

**FORMAS NATURAIS  
E ESTRUTURAÇÃO DE  
SUPERFÍCIES MÍNIMAS  
EM ARQUITETURA**

**RODRIGO ALLGAYER**  
AUTOR

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM DESIGN E TECNOLOGIA**

**PROF. DR. BENAMY TURKIENICZ**  
ORIENTADOR

**PORTO ALEGRE**  
2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**FORMAS NATURAIS  
E ESTRUTURAÇÃO DE  
SUPERFÍCIES MÍNIMAS  
EM ARQUITETURA**

**RODRIGO ALLGAYER  
AUTOR**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM DESIGN E TECNOLOGIA**

**PROF. DR. BENAMY TURKIENICZ  
ORIENTADOR**

**PORTO ALEGRE  
2009**

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Programa de Pós-Graduação em Design**  
**Mestrado em Design e Tecnologia**

**RODRIGO ALLGAYER**

**FORMAS NATURAIS E ESTRUTURAÇÃO DE  
SUPERFÍCIES MÍNIMAS EM ARQUITETURA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Benamy Turkienicz (orientador)  
[UFRGS]

---

Profª Drª Gabriela Celani  
[UNICAMP]

---

Prof. Dr. Sydney Fernandes de Freitas  
[ESDI/UERJ]

---

Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior  
[UFRGS]

---

Profª Drª Branca Freitas de Oliveira  
[UFRGS]

Porto Alegre, 24 de novembro de 2009.



*Este trabalho é dedicado a Remi Allgayer,  
a quem agradeço por iluminar meu caminho  
e manter minha esperança.*

*Pai,  
finalmente, aquelas bolhas de sabão  
estampadas em nossa Kombi  
fizeram sentido para mim.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Benamy Turkienicz, que sempre se mostrou disposto a apontar os caminhos da excelência e rigor científico, sobretudo por sua paixão incondicional pela boa arquitetura, o que me torna eternamente grato por compartilhar de sua parceria e amizade.

À Patrícia Gubert Neuhaus, pelo apoio e amor irrestrito.

Aos colegas Ana Cláudia Vettoretti, Cristina Gondim, Fernanda Reis Schreiner, José Carlos Broch e Tiago Retamal, parceiros em todos os bons e difíceis momentos desta jornada.

Aos Bolsistas do Simmlab, Mário Guidoux, Pablo Resende e Carlos Eduardo Binato de Castro, pelo valioso auxílio durante a fase do experimento, com quem compartilhei os atribulados e emocionantes percursos finais deste trabalho.

À Professora Branca Freitas de Oliveira e aos bolsistas do Departamento de Expressão Gráfica, Moisés Krützmann e Felipe Nassif, pelo auxílio na fase de avaliação estrutural, sobretudo pela simpatia e dedicação com que me acolheram.

Ao engenheiro Geraldo Wolff, por sugerir caminhos para a validação estrutural do experimento.

Aos alunos da Faculdade de Arquitetura e Design desta Universidade, pela oportunidade a mim dada em trilhar os primeiros passos no exercício da docência.

Ao professor Wilson Kindlein Júnior, pela dedicação com que tem dirigido nosso curso.

Ao meu sócio Gabriel Menna Barreto, por ter suportado bravamente minha longa ausência do escritório.

Aos meus amigos e familiares, privados temporariamente do meu convívio.

A todos os professores, funcionários, colegas e bolsistas do PGDesign.

*O desenvolvimento da moderna  
arquitetura não pode ser como um  
broto novo em um tronco velho;  
é um crescimento que vem da raiz”*

Walter Gropius

## RESUMO

O paradigma *forma segue a função* indica uma invariável dependência entre a origem anatômica de partes de plantas e animais com as funções desempenhadas por estas partes. Embora este paradigma, em biologia, tenha sido superado após Lamarck, a arquitetura e o design ainda se utilizam de analogias biológicas para explicar escolhas estéticas. Neste sentido, as formas mais adequadas sob o aspecto estrutural seriam aquelas que demonstrem eficácia máxima de suas partes na distribuição de esforços. Esta analogia levou à adoção de padrões geométricos cujo vocabulário básico se traduz em figuras demasiadamente homogêneas, sem identidade imediata com formas naturais, porém fortemente vinculadas à sua lógica estrutural. Esta pesquisa sugere um caminho inverso, em que o vocabulário básico mantenha identidade com as formas naturais e a lógica estrutural emergente da relação entre duas categorias de esforços (tração e compressão) não altere o vocabulário original. Para tal, propõe-se fundamentar um processo dialético de projeto para estruturação de superfícies mínimas com base na identificação e parametrização de formas emergentes da natureza. O método proposto se valeu de modelos computacionais de representação vinculando a evolução do projeto à aferição, sob o ponto de vista estrutural, da gramática da forma emergente. Os resultados obtidos confirmam a obtenção de eficácia estrutural a partir de padrões geométricos, sem vínculo original com aspectos funcionais.

**Palavras-chave:** arquitetura; design; superfícies mínimas; estruturas; padrões naturais.

## **ABSTRACT**

The paradigm form follows function indicates an invariable link between the anatomical origin of parts of plants and animals with the functions performed by these parts. Although this paradigm in biology has been overcome after Lamarck, architecture still applies biological analogies to explain aesthetic choices. In this sense, the most appropriate forms in structural aspects would be those that show maximum efficiency at load distribution. This analogy led to the adoption of geometric patterns whose basic vocabulary is translated into figures too homogeneous, without immediate identity with natural forms, but strongly linked to its structural logic. This research suggests an inverse way, where the basic vocabulary keeps identity with natural forms, as so far the structural logic of emerging relationship between two structural loads (tension and compression) does not change the original vocabulary. Thus, it is proposed to support a dialectical process of design, structuring minimal surfaces, upon identification and parameterization of natural emergent shapes. The proposed method relies on representation by computer models, linking the design evolution to evaluation, under the structural point of view, of emergent shape grammar. The results confirm structural effectiveness without original dependency with functional aspects.

**Keywords: architecture; design; minimal surfaces; structures; natural patterns.**

## **SUMÁRIO**

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
Formulação dos problemas	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
A superfície como elemento da arquitetura e design	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
Superfícies Mínimas - Fundamentos	<b>23</b>
Superfícies Mínimas - Modelos computacionais	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO III</b>	
Aplicação de conceitos mínimos em arquitetura e design	<b>36</b>
<b>CAPÍTULO IV</b>	
Forma	<b>54</b>
Emergência	<b>59</b>
Simetria	<b>60</b>
<b>CAPÍTULO V</b>	
Materiais e Métodos	<b>71</b>
Fases do Experimento	<b>74</b>
Amostra 1 – Folha	<b>77</b>
Amostra 2 – Cogumelo	<b>86</b>
Amostra 3 – Bananeira	<b>89</b>
Amostra 4 – Dente-de-Leão	<b>94</b>
Quadro síntese - Fases 1 e 2	<b>98</b>
Avaliação preliminar do desempenho estrutural	<b>99</b>
Análise e Registro de Resultados	<b>102</b>
Intervenção na Geometria dos Padrões	<b>104</b>
Reavaliação do desempenho estrutural	<b>105</b>
Quadro síntese - Fases 3 e 4	<b>107</b>

<b>CONCLUSÕES</b>	<b>108</b>
<b>APÊNDICES</b>	
Apêndice A – Fichas relativas à Simulação em Modelos Tridimensionais	<b>112</b>
Apêndice B – Fichas relativas à Avaliação Estrutural - Pré-Teste	<b>134</b>
Apêndice C – Fichas relativas à Avaliação Estrutural - Pós-Teste	<b>139</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>144</b>
<b>FONTES DAS FIGURAS</b>	<b>154</b>

## INTRODUÇÃO

O caminho científico, muitas vezes, encontra-se delimitado a partir de uma necessidade de modificações na estrutura de pensamento vigente, bem como na perseguição de novas respostas para problemas da humanidade que se constituem na base da inovação. Thomas Kuhn (1962) acreditava que o papel da pesquisa científica seria o de revolucionar nossa visão de mundo através de questionamentos aos paradigmas vigentes que, na visão de Stanton (2004), representariam as “mudanças que não foram apenas incrementais, mas representaram uma ruptura com o passado abrindo um novo capítulo na nossa compreensão da natureza, com sua assimilação, exigindo, inclusive, a reconstrução das teorias anteriores e a reinterpretação de observações experimentais antes realizadas”. A contestação aos paradigmas, nesse sentido, situa-se como estímulo à perseguição de novas ideias que, formuladas a partir da investigação e comprovação dos resultados, podem configurar novas linhas de raciocínio, ampliando as possibilidades de pesquisa e contribuições efetivas para o universo científico.

O contexto histórico decorrente da era industrial semeou um paradigma relacionado ao funcionalismo e que se propagou em várias manifestações do pensamento, então, perpetuando-se como senso comum até a atualidade. O *slogan* “forma segue a função” (*form follows function*), veiculado por Louis Sullivan, em 1896, foi adotado como dogma na arquitetura modernista, em seus propósitos de romper vínculos com o atavismo aos estilos do final do século XIX. Sobreveio a ideia de que um edifício, ao invés de incorporar referências estéticas passadas, deveria ter sua configuração estabelecida a partir de seus propósitos funcionais, tal qual



faria a “natureza orgânica e inorgânica, a física e a metafísica, as instâncias humanas e sobre-humanas” (SULLIVAN, 1896, p. 208).

Segundo Steadman (1979), a analogia ecológica, propagada pelo funcionalismo do século XIX e pelo movimento moderno, traz o raciocínio de que, tanto em animais quanto artefatos, a forma estaria subordinada à função; e a função como produto do meio. O paradigma biológico estabelecido por Sullivan pode ser examinado sob dois pontos de vista vinculados às teorias evolutivas naturais.

Lamarck (1809) lançou bases para uma interpretação evolutiva vinculada ao determinismo, pautada na adaptação dos organismos às exigências do meio. As mudanças nos hábitos e configurações dos organismos seriam produtos diretos de suas relações com o meio ambiente, o que se alinha com o predicado da forma seguindo a função. Tal raciocínio remonta as bases filosóficas da Grécia Antiga, quando Aristóteles associou a própria percepção da beleza orgânica ao equilíbrio racional entre meios e propósitos, entre a estruturação física dos seres vivos e suas respectivas funções. A harmonia da natureza poderia inclusive sugerir a existência de uma regra suprema pela qual os organismos naturais são modelados, numa visão teleológica<sup>1</sup> da evolução. Spencer (1864), por sua vez, relacionou a complexidade da forma ao âmbito de especialização dos organismos que, em um contexto primitivo, representado pela homogeneidade e simplicidade, evoluiriam gradativamente para estágios superiores, diferenciados e heterogêneos. A evolução seria diretamente proporcional à complexidade funcional exigida pelo meio, representada, até mesmo, no contexto social, nos hábitos e costumes da humanidade.

A partir de 1858, Darwin e Wallace passaram a vincular a evolução dos organismos às adaptações da forma e seu teste sob o meio através da seleção natural. As espécies desenvolveriam variações cujos atributos transmitidos às gerações subseqüentes seriam aqueles que respondem com mais eficiência na luta

---

<sup>1</sup> O termo **teleologia** deriva do grego *télos* (fim, propósito), e foi propagado, por Aristóteles, como o estudo filosófico sobre desígnio e propósito. Segundo Bertman (2006), a própria teologia pressupõe um raciocínio teleológico encontrando, na organização da natureza, um argumento para a existência divina.

pela sobrevivência. Neste ínterim, não é o ambiente o responsável pelas modificações nos organismos, mas são adaptações internas que, colocadas à prova perante o meio, constituem aperfeiçoamento e são efetivamente consolidadas na herança genética. A reprodução, verificada em proporções geométricas, atende a uma demanda por reservas à sobrevivência, e seus mecanismos de redundância e diferenciação decorrem não somente da competição individual, mas refletem também uma necessidade em prover maior fertilidade populacional. A herança genética, baseada na diversidade, é proporcional à eficiência pela sobrevivência e perpetuação das espécies. As teorias de Darwin produziram impactos na filosofia e na religião, pois trataram a evolução como produto da adaptação e seleção natural em detrimento a uma explicação divina pela harmonia da natureza. Cannon (1961 apud Steadman 1979, p. 78) chega a afirmar que “Darwin teria roubado o universo dos teólogos”.

A relação da forma ao contexto funcional, situada nos parâmetros propostos por Lamarck, encontra representação em teorias da arquitetura espelhadas na relação entre processos construtivos e tecnologias materiais. Viollet-le-Duc (1858) acreditava que tal relação implicava no próprio ajuste da forma dos edifícios a partir da exposição racional de sua lógica estrutural e funcional. Cada componente construtivo teria sua responsabilidade funcional, desse modo, organizando-se em um sistema coerente sob aspectos estruturais e ordenadores.

O contexto moderno do início do século XX revelou anseios pela renovação estética e funcional da identidade arquitetônica, assim, situando-a diante dos códigos produtivos e tecnológicos trazidos pelos ventos da revolução industrial. Le Corbusier e Ozenfant (1925) acreditavam que o espírito moderno deveria voltar-se ao estabelecimento de novos estilos arquitetônicos e artísticos, coerentes com uma época de renovação produtiva e tecnológica. Steadman (1979) esclarece que o determinismo funcional adotou como prerrogativa a definição prioritária das funções e condicionantes vinculados a artefatos e edifícios cuja forma surge em sua decorrência. Os atributos estéticos estariam vinculados a decisões formais pautadas pelo atendimento à função. Tal contexto gerou reflexões que vinculavam o progresso cultural à simplicidade estética, com isso, propiciando críticas ao ornamento (LOSS, 1908), ou mesmo pela crença de que a perfeição estética encontraria lugar no

anonimato da forma, expressa pela pura técnica, a exemplo do conceito “*Less is More*”, disseminado por Mies Van der Rohe. Os puristas, por sua vez, acreditavam que a seleção de formas no design permeava-se pela economia de meios e recursos e vinculava a própria evolução das máquinas e ferramentas na busca pelo melhor desempenho com o mínimo de dispêndio material e energético. Por conseguinte, a forma apresentaria uma tendência em convergir para um modelo universal ou padrão, alinhando-se à lógica do progresso industrial.

Já as teorias evolutivas formuladas por Darwin, somadas às teorias da hereditariedade lançadas por Mendel (1865), encontram paralelo na arquitetura à medida que o edifício pode ser concebido a partir da multiplicidade de configurações vinculadas à sua estrutura genética. Segundo Mayer (2003), os termos **genótipo** e **fenótipo** foram introduzidos por Wilhelm Johannsen, em 1909, sendo o genótipo a descrição das espécies transmitida pela hereditariedade biológica, e o fenótipo a manifestação física da interação deste genótipo com o meio, ou com sua função. Seguindo mecanismos semelhantes, a linguagem arquitetônica se vincula ao estabelecimento de genótipos, enquanto o fenótipo situa esta linguagem perante a época e o contexto.

