIGURA 8.2 – Variando o empenamento da estrutura, porém mantendo a mesma distância entre os apoios, cada vez mais afasta-se da similaridade entre elas quanto à escala  
 FONTE - Arquivo pessoal.

Desta forma, quando a estrutura atingisse o empenamento máximo de  $\alpha = 80^\circ$ , sua aresta de borda de seu módulo básico, com seus 46.070,2 mm de comprimento, estaria 5,76 vezes maior que a aresta de borda do módulo original de  $\alpha = 0^\circ$  (8000 mm) e atingiria uma altura de 45.370,3 mm.

Para resolver esta “discrepância”, necessitou-se de um parâmetro diferente da área útil de recobrimento, que unificasse todas as estruturas em seus aspectos de escala. Caso contrário, poderiam ser obtidos padrões de esbeltez radicalmente díspares sem nenhuma semelhança de modelo.

Voltando ao exemplo do experimento comprobatório apresentado no item 4.5, vale a pena salientar que naquele experimento não foi feita nenhuma dessas considerações. Calculando-se a área total da superfície da estrutura apresentada na FIG. 4.37, obtém-se  $1.600 \text{ cm}^2$  sem maiores complicações, pois trata-se de uma estrutura em grelha plana de  $40 \times 40 \text{ cm}$  de aresta, no entanto, calcular a área da superfície da estrutura da FIG. 4.38 não é tão fácil como no caso anterior.

Ao se posicionar bastante afastado dessa superfície contida na FIG. 4.38, pode-se grosseiramente dizer que sua área também seria de  $1.600 \text{ cm}^2$ . Mas, ao se aproximar e considerar seu declive apresentado na FIG. 4.39 como uma “rugosidade” de sua superfície, análogo ao raciocínio apresentado sobre a geometria fractal no item 5.3, percebe-se que esta área seria bem maior.

Num primeiro impulso, pode-se acreditar que, para se obter esta área total, basta calcular a área de cada um dos 144 pequenos quadrados e, então, somá-las. Mas, como todas as barras são reversas espacialmente e não são coplanares, conforme costume na Geometria Clássica ou Euclidiana, essa superfície não contém 144 pequenos quadrados, conforme se pode supor, e sim 144 pequenos HPs ou parabolóides hiperbólicos.

Para uma melhor aproximação, então, bastaria triangular estes “falsos quadrados”, definindo uma diagonal, e, finalmente, calcular a área de cada um dos triângulos gerados. Com o somatório dos 288 triângulos gerados, tem-se aproximadamente a área total da superfície da FIG. 4.38. Como essa triangulação também representa uma aproximação, cada vez que se refinar a discretização da malha, aproxima-se da área real dessa superfície.

À medida que se aumenta a altura da estrutura exibida na trena da FIG. 4.39 para outro valor superior ao de 6,5 cm, eleva-se seu declive, ou seja, seu grau de empenamento, conseqüentemente, a sua área de superfície, pois as arestas dos pequenos triângulos gerados seriam cada vez maiores em função do aumento dos comprimentos das barras, exceto as únicas barras posicionadas na direção de suas curvaturas nulas (FIG. 4.9d e FIG. 4.22) que se manteriam com o mesmo comprimento de 20 cm para o módulo, ou 40 cm para toda a estrutura, pelo fato de sempre permanecerem paralelas ao plano horizontal (FIG. 8.3).



FIGURA 8.3 – As peças assinaladas se encontram na posição das direções de curvatura nula da superfície (paralelas ao plano horizontal)  
FONTE - Arquivo pessoal

Visando estabelecer um parâmetro unificador entre as novas estruturas com graus de empenamento diferenciados, e uma vez compreendidos esses conceitos extraídos do experimento comprobatório, é fácil perceber que, igualando-se as áreas de todas as nove superfícies ( $\alpha=0^\circ$  a  $\alpha=80^\circ$ ), tem-se uma correlação entre o fator de escala e a proporcionalidade entre elas, pois se está igualando a mesma quantidade de matéria envolvida para a construção dessas superfícies.

Como o objeto de estudo não possui uma superfície contínua, por ser reticulado e vazado, constituído por barras tubulares, tem-se opção de igualar o quantitativo do comprimento linear total das barras consumidas para cada uma das 9 estruturas. Dessa forma, calculou-se inicialmente o consumo em metros lineares dos tubos necessários para a construção do modelo, adotado como padrão, com  $\alpha=0^\circ$  (FIG. 8.1) que corresponde a 544 m lineares, para que todos os outros oito modelos se aproximassem dessa medida. Uma vez igualada a quantidade de tubos (metros lineares) utilizados em cada um dos modelos, suas áreas de projeção decrescerão à medida que suas declividades aumentarem.

A TAB. 8.1 apresenta a relação dos modelos estruturais que foram investigados, a declividade do módulo básico constituinte de cada modelo, o comprimento total de tubos consumidos e a área útil total de projeção para cada um dos modelos.

TABELA 8. 1  
Dados relativos às declividades e à área de cobertura

Nº	Modelos	Declive do Módulo Básico ( mm )	Comprimento Linear Total de Tubos Utilizados ( mm )	Vão Livre ( m )	Área útil de Projeção Horizontal ( m <sup>2</sup> )
		Horizontal / Vertical			
1	$\alpha = 0^\circ$	8000 / 0	544,00*	16,00 x 16,00	256,00
2	$\alpha = 10^\circ$	7956 / 1402,8	544,32	15,91 x 15,91	253,19
3	$\alpha = 20^\circ$	7808 / 2841,9	544,00	15,62 x 15,62	243,86
4	$\alpha = 30^\circ$	7560 / 4364,8	544,10	15,12 x 15,12	228,61
5	$\alpha = 40^\circ$	7140 / 5991,2	544,32	14,28 x 14,28	203,92
6	$\alpha = 50^\circ$	6528 / 7779,8	544,32	13,06 x 13,06	170,46
7	$\alpha = 60^\circ$	5620 / 9734,1	544,00	11,24 x 11,24	126,34
8	$\alpha = 70^\circ$	4312 / 11847,1	544,64	8,62 x 8,62	74,37
9	$\alpha = 80^\circ$	2440 / 13837,9	544,32	4,88 x 4,88	23,81

\* Valor adotado como padrão desejável

FONTE - Decorrente da Investigação.

Uma vez modeladas as 9 tipologias estruturais (composta por quatro módulos básicos cada), classificaram-se todas as barras em três grupos ou categorias, conforme mostra FIG. 8.4.

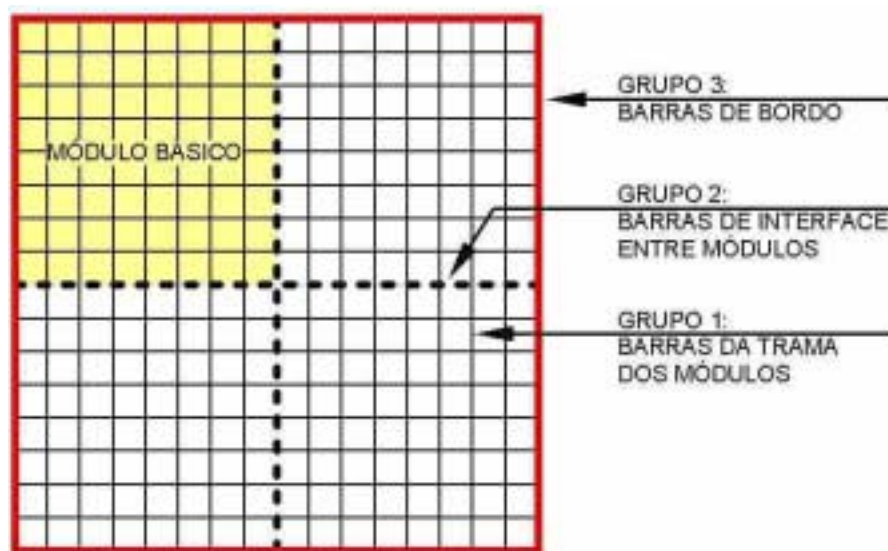


FIGURA 8.4 – Posicionamento das tipologias dos grupos de barras na estrutura de 4 módulos.

FONTE - Arquivo pessoal.

Esta classificação teve como objetivo a redução de tipologias diferenciadas, para utilizar apenas até três tipos de tubos padronizados. A escolha do posicionamento destes grupos teve como condicionantes aspectos estéticos estruturais e construtivos.

As 9 estruturas foram caracterizadas como se todas as suas barras estivessem engastadas e apenas fixadas pelos seus quatro vértices extremos sobre o apoio articulado fixo, numa conformação semelhante à da FIG. 8.5.

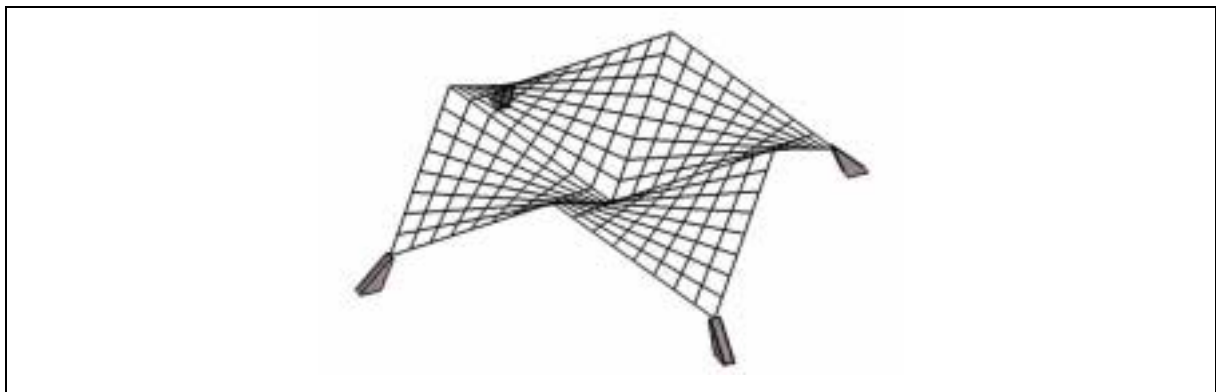


FIGURA 8.5 – Esquema genérico de apoio para as coberturas  
FONTE - Arquivo pessoal.

Para este ensaio, utilizou-se tubo estrutural de seção circular, onde, por meio de catálogo técnico<sup>2</sup>, foram lançadas todas as dimensões e propriedades geométricas necessárias requeridas pelo programa de cálculo dos tubos existentes:

- 1) diâmetro externo;
- 2) espessura da parede;
- 3) área de seção transversal;
- 4) momento de inércia;
- 5) constante de torção.

Inicialmente dimensionaram-se todas as estruturas para apenas suportar o seu peso próprio. Uma vez estando com as estruturas dimensionadas, acrescentou-se mais carga no intuito de descobrir seu comportamento no caso de ainda possuir uma resistência adicional. Dois tipos de posicionamento das cargas adicionais foram considerados:

---

<sup>2</sup> VALLOUREC & MANNESMANN TUBES, 2000.



- 1) uma única carga concentrada no nó central de cada uma das estruturas (FIG. 8.6);
- 2) 289 cargas idênticas concentradas em cada nó das nove estruturas (FIG. 8.7).

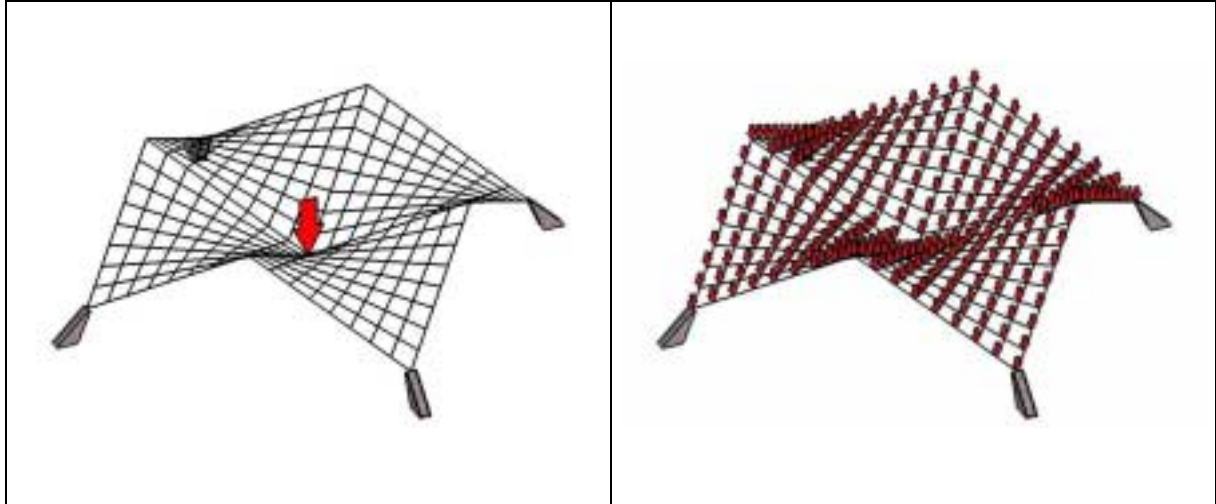


FIGURA 8.6 – Exemplo genérico da carga aplicada no meio do vão da estrutura  
FONTE - Arquivo pessoal.

FIGURA 8.7 – Exemplo genérico de cargas de mesmo valor aplicadas em todos os 289 nós da estrutura  
FONTE - Arquivo pessoal.

Em ambos os casos, procurou-se definir a carga limite de resistência. Em seguida compararam-se os diversos modelos entre si observando as diferenças significativas.

Como o objetivo é avaliar em qual das nove situações de empenamento a estrutura se apresenta mais eficiente, é importante definir primeiro quais os parâmetros de eficiência serão considerados. Mas como cada um desses modelos apresenta área útil de projeção horizontal reduzida à medida que se aumenta o seu grau de empenamento, não se pode adotar simplesmente o modelo que apresente o menor peso. Assim, relacionou-se para cada estrutura o seu peso total pela sua área de projeção correspondente. Definiu-se, então, que a estrutura que apresentasse o menor valor da relação obtida pela divisão de seu peso (kgf) pela sua área ( $m^2$ ) corresponderia à estrutura de maior eficiência. Os resultados dessas diversas avaliações podem ser vistos no item 8.3.

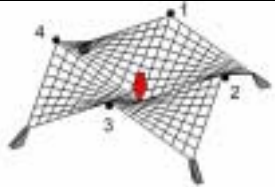
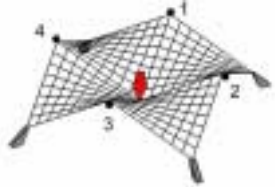
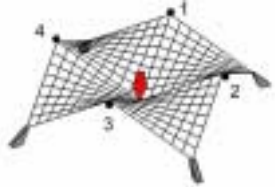
## 8.3 Resultados

São apresentados a seguir os resultados das simulações de cálculo estrutural obtidos pelo programa *Cypecad 3D* metálica.

**TAB. 8.2** - nessa tabela apresentam-se os diâmetros e espessuras dos tubos obtidos nas três posições dos grupos indicados na FIG. 8.4 após o cálculo do peso próprio, o peso e o comprimento de cada um deles bem como o peso e comprimentos totais e tubos gastos na estrutura, e ainda a relação entre o peso total e área de projeção horizontal. Procurou-se monitorar também os deslocamentos verticais em função das envoltórias ( $\delta z$ ) do centro das estruturas e dos quatro pontos localizados no meio do vão entre pilares (pontos 1, 2, 3 e 4, indicados no diagrama da tabela), para todos os modelos de  $\alpha=0^\circ$  a  $\alpha=80^\circ$  após o valor do acréscimo da carga limite posicionada no centro da estrutura, conforme foi indicado na FIG. 8.6.

**TAB. 8.3** - a única diferença dessa tabela para a anterior está no fato de que os dados apresentados se referem ao novo posicionamento da carga limite adicional, conforme FIG. 8.7.

TABELA 8.2  
Resultados com carga concentrada

$\alpha = 0^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>		
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	757,12	448		
		<b>Grupo2</b>	60,3	4,8	209,60	32		
		<b>Grupo3</b>	141,3	5,6	1190,4	64		
		<b>TOTAL</b>			2157,12	544		
	Área :	256	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária no Centro			0,0114	Tf
	Eficiência	8,426	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós			-	Tf
	Barras que não passam H 65      V 65		<b>Deslocamentos (m)</b>					
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>			
		<b>Ponto1</b>	0	0	-0,0035			
	<b>Ponto2</b>	0	0	-0,0035				
	<b>Ponto3</b>	0	0	-0,0035				
	<b>Ponto4</b>	0	0	-0,0035				
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0217				
$\alpha = 10^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>		
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	753,92	447,36		
		<b>Grupo2</b>	26,7	2,9	54,4	32,32		
		<b>Grupo3</b>	101,6	4,0	613,76	64,64		
		<b>TOTAL</b>			1422,08	544,32		
	Área :	253,19	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária no Centro :			0,0537	Tf
	Eficiência	5,617	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :			-	Tf
	Barras que não passam H 41      V 41		<b>Deslocamentos (m)</b>					
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>			
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0073	0			
	<b>Ponto2</b>	-0,0073	0	0				
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0073	0				
	<b>Ponto4</b>	+0,0073	0	0				
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0426				
$\alpha = 20^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>		
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	749,44	44,16		
		<b>Grupo2</b>	26,7	2,9	56,00	33,28		
		<b>Grupo3</b>	88,9	4,4	605,44	66,56		
		<b>TOTAL</b>			1410,88	544,00		
	Área :	243,86	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária no Centro :			0,0502	Tf
	Eficiência	5,786	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :			-	Tf
	Barras que não passam H 9      V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>					
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>			
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0069	0			
	<b>Ponto2</b>	-0,0069	0	0				
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0069	0				
	<b>Ponto4</b>	+0,0069	0	0				
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0192				

FONTE - Decorrente da Investigação.

TABELA 8.2 (Continuação)  
Resultados com carga concentrada.

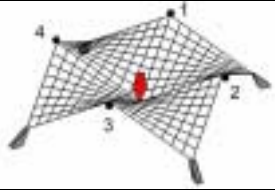
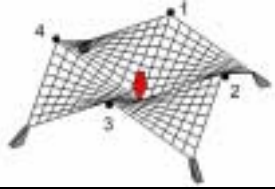
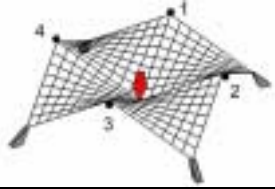
$\alpha = 30^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	743,04	439,46	
		<b>Grupo2</b>	26,7	2,9	58,88	34,88	
		<b>Grupo3</b>	88,9	4,4	636,16	69,76	
		<b>TOTAL</b>			1438,08	544,10	
	Área :	228,61	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária no Centro		0,1547	Tf
	Eficiência	6,291	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós		-	Tf
	Barras que não passam H 9            V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0193	0		
	<b>Ponto2</b>	-0,0193	0	0			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0193	0			
	<b>Ponto4</b>	0	-0,0193	0			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,1547			
$\alpha = 40^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	730,24	432,00	
		<b>Grupo2</b>	26,7	2,9	63,04	37,44	
		<b>Grupo3</b>	73,0	4,4	551,68	74,88	
		<b>TOTAL</b>			1344,96	544,32	
	Área :	203,92	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária no Centro :		0,0115	Tf
	Eficiência	6,596	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :		-	Tf
	Barras que não passam H 9            V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0019	0		
	<b>Ponto2</b>	-0,0019	0	0			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0019	0			
	<b>Ponto4</b>	+0,0019	0	0			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0022			
$\alpha = 50^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	714,24	422,40	
		<b>Grupo2</b>	88,9	4,4	369,92	40,64	
		<b>Grupo3</b>	88,9	4,4	739,84	81,28	
		<b>TOTAL</b>			1824,00	544,32	
	Área :	170,46	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária no Centro :		0,1688	Tf
	Eficiência	10,701	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :		-	Tf
	Barras que não passam H 9            V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0132	0		
	<b>Ponto2</b>	-0,0132	0	0			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0132	0			
	<b>Ponto4</b>	+0,0132	0	0			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0111			

TABELA 8.2 (Continuação)  
Resultados com carga concentrada.

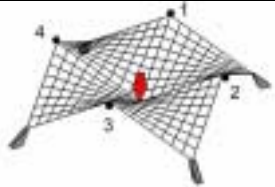
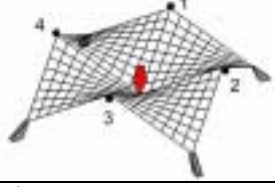
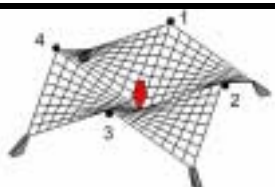
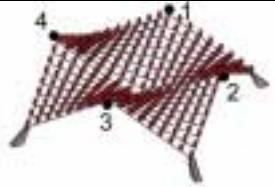
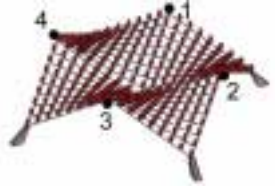
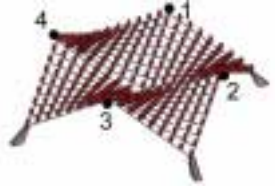
$\alpha = 60^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	690,56	409,60	
		<b>Grupo2</b>	88,9	4,4	409,28	44,80	
		<b>Grupo3</b>	88,9	4,4	818,56	89,60	
		<b>TOTAL</b>			1918,40	544,00	
	Área :	126,34	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária no Centro : 0,3571 Tf			
	Eficiência	15,184	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós : - Tf			
	Barras que não passam H 9 V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0267	0		
	<b>Ponto2</b>	-0,0267	0	0			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0267	0			
	<b>Ponto4</b>	+0,0267	0	0			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,3571			
$\alpha = 70^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	663,68	392,96	
		<b>Grupo2</b>	101,6	4,0	479,04	50,56	
		<b>Grupo3</b>	101,6	4,0	958,08	101,12	
		<b>TOTAL</b>			2100,80	544,64	
	Área :	74,37	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária no Centro : 1,0648 Tf			
	Eficiência	28,248	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós : - Tf			
	Barras que não passam H 9 V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0551	0		
	<b>Ponto2</b>	-0,0551	0	0			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0551	0			
	<b>Ponto4</b>	+0,0551	0	0			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0201			
$\alpha = 80^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	632,96	375,36	
		<b>Grupo2</b>	114,3	4,0	604,48	56,32	
		<b>Grupo3</b>	114,3	4,0	208,96	112,64	
		<b>TOTAL</b>			2446,40	544,32	
	Área :	23,81	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária no Centro : 3,4765 Tf			
	Eficiência	102,747	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós : - Tf			
	Barras que não passam H 9 V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0864	0		
	<b>Ponto2</b>	-0,0864	0	0			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0864	0			
	<b>Ponto4</b>	+0,0864	0	0			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0155			

TABELA 8.3  
Resultados com carga distribuída nos 289 nós

$\alpha = 0^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	757,12	448	
		<b>Grupo2</b>	60,3	4,8	209,60	32	
		<b>Grupo3</b>	141,3	5,6	1190,4	64	
	<b>TOTAL</b>					2157,12	544
	Área :	256	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária :		0,0001	Tf
	Eficiência	8,426	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :		0,0289	Tf
	Barras que não passam H 65      V 65		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	0	-0,0057		
	<b>Ponto2</b>	0	0	-0,0057			
	<b>Ponto3</b>	0	0	-0,0057			
	<b>Ponto4</b>	0	0	-0,0057			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0194			
$\alpha = 10^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	753,92	447,36	
		<b>Grupo2</b>	26,7	2,9	54,4	32,32	
		<b>Grupo3</b>	101,6	4,0	613,76	64,64	
	<b>TOTAL</b>					1422,08	544,32
	Área :	253,19	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária :		0,0003	Tf
	Eficiência	5,617	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :		0,0867	Tf
	Barras que não passam H 41      V 41		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0039	-0,0001		
	<b>Ponto2</b>	-0,0039	0	-0,0001			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0039	-0,0001			
	<b>Ponto4</b>	+0,0039	0	-0,0001			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0222			
$\alpha = 20^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	749,44	44,16	
		<b>Grupo2</b>	26,7	2,9	56,00	33,28	
		<b>Grupo3</b>	88,9	4,4	605,44	66,56	
	<b>TOTAL</b>					1410,88	544,00
	Área :	243,86	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária :		0,0003	Tf
	Eficiência	5,786	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :		0,0867	Tf
	Barras que não passam H 9      V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0044	0		
	<b>Ponto2</b>	-0,0044	0	0			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0044	0			
	<b>Ponto4</b>	+0,0044	0	0			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0121			