O **tipo** é, portanto, o fator transmitido pela cópia (reprodução) através de um conjunto de instruções genéticas que são transmitidas cronologicamente. Artefatos carregam um conjunto de informações acerca de sua funcionalidade e estrutura (forma) que evoluem a partir das referências que são absorvidas em seu proveito. Steadman (1979) esclarece que tal distinção corresponde aos genótipos e fenótipos da biologia que, nos objetos, constituem-se respectivamente nos atributos formais carregados numa linguagem arquitetônica, e que ao serem testados perante novas demandas e funções estabelecem novas formas e conceitos, conseqüentemente, representando a própria evolução arquitetônica. Estes fatores incorporam ainda a noção darwiniana de **tentativa e erro** recorrente na natureza, conforme postulou Darwin - os organismos adquirem configurações que são postas à prova perante o meio. Na mesma linha, diferentes linguagens arquitetônicas são também construídas a partir da incorporação de soluções profícuas, enquanto os equívocos são naturalmente excluídos ou deixados ao esquecimento. “A acumulação do conhecimento estrutural e material, somada ao refinamento construtivo da forma e

técnica, são produtos de processos históricos de tentativa e erro, transmitido ao longo das gerações de arquitetos e designers” (STEADMAN, 1979, p. 83).

A noção de que edifícios carregam princípios generativos motivou uma série de estudos que vinculam estes à descrição da linguagem arquitetônica, a exemplo de Stiny e Mitchell (1978), Koning e Eizenberg (1981), Flemming (1981), Mayer (2003), Weber (2005) e Westphal (2007).

A contextualização do paradigma **forma segue a função** apoia o principal argumento desta pesquisa: se os propósitos do design, e também da arquitetura, envolvem gerar equilíbrio entre atributos funcionais e estéticos, a precedência de um fator sobre o outro (da função sobre a forma) pode trazer limitações para a criação estética. Recordar-se que Vitruvius (25 a.C.) propugnava a excelência em arquitetura fundamentada no atendimento aos pressupostos de estabilidade, utilidade e beleza (*firmitas, utilitas e venustas*). Lobach (2001) ponderou que o propósito do design é, sobretudo, alcançar a combinação e o equilíbrio entre os aspectos estéticos, funcionais e simbólicos. Este paradigma, destituído da extrema rigidez e hemetismo, oferece outro viés, pelo qual se pressupõem as recíprocas influências entre a função e o estabelecimento da forma. Estando sob o domínio de um método, sua influência sobre o projeto pode ser encarada numa perspectiva mais flexível, cabendo ao projetista determinar seu grau de interferência na concepção arquitetônica. Ao buscar maior mediação entre forma e função, a negociação entre propósitos estéticos e funcionais se vincula a uma estruturação multidisciplinar do processo de projeto.

Este trabalho propõe-se a fundamentar um processo dialético de projeto que, apoiado inicialmente num viés estético (referenciais orgânicos), trata de submeter **formas a validações funcionais**. A estratégia pode ser descrita como um processo de abstração da forma vinculado às analogias biológicas. Segundo Harre (1972), analogias são relações entre processos ou produtos nas quais são elaboradas inferências de um sobre o que se conhece do outro. Shelley (2003) esclarece que Platão e Aristóteles já se referiam à analogia como uma abstração compartilhada de ideias, padrões, atributos ou mesmo efeitos. Nagel (1961 apud Krüger, 1986) classifica as analogias em dois grupos principais, substantivas ou formais. Nas

primeiras, um sistema de relações serve como modelo para construir teorias ou regras de projeto; enquanto as analogias formais partem da abstração como modelo que permita fazer inferências sobre um sistema ou produto.

Krüger (1986) relaciona as analogias com a formulação de teorias em torno da arquitetura, classificando estas em dois grupos principais: teorias da competência e teorias de desempenho. As primeiras representam o corpo de conhecimento acerca do objeto arquitetônico como artefato; as teorias do desempenho formulam o conjunto de princípios vinculados à arquitetura como atividade processual em que a busca de analogias formais permite inferir sobre o processo de projeto, a partir da elaboração de protocolos<sup>2</sup> de concepção. Entrementes, abre-se um campo de pesquisa em que a busca pela abstração, por meio do referencial biológico, oferece modelos aplicáveis em arquitetura e pode ser estabelecida pela formulação de metodologias de projeto. Ao delimitar o processo de concepção de ideias, o método fornece a base de registro e domínio para o projetista, estruturando suas ações em etapas sistemáticas, situadas desde a identificação da referência generativa até sua aplicação no objeto arquitetônico. Tal estratégia, além de abrir lacunas para interferências ou reavaliações pontuais no processo de definição da forma, clarifica o processo como um todo viabilizando sua posterior descrição.

Metáforas e analogias biológicas serviram tanto ao propósito de descrever o artefato arquitetônico ou para buscar referências formais para sua configuração. Na primeira instância, Le Corbusier (1923) associou os conceitos de planta livre e paralisada respectivamente à estrutura muscular e óssea do corpo humano; Alberti (1452) vinculou os elementos estruturais a uma metáfora com o sistema ósseo; e Scamozzi (1615) comparou as vias de circulação urbana ao sistema circulatório sanguíneo. Já as analogias biológicas, tomadas como princípios de fundamentação de ideias para o artefato arquitetônico, estão alicerçadas no princípio da recursividade e simetrias (WEYL, 1952; SKINNER, 2006). Armero (2004) afirma que a geometria, presente nas formas do universo, passou a ser compreendida como manifestações de caráter físico, desse modo, permeando sua compreensão

---

<sup>2</sup> Um protocolo representa o registro de comportamento do projetista, ou das possíveis ações que serão tomadas no percurso entre a identificação de um problema e sua solução final (AKIN, 1978).

científica e matemática em detrimento de uma visão mística. Tanto os organismos vivos como as formas inertes seguem leis ligadas à regularidade em que a geometria se traduz como a manifestação plástica de uma lei de formação.

Steadman (1979) associa o próprio ideal clássico de beleza da antiga Grécia à harmonia e proporção presentes nos organismos naturais. Tal analogia pressupõe a presença de dois fundamentos básicos necessariamente interligados - um relativo à aparência visual ou composição; e o outro caracterizado pela funcionalidade. Assim a suposta afinidade entre a beleza do orgânico em relação às formas artificiais depende do modo com que compartilham certos fundamentos matemáticos e, particularmente, geométricos. Manzini (1993) reflete sobre a aproximação às formas arborescentes e orgânicas da natureza e sua possibilidade de conexão com a tecnologia; e Pahl et al. (2005) vinculam as possibilidades de investigação de sistemas estruturais a partir da análise de formas, estruturas, organismos e processos naturais.

A fim de discutir a inserção das analogias biológicas em arquitetura, constata-se que a discussão sobre o tema, até então, concentra-se em sua utilização como elemento generativo, ou mesmo na descrição de elementos arquitetônicos a partir de metáforas com a natureza. A base teórica clarificada neste trabalho aponta para um campo ainda inexplorado - o emprego de referencial biológico documentado através de um protocolo de projeto, tanto sob o aspecto estético como funcional. Esta dissertação objetiva preencher este vazio metodológico propondo uma discussão sobre a natureza como elemento generativo para a arquitetura, sob a ótica de um método de projeto. O trabalho se insere nesta lacuna teórica com a proposta de fundamentar uma metodologia de projeto a partir do referencial orgânico, ao mesmo tempo em que, passo a passo, associará referências visuais a requisitos vinculados à função estrutural.

Para tanto, esta pesquisa concentrar-se-á nas **superfícies** como protagonistas da forma arquitetônica. Superfícies rígidas ou flexíveis, cumprindo ou não a função de estruturação, podem assumir diferentes formas, sejam elas planas, curvas, contínuas ou fragmentadas. Independentemente de uma caracterização universal do seu propósito, é mister consensualizar seu papel como limite físico de

volume. Caracterizadas como envolventes, podem bloquear ou irradiar calor, restringir ou franquear visuais, transitando entre diferentes graus de permeabilidade ou opacidade, proteção ou vulnerabilidade.

Sob um viés estrutural, a superfície arquitetônica pode incorporar em sua formação elementos que garantam autossustentação em sua constituição física e material. Aqui, estrutura e vedação relacionam-se em diferentes graus de exposição, conforme os elementos construtivos estruturadores possam ou não estar expostos à percepção visual. Estes, quando incorporados à superfície perceptível e estruturável, podem ser também associados a padrões originários da natureza, cujas formas modelam-se por meio de operações recursivas de simetrias, estando calibradas através de proporções diversas.

Como delimitadora de volume, identifica-se uma categoria específica de superfície caracterizada pela relação ótima entre volume efetivo e área de seu envoltório – as **superfícies mínimas**, matematicamente definidas como entidades que apresentam a menor área possível, dados os limites para uma determinada região ou volume (BALL, 1999). Observadas na conformação de películas líquidas, foram objeto de investigação de Plateau (1873) e Maraldi (1712), que identificaram propriedades geométricas recorrentes na configuração destas formas, lançando luz sobre a existência de princípios de organização que regem organismos naturais. Thompson (1942) relacionou uma série de ocorrências plásticas da natureza a fundamentos físicos vinculados ao equilíbrio de tensões, desse modo, comprovando que formas mínimas são, em regra, frutos da combinação de sua própria essência material com a contingência física de equilíbrio com o meio.

A aplicação do conceito de formas mínimas na arquitetura pode ser constatada em várias escalas, desde o urbanismo, a exemplo das cidades medievais muradas ou em planos neoclássicos para cidades ideais (LEDOUX, 1775), até a conformação volumétrica de edifícios fundamentada no conceito de compacidade<sup>3</sup> (BOULLÉE, 1790). Gaudí desenvolveu, no século XIX, princípios

---

<sup>3</sup> **Compacidade** consiste na relação ótima entre área e volume, e pode ser entendida como uma propriedade vinculada à forma mínima.

estruturadores a partir da análise de formas suspensas em estado de equilíbrio, com o intuito de obter curvaturas catenárias estáveis, dotadas exclusivamente de esforços de tração ou compressão. A partir da década de 1950, a investigação acerca das superfícies mínimas ganhou impulso com Buckminster Fuller e Frei Otto, que aplicaram formatos mínimos em princípios estruturais, apropriando ao projeto de membranas tensionadas o equilíbrio de tensões, por sua vez obtido a partir de estados naturais de relaxamento.

A arquitetura e o design contemporâneos revelam várias tendências inspiradas em analogias naturais, tanto para a conformação volumétrica como para princípios de estruturação. Fundamentam-se, assim, na análise dos processos e princípios geométricos existentes em padrões naturais emergentes, e seu potencial de aplicação na conformação de estruturas vinculadas ao conceito de superfícies mínimas. Kelvin (1887) e Wearie Phelan (1993) investigaram princípios de área mínima em agregação tridimensional, obtendo modelos geométricos que incorporam princípios ideais de compacidade aplicáveis no desenvolvimento de novos materiais, espumas poliméricas e modelos estruturais de edificações, o que veio inspirar posteriores modelos de estruturação propostos por Girsewald e Subercaseaux (2005) e PTW Architects (2006).

Se organismos naturais fornecem um repertório de formas aplicáveis em superfícies autoportantes, argumenta-se que as analogias formais, pautadas apenas na função estrutural, restringem o espectro de possibilidades ao resgate de formas com função idêntica tanto no artefato como na fonte orgânica de referência. Alternativamente, sugere-se um caminho inverso em que a função, determinada a partir de um contexto geométrico, seja consolidada pela negociação entre o cumprimento da função e a escolha da forma. A inversão do paradigma **forma segue a função**, proposto por Sullivan, traz possibilidades de renovação no repertório arquitetônico: ao propor a utilização de formas naturais como elementos generativos vinculados a protocolos de concepção, pode-se, além de alcançar o ajuste da função a formas pré-definidas, estabelecer novos patamares de liberdade projetual e de linguagem arquitetônica.



## **Formulação dos problemas**

A argumentação até aqui apresentada ajuda a construir as questões principais da pesquisa, ou seja:

1. É possível criar um modelo que permita descrever o povoamento de superfícies mínimas vinculado a padrões modulares extraídos de formas emergentes da natureza?
2. A partir de um processo de avaliação estrutural, é possível atingir eficiência estrutural mantendo a identidade da linguagem dos padrões modulares?

O fio condutor da pesquisa reside na aplicação de uma metodologia de projeto para estruturação de superfícies mínimas com base na identificação e parametrização de formas emergentes da natureza. Assim, argumenta-se que um processo de projeto vinculado a esta abordagem estruture-se em etapas, desse modo, iniciando com a identificação de geometrias na natureza, sua transposição para um ambiente computacional que permita a manipulação do padrão e a geração de alternativas de simetria, a visualização pela simulação tridimensional e a avaliação do desempenho estrutural. Tal processo vincula a escolha por uma forma pré-identificada à qual deva ser atribuída uma função específica de estruturação, portanto, adotando mecanismos de mensuração que possam viabilizar seu emprego em um componente arquitetônico e com o compromisso de preservar sua identidade geométrica original.

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro trata da superfície como elemento arquitetônico focando suas possíveis denominações, propósitos programáticos e estruturais. No segundo capítulo, as superfícies mínimas são contextualizadas a partir de suas bases físicas e matemáticas salientando sua recorrência na natureza. O terceiro capítulo traça um paralelo entre a aplicação de formas e conceitos mínimos na arquitetura e no design, nessa perspectiva, baseando-se nos princípios de estruturação e agregação. O quarto capítulo revisa os conceitos de forma, emergência e simetrias a partir de suas manifestações

biológicas e posteriores aplicações na formulação de regras de projeto. O quinto e último capítulo descreve os materiais e métodos que conduziram o experimento desta pesquisa, então, apresentando e discutindo seus resultados. Por fim, são apresentadas as conclusões e prováveis desdobramentos que esta pesquisa oferece na continuidade de investigação sobre o tema.

## CAPÍTULO I

### A superfície como elemento da arquitetura e design

Platão (1892 apud ARNHEIM, 1978, p. 13) se referia ao espaço como “a mãe e o receptáculo do todo criado e visível, e de algum modo sensível”, aceitando que, em sua essência, ele precede a todos os objetos. Mesmo vazio se estabelece como um ente único e universal da natureza, sendo “o recipiente natural de todas impressões, animado e modelado por elas”. Arnheim ressalva que, neste espaço onipresente e autossuficiente, o fenômeno da percepção espacial somente se verifica pela existência das coisas efetivamente perceptíveis, visto que “de nenhum modo o espaço se dá por si mesmo. É criado por uma constelação particular de objetos naturais e feitos pelo homem, para as quais o arquiteto contribui” (ARNHEIM, 1978, p. 6). Nesse sentido, evoca-se o princípio básico da arquitetura, caracterizada como uma criação essencialmente humana destinada a satisfazer necessidades em habitar e modelar o espaço, e cujo objeto primordial decorrente de seu propósito é o edifício.

A modelagem do espaço pressupõe a forma como instrumento essencial da arquitetura, esta que foi definida singulamente, por Le Corbusier (1977), como um jogo de volumes reunidos sob a luz. A forma, entendida como matriz sobre a qual os volumes se configuram, pressupõe a materialização de limites físicos vinculados à sua constituição espacial, traduzidos num elemento construtivo específico - a superfície.

Como componente da edificação, a superfície pode receber várias denominações. Em seu propósito primordial de teto e abrigo, **envelope, pele, máscara, invólucro, manto ou capa**, são analogias recorrentes, usualmente relacionadas ao contexto e à função em que a superfície é descrita, ou mesmo, representada, como um limite físico de vedação e proteção ao espaço interno.

A superfície desempenha também a função de interface entre o espaço construído, o meio e o usuário, estabelecendo entre eles diferentes dinâmicas e relações. Ao cumprir este papel, delimita o volume e materializa, por meio de seus componentes construtivos, um espectro de relações podendo representar, em diferentes níveis de intensidade, estanquidade e hermetismo, permeabilidade e transparência, proteção ou vulnerabilidade (MONTANER, 1997). Os elementos que regulam este espectro estão intimamente ligados às soluções arquitetônicas empregadas, aos materiais, aos propósitos programáticos estruturais e funcionais pelos quais o arquiteto é responsável. Para este caráter de mecanismo transitório as nomenclaturas usuais remontam à **pele, membrana, filtro**, caracterizando a superfície como um elemento que permeia a relação do objeto arquitetônico com o espaço em que se insere.

Piñón (2006) questiona o uso deliberado de rótulos na descrição de elementos arquitetônicos, dentre os quais, o termo **pele** “acentua a condição de elemento superficial externo da parte do edifício a que alude: elemento contínuo, indistinto, ainda que ajustado aos pormenores do interior” (PIÑÓN, 2006, p. 74). Assim, o uso apropriado de uma nomenclatura orgânica teria de considerar a pele como um elemento de proteção elástico e versátil, de modo que “a extrapolação do substantivo [...] contribui, com frequência, para que se evite a consideração dos atributos que deveriam caracterizar o fechamento” (PIÑÓN, 2006, p. 74). Em sua substituição, o termo **casca** descreveria com maior propriedade os atributos do envolvente, ainda que inserido no referencial orgânico: “A casca cobre e protege a árvore a qual pertence, mas, sem deixar de adaptar-se à sua constituição, tem sua própria estrutura, o que a aproxima do papel de fechamento dos edifícios” (PIÑÓN, 2006, p. 73-74).

Admitindo que a arquitetura se materializa no espaço através dos volumes, estes por, sua vez, são delimitados por superfícies com diferentes possibilidades de conformação plástica, assim, podendo ser planas, horizontais, verticais, curvas, inclinados ou cascas. Ao envolver espaços habitáveis, subentende-se que a conformação do volume está diretamente ligada às características da superfície e sua materialidade, com isso, incorporando revestimentos com propriedades relacionadas a funções simbólicas, estéticas e funcionais<sup>1</sup>. Tais aspectos foram definidos por Lobach (2001) como bases conceituais para o desenvolvimento de produtos em escala industrial que podem, com maior ou menor grau de relevância, instrumentalizar o desenvolvimento de padrões para design de superfície na arquitetura.

Rutschilling (2008) define o design de superfícies - “uma atividade técnica e criativa cujo objetivo é a criação de texturas visuais e/ou tácteis, projetadas especificamente para a constituição e/ou tratamento de superfícies, apresentando soluções estéticas, simbólicas e funcionais adequadas às diferentes necessidades, materiais e processos de fabricação”. Num contexto arquitetônico, seu papel pode ser amplificado para a elaboração de alternativas de estruturação da superfície, visto que, a exemplo do que versa a tríade Vitruviana<sup>2</sup>, os aspectos estéticos e funcionais de uma superfície arquitetônica não se perpetuam se não coexistirem com sua sustentação.

A superfície, sob o ponto de vista matemático, traduz-se em uma variedade topológica bidimensional, e todo o esforço inicial no estudo da topologia se concentrou na compreensão de seus conceitos. Para Devlin (1998), numa visão

---

<sup>1</sup> Gomes Filho (2006) relaciona a Função Estética ao repertório sociocultural do observador, à percepção visual e aos conceitos estéticos definidos pela sociedade. A Função Simbólica é compreendida a partir de uma dimensão sensorial, psíquica, emotiva e espiritual relacionada à personalidade e aos modos de viver. A Função Prática equaliza as relações fisiológicas e interferências ambientais que, entendidas no campo do design de superfície da fachada, pressupõem os níveis de interação entre o edifício com o usuário e o meio, sua materialização física, seu *modus operandi* e sua eficácia.

<sup>2</sup> A tríade Vitruviana *Firmitas, utilitas e Venustas* (25 a.C.) representa os três pressupostos básicos da arquitetura, nos quais o primeiro representa a estabilidade como condição básica, sem a qual não seria possível existirem os dois pressupostos. Nada que não se sustente pode se perpetuar como um objeto arquitetônico, e as qualidades complementares de utilidade e estética somente coexistem com a condição de estabilidade.

matemática fundamental, as superfícies não possuem lados, pois, por fazerem parte de um universo bidimensional, a noção de lado ou face somente resulta quando ela é observada do espaço tridimensional circundante. Na ótica da arquitetura, portanto, a noção de faces ou lados se faz relevante porque seu produto, o edifício, pertence a um universo tridimensional revelando a superfície em suas faces internas e externas, cada qual caracterizada e percebida de maneiras distintas. Schwartz (2008) relata que a inserção da superfície no espaço tridimensional faz com que sua percepção esteja sempre contextualizada e condicionada ao trinômio observador/sujeito/usuário, inclusive sujeita a questões temporais, como o desgaste físico.

Na arquitetura, as superfícies desempenham a função de limite físico entre os espaços e podem caracterizar separações ou comunicações entre estes. Os elementos construtivos vinculados à superfície podem, ainda, desempenhar sua estruturação, dessa forma, passando a caracterizá-la como **superfície-objeto**. Schwartz (2008) esclarece que o conceito de superfície-objeto refere-se ao caráter estruturador do envoltório, estando este organizado simultaneamente ao volume. Ao transpor esta definição para um plano arquitetônico, sobrevém o entendimento de que a superfície, como componente da edificação, possui faces perceptivamente distintas e pode desempenhar a função de autoestruturação, como responsável direta por sua própria sustentação espacial. Tal propriedade é materializada em elementos construtivos dispostos interna ou externamente à superfície, ou mesmo incorporados na espessura da membrana. Assim se estabelece uma relação espacial entre estrutura e mecanismos de vedação, assumindo rigidez necessária para garantir a própria sustentação, e permitindo graus diversos de exposição visual.

As membranas se caracterizam como um tipo especial de envolvente da edificação em que pode ser aplicado o conceito de autoestruturação. Superfícies podem ser classificadas segundo critérios de constituição e aparência sobre os quais podem ser identificadas duas categorias básicas: a primeira, relacionada à unidade material e perceptiva, representada pelo termo **uno**, refere-se a entidades cuja percepção se revela de maneira única e íntegra, sem divisões aparentes e apresentando consistência e integridade formal. Numa outra instância, os elementos

construtivos se fazem perceptíveis e traduzem uma segmentação que permite classificá-las como membranas ou superfícies **compostas**.

Para compreender a inserção da unidade formal na arquitetura faz-se necessário contextualizar, historicamente, o período compreendido no início do século XX, quando aflorara uma preocupação em compatibilizar a identidade arquitetônica com as novas tecnologias e meios de produção emergentes na época. Ao situar a arquitetura diante de um código de produção repleto de inovações construtivas, versava-se pela unidade espacial, onde os componentes envolventes dos edifícios deveriam atuar de forma a ressaltar a plasticidade e o volume. Le Corbusier (1923) exaltava a arquitetura clássica grega como exemplo seminal da pureza e coordenação volumétrica, em que a proporção e a plasticidade estavam na via da perfeição. Acreditava, sobretudo, que o espírito moderno deveria voltar-se ao estabelecimento de um novo estilo arquitetônico que pudesse representar os tempos modernos tal qual o fez a arquitetura clássica e gótica em seus períodos.

Assim, o arquiteto teria como tarefa “fazer viver as superfícies que envolvem esses volumes, sem que essas, tornadas parasitas, devorem o volume e o absorvam em seu proveito: triste história dos tempos presentes” (LE CORBUSIER, 1923, p. 18). Ao condenar o excesso de ornamentação vigente na arquitetura neoclássica, Le Corbusier (1923) alertava que a linguagem da superfície estava maculada pela profusão de estilos de época<sup>3</sup>, que, na sua visão destruíam e concorriam com as formas puras.

Clamando pela recuperação da pureza e sinceridade da arquitetura clássica, Adolf Loss (1908) propunha, em seu artigo *Ornamento e Crime*, que o progresso da cultura estaria ligado à eliminação do ornamento, o que, em ressonância com as teorias de Mies Van der Rohe, encontrava, na exuberância e anonimato da forma pela expressão pura da técnica, as bases da arquitetura moderna. Moreira (2005) refere que a concepção moderna alterou profundamente o ato de vestir as fachadas,

---

<sup>3</sup> Nas palavras de Le Corbusier, “A arquitetura não tem nada a ver com os ‘estilos’. Os Luis VX, XVI, XIV ou o gótico, são para a arquitetura o que é uma pena na cabeça de uma mulher; às vezes é bonito, mas nem sempre e nada demais” (LE CORBUSIER, 1923, p. 22).

que passaram a ser livres em prol da expressão de uma nova tecnologia construtiva e em detrimento da simples representação estética.

A preocupação e o engajamento com a valorização plástica encontraram abrigo nas ilimitadas possibilidades tecnológicas do concreto amado (MAYER, 2003), cujos atributos de flexibilidade, moldabilidade e resistência deram início à investigação por formas livres e puras. A combinação de configurações plásticas, estruturalmente ativas com tais potencialidades materiais, possibilitou a materialização de **casca**s com espessuras reduzidas, traduzindo um compromisso com a monumentalidade, a integridade formal e a economia de meios, estratégias que se alinham com dogmas modernos voltados ao destaque volumétrico e à sobriedade construtiva. Mesmo sendo intencionalmente composta por elementos diversos, uma superfície de concreto, quando predominantemente lisa e monocromática, apresenta uma uniformidade em seu aspecto externo, traduzindo a constituição **una**, esta que se constitui numa das possíveis estratégias para composição de superfícies mínimas em arquitetura, quando considerado o atributo perceptivo de constituição.

O arquiteto espanhol Felix Candela (1963), responsável por significativas contribuições no campo das cascas **unas** de concreto reforçado, acreditava que “de todas as formas que podem ser dadas a uma casca, a de maior facilidade e praticidade executiva é o parabolóide hiperbólico” (CANDELA, 1963, p. 226). Também conhecido pela expressão *hypar*, este modelo de superfície mínima é um formato recorrente em sua arquitetura, a exemplo das formas fluídas do restaurante *Los Manantiales* (Figura 01), composto pelo arranjo simétrico radial de quatro *hypars* que se interceptam no eixo central da edificação (Figura 02). Segundo Garlock e Billington (2008), as cascas podem ser classificadas em duas categorias principais: *proper shells*, que apresentam dupla curvatura destinada a anular esforços de flexão, e outras denominadas *improper shells*, onde a forma é resultado da combinação do peso próprio com os esforços de flexão, a exemplo das catenárias invertidas. Em ambas, a espessura é significativamente reduzida em relação à largura e comprimento, os esforços estão sempre delimitados na própria membrana em que forma, espessura e material proporcionam uma distribuição equilibrada do



peso próprio da estrutura. Armero (2004) salienta que diversos organismos naturais revelam preferência por configurações de dupla curvatura para obter maior rigidez.

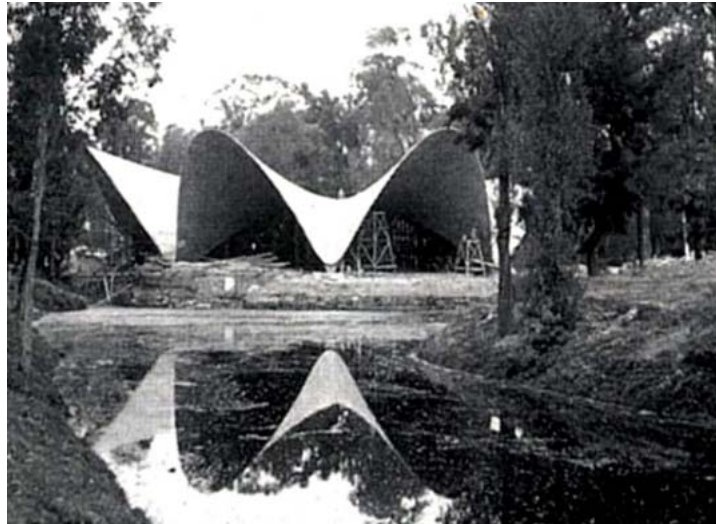


Figura 01- Restaurante *Los Manantiales* (CANDELA, 1958).

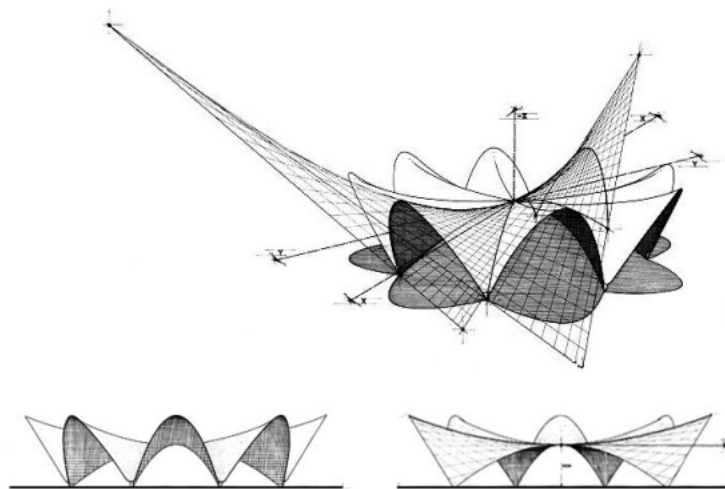


Figura 02 - Composição dos *hypars* do Restaurante *Los Manantiales*.  
Axonométrica, Elevação e Corte. (CANDELA, 1958).

Ainda sob a ótica da constituição, as superfícies podem ser classificadas de acordo com o termo **composto**, onde são reveladas suas partes componentes, sendo possível haver a percepção de segmentação. Entrementes, sobrevém o caráter de modularidade, somente perceptível em uma superfície composta em que sua materialização pode estar associada à sua decomposição em módulos constituintes, similares ou diferentes entre si.