FONTE - Decorrente da Investigação

TABELA 8.3 (Continuação)  
Resultados com carga distribuída nos 289 nós

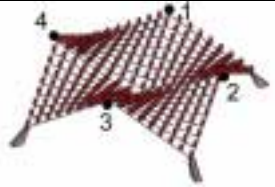
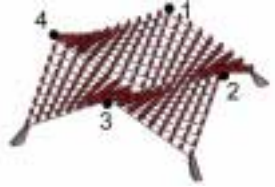
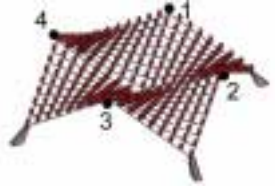
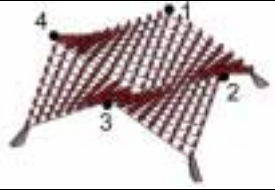
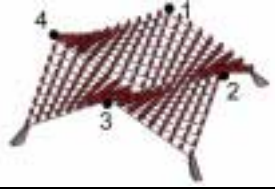
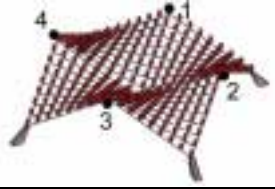
$\alpha = 30^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	743,04	439,46	
		<b>Grupo2</b>	26,7	2,9	58,88	34,88	
		<b>Grupo3</b>	88,9	4,4	636,16	69,76	
		<b>TOTAL</b>			1438,08	544,10	
	Área :	228,61	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária :		0,0009	Tf
	Eficiência	6,291	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :		0,2601	Tf
	Barras que não passam H 9            V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0125	0		
	<b>Ponto2</b>	-0,0125	0	0			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0125	0			
	<b>Ponto4</b>	+0,0125	0	0			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0216			
$\alpha = 40^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	730,24	432,00	
		<b>Grupo2</b>	26,7	2,9	63,04	37,44	
		<b>Grupo3</b>	73,0	4,4	551,68	74,88	
		<b>TOTAL</b>			1344,96	544,32	
	Área :	203,92	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária :		Não passou c/ 0,0001	Tf
	Eficiência	6,596	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :		-	Tf
	Barras que não passam H 9            V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	-	-	-		
	<b>Ponto2</b>	-	-	-			
	<b>Ponto3</b>	-	-	-			
	<b>Ponto4</b>	-	-	-			
	<b>Centro</b>	-	-	-			
$\alpha = 50^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	714,24	422,40	
		<b>Grupo2</b>	88,9	4,4	369,92	40,64	
		<b>Grupo3</b>	88,9	4,4	739,84	81,28	
		<b>TOTAL</b>			1824,00	544,32	
	Área :	170,46	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária :		0,0010	Tf
	Eficiência	10,701	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :		0,2890	Tf
	Barras que não passam H 9            V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0093	0		
	<b>Ponto2</b>	-0,0093	0	0			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0093	0			
	<b>Ponto4</b>	+0,0093	0	0			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0078			

TABELA 8.3 (Continuação)  
Resultados com carga distribuída nos 289 nós

$\alpha = 60^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	690,56	409,60	
		<b>Grupo2</b>	88,9	4,4	409,28	44,80	
		<b>Grupo3</b>	88,9	4,4	818,56	89,60	
		<b>TOTAL</b>			1918,40	544,00	
	Área :	126,34	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária :		0,0023	Tf
	Eficiência	15,184	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :		0,6647	Tf
	Barras que não passam H 9            V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0209	0		
	<b>Ponto2</b>	-0,0209	0	0			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0209	0			
	<b>Ponto4</b>	+0,0209	0	0			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0121			
$\alpha = 70^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	663,68	392,96	
		<b>Grupo2</b>	101,6	4,0	479,04	50,56	
		<b>Grupo3</b>	101,6	4,0	958,08	101,12	
		<b>TOTAL</b>			2100,80	544,64	
	Área :	74,37	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária :		0,0068	Tf
	Eficiência	28,248	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :		1,9652	Tf
	Barras que não passam H 9            V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0437	0		
	<b>Ponto2</b>	-0,0437	0	0			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0437	0			
	<b>Ponto4</b>	+0,0437	0	0			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0160			
$\alpha = 80^\circ$		<b>Grupos</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Peso (Kgf)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	
		<b>Grupo1</b>	26,7	2,9	632,96	375,36	
		<b>Grupo2</b>	114,3	4,0	604,48	56,32	
		<b>Grupo3</b>	114,3	4,0	208,96	112,64	
		<b>TOTAL</b>			2446,40	544,32	
	Área :	23,81	m <sup>2</sup>	Carga Limite Unitária :		0,0214	Tf
	Eficiência	102,747	K/ m <sup>2</sup>	Carga Limite Total nos 289 Nós :		6,1846	Tf
	Barras que não passam H 9            V 9		<b>Deslocamentos (m)</b>				
			<b>Δx</b>	<b>Δy</b>	<b>Δz</b>		
		<b>Ponto1</b>	0	-0,0690	-0,0001		
	<b>Ponto2</b>	-0,0690	0	-0,0001			
	<b>Ponto3</b>	0	+0,0690	-0,0001			
	<b>Ponto4</b>	+0,0690	0	-0,0001			
	<b>Centro</b>	0	0	-0,0123			



## 8.4 Análise dos resultados

Analisando os dados da TAB: 8.2, classificaram-se as estruturas na ordem crescente em relação ao seu peso final, como apresentado a seguir:

- 1)  $\alpha = 40^\circ$  com peso total de 1.344,96 kgf;
- 2)  $\alpha = 20^\circ$  com peso total de 1.410,88 kgf;
- 3)  $\alpha = 10^\circ$  com peso total de 1.422,08 kgf;
- 4)  $\alpha = 30^\circ$  com peso total de 1.438,08 kgf;
- 5)  $\alpha = 50^\circ$  com peso total de 1.824,00 kgf;
- 6)  $\alpha = 60^\circ$  com peso total de 1.918,40 kgf;
- 7)  $\alpha = 70^\circ$  com peso total de 2.100,80 kgf;
- 8)  $\alpha = 0^\circ$  com peso total de 2.157,12 kgf;
- 9)  $\alpha = 80^\circ$  com peso total de 2.446,40 kgf.

Ordenando as estruturas conforme a sua relação de peso total (kgf)/área de projeção horizontal ( $m^2$ ), também numa ordem crescente, tem-se o seguinte resultado da eficiência de nossas estruturas:

- 1)  $\alpha = 10^\circ$  com 5,617 kgf/m<sup>2</sup>;
- 2)  $\alpha = 20^\circ$  com 5,786 kgf/m<sup>2</sup>;
- 3)  $\alpha = 30^\circ$  com 6,291 kgf/m<sup>2</sup>;
- 4)  $\alpha = 40^\circ$  com 6,596 kgf/m<sup>2</sup>;
- 5)  $\alpha = 0^\circ$  com 8,426 kgf/m<sup>2</sup>;
- 6)  $\alpha = 50^\circ$  com 10,701 kgf/m<sup>2</sup>;
- 7)  $\alpha = 60^\circ$  com 15,184 kgf/m<sup>2</sup>;
- 8)  $\alpha = 70^\circ$  com 28,248 kgf/m<sup>2</sup>;
- 9)  $\alpha = 80^\circ$  com 102,747 kgf/m<sup>2</sup>.

Analisando essas duas classificações, pode-se perceber que, apesar de o modelo  $\alpha=40^\circ$  ser o mais leve de todos, ele ocupa a quarta colocação em termos de eficiência, pelo fato de a eficiência estar relacionada à área total de recobrimento. Neste aspecto, a estrutura  $\alpha=10^\circ$ ,

que ocupou o terceiro lugar em peso, demonstrou-se como a mais eficiente em relação ao menor peso para se cobrir áreas.

Pode-se perceber também que, para todas as estruturas HP, à medida que seu empenamento aumenta, a sua eficiência diminui acentuadamente, o que já não acontece quando, comparando seu peso com seu empenamento, apenas um modelo  $\alpha=20^\circ$  permaneceu na mesma classificação para as duas análises.

## **8.5 Análise final**

Com esta simulação, comprovou-se que, nas estruturas reticuladas, o empenamento favorece a resistência de todo o conjunto. Constatou-se ainda que a máxima eficiência ficou restrita aos empenamentos entre  $\alpha=10^\circ$  e  $\alpha=20^\circ$ , que tiveram valores muito próximos. Empenamentos superiores a  $\alpha=20^\circ$  correspondem gradativamente a estruturas menos eficientes, porém só a partir do empenamento  $\alpha=40^\circ$  é que o HP demonstrou-se menos eficiente que a grelha plana que ficou na quinta posição. Analisando somente o peso final das estruturas, a plana ficou em penúltima posição (oitava) e o empenamento de  $\alpha=80^\circ$  nos dois casos em última posição.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 9.1 Conclusões

Conforme os resultados verificados e apresentados anteriormente, tanto no experimento comprobatório do item 4.5 da estrutura de papelão em tiras planas, quanto nas estruturas metálicas tubulares de seção circular, simulada do capítulo 8, pode-se constatar que, quando as estruturas reticuladas se conformam na superfície de um HP, elas adquirem um comportamento estrutural superior ao de suas correspondentes planas.

Este comportamento é análogo ao que acontece nas cascas. No entanto ao contrário destas, não se encontrou bibliografia com abordagem do comportamento estrutural em estruturas reticuladas de dupla curvatura. As estruturas tubulares enrijecidas por superfícies de dupla curvatura, apesar da pouca existência de exemplares construídos, representam um campo novo para a pesquisa e com vastas possibilidades de aplicação.

Aliadas às vantagens específicas da geometria do tubo para a elaboração de tais superfícies HP, podem-se agregar também as vantagens proporcionadas pelas estruturas metálicas relativas à leveza, quando comparadas às que utilizam outros materiais análogos ao concreto. Tem-se ainda uma valiosa vantagem ainda pouco explorada atualmente no Brasil, que é a capacidade de desmontabilidade. Entre meados do século XIX e início do século XX com o surgimento da “Arquitetura de catálogo” no Brasil isto era possível (FIG. 9.1).

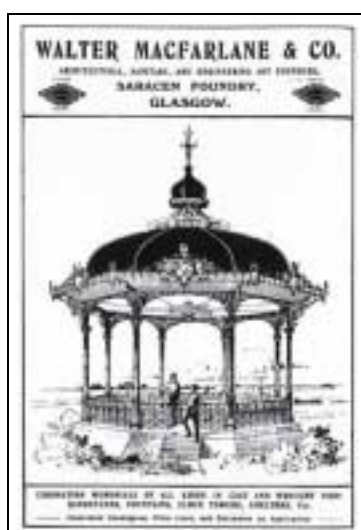


FIGURA 9.1 – Coreto em ferro fundido de MacFarlane.  
FONTE - COSTA, 2001.p.85.

Além da desmontabilidade, a arquitetura metálica possibilita a construção de alguns tipos de estruturas efêmeras ou temporárias. Percebe-se que atualmente existe demanda de mercado e pouca oferta de produtos (FIG. 9.2 - FIG. 9.4).



FIGURA 9.2 – Boate itinerante em estrutura tubular  
FONTE - Arquivo pessoal



FIGURA 9.3 – Estruturas treliçadas para palcos e eventos  
FONTE - Arquivo pessoal.



FIGURA 9.4 – Estrutura para estacionamento em perfil tubular  
FONTE - Arquivo pessoal

O conceito dos “produtos de prateleiras”, oriundo da era da industrialização, pode encontrar afinidades com o tema na produção de estruturas perenes, mas de fácil montagem, em casos de uso em que a exclusividade não é necessária. Por exemplo, *play-grounds*, gasebos, etc. As superfícies HPs (bem como todas as hiperbólicas) podem, num primeiro instante, parecer complexas, mas o seu conceito é muito simples, pois, tratando-se de superfícies regradas, são totalmente constituídas apenas por linhas retas (FIG. 9.5).



FIGURA 9.5 – Escultura helicoidal constituída por tubos metálicos de seção quadrangular  
FONTE - Arquivo pessoal

As estruturas reticuladas em HP também podem ser exploradas em conformações de treliças espaciais. Tal aspecto sobre a espacialidade das malhas levou a um modelo teórico para ser investigado neste trabalho (FIG.4.31 - FIG.4.33). Ao analisar uma caixa ou pente de ovos conforme a FIG. 9.6, pode-se constatar que sua rigidez advém da existência de curvaturas de sua superfície, analogamente à estrutura investigada.



FIGURA 9.6 – Pente de ovos com sua superfície enrijecida pelas curvaturas  
FONTE - Arquivo pessoal.



FIGURA 9.7 – Presença das curvas reversas conforme no HP  
FONTE - Arquivo pessoal.

Observando mais detalhadamente um pente de ovos (FIG. 9.7), da mesma forma que no HP, pode-se também identificar a presença de curvaturas reversas, retratadas na FIG. 4.9. A sua rigidez é suficiente para se auto-sustentar caso este esteja apoiado pelas extremidades. No entanto, se for adicionada uma certa carga no meio de seu vão, este tenderá a fletir de acordo com a solicitação (FIG. 9.8).



FIGURA 9.8 – Flexão provocada pela adição de uma carga  
FONTE - Arquivo pessoal.

Sobrepondo-se uma nova camada da mesma estrutura sobre a anterior, de forma que seus pontos mais altos estejam vinculados aos pontos mais baixos, este conjunto adquire uma resistência superior para o mesmo vão (FIG. 9.9).

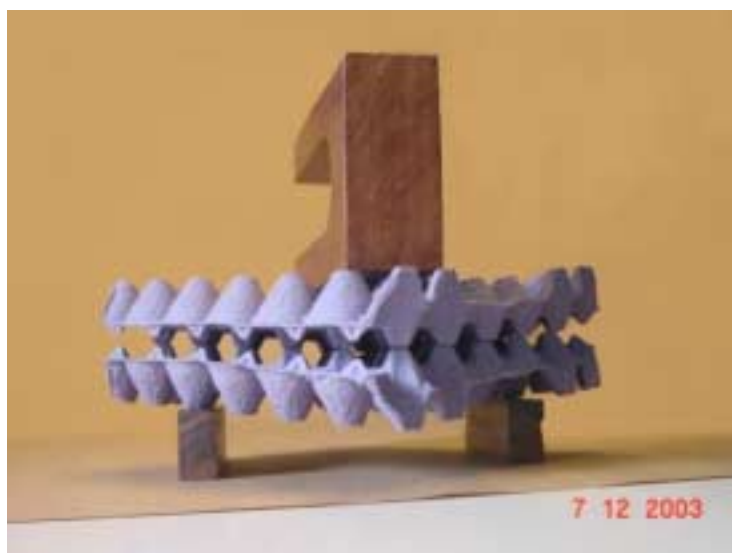


FIGURA 9.9 – Maior resistência à flexão quando adicionada mais uma estrutura sobre a outra com a mesma carga  
FONTE - Arquivo pessoal.

Um raciocínio estrutural análogo para o HP pode vir a permitir vãos maiores, conforme sugerido pela FIG. 9.10.

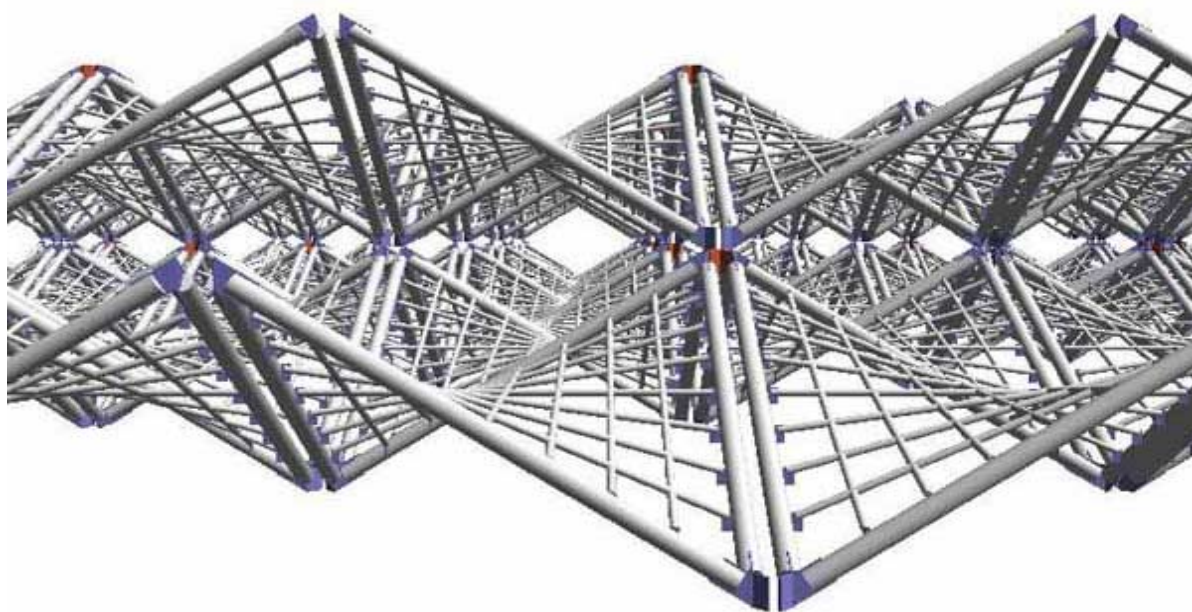


FIGURA 9.10 – Sugestão de modelo de estrutura espacial em HP para ser investigado  
FONTE - Arquivo pessoal.

No decorrer deste trabalho, pode-se perceber que, para o estado atual da realidade construtiva, a economia no consumo de materiais ou matéria-prima nem sempre acarreta obras mais econômicas ou mais viáveis tecnicamente. Outros fatores de vital importância que devem ser considerados são as limitações tecnológicas, sejam elas fatores humanos de conhecimento e/ou de equipamentos para execução. Tudo isso representa o *know-how* – saber fazer e poder fazer – de uma sociedade. Esses fatores podem se tornar variáveis mais importantes que a própria preocupação na busca em economia de material, pois a sua tentativa de viabilizá-los sem recursos adequados quase sempre significará um gasto superior.

Isso tudo representa o grau de maturidade tecnológica de uma sociedade que normalmente evolui de acordo com sua demanda de mercado. Se uma sociedade identifica valores e almeja alcançá-los, os meios para tal estarão mais próximos e os empecilhos cada vez mais minimizados e aos poucos o *know-how* será incorporado.

É por todos esses fatores que os projetistas de sistemas estruturais devem conhecer a realidade tecnológica dos fabricantes, seus equipamentos, seus procedimentos envolvidos nas etapas de fabricação e beneficiamento de seus produtos, etc, sempre observando realidade regional e nacional. Dessa forma, os projetistas terão melhores condições de optar ou propor detalhes e procedimentos executivos, compatíveis com o estado da sua realidade construtiva.



## 9.2 Proposições/Possibilidades

Tomando como base as estruturas simuladas no capítulo anterior, apresentam-se a seguir algumas possibilidades de uso das estruturas tipo HP (FIG. 9.11 - 9.16).

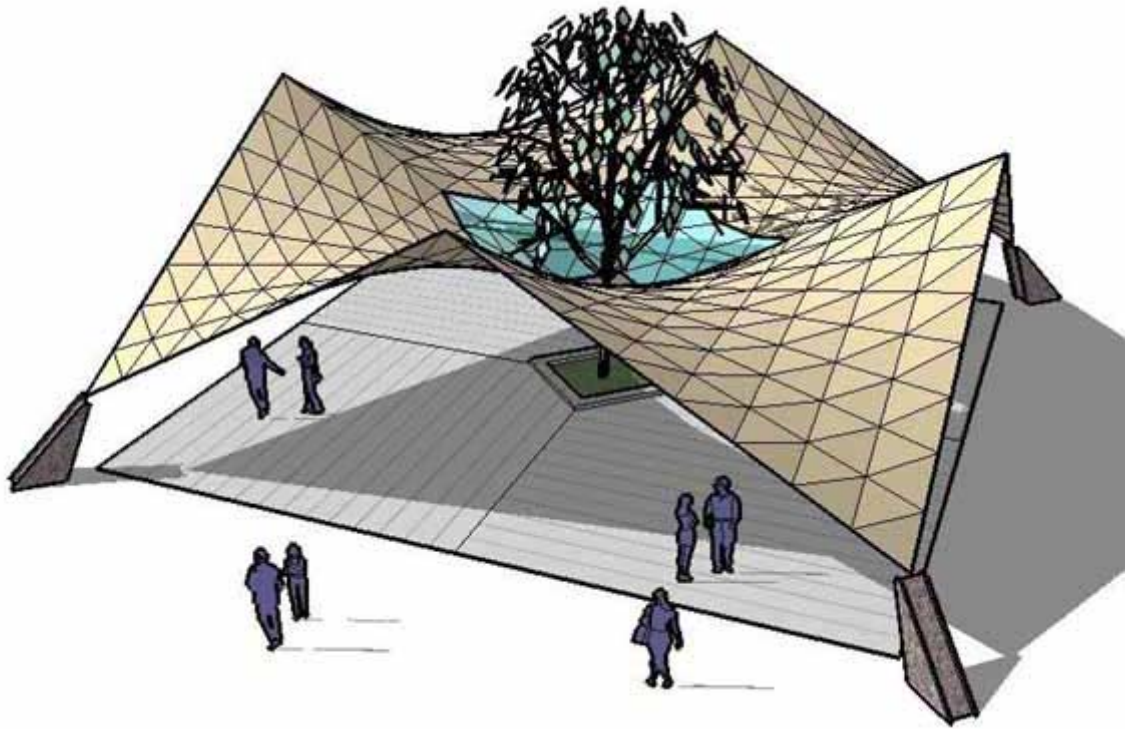


FIGURA 9.11 – Proposição de uso para o modelo simulado, com revestimento em vidro e painéis de alumínio  
FONTE - Arquivo pessoal.

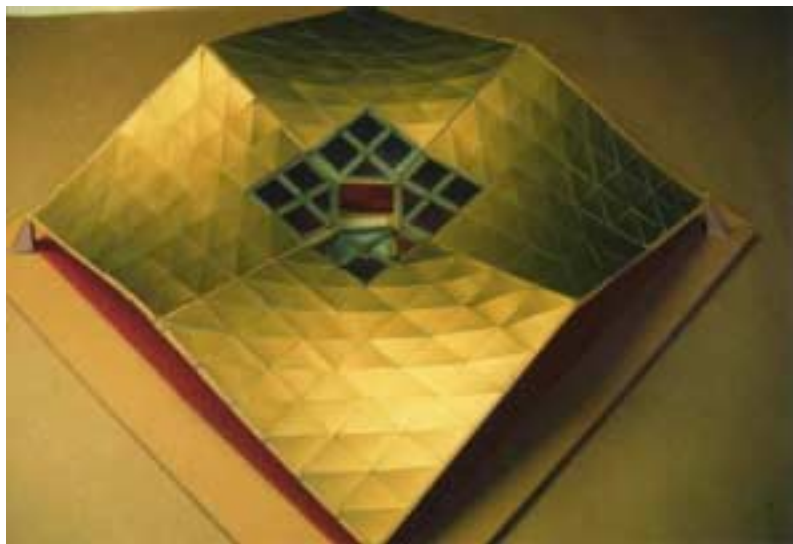


FIGURA 9.12 – Maquete de massa do modelo simulado, com revestimento em vidro e painéis de alumínio  
FONTE - Arquivo pessoal.