Em arquitetura, os volumes que delimitam edificações podem ter sua conformação ligada ao uso de superfícies mínimas, para as quais é igualmente necessário prover sua estruturação, que pode estar associada à presença de um único elemento perceptivo (**uno**), ou pela fragmentação construtiva a partir de elementos modulares e serializados (**compostos**).

Em relação ao comportamento físico, podem ser categorizados três tipos de esforços básicos sobre uma estrutura: **tensão, compressão e flexão**. O conceito de autoestruturação em membranas implica em agregar elementos que absorvam tais esforços, desempenhando o papel da eficiência estrutural numa espessura reduzida, conseqüentemente com uma menor quantidade de matéria-prima. Tais elementos se traduzem pelo *frame* estrutural, organizado sob a forma de retículas ou tramas cujos componentes estruturais se distribuem através das linhas de tensão e compressão, concentrando os esforços e permitindo obter uma estrutura delgada, na qual a vedação pode ser sobreposta ou incorporada na própria espessura da membrana.

Bechthold (2008) classifica as superfícies arquitetônicas a partir de seu comportamento estrutural, dada a grande variedade de formatos e circunstâncias relacionadas ao seu emprego em edificações. Assim, propõe uma categorização em dois grupos principais: **sistemas rígidos**, que apresentam pequenas deformações quando submetidos a carregamentos, e **sistemas não-rígidos** em que as deformações são significativamente maiores, usualmente decorrentes das características de flexibilidade e maleabilidade dos materiais empregados. (BECHTHOLD, 2008, p. 4-5).

Os sistemas rígidos caracterizam-se pela presença predominante de tensões de compressão e subdividem-se em grupos vinculados à configuração da superfície e sua constituição. Nesta categoria, as superfícies **unas** constituídas por materiais contínuos são classificadas em *shells* e *folded plates*, representando respectivamente superfícies que apresentam curvaturas simples, duplas, ou mesmo dobraduras em elementos planos, que vinculam a forma à função de sustentação espacial. As necessidades de redução no peso próprio ou busca por maior permeabilidade visual geram ainda a subcategoria *grid-shell*, onde a superfície passa a incorporar tramas de elementos rígidos, usualmente confeccionados em aço

ou madeira e que podem igualmente incorporar curvaturas para otimizar o direcionamento dos esforços de compressão. Em contraposição, sistemas não-rígidos estão vinculados ao uso de materiais com flexibilidade e resistência à tração, esforço predominante nesta categoria de superfícies estruturais. Dentre os modelos possíveis, destacam-se as membranas pré-tensionadas, seja por recursos mecânicos ou pneumáticos, e as tramas de cabos, todas representando modelos substancialmente mais leves quando comparados aos sistemas rígidos.

O uso de membranas pré-tensionadas tem representatividade na obra do arquiteto russo Vladimir Shukhov que, em 1896, concebeu oito pavilhões para a exposição Pan-Russa, ocorrida na cidade de Nizhny Novgorod, evento promovido pelo então imperador Nicholas II com o intuito de divulgar a insurgente capacidade industrial do país ao término do século XIX. Dentre tais obras, destaca-se a estrutura de membrana tensionada para a *Shukhov Rotunda* (Figura 03). O protoconstrutivista Shukhov foi ainda reconhecido pela idealização da primeira estrutura em aço com dupla curvatura para os pavilhões industriais em Navky (1897), bem como pela primeira torre com geometria estrutural hiperboloide (1896).

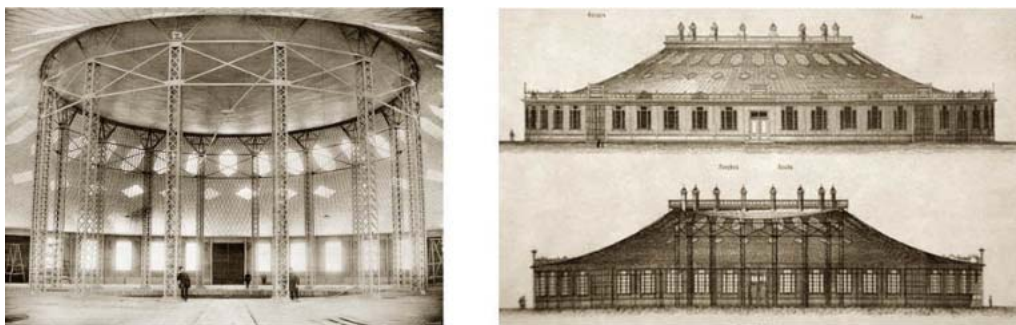


Figura 03 – Shukhov Rotunda, 1896. Átrio Central, Elevação e Corte.

A abordagem em superfícies tensesis foi também aplicada no projeto para o Sidney Myer Music Bowl (Figura 04), realizado pelo arquiteto Barry Patten em 1957. Consiste numa fina membrana estruturada por cabos tensionados, complementada pela vedação em painéis de madeira laminada revestidos em ambas as faces por chapas de alumínio. Tanto Shukhov como Patten foram posteriormente citados por Frei Otto (1958) como referência a suas pesquisas em membranas arquitetônicas, a partir da investigação de formas líquidas e estados naturais de equilíbrio presentes em sua configuração.



Figura 04 - Sidney Myer Music Bowl. Barry Beauchamp Patten, 1957.

A combinação entre elementos de compressão e tração gera uma categoria específica de estruturas com a propriedade de **integridade tensional** ou **tensegridade**, estabelecida a partir da sinergia entre tais forças mecânicas elementares. Motro (2002) a descreve como um estado de equilíbrio obtido pela junção de segmentos descontínuos, comprimidos por elementos contínuos tracionados, princípio análogo ao das treliças de engenharia. Em 1948, o artista Kenneth Snelson produziu uma série de estruturas vinculadas a este princípio (Figura 05) as quais impressionaram seu professor Buckminster Fuller, que, por sua vez, creditou a Snelson a invenção de um novo princípio estrutural, dessa forma, estabelecendo a nomenclatura por meio da contração entre os termos **tensão** e **integridade**.

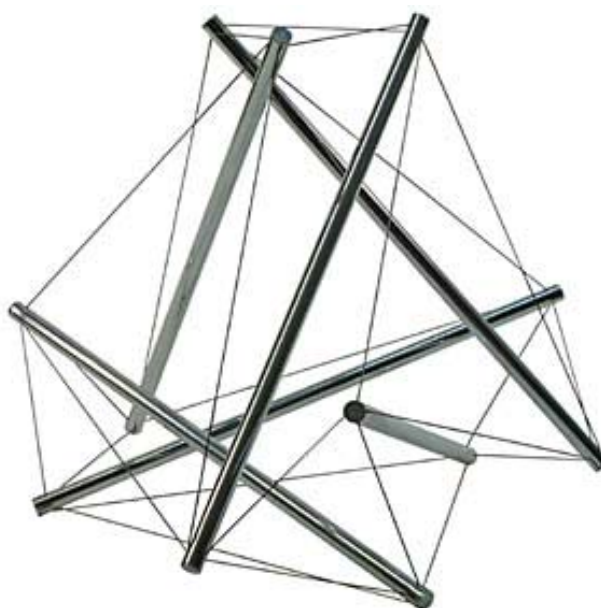


Figura 05 – Modelo de Tensegridade proposto por Kenneth Snelson.

Fox (1982) infere que a tensegridade encontra correspondência em sistemas biológicos, a exemplo da junção mecânica entre forças de contração proporcionadas pelos músculos e ligamentos em contraposição à resistência oferecida pelos ossos à compressão, de tal forma que a sinergia entre ambos propicia os movimentos e a sustentação estrutural dos organismos. Ingber (1998) aponta para sua recorrência em escala molecular, associando a tensegridade a princípios de organização existentes em membranas celulares, que combinam superfícies flexíveis a filamentos rígidos, assim, possibilitando a ancoragem mecânica a substratos proteicos.

Frumar e Zhou (2009) aduzem que estruturas em tensegridade têm grande potencial para aplicação em arquitetura e engenharia, dada sua leveza e rapidez executiva, apresentando altos graus de liberdade geométrica e potencialidades formais. Ademais, a combinação de seus fundamentos estruturais dispensa a necessidade de ancoragem a subsistemas, caracterizando-as como estruturas autônomas com graus de flexibilidade e mobilidade superiores às estruturas convencionais.

## CAPÍTULO II

### Superfícies Mínimas - Fundamentos

Definido o papel da superfície como delimitadora do volume, identifica-se uma categoria específica de superfícies a qual é caracterizada pela relação ótima entre volume efetivo e área de seu envoltório – as **superfícies mínimas**, entidades definidas matematicamente como aquelas que apresentam a menor área possível, dados os limites para uma determinada região ou volume (BALL, 1999).

Thompson (1942) relaciona as formas mínimas a ocorrências plásticas da natureza, baseadas numa questão fundamental de equilíbrio de tensões. Na conformação de líquidos em gotículas ou na geometria das bolhas de sabão (Figura 06), tais formatos se estabelecem pela tendência natural em anular as forças externas e internas que atuam sobre os limites físicos da matéria. As formas assumidas pelos líquidos se relacionam ao fenômeno da tensão superficial, representada pelas forças atrativas entre as moléculas da matéria líquida (PLATEAU, 1873). Ao buscar o equilíbrio, a superfície assume configurações de áreas mínimas para possibilitar o melhor aproveitamento de sua tensão superficial.

De todos os sólidos, a esfera é, por uma razão topológica fundamental, aquele que satisfaz a condição de englobar o maior volume com a menor área superficial relativa. Esta é uma das onze propriedades fundamentais da esfera relatadas por David Hilbert e Stephan Cohn-Vossen, em 1952, no livro *Geometry and the imagination*.



Figura 06 - Bolhas de sabão em formato esférico

Armero (2004) ressalta que superfícies mínimas reduzem a quantidade de material, otimizam tensões de trabalho e atuam no equilíbrio energético, o que explica a tendência à forma esférica apresentada por organismos que produzem calor de modo a reduzir ao máximo sua área de intercâmbio com o meio. Já aqueles que necessitam absorver cargas térmicas, frequentemente, optam por configurações que ampliam a superfície de contato para assim obter maior ganho térmico.

Os primeiros estudos sistemáticos acerca da geometria das bolhas e películas de sabão são atribuídos ao físico belga Joseph Plateau, que, em 1873, identificou, de forma empírica, notáveis peculiaridades geométricas destas configurações, o que lhe permitiu lançar vários postulados sobre o tema. Bolhas ou espumas são estruturas formadas a partir da matéria líquida expandida por matéria gasosa, sob ação da tensão superficial. Quando agrupadas, sua conformação tende ao estado de equilíbrio mecânico, e Plateau constatou que este se materializa no encontro entre as películas líquidas, sempre em três unidades e num ângulo recorrente de 120 graus. Num arranjo tridimensional (Figura 07), as bolhas são representadas por formas poliédricas cujas bordas assumem um arranjo também

constante de quatro unidades, em que o **ângulo tetraédrico** inevitavelmente é de “exatos 109 graus e 28 minutos” (THOMPSON, 1942, p. 498). Este ângulo tem sua aferição atribuída ao astrônomo e matemático Giacomo Filippo Maraldi, que em 1712 realizou cálculos sobre a geometria do dodecaedro rômbo. <sup>1</sup>

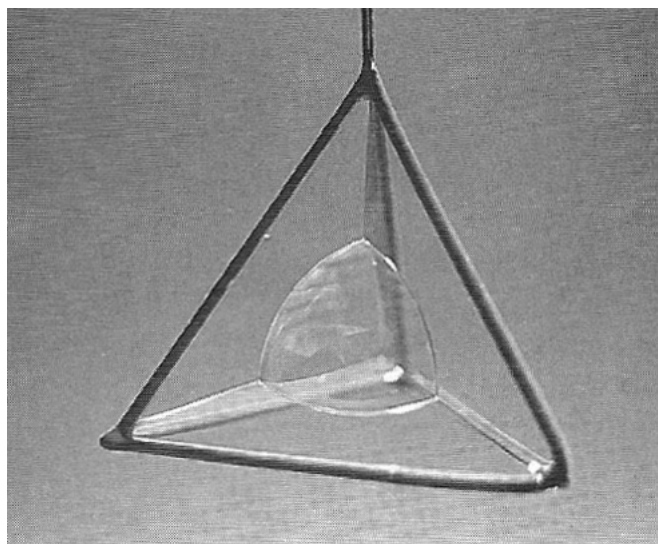


Figura 07 - Formação tetraédrica de bolha de sabão.

Em 1976, com a publicação do artigo *The Geometry of Soap Films and Soap Bubbles*, Taylor e Almgren comprovam, matematicamente, os postulados de Plateau numa série de experimentos com filmes de sabão conectados a diferentes limites ou *frames*. A publicação corroborou os princípios de áreas mínimas outrora anunciados, e que segundo Emmer (1996), apresenta uma notável coleção de figuras que comparam a geometria das bolhas e películas líquidas com estruturas naturais. Nesse sentido, Thompson relaciona diversas configurações de tecidos e organismos naturais ao princípio de áreas mínimas, a exemplo do que ocorre com os radiolários, protozoários marinhos que revelam “formas geométricas de peculiar elegância e beleza matemática” (THOMPSON, 1942, p. 712). Tais organismos são constituídos essencialmente por arranjos de matéria líquida e que, durante sua vida, acumulam gradativamente carbonato de cálcio em suas superfícies, no fenômeno conhecido por adsorção. O resultado é a formação de um exoesqueleto calcificado cujo formato

---

<sup>1</sup> O dodecaedro rômbo é um dos 13 sólidos de Catalan, cuja classificação é atribuída ao matemático belga Eugène Catalan, em 1865, sendo composto por 12 faces em formato de losango. Fonte: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Catalan\\_solid](http://en.wikipedia.org/wiki/Catalan_solid)> Acesso em 23 Ago. 2009.



se iguala ao arranjo recorrente identificado por Plateau (Figuras 08 e 09). Quando agrupado, o módulo componente da estrutura do organismo forma estruturas em colmeia. As formas mínimas da natureza são, portanto, o resultado da combinação da própria essência material com a contingência física de equilíbrio com o meio.

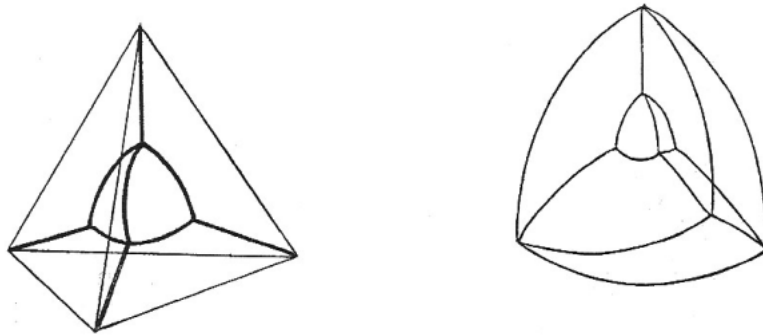


Figura 08 - Diagrama construtivo da *Callimitra*

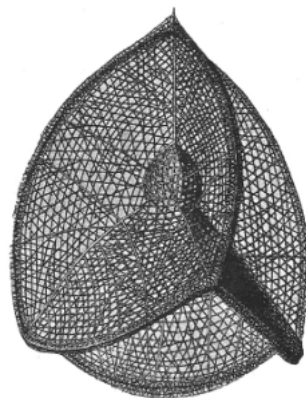


Figura 09 - Exoesqueleto calcificado da *Calimitra agnesae*.

Weinstock (2006) esclarece que processos adsortivos similares, conhecidos pelo termo *free living radical polymerisation*, podem ser reproduzidos em escala industrial para gerar estruturas poliméricas em colmeia num âmbito molecular, o que abre possibilidades para o desenvolvimento de novos materiais de revestimento os quais integrem transparência com resistência, ou mesmo apresentem propriedades autolimpantes para emprego em fachadas. Segundo Armero (2004), os organismos naturais demonstram preferência pelo ângulo de 120 graus, e muitas superfícies se estruturam em redes planas de polígonos repetidos e nos sistemas espaciais de poliedros, formando grupos de redes cristalográficas.

Thomas Von Girssewald e Juan Subercaseaux (2005), do grupo *Emergent Technologies and Design programme*, identificaram a configuração de Plateau e Maraldi a partir da análise de um componente endoesquelético de esponja do mar (Figura 10). A lógica estrutural do padrão inspirou a elaboração de um modelo estrutural geométrico composto de quatro arestas que, ao ser replicado, compõe uma malha estrutural flexível e adaptável. O experimento, ilustrado na figura 11, atesta o fato de que a natureza oferece, em sua morfologia, indícios para a formulação de modelos matemáticos, capazes de incrementar o processo de elaboração de estruturas complexas a partir de um módulo simples e versátil.

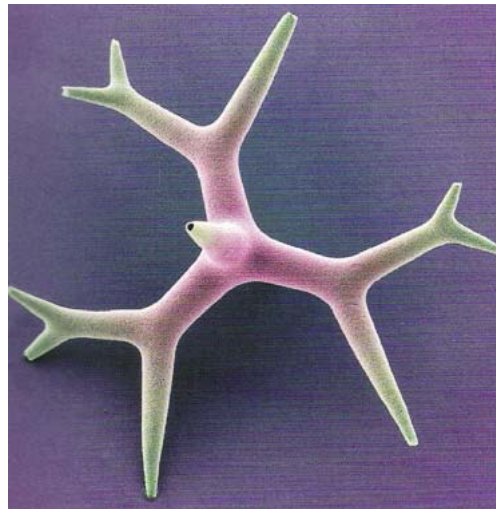


Figura 10 – Eletromicrografia de esponja do mar.

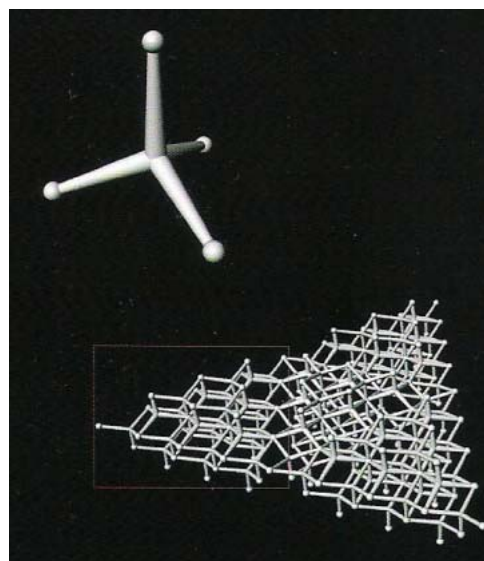


Figura 11 – Componente estrutural formulado a partir das leis de Plateau.  
Girssewald e Subercaseaux (2006)

A lógica geométrica resultante da conformação de espumas naturais ou poliméricas está também representada na estrutura molecular. Os termos **alotropia** e **polimorfismo** referem-se à propriedade vinculada aos elementos químicos e à sua configuração espacial atômica, desse modo, possibilitando a existência de materiais com propriedades diversas, provenientes de uma mesma unidade molecular organizada espacialmente de formas distintas. Os átomos de carbono, por exemplo, possuem dois alótropos principais: a grafite, representada pelo arranjo de retículas hexagonais em camadas planas; e o diamante cuja estrutura cristalina se configura espacialmente em tetraedros (Figura 12). A distinção entre suas configurações moleculares interfere também nas características físicas, a exemplo das durezas e condutividades elétricas diversas apresentadas por estes materiais. Kindlein (1999) afirma que graças à alotropia, é possível produzir diamante sintético a partir da grafite, somente alterando as condições de temperatura e pressão.

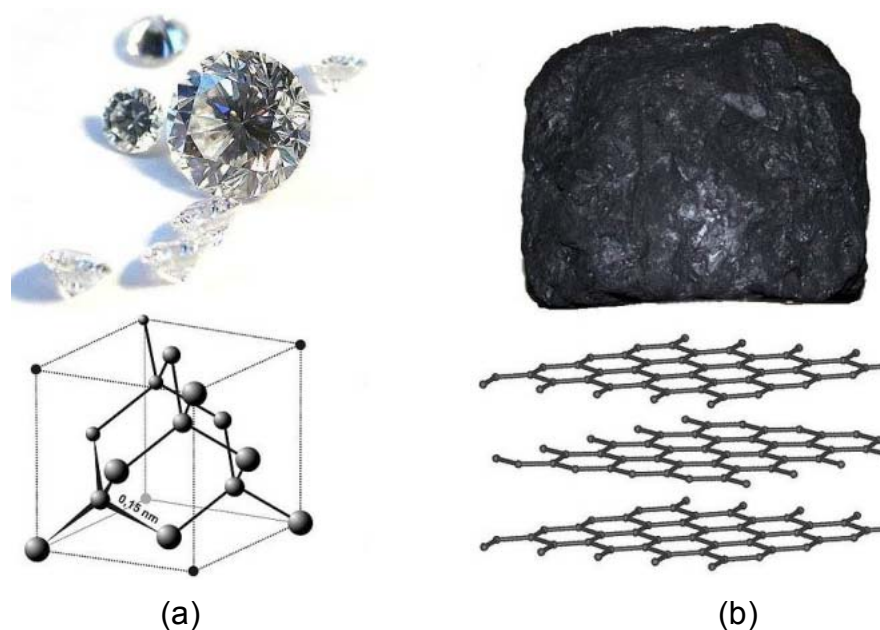


Figura 12 – Alótropos de Carbono.

(a) - Diamante. (b) - Grafite.

Em 1985, foram identificados novos alótropos de carbono que, ao contrário do diamante e grafite, por sua vez dotados de retículas contínuas e conectadas, possuem uma estrutura molecular individualizada, que segundo Kroto et al. (1985) usualmente se apresentam em formas poliédricas, elipsoidais e cilíndricas. A

semelhança de sua configuração alotrópica com as estruturas geodésicas de Buckminster Fuller inspirou seus descobridores a batizá-los com o nome de *Buckminsterfullerenos* (Figura 13), tendo aplicação nos campos da ciência dos materiais, supercondutividade e nanotecnologia. Quando apresentados na variante cilíndrica, são conhecidos como nanotubos de carbono, cuja configuração molecular os coloca dentre os materiais com maior resistência à tensão já identificados, lançando luz sobre o “futuro desenvolvimento de inovadores materiais de engenharia a partir de suas potencialidades estruturais.”(DALTON, 2003, p. 703).

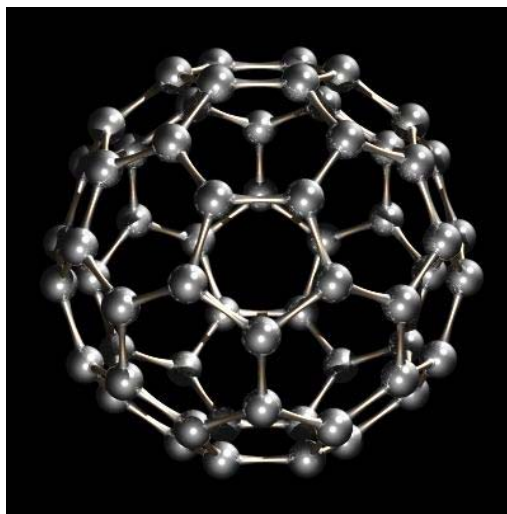


Figura 13 - Molécula de *Buckminsterfullereno*, Carbono 60.

### **Superfícies Mínimas - Modelos computacionais**

As superfícies mínimas podem ser produzidas e visualizadas por meio da distensão de uma película de sabão por anéis limitadores ou *frames* (figura do catenoide), podendo assumir uma diversidade de formatos, alguns deles de grande complexidade. Quando limitadas a um eixo de simetria, estas são nomeadas superfícies mínimas de revolução, as quais, além do plano (este gerado a partir da revolução de uma reta perpendicular ao eixo de simetria), destacam-se por cinco tipos possíveis: cilindro, onduloide, esfera, catenoide e nodoide, apresentados respectivamente da esquerda para a direita na figura 14:

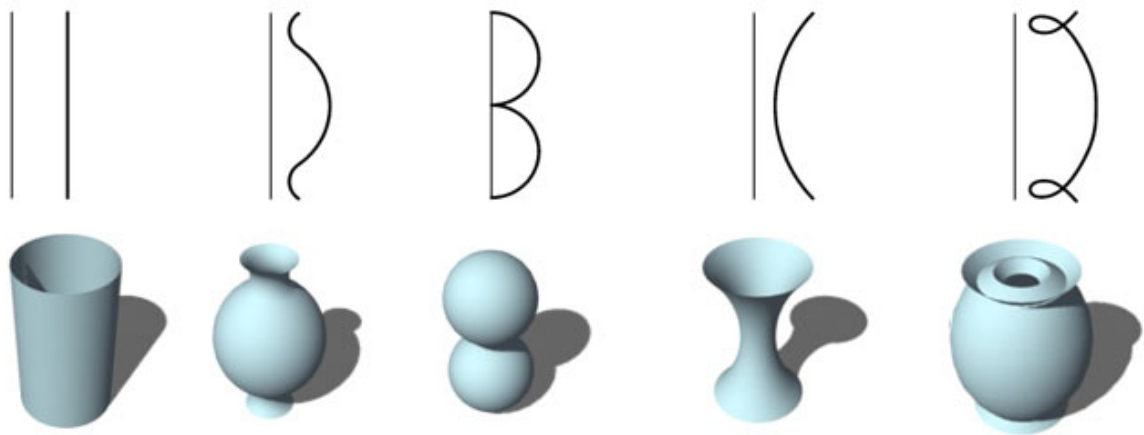


Figura 14 – superfícies mínimas de revolução e respectivas geratrizes

Thompson (1942, p. 368) nomeou-as como “figuras de equilíbrio”, indicando sua recorrência em organismos unicelulares em que a configuração depende essencialmente da variação entre as pressões exercidas sobre as superfícies líquidas, sendo que, no caso das superfícies mínimas de revolução, determinam variantes em sua geratriz, assim, caracterizando a dependência da forma em detrimento do equilíbrio de forças representado pela tensão superficial.

O catenoide foi o primeiro modelo de superfície mínima identificado após as formas básicas do plano e esfera, e sua descoberta é atribuída ao matemático suíço Leonard Euler (1744). Seu formato é facilmente obtido pela distensão de uma película líquida através de dois anéis concêntricos (Figura 15) e se constitui numa superfície de revolução obtida a partir da rotação de uma catenária (geratriz) sob um eixo (diretriz).

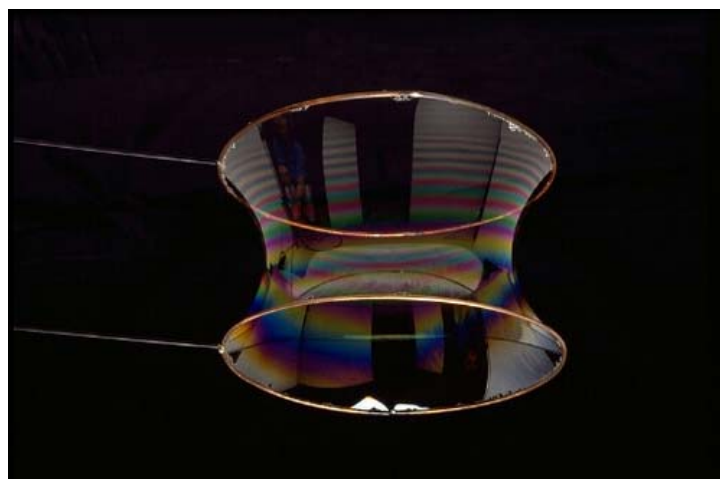


Figura 15 – Catenoide

A catenária é conhecida como o formato curvo assumido por um elemento de sustentação quando nele se aplica uma força (carregamento), onde a acentuação da deformação é diretamente proporcional à carga aplicada. Gaudí (1852-1926) utilizou correntes suspensas como modelos para obtenção de curvas catenárias, posteriormente, utilizando suas configurações para aplicação em estruturas com esforços exclusivos de compressão ou tração. O catenoide seccionado bilateralmente produz duas estruturas hiperboloides (*hyper*), e a soma de suas curvaturas sempre é nula, o que ilustra os princípios de equilíbrio encontrados em sua configuração mínima.

Gosling (2005) propôs um método de conformação de superfícies mínimas a partir de um modelo genérico finito (Figura 16), elaborado com base num quadrilátero inicial sobre o qual se aplicam diferentes esforços de tensão. Admitindo que a superfície se deforme gradativamente até encontrar uma condição de equilíbrio, então, os parâmetros de esforços passam a ser controlados e sua quantidade se revela determinante no estabelecimento da forma final equilibrada. Mantendo constante a restrição dos limites da superfície, Gosling estabeleceu um algoritmo que relaciona a deformação à quantidade de forças aplicadas. Desse modo, comprovou que a geometria da superfície é essencialmente vinculada à conformação de suas bordas (ou limites), sendo que as deformações são diretamente proporcionais aos esforços, responsáveis por diferentes configurações da forma.