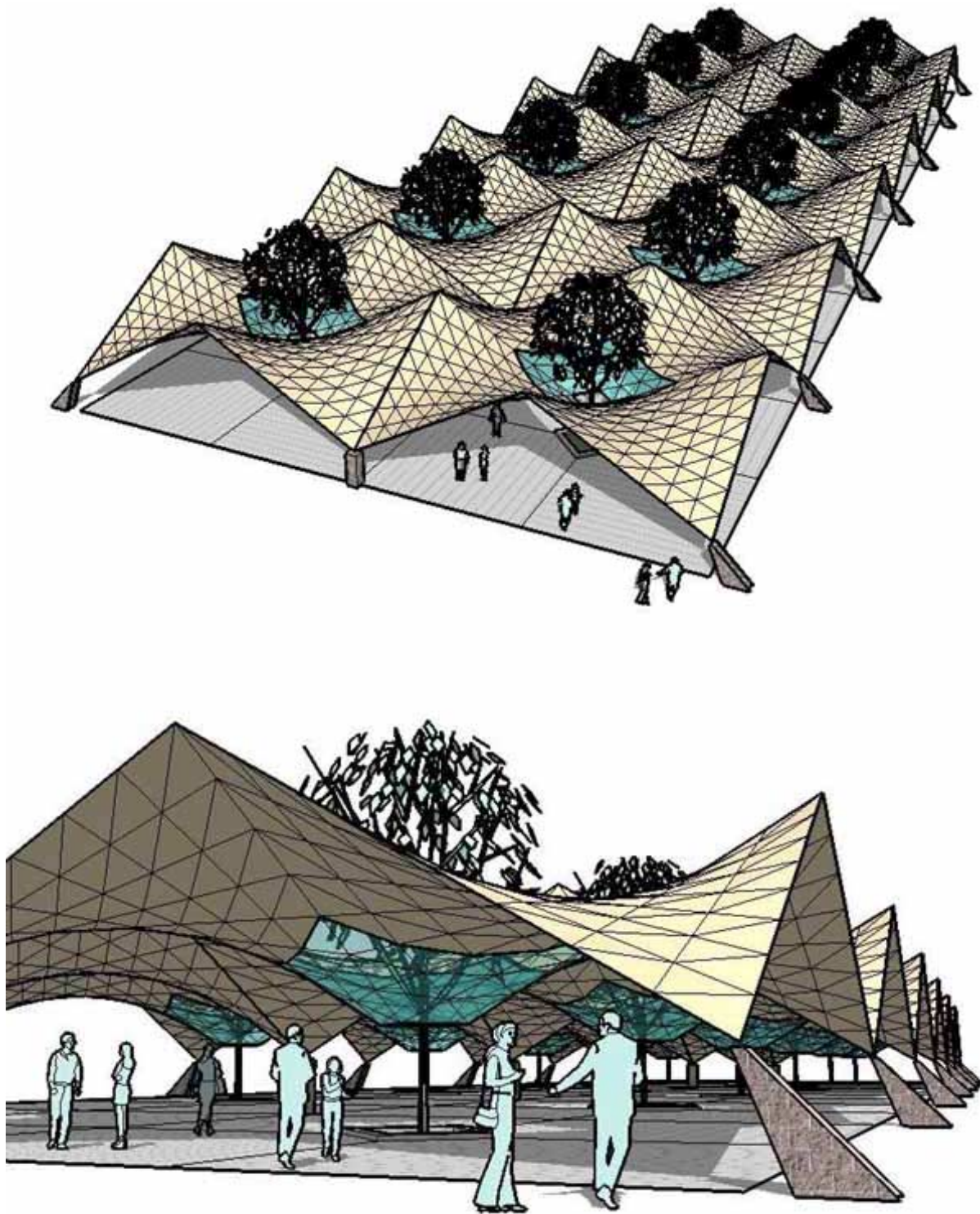


FIGURA 9.13 – Proposição de acoplamento de módulos do modelo anterior  
FONTE - Arquivo pessoal.

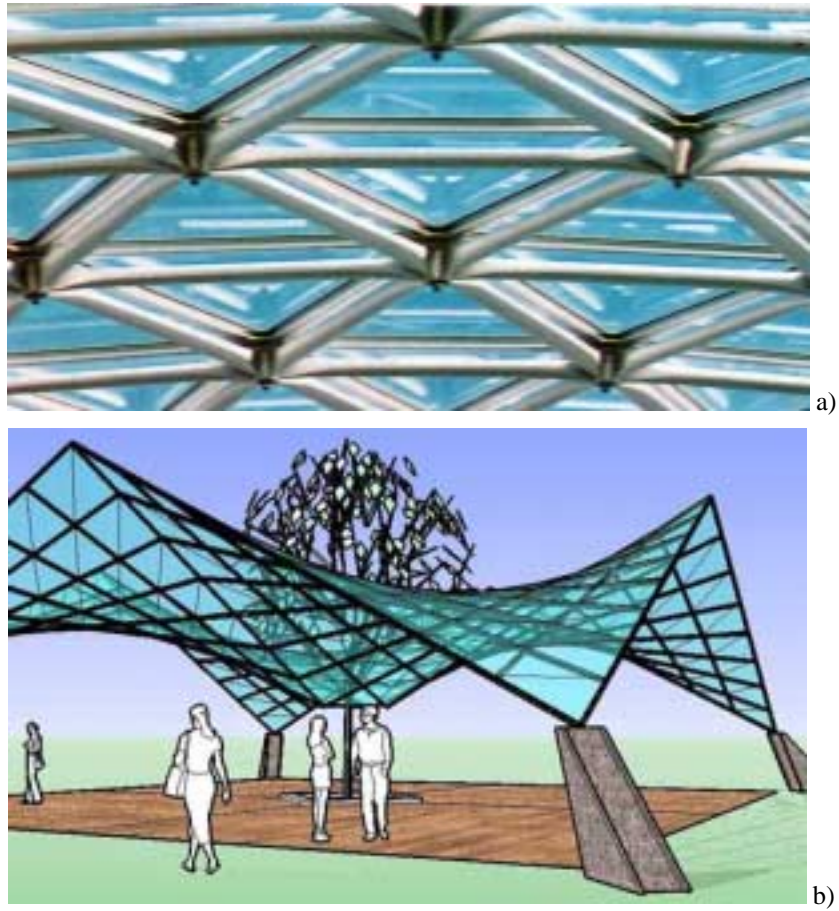


FIGURA 9.14 – Proposição do modelo com revestimento em vidro  
 FONTE - a) NIKEL, nº 492, 1994. p.191.; b) Arquivo pessoal

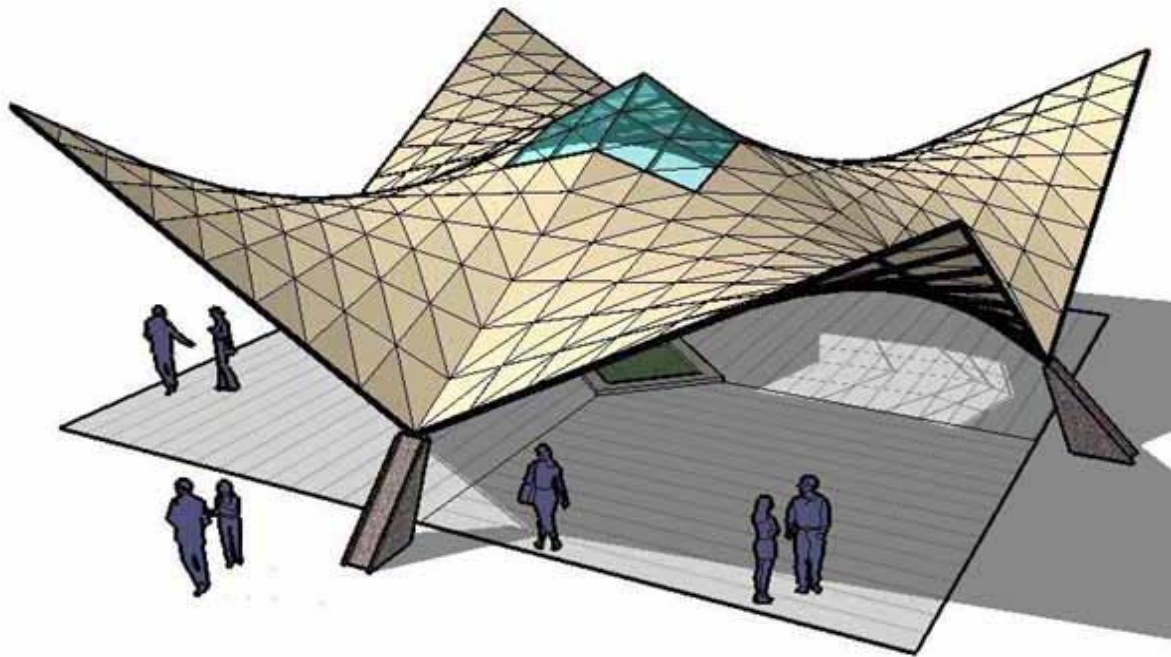
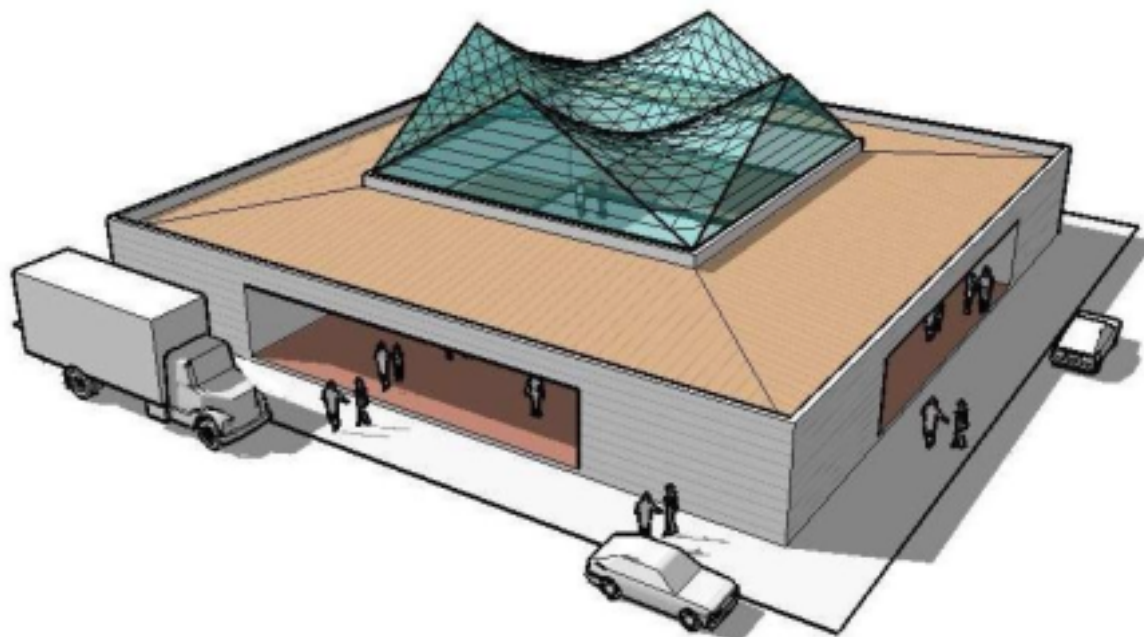
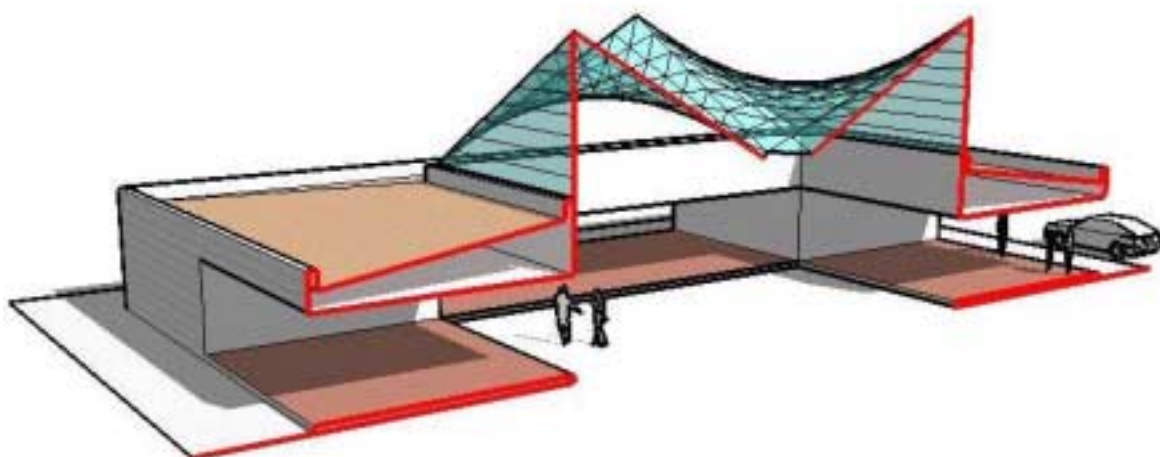


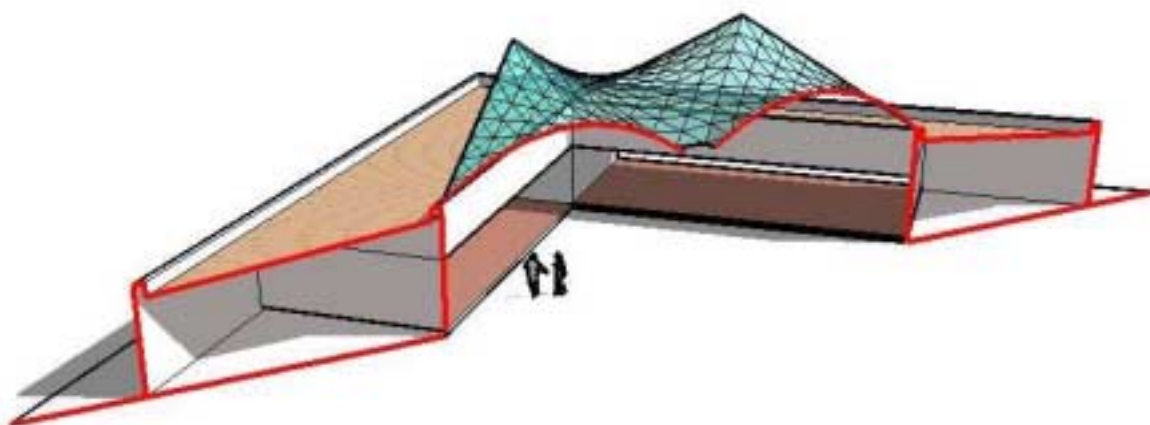
FIGURA 9.15 – Proposição invertida do modelo estrutural com revestimento em vidro e painéis de alumínio  
 FONTE - Arquivo pessoal



a)



b)



c)

FIGURA 9.16 – Proposição de aplicação do modelo simulado em iluminação zenital de pátios cobertos  
a) Vista geral aérea b) Corte esquemático transversal c) Corte esquemático em diagonal  
FONTE - Arquivo pessoal

Variando os posicionamentos dos HPs, infinitas combinações e utilizações podem ser obtidas. Ao adotá-las como no modelo tipo “taça” (FIG. 9.17) em que toda a sua borda periférica está na posição horizontal, pode-se obter módulos com possibilidades de utilização como pisos passíveis de serem acoplados entre si nos mais variados arranjos (FIG. 9.18).

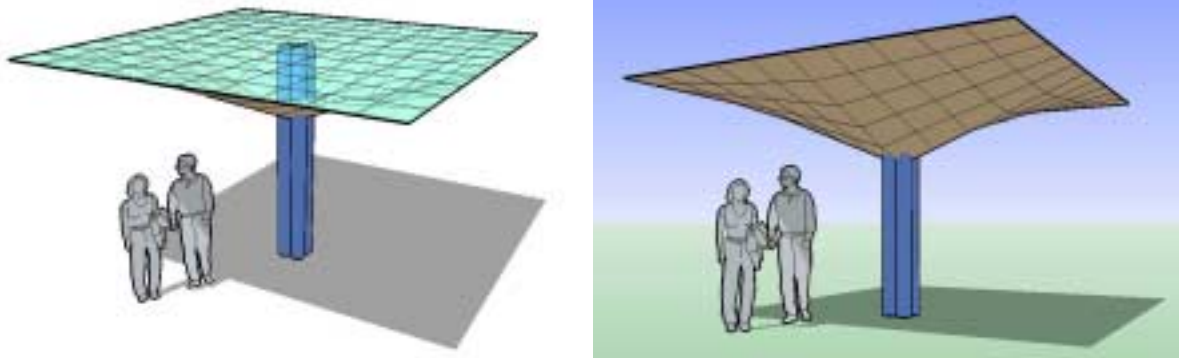


FIGURA 9.17 - Módulo em “taça” composto por quatro HP  
FONTE - Arquivo pessoal.

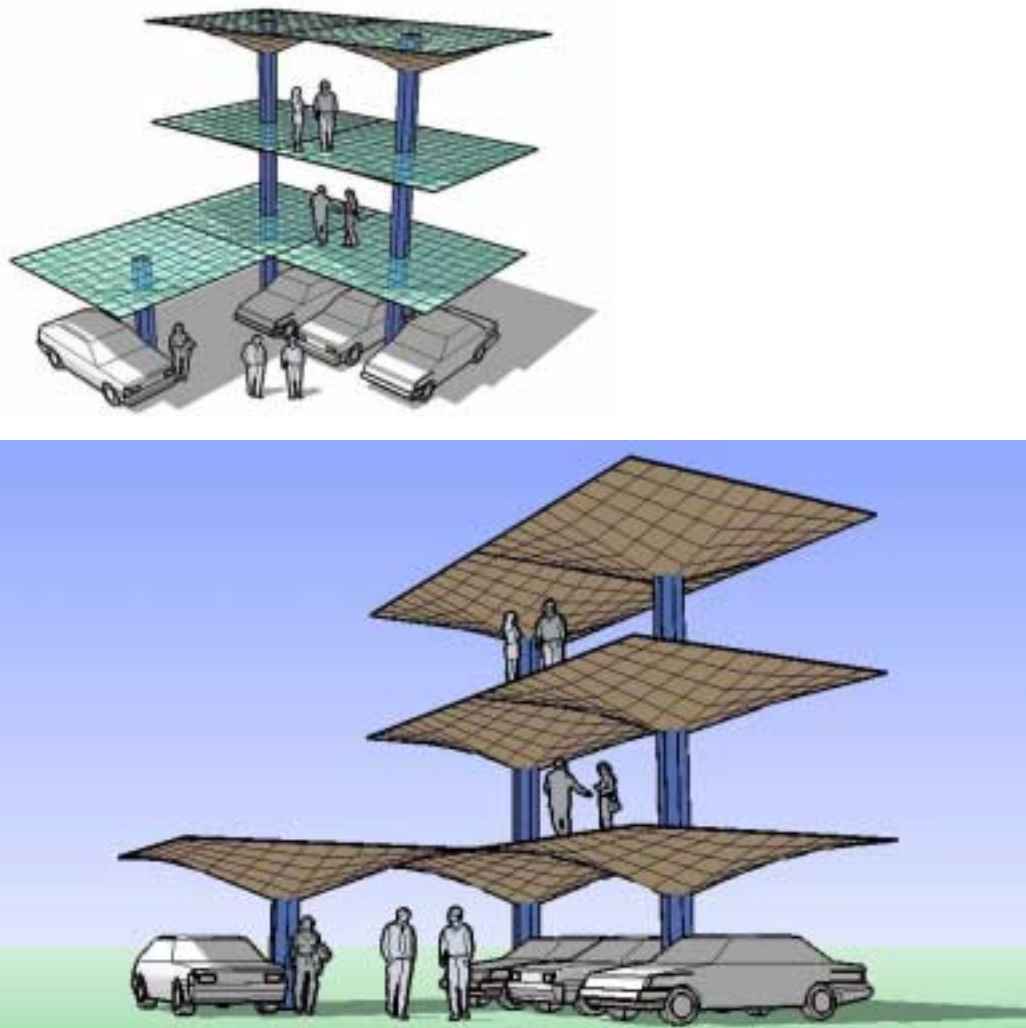


FIGURA 9.18 – Possibilidade de acoplamento de módulos em “taça”  
FONTE - Arquivo pessoal.

A FIG. 9.19 exemplifica a possibilidade de utilização como estrutura para pequenas residências desmontáveis e que podem ser instaladas em qualquer tipo de topografia em função de apresentarem poucos pontos de contato com o solo (somente três pontos de apoio), como, por exemplo, a margem de um lago ou sobre espelho d'água, tipo palafita ou *deck*.

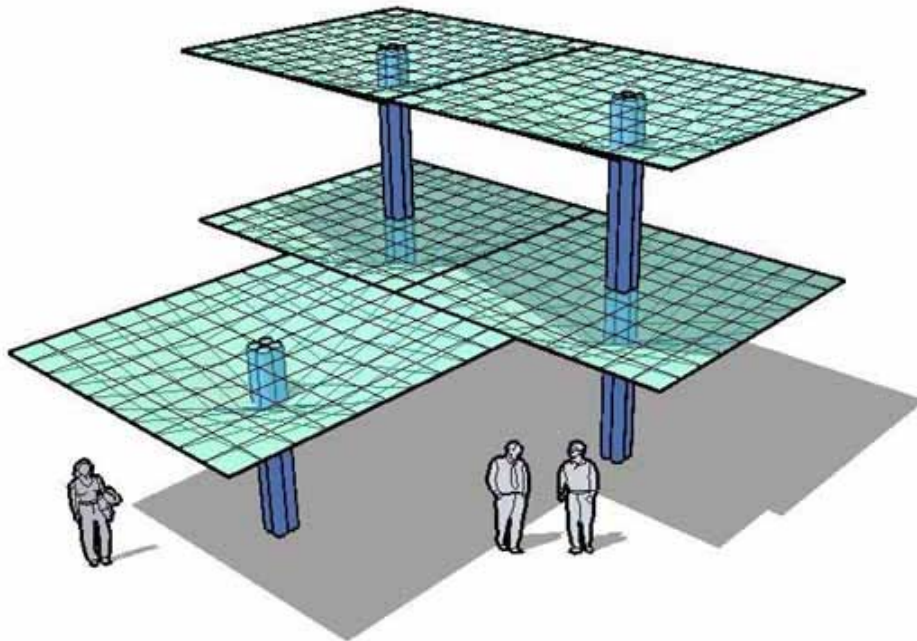
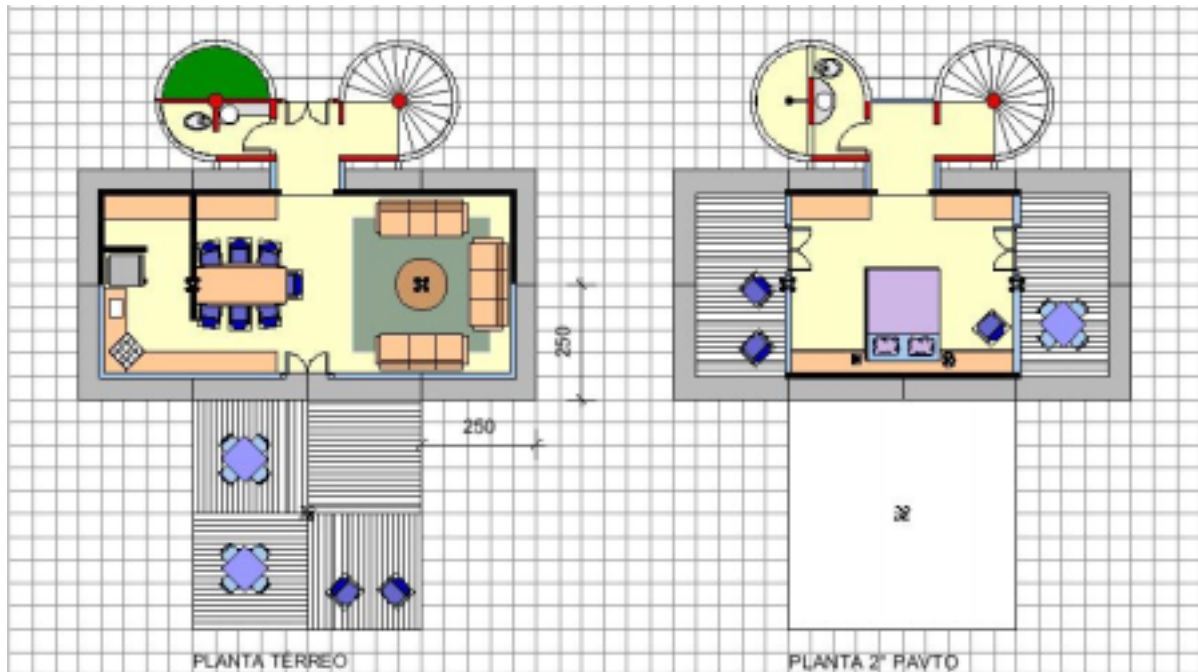


FIGURA 9.19 – Proposta de residências desmontáveis com a utilização do módulo “taça”  
FONTE - Arquivo pessoal.