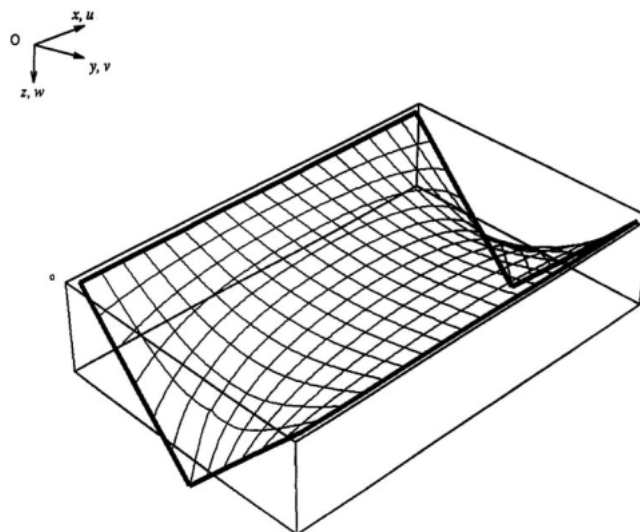
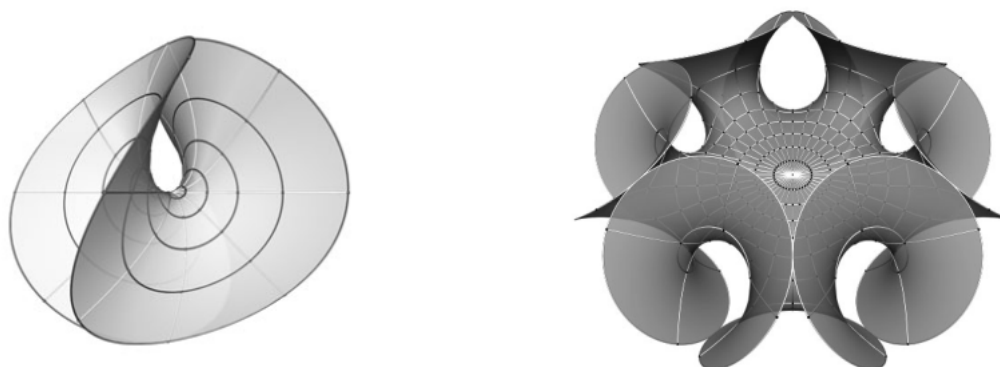


Figura 16 – Modelo genérico de superfícies mínimas. Gosling (2005).

Alfred Enneper (1830-1885) estudou a configuração de superfícies mínimas e identificou um modelo que recebeu seu nome, constituído por uma superfície com simetria bilateral biaxial (Figura 17-a), podendo ainda receber uma versão com simetria cíclica (Figura 17-b).



(a)

(b)

Figura 17 – Modelos de Superfície Mínima.

(a) Single Enneper Surface, (b) Enneper com Simetria Cíclica.

A conhecida *fita de Moebius* (Figura 18-a) tem sua descoberta atribuída aos matemáticos August Ferdinand Möbius e Johann Listing (1858) e se constitui numa geometria com intrigantes propriedades matemáticas. No campo da topologia, ela é utilizada como exemplo para ilustrar superfícies não-orientáveis (DEVLIN, 1997), ou superfícies onde não é possível determinar vetores normais ou sua orientabilidade de forma consistente. É simples formar uma fita de Moebius a partir de uma tira de papel unida nas bordas, por uma rotação em 180 graus. Ao traçar uma linha ou mesmo colorir sua face, constata-se que, ao final, toda a superfície estará preenchida, fazendo-se acreditar que esta possui somente uma face contínua e apenas uma borda. Outra propriedade se refere à sua **quiralidade**, ou seja, a capacidade geométrica de não poder ser sobreposta a sua própria imagem especular. Sua correspondente tridimensional é conhecida como Klein Bottle (Figura 18-b), descrita em 1882, por Felix Klein, cuja decomposição por meio de uma secção plana revela duas bandas de Moebius com rotações opostas.



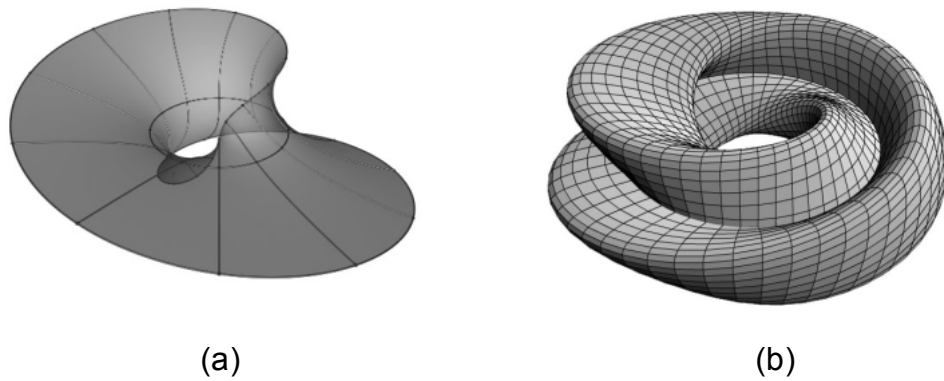


Figura 18 – Moebius Strip (a) e sua correspondente tridimensional Klein Bottle (b).

A fita de Moebius tem várias aplicações práticas, como, por exemplo, o uso em esteiras rolantes, correias industriais sujeitas ao desgaste contínuo, ou mesmo em dispositivos de gravação com *looping* constante, que, numa tira cilíndrica convencional com mesma extensão, permitiria utilizar apenas uma das faces. Escher (1963) a representou na memorável ilustração *Mobius Strip II* (Figura 19), revelando seu interesse por esta singular geometria.



Figura 19 –Mobius Strip II. M.C. Escher (1963).



Alguns modelos de superfícies mínimas podem ser repetidos periodicamente, representando a delimitação volumétrica a partir de áreas superficiais mínimas e mantendo pressão constante em todas as faces (BALL, 1999). A junção de planos ortogonais produz o modelo Scherk (Figura 20-a), que encontra aplicações no campo cirúrgico da medicina, ou no caso da Schwarz Surface (Figura 20-b), que representa a recursividade em um labirinto de superfícies periódicas, com simetria tridimensional cúbica. Tal configuração encontra representação na natureza, a exemplo de alguns esqueletos calcificados de organismos marinhos com resistências elevadas, o que abre um campo de investigação para o desenvolvimento de materiais e estruturas de nível molecular.

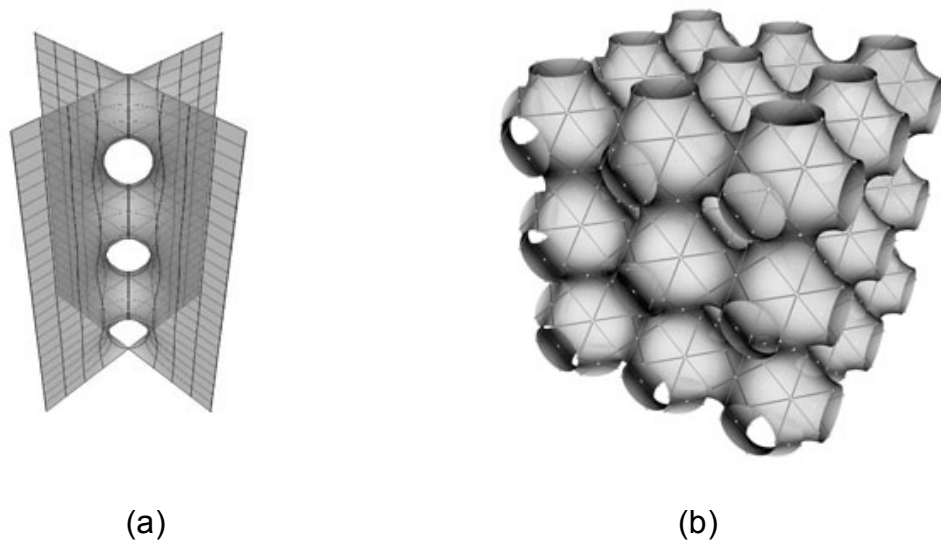
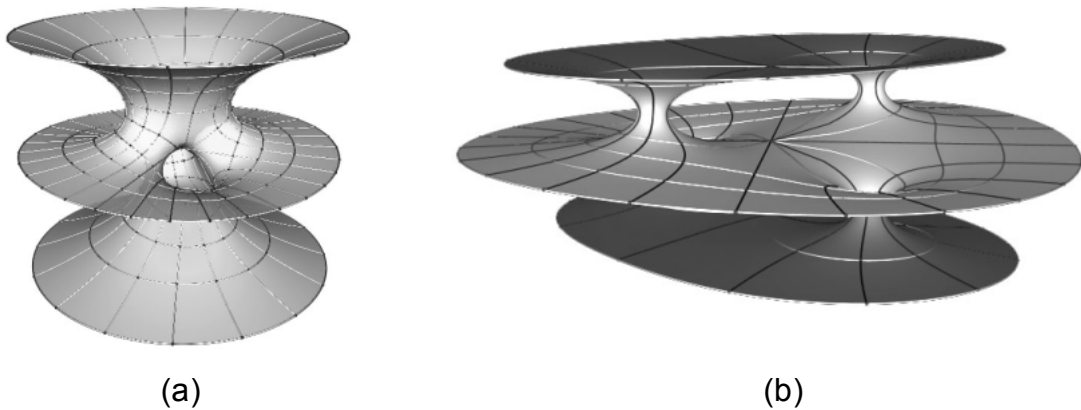


Figura 20 – Superfícies Mínimas Periódicas.  
(a) - Scherk surface, (b) - Schwarz P-surface.

A computação gráfica possibilitou uma série de avanços no campo das superfícies mínimas, pois a criação de ferramentas de modelagem tridimensional e visualização permitiu a investigação e descoberta de novos modelos, alguns deles de notável complexidade. O modelo ilustrado na figura 21-a foi descoberto pelo brasileiro Celso Costa, em 1982, possuindo uma região planar conectada a duas extremidades catenoides. Uma variante intitulada Horgan Minimal Surface (Figura 21-b) possui extremidades catenoides duplas.



(a) (b)  
Figura 21 – Modelos Computacionais de Superfícies Mínimas.  
(a) – Costa Minimal Surface. (b) – Horgan Minimal Surface.

A investigação de modelos computacionais de superfícies mínimas carrega um espectro de configurações possíveis, cujo potencial para aplicação em arquitetura e design amplia o repertório de soluções estéticas, aliadas aos princípios de simplicidade estrutural e equilíbrio apresentados por tais formas. Isso justifica os propósitos desta pesquisa, focada na aplicação de formas mínimas como entidades estruturais autônomas e íntegras. Sua estruturação, por meio da identificação de módulos também provenientes da natureza, combina dois fundamentos de comprovada eficiência, vinculados à sua lógica geométrica e estabilidade estrutural.

## CAPÍTULO III

### Aplicação de conceitos mínimos em arquitetura e design

Os modelos de configuração mínima frequentemente servem como princípio para a conformação de edificações ou mesmo cidades. A relação entre volume edificado *versus* área de envoltório, representada pela compactidade, é um fator estritamente relacionado à economia de meios, cuja recorrência na natureza pode encontrar aplicação na arquitetura.

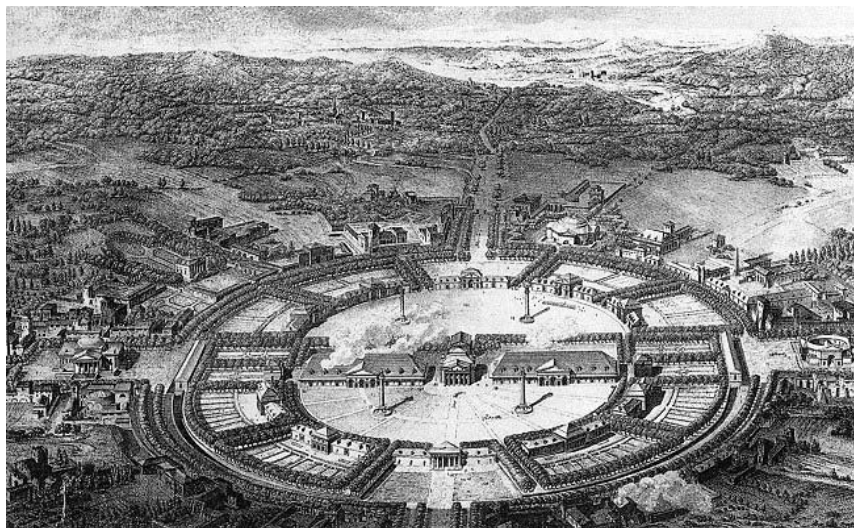


Figura 22 – Projeto da cidade ideal de Chau. Ledoux, 1775.

Emmer (1996, p. 55) relata que “um arquiteto na idade média que quisesse construir os muros de uma cidade com o menor comprimento possível contendo a maior área interna, teria de fazê-lo na forma circular”. O conceito arquitetônico

vinculado ao uso de formas mínimas está presente no urbanismo utópico proposto, por Ledoux (1775), para a cidade ideal de Chaux (Figura 22), ou mesmo na medieval Arles (Figura 23), refletindo também a lógica social da época, quando era necessária a clara delimitação das fronteiras, sobretudo, como estratégia de defesa e segregação social (BENEVOLO, 2001).

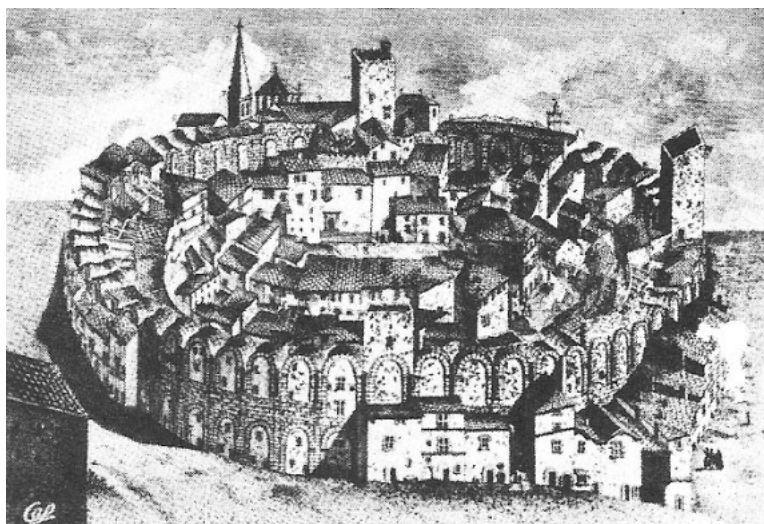


Figura 23 - Cidade Medieval de Arles séc. VI

O formato esférico, típica representação de forma mínima em sua simplicidade e significado, toma a forma arquitetônica no projeto de Boullée (1728-1799) para o cenotáfio de Newton (Figura 24). Composto por uma forma esférica de 150 metros de diâmetro, a proposta, considerada megalomaníaca para sua época, não foi executada. Boullée foi, juntamente com Ledoux (1736-1806), um dos grandes expoentes da arquitetura neoclássica francesa no século XVIII. Sua preferência pelas formas curvas refletia sua crença na grandiosidade, autonomia volumétrica e magnificência da arquitetura. Segundo Guerra (2004), a arquitetura de Boullée e Ledoux seria, momentaneamente, revolucionária, pois representou um novo caminho para a renovação formal que viria nos séculos seguintes: “a arquitetura neoclássica, autônoma em relação aos sistemas formais pré-determinados (mesmo que herde sem maiores incômodos o arsenal de elementos isolados da tradição), coloca em primeiro plano uma nova ambição – a *expressão do caráter* – e um novo princípio de agenciamento formal – a *composição*. Uma arquitetura, portanto, que vai investir na valorização extrema do manuseio dos volumes, tratados com grande autonomia e sem os antigos compromissos com a totalidade” (GUERRA, 2004, p. 103).