A FIG. 9.20 demonstra a flexibilidade do sistema para a definição dos mais variados *lay-outs*.

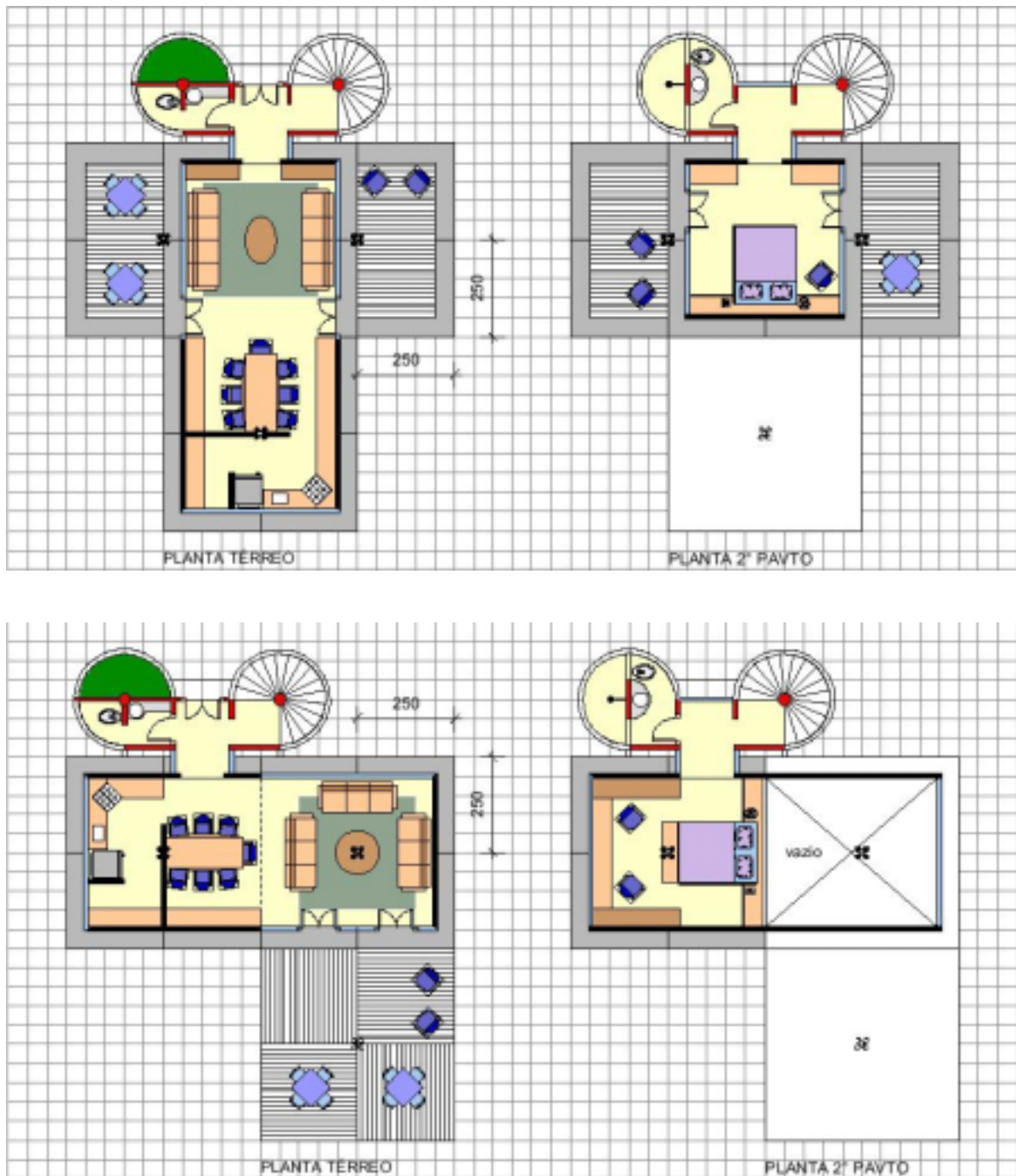


FIGURA 9.20 – Variações de *layout* para residências desmontáveis com a utilização dos módulos “taça”  
FONTE - Arquivo pessoal.



Adotando a possibilidade de utilização das superfícies HPs na vertical, conforme a FIG. 9.21, podem-se ter outras novas aplicações, como a estrutura de torre sugerida pela FIG. 9.22.

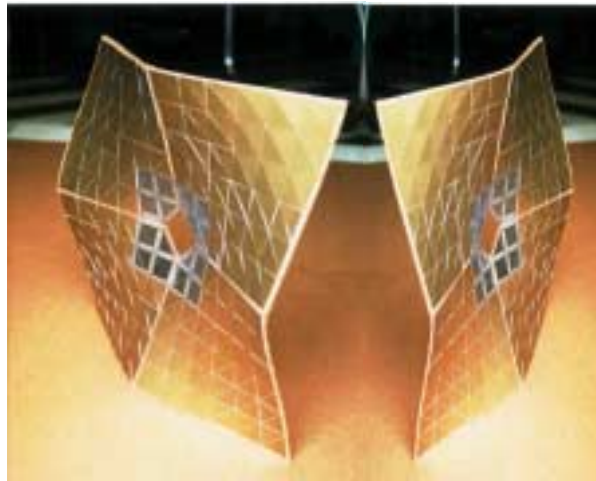


FIGURA 9.21 – Possibilidade de utilização na vertical  
FONTE - Arquivo pessoal.

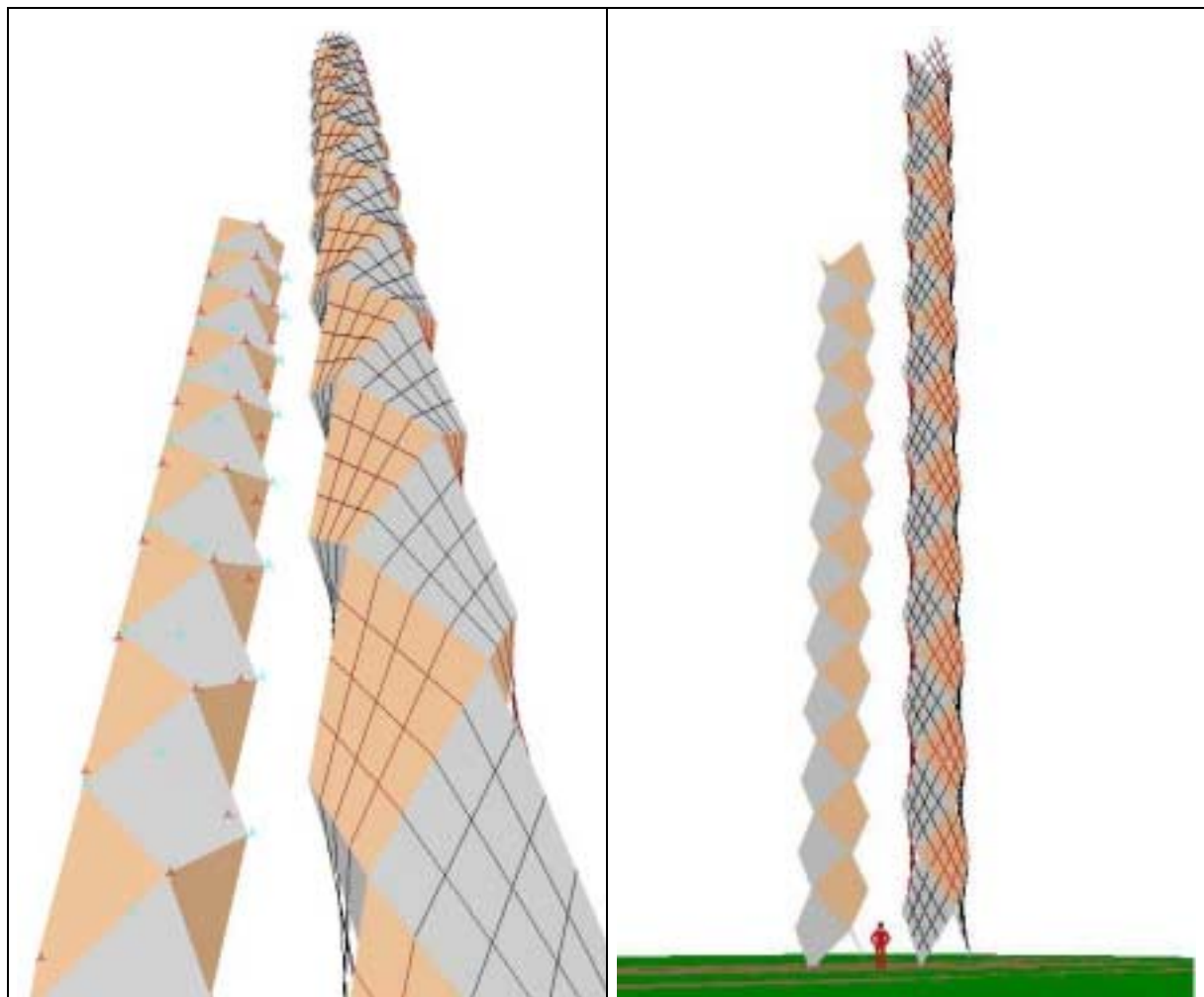


FIGURA 9.22 – Proposta para torres constituídas por acoplamentos de HP na vertical  
FONTE - Arquivo pessoal.

### **9.3 Desenvolvimentos futuros**

Todos os exemplos apresentados no capítulo anterior representam apenas possibilidades e sugestões arquitetônicas de utilização. No entanto, fazem-se necessárias investigações mais detalhadas do seu comportamento estrutural, considerando não apenas o peso próprio da estrutura, mas também sobrecargas compatíveis às aplicações. Isto é função dos arranjos espaciais e combinações das “células” de HP que têm seu comportamento estrutural diferenciado para cada tipo de apoio adotado, bem como para o seu posicionamento. Este trabalho possibilita futuras pesquisas sobre o tema que poderão focar o comportamento estrutural como solução construtiva.

## 10 BIBLIOGRAFIA

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

AQUASCAPES II. Organizado por Bunj Murotani. Introdução de Hiroyuki Suzuki. Tokyo: Process Architecture Co., 1994. 224 p.

A+U ARCHITECTURE & URBANISM. Antonio Gaudí. Tokyo: A +U Publishing Ltda., n. 86, nov. 1977. 292 p. Edição especial..

BANHAM, Reyner. *Megaestructuras: futuro urbano del pasado reciente*. Barcelona: Gustavo Gili S.A., 2001. 223 p.

BAHAMÓN, Alejandro. *PreFab: Adaptable, modular, dismountable, light, mobile architecture*. New York: Loft Publications S.L./ HBI, 2002. 185 p.

BRASIL, Lucas S. S., SILVA, Renato R., TIRONI, Tatiana M. M. *Projeto final*. Belo Horizonte: CEFET-MG, 1997. (Trabalho final, Curso “Suplementação em pré-moldados: A concepção da arquitetura no processo industrial”).

BUILDINGS. Organizado por Hilary Stephens. Kyoto: Dohosha Publishing Co., 1994. 76 p. (Coleção Dicionário Visual).

CANDELA, Félix. Introdução do livro *Frei Otto: estructuras.*, de C. Roland. Barcelona: Gustavo Gili, 1973. 172 p.

CAPAZ, Rodrigo C., CHACHAM, Hélio. Nanotubos e a nova era do carbono. *Ciência Hoje*, São Paulo, n. 198, p. 20 -27, out. 2003.

CARDELLACH, Félix. *Filosofía de las estructuras*. Barcelona: A. Bosh, 1910.

CARSALADE, Flávio de Lemos. *Arquitetura: interfaces*. Belo Horizonte: AP Cultural, 2001. 110 p.

COSTA, Cacilda Teixeira. *O sonho e a técnica*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001. 200 p.

COSTA, Alexandre. Um estádio campeão. *Made in Japan*. São Paulo Editora Japan Brazil Communication, n. 55, p. 28-29, abr. 2002.

DC. *Tecnologia: O Bambu Forte Como O Aço*. Março de 1992.

DEMAINE, Erik. *Erik Demaine's Folding and unfolding*. Disponível no site: <http://theory.lcs.mit.edu/~edemaine/hypar/> Acesso em: 02 abr. 2002.

DESIGN COME: Progettare el nuovo. Milano: Istituto Europeo di Design, n. 0, jun. 1993.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. *Aço e arquitetura: estudo de edificações no Brasil*. São Paulo: Zigurate, 1998. 163 p.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. *Estruturas de aço: estudo de edificações no Brasil*. São Paulo: Zigurate, 2001. 172 p.

ENGEL, Heino. *Sistemas de estruturas*. São Paulo:Hemus Editora Ltda, 1981. 277 p.

ENGEL, Heinrich. *The japanese house: a tradition for contemporary architecture*. Tokyo: Charles E. Tuttle Company, 1991. 495 p.

EXPO'85 ARCHITECTURE , 1995. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1995. 211 p.

FAMIH. *Vocabulário básico* - material didático do curso de arquitetura e urbanismo das faculdades metodistas integradas Izabela Hendrix na disciplina de plástica.1990.

FILGUEIRAS, Ronei Lombardi. *Membranas*. Belo Horizonte: Arbor Engenharia, s.d.

FIRMO, Célio da Silveira. Arquivo pessoal de imagens.

- FIRMO, Célio da Silveira. *Overseas technical trainee of Yamanashi Prefectural government*. Kofu: Editions fo Yamanashi Prefectural Government, 1995. (Relatório apresentado por ocasião do estágio realizado)
- GHAVAMI, K, & ZIELINSKI, Z.A.. "*Permanent Shutter Bambo Reiforced Concrete Slab*". Montreal - Canada: Publication BRCSI dept. of Civil Eng. Concordia Univ., 1988. 34 p.
- GHYKA, Matila. *Esthétique des proporcionnes dans la nature el dans les arts*. Paris: Librairie Gallimard, 1927. 452 p.
- GÓMEZ, Joseph; COLL, Jordi, MELERO, Juan C0., MARK C. L. *Sagrada Familia: de Gaudí al CAD*. Barcelona: Edicions UPC, 1996. 166 p.
- HEBASQUE, Guy. *A evolução do arranha céu*. Trad. de Andréa de Vasconcellos. Belo Horizonte: Escola de Arquitetura da Universidade de Minas Gerais, 1962. 81 p. (Coleção Traduções escolhidas, n. 5).
- HELCKE, J. C. & OTTO, Frei. *Estructuras vivas y técnicas*. Delft: Dragend Konstrukties, 1969.
- IHKUBO, Ryuko. *Look Japan: "A STORY OF CONSTRUCTION, DEMOLITION, AND RECYCLING"* Culture Feature - September 2000. Disponível em: <<http://www.lookjapan.com/LBsc/00SepCul.html>> Acesso em: 25 nov 2003.
- INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. *Innovations in steel: multi-storey buildings from around the world*. [S.l.], 1989. Folheto demonstrativo.
- JENCKS, Charles. *Arquitectura Tardomoderna y otros ensayos*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1982. 200 p.
- JOÃO FILGUEIRAS LIMA. *Lelé*. Organizado por Giancarlo Latorraca. São Paulo: Instituto Lina Bo e P. M. Bardi; Lisboa: Editorial Blau, 1999. 264 p. (Arquitetos Brasileiros)

- JOBIM, Tom & ARAÚJO, Zeka. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Expressão e Cultura, 1991. 119 p.
- JODIDIO, Philip. *Architecture now!* Colônia: Tashen, 2001. 577 p.
- JODIDIO, Philip. *Building a new millennium.* Köln: Tashen, 2000. 556 p.
- JODIDIO, Philip. *Novas formas na arquitetura: a arquitetura dos anos 90.* Colônia: Tashen, 1997. 237 p.
- KIMPIAN, Judit. Portable auditorium. *Fabric Architecture*, Minnesota, v. 14, n. 4, p. 42-43, jul.-ag., 2002
- KOTOBUKI. *Townscape Products.* Tokyo: Kotobuki Corporation, n.143, 1994.
- KRON, Joan, SLESIN, Suzanne. *High-Tech: The industrial style and source book for the home.* New York: Clarkson N. Potter, Inc., 1980. 280 p.
- KUROKAWA, Kisho. *New Wave Japanese Architecture.* Great Britain: Academy Editions, Ernst & Sohn, 1993. 300. p.
- LANDI, Francisco Romeu. Simpósio Internacional “Ciência e Tecnologia como Cultura e Desenvolvimento – um Enfoque Histórico” disponível no *site* da Associação Brasileira de Jornalismo Científico: <[http://www.abjc.org.br/artigo\\_19.asp](http://www.abjc.org.br/artigo_19.asp)> Acesso em: 25 nov. 2003.
- LIESE, Walter. *The Anatomy of Bamboo Culms*, INBAR International Network for Bamboo and Rattan. Beijing China 1998 .
- LYALL, Sutherland. *Master of Structure: Engineering Today's Innovative Buildings.* London: Laurence King Publishing Ltd., 2002. 224 p.
- LOCHER, J. L..*The world of M. C. Escher.* New York: Abradale Press, 1988. 263 p.

LOZANO, Ruiz Antonio; DE NÁPOLES, Suzana Metello. *O que são superfícies regradadas*. Lisboa: Centro de Matemática e Aplicações Fundamentais da Universidade de Lisboa. Projeto Matemática em Acção. Disponível em: <[http://cmaf.lmc.fc.ul.pt/em\\_accao/superficies\\_regradadas/Superficies\\_regradadas2.htm](http://cmaf.lmc.fc.ul.pt/em_accao/superficies_regradadas/Superficies_regradadas2.htm)> Acesso em: 30 ago. 2001.

MAC DONNELL, Joseph F, S.J. *Six types of ruled surfaces*. Disponível em: <<http://www.faculty.fairfield.edu/jmac/rs/sixmodels.htm>> Acesso em: 02 abr. 2002.

MAC DONNELL, Joseph F, S.J. *Saddle (hypar) Surfaces*. Disponível no site <<http://www.faculty.fairfield.edu/jmac/rs/saddles.htm>> Acesso em: 02 abr. 2002.

MACHADO, Ardevan. *Desenho na engenharia e arquitetura*. São Paulo: Ardevan Machado, 1980. 253 p.

MADE IN JAPAN. São Paulo: Editora Japan Brazil Communication, n. 65, fev. 2003.

MASON, Peter. Pie in the sky: the structural path from ballons to building. *Fabric Architecture*, Minnesota, v. 14, n. 4, p. 38-39, jul.-ag., 2002.

MEDEIROS, Heloísa. Quebre recordes, seja fast. *Téchne*, São Paulo, ed. 79, ano 11, p. 40-47, out. 2003.

MEDEIROS, Heloísa. Yopanan Conrado Pereira Rebello: a precisão milimétrica da estrutura metálica. *Finestra Brasil*, São Paulo, n. 35, p. 45-48, out.-nov.-dez. 2003.

MESSINGER, A., PASTORE, Chris, FLEMING, Rob & WOLLNWE, Cesilla. Understand it all. *Fabric Architecture*, Minnesota, v. 14, n. 4, p. 10-22, jul.-ag., 2002.

MEYER, Karl Fritz. *Estruturas metálicas: construções com tubos*. Belo Horizonte: KM Engenharia, 2002. 224 p.

MOMIX DANCE THEATRE. [s.n.], 2002. 14 p. (Catálogo da turnê brasileira de 2002, Dell'Arte Soluções culturais)

- NEILL, William. *By nature's design: an exploratorium book*. San Francisco: Chronicle Books, 1993. 119 p.
- NEUFERT, Ernst. *A arte de projetar em arquitetura*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1981. 432 p.
- NIKKEI, ARCHITECTURE. Tokyo: Nikkei Business Publication, n. 491, 1994.
- NIKKEI, ARCHITECTURE. Tokyo: Nikkei Business Publication, n. 492, 1994.
- NIKKEI, ARCHITECTURE. Tokyo: Nikkei Business Publication, v. 19, n. 529, 1995.
- NIKKEI, ARCHITECTURE BOOKS. The New Tokyo City Hall Complex. Tokyo: Nikkei Business Publication, set. 1991. Edição. Especial.
- PRINCE, Bart. Dale and Margo Seymour Residence. *GA Houses*. Tokyo, n. 19, p. 40-47, 1986.
- REVIEW. Minnesota: Industrial Fabrics Association International, v. 87, n. 13, dez. 2002.
- REBELLO, Yopanan C. P. *A concepção estrutural e a arquitetura*. São Paulo: Zigurate Editora, 2000. 271 p.
- RIKUYOSHA CREATIVE NOW. Masaharu Takasaki. Tokyo: Rikuyoshi Publishing Inc., n. 001. 1988. 88 p.
- RICHARDSON, Phyllis. *Grandes ideias para pequenos edifícios*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.A., 2001. 233 p.
- ROBBIN, Tony. *Engineering a new architecture*. London; Yale University Press, 1996. 198 p.
- ROCHA, Carlos Sousa. *Plasticidade do papel e design*. Lisboa: Plátano Editora, 2000. 320 p.



- ROLAND, C. *Frei Otto: estruturas*. Prólogo de Félix Candela. Barcelona: Gustavo Gili, 1973. 172 p.
- RUTAS DEL MODERNISMO: Colección Rutas Artísticas. Catalunya: Departament de Comerç, Consum i Turisme de la Generalitat, 1995.
- RÜTER, Ewald. *Bauen mit Stahl: kreative Lösungen praktisch umgesetzt*. Berlin: Springer, 1997.
- SALVADORI, Mario. *Estructura para arquitectos*. Buenos Aires: Editorial CP 67, 1994. 254 p.
- SANTOS, Pedrovaldo Caram. *Arquitetura Em Aço, Uma Abordagem Para Elaboração De Projetos*. Caderno de arquitetura e urbanismo. Belo Horizonte: n. 4, p. 191-213, maio 1996.
- SAYEGH, Simone. Ualfrido del Carlo: tecnohabitações. *Téchne*, São Paulo, ed. 79, ano 11, p. 28-31, out. 2003.
- SIEGEL, Curt. *Formas estructurales en la arquitectura moderna*. S.l: Compañía Editorial Continental S.A., 1967. 310 p.
- SMITS, Mônica Smits. *Caracterização físico-química do bambu e emprego de suas fibras em materiais compósitos pra engenharia civil*. Ouro Preto: REDEMAT UFOP-CETEC-UEMG, 2003. (Proposta de dissertação de mestrado em Engenharia de Materiais, na área de concentração Processo de fabricação e aplicação)
- TAKASAKI MASAHARU. *Earthian Architecture: buildings and projects 1982-1996*. Tokyo: Takasaki Masaharu Architects, 1996. (Catálogo do escritório)
- TARRAGÓ, Salvador. *Gaudí entre la estructura y la forma. A+U Architecture & urbanism*. Antonio Gaudí. Tokyo: A +U Publishing Ltda., n. 86, nov. 1977. 292 p. Edição especial.
- THE INTERNATION DIRETORY OF ARQUITECTRE & DESIGN. VOLUME 5. Paris: DID SARL, 2000. 372 p.

TOKYO METROPOLITAN GOVERNMENT. A Guide to the Tokyo Metropolitan Government Office - *The New Symbol of World Metropolis Tokyo*. Tóquio: Tokyo Metropolitan Government, 1994. 8 p.

TZONIS, Alexander. *Santiago Calatrava: the poetics of movement*. London: Thanes & Hudson, 2001. 239 p.

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

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: Estúdio Nobel, 2000. 311 p.

VITRA DESIGN MUSEUM. *Grown your own house: Simón Vélez and bamboo architecture*. S.l.: Vitra Design Museum / ZERI / C.I.R.E.C.A., 2000. 262 p.

WALKER, Charles. Charles Warker. Universo paralelo da arquitetura <<http://www.vitruvius.com.br/entrevista/walker/walker.asp>> [jan. 2001]. Entrevista concedida a Beatriz de Abreu e Lima. Acesso em: 12 abr. 2003.

WYLSON, Anthony, WILSON, Patricia. *Theme parks, leisure centres, zoo and aquaria*. S.l : Longman, 1994. 183 p.