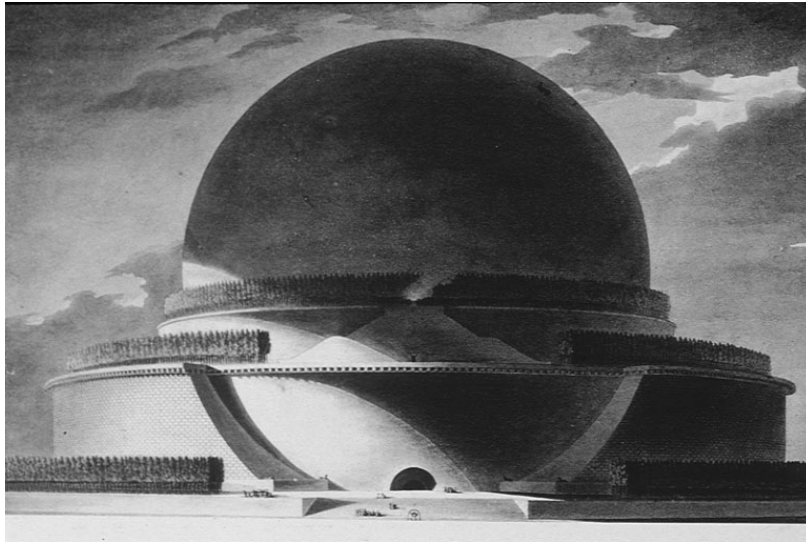


Figura 24 - Cenotáfio de Newton. Étienne Louis Boullée (1790).

As investigações com foco na geometria de películas líquidas adquiriram relevância no estudo de membranas arquitetônicas realizado por Frei Otto, a partir do final da década de 1950, expandindo o universo de investigação para fronteiras além da conotação estética. Os princípios formais passaram a pautar uma abordagem estrutural, conforme as configurações mínimas revelavam um potencial para desempenhar estruturas modeladas por meio de condições controladas de equilíbrio de tensões.

Otto realizou uma série de experimentos com películas líquidas (Figura 25) visando encontrar diferentes configurações e alternativas formais para membranas delgadas estruturalmente estáveis. Conectando estas películas a diferentes limites e bordas através de punção por *frames* aramados, selecionava, a partir de uma condição de equilíbrio, as formas que representavam um estado natural de relaxamento de tensões.

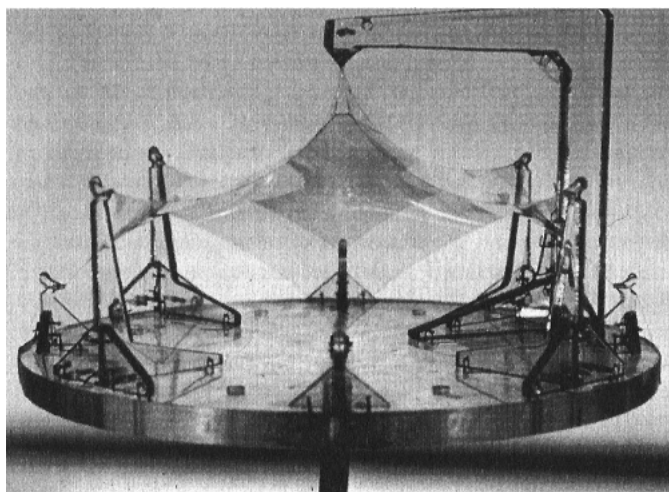


Figura 25 - Modelo de conformação mínima para filme de sabão realizado por Frei Otto.

Segundo o *Emergence and Design Group* (2004), o interesse de Otto nos processos autogenerativos de formas e seu comportamento estrutural levaram-no a desenvolver inovadores experimentos em processos físicos de modelagem formal, revisitando, pela primeira vez, o que Gaudí fizera na década anterior. Otto ressaltava, ainda, que uma superfície desenvolvida por películas líquidas, sob determinadas condições, assume uma forma única, e sua reprodução em grande escala requer o uso de materiais compostos, como, por exemplo, redes de cabos tensionados. Tais técnicas construtivas, combinadas à vedação com placas de acrílico transparente, foram utilizadas no projeto de Otto e Behnisch para as coberturas tensionadas do Complexo Olímpico de Munique (Figura 26).



Figura 26 - Complexo Olímpico de Munique. Günther Behnisch e Frei Otto (1972).

Formas mínimas se manifestam em princípios de agregação naturais, e sua recorrência motiva uma série de aplicações em arquitetura e design. Para explicar esta relação entre forma biológica e posterior aplicação construtiva faz-se necessário clarificar alguns fundamentos matemáticos relacionados aos sistemas de agregação. Partindo da constatação de que a matéria líquida, sob a ação da tensão superficial, assume configurações de área mínima, comprova-se matematicamente que a esfera é a mais eficiente e compacta figura de equilíbrio de tensões, manifestando-se de maneira recorrente e singular. Por sua vez, partindo para um plano bidimensional, a figura geométrica que representa uma secção plana da esfera é o círculo, e este pode ser utilizado para discorrer sobre os princípios básicos que envolvem agregações no plano bidimensional.

Toma-se como exemplo a figura 27, onde dois arranjos bidimensionais (a) e (b) de figuras circulares são propostos. Em (a), os círculos são dispostos ortogonalmente, configurando um arranjo retangular. Já em (b), a disposição ocorre de maneira intercalada, obedecendo a uma configuração hexagonal. É fácil perceber que destas configurações a que apresenta o menor espaço residual entre os círculos é o arranjo hexagonal. Thompson (1942) ilustra que, por uma simples condição geométrica, cada um dos círculos dispostos no arranjo hexagonal está em contato com seis círculos vizinhos. Imagine-se, desse pressuposto, a necessidade em preencher totalmente tais espaços residuais através da expansão equilibrada de cada um dos círculos por aumento de sua pressão interna, então, deduz-se que cada um dos seis pontos de contato será convertido em linhas, resultando numa composição de hexágonos regulares.

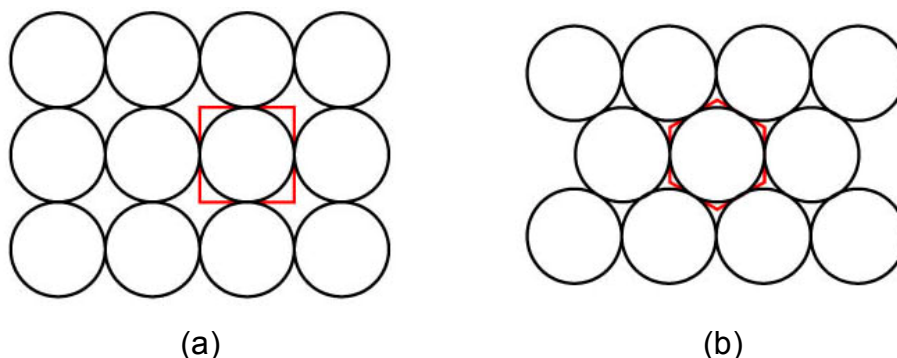


Figura 27 – Arranjos bidimensionais de círculos.

(a) – configuração retangular. (b) – configuração hexagonal.



Esta simples dedução explica a recorrência das configurações hexagonais em organismos naturais, criadas por uma condição de equilíbrio de tensões superficiais e princípios de área mínima, dos quais, o exemplo mais representativo é a configuração das colmeias de abelhas (Figura 28). Weyl (1952) infere que os “estranhos hábitos sociais das abelhas e seus talentos geométricos” (WEYL, 1952, p. 90) despertaram a atenção e admiração de seus expectadores humanos, incentivando uma série de pesquisas e conjeturas em relação à agregação tridimensional das colmeias, a exemplo dos estudos desenvolvidos por Kepler (1611), Maraldi (1712), Gauss (1831).



Figura 28 - Colmeia de abelhas.

As formas geodésicas de Buckminster Fuller refletem a estratégia em absorver conceitos de formas da natureza em conjunção com fundamentos matemáticos e geométricos. Amparado pela observação de padrões existentes em organismos marinhos (radiolárias), ou mesmo em conformações moleculares dos vírus, Fuller aplicou seus conceitos geométricos na formulação de regras compositivas para a estruturação de volumetrias. Segundo Rohan (2003), a superfície esférica do Pavilhão Americano em Montreal (Figura 29) testemunha o interesse de Fuller pela natureza e as formas biológicas como representação “microscópica do macrocosmo”. Sua intenção era propor um tipo de estrutura que pudesse otimizar a sustentação com reduzida quantidade de material e, assim, prover a eficiência estrutural com menor consumo de recursos.



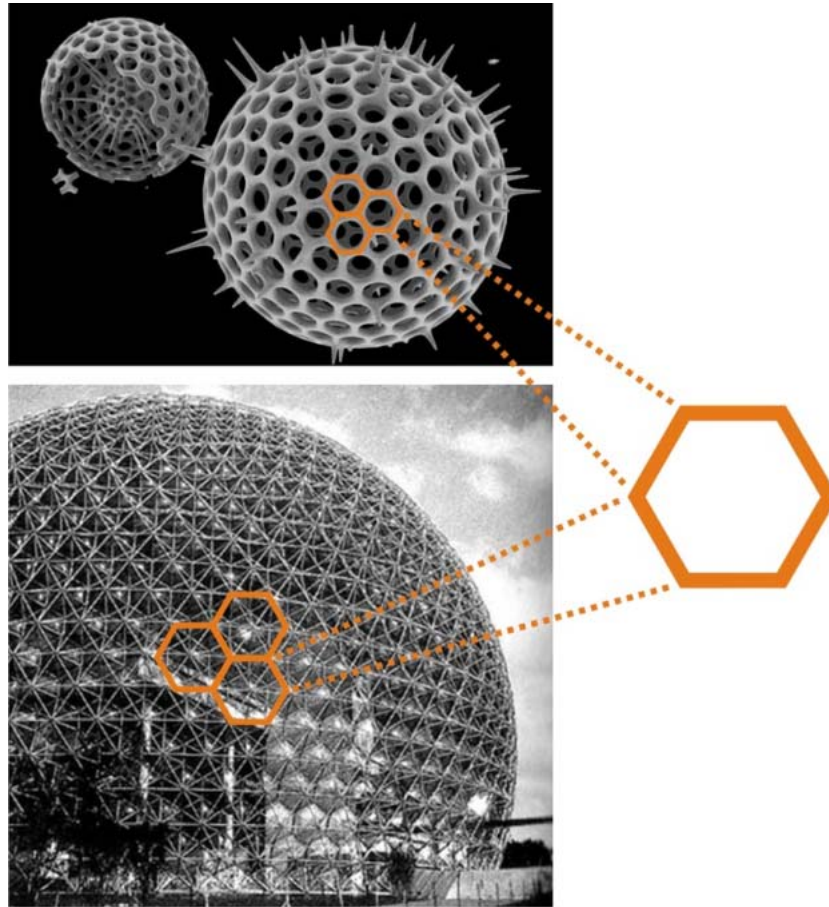


Figura 29 – Relação entre o padrão hexagonal encontrado na radiolária e o módulo estrutural do Pavilhão de Montreal (FULLER, 1967).

Os *domus geodésicos* se constituem em formatos poliédricos cuja modulação é realizada por polígonos regulares, permitindo o uso de elementos comprimidos de dimensões constantes unidos por peças de conexão padronizadas. Fuller patenteou o formato geodésico construído a partir de polígonos regulares, em 1951, especificando uma série de conexões possíveis para obter configurações diversas.

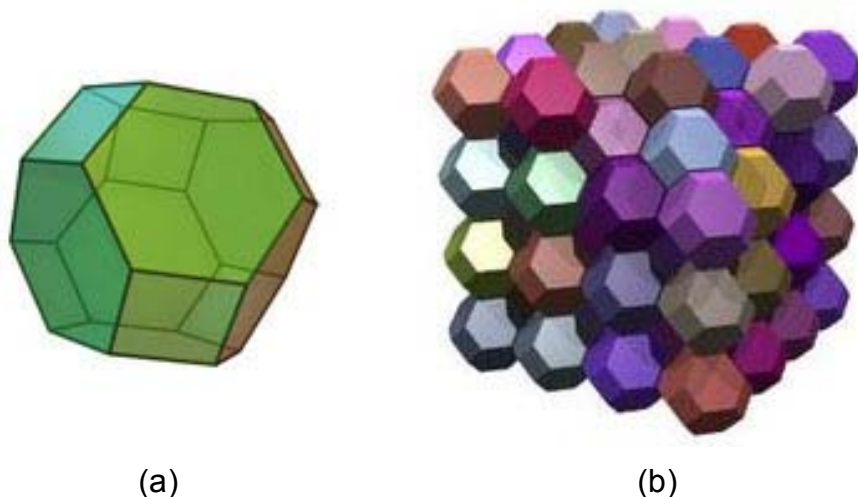
De acordo com Prenis (1973), o formato geodésico emerge naturalmente a partir dos sólidos regulares, unificando os princípios de área mínima da esfera e agregando a forma triangular. Esta, por sua vez, caracterizada como o arranjo bidimensional geometricamente indeformável, resulta em uma configuração estrutural robusta e estável. Nicholas Grimshaw utilizou os mesmos princípios de estruturação na concepção do Eden Project (Figura 30), em 2001, o qual consiste numa série de *domus geodésicos* contendo uma diversidade de espécies vegetais

do planeta, distribuída ao longo de três biomas distintos, mantidos por atmosferas e níveis de umidade controlados.



Figura 30 – Eden Project. Nicholas Grimshaw (2001).

Os princípios de agregação tridimensional, vinculados ao conceito de formas mínimas, encontram bases matemáticas sólidas em estudos desenvolvidos pelo matemático britânico Lord Kelvin, que, em 1887, realizou pesquisas no sentido de encontrar a maneira mais eficiente de dividir o espaço em células de igual volume, com a menor área superficial possível. Na ocasião, Kelvin conduziu que a forma geométrica mais eficiente seria a composição de octaedros truncados (Figura 31), conhecidos como um dos sólidos de Arquimedes, sendo compostos por oito faces hexagonais e seis faces quadradas.



(a) (b)  
Figura 31 – Modelo de agregação mínima proposto por Kelvin (1887).  
(a) – octaedro truncado; (b) - agregado composto por octaedros truncados.

As bases lançadas por Kelvin foram contestadas somente em 1993, quando os físicos irlandeses Denis Weaire e Robert Phelan, durante uma simulação computacional para produção de espumas sintéticas, descobriram um novo modelo de configuração ainda mais eficiente que o modelo original proposto por Kelvin (KUSNER & SULLIVAN, 1996). A estrutura de Weaire-Phelan é representada pela combinação de dois tipos de células de igual volume, o dodecaedro pentagonal irregular e o *tetrakaidecaedro* (Figura 32).

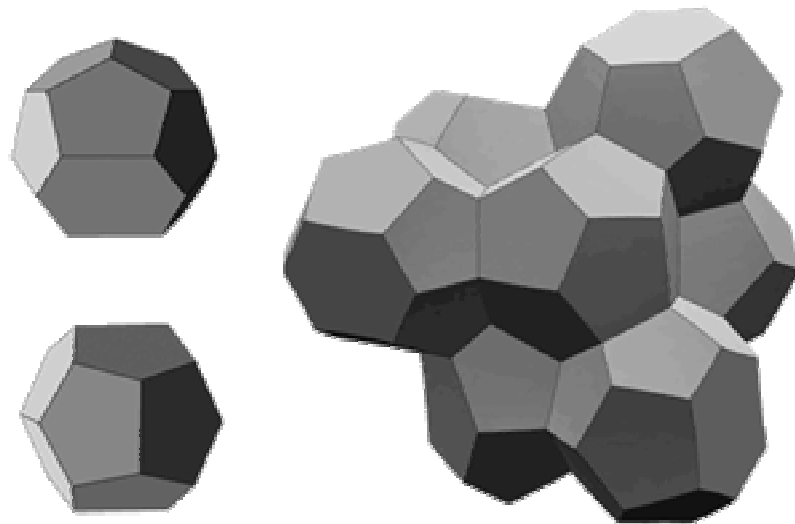


Figura 32 – Estrutura de Weaire-Phelan.

Este modelo de configuração mínima, cujos princípios matemáticos também estão relacionados às propriedades geométricas identificadas nas bolhas de sabão, constituiu a matriz fundamental para formulação do projeto para o Centro Aquático das Olimpíadas de Beijing (Figura 33), concebido por *PTW architects* (2005).

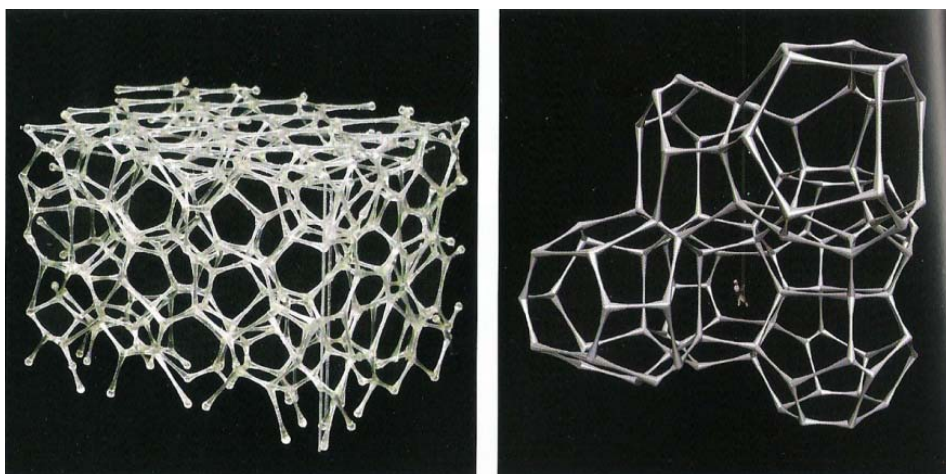


Figura 33 - Modelo tridimensional da Geometria de Weaire-Phelan.

A geometria de Weaire-Phelan foi utilizada como modelo tridimensional para composição da estrutura da edificação (Figuras 33, 34 e 35) e, na conformação externa do volume retangular, o fatiamento da estrutura resultou numa geometria de aparência irregular e orgânica, análoga às bolhas de sabão, cuja estruturação foi organizada em 16 variações de *frames* estruturais. A vedação foi então complementada com o invólucro em filmes poliméricos de ETFE<sup>1</sup>.

A proposta para o *Water Cube* representa um exemplo de inovação tecnológica alicerçado sobre a pesquisa de novos modelos de concepção estrutural, aliando a ciência dos materiais ao referencial orgânico. A geometria empregada na estrutura reflete-se na vestimenta da fachada, emprestando ao edifício o caráter apropriado à sua função (centro de esportes aquáticos), evidenciando a coerência do design proposto com a origem conceitual da proposta.

---

<sup>1</sup> ETFE – polímero descrito como etileno-tetra-fluor-etileno, composto por lâminas que possuem baixo peso próprio, elevada resistência às intempéries e capacidade de autoestruturação. Foi originalmente desenvolvido pela empresa DuPont, na década de 70, para uso na indústria aeroespacial. Disponível em: <[http://www.todoarquitectura.com/revista/40/en04\\_ETFE.asp](http://www.todoarquitectura.com/revista/40/en04_ETFE.asp)>. Acesso em: 05/07/2008.





Figura 34 - Etapa de construção do Water Cube.

O projeto para o centro aquático das olimpíadas de Beijing trouxe avanços na aplicação de princípios de agregação mínimos em estruturas, com base em conceitos matemáticos explorados há mais de dois séculos, e que passaram por diferentes instâncias desde a regularidade dos padrões geodésicos de Fuller ou nas formas líquidas de Otto. No século XXI, abre uma nova fronteira de exploração de formas naturais, aliando ferramentas computacionais para a produção de modelos de representação que permitiram simular os princípios estruturais e geométricos empregados na proposta, dando condições para viabilizar sua execução em escala real.



Figura 35 - Centro Aquático das Olimpíadas de Beijing. *PTW architects*.

A busca por fundamentos biológicos com aplicação no design e arquitetura permeia-se por vários ramos científicos os quais, por sua vez, agregam diferentes denominações, a exemplo da **biomimética**, **biônica** e **biodinâmica**. Estas áreas de

conhecimento compartilham uma abordagem à investigação de processos e conceitos geométrico-funcionais encontrados na biologia e seu potencial de transposição para aplicação em objetos, desenvolvimento de novos materiais ou tecnologias construtivas.

A **biomimética**, segundo Wolf (2005), “estuda os modelos naturais e então os imita ou busca inspiração em seu design e processos para solucionar problemas humanos. É um novo modo de enxergar e valorizar a natureza, baseado no que se pode dali aprender e, sobretudo extrair. A biomimética se apodera da sabedoria da natureza acumulada em 3,8 bilhões de anos evolutivos para determinar o que funciona, o que é apropriado e o que permanecerá”. O termo tem sua origem atribuída ao biofísico Otto Schmitt, nos anos 50. Steadman (1979), no entanto, reconstrói a história da biotecnologia a partir dos anos 1870, ressaltando que alguns exemplares de literatura popular da época já mencionavam analogias entre a natureza e as máquinas, como na obra *Nature's Teachings: Human Invention Anticipated by Nature*, do reverendo J.G.Wood (1877), que demonstra existir “uma conexão muito próxima entre a natureza e as invenções humanas, raramente há alguma invenção do homem que não tenha seu protótipo na natureza” (WOOD, 1877 apud STEADMAN, 1979, p. 159). As aplicações da biomimética atualmente se disseminam nos campos da biomecânica e ciência dos materiais.

O termo **biônica** tem sua origem relacionada aos estudos realizados pelo médico americano Jack E. Steele, em 1958. Na literatura médica, comumente, encontra-se sua aplicação ligada à origem etimológica *bio* (vida) com eletrônica, promovendo a sistematização de estudos em mecanismos biológicos, com ênfase na produção de dispositivos para substituição de membros ou órgãos humanos. (STEADMAN, op. cit., p. 168). Seu raio de ação, todavia, é bem mais amplo, a exemplo de invenções como o radar, sonar, ultrassom, velcro e demais aplicações em cibemética e inteligência artificial. Para Kindlein (2005), a biônica consiste numa ferramenta alternativa para buscar a diferenciação de produtos em meio às exigências de competitividade mercadológica, “pois é uma ciência multidisciplinar que pesquisa nos sistemas naturais princípios e/ou propriedades (estruturas, processos, funções, organizações e relações) e seus mecanismos com objetivo de aplicá-los na criação de novos produtos ou para solucionar problemas técnicos

existentes na projeção” (KINDLEIN et al., 2005, p. 1). Contudo, a consolidação de sua transposição para o universo do design depende essencialmente da criação de uma metodologia capaz de orientar e capacitar o processo de investigação. Assim, Kindlein define etapas iniciais para o processo de seleção, coleta, observação e parametrização de amostras que desencadeiam as etapas finais, constituídas na analogia do sistema natural ao produto e à final aplicação projetual.

A **biodinâmica** é a ciência que estuda os processos adaptativos presentes na natureza. Sua aplicação é comumente encontrada na agricultura, identificando os mecanismos de relação entre o solo, as plantas, os micro-organismos e os animais como um sistema holístico e cíclico de autogerenciamento. Ao reconhecer a eficácia com que os sistemas naturais interagem, permite configurar uma sistematização para os ciclos de safra, aproveitamento e reciclagem de recursos do solo, controle da erosão e combate a pragas sem a interferência de produtos químicos. Atualmente, a biodinâmica adquire importância na análise dos processos e morfologias biológicas visando ao desenvolvimento de materiais para o design e arquitetura. Os estudos desenvolvidos nesta área de conhecimento, por Jeronimidis (2004), demonstram que determinados sistemas vegetais incorporam hierarquias geométricas e funcionais capazes de produzir movimento sem a existência de mecanismos musculares, seja para buscar a orientação adequada ao sol, corrigir a inclinação de crescimento, ou mesmo abrir ou fechar pétalas para capturar insetos. Tais movimentos reversíveis são proporcionados por alterações de pressão ao nível celular, ocasionadas pela interação com a umidade e pelos mecanismos osmóticos gerados nas membranas. A direção de movimento é dada pela conformação geométrica do tecido (Figura 36), que pode ainda sofrer adaptações vinculadas a mudanças climáticas ou necessidades ambientais.



Figura 36 – Secção de um estema vegetal.

Jeronimidis destaca que “é a animação da geometria e do material que produzem a forma. A capacidade dinâmica, a habilidade para o movimento, é proporcionada pelos mesmos fatores” (JERONIMIDIS, 2004, p. 95). Utilizando similar analogia, ele explica como se diferenciam tecidos presentes em vasos sanguíneos, tendões ou matéria óssea, todos conformados com a mesma proteína, o colágeno, no entanto, apresentando propriedades elásticas e resistências distintas geradas pela diferenciação geométrica dos módulos e agrupamentos celulares. Esta forma de organização explica porque, curiosamente, a natureza dispõe de apenas quatro grupos de fibras poliméricas, todas elas com densidades menores do que as encontradas na maioria dos materiais de engenharia. A celulose conforma os organismos vegetais, as fibras colágenas são características dos animais, a quitina é preponderante na anatomia de insetos e crustáceos, enquanto a seda está presente nas teias de aracnídeos. (JERONIMIDIS, 2004).

Weinstock (2006) aduz que os níveis de organização material dos organismos naturais produzem agrupamentos robustos com alto desempenho estrutural, como das junções e nós presentes em sistemas vegetais. A análise das continuidades materiais presentes nestes organismos, associada à presença de princípios de estruturação eficientes e de relativa simplicidade, apontaria para uma necessidade de reavaliação nas junções mecânicas da engenharia convencional. Kindlein et al. (2007) afirma ser possível desenvolver elementos de junção para o design industrial



utilizando os conceitos provenientes da biônica, a partir de metodologias de identificação de padrões e sua transposição para o ambiente de projeto.

Weinstock (2006, p.41) esclarece ainda que “estratégias biomiméticas que integram forma, material e estrutura em um processo único estão sendo adotadas a partir da nano escala para o design de grandes edifícios”. Daí destaca-se a importância em resgatar, através da realidade aumentada, os processos e lógicas presentes na natureza para uma escala arquitetônica. Em consonância com a abordagem biológica, o volume ogival do edifício sede da *Swiss Re* (Figura 37), em Londres, projeto do escritório de arquitetura *Foster & Partners*, longe de ser uma simples escolha formal, caracteriza-se pelo resultado de um extenso estudo com a preocupação de unir tecnologia, arquitetura e biologia. Projetada em 1997 e concluída em 2003, a torre possui 180 metros de altura e uma área de 46.000 metros quadrados. A forma orgânica estruturada em diagonais foi a alternativa que melhor suportava as cargas resultantes da incidência de vento, relevantes em edifícios deste porte. Neste caso a forma, estrutura e vedação se mesclam conferindo unidade ao edifício, do mesmo modo que resgatam características orgânicas para um viés tecnológico. Os vidros que compõem as vedações, ao contrário do que aparentam, são planos, acompanhando a estrutura que circunda o edifício de maneira crescente ao molde das microscópicas cadeias de DNA. Este fechamento, adaptado à forma ogival, faz da fachada mais do que uma simples superfície, mas um invólucro que, juntamente com o arranjo das plantas dos diversos pavimentos, confere um caráter ecologicamente sustentável ao edifício.

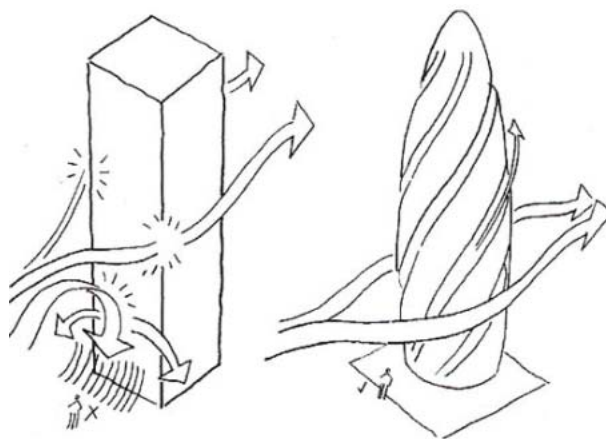


Figura 37 – *Swiss Re*. Arquiteto: Foster & Partners.

A volumetria do projeto atua na redução do impacto das cargas de vento incidentes na estrutura, e esta, por sua vez, configura-se pela junção do sistema superficial em diagonais metálicas, resistentes às cargas horizontais, e por um esqueleto central responsável pelos esforços verticais. A lógica geométrica da fachada se reflete na organização espacial interna, promovendo rotações gradativas nas plantas dos diversos pavimentos (Figura 38) e gerando espaços vazios circundantes que acompanham a evolução das diagonais emergentes. A superfície envolvente, juntamente com esses espaços, atua como uma antecâmara que baliza as trocas entre espaço interno e externo. Todo o sistema é gerenciado por computadores que controlam o funcionamento das aberturas de acordo com as necessidades de renovação do ar interior.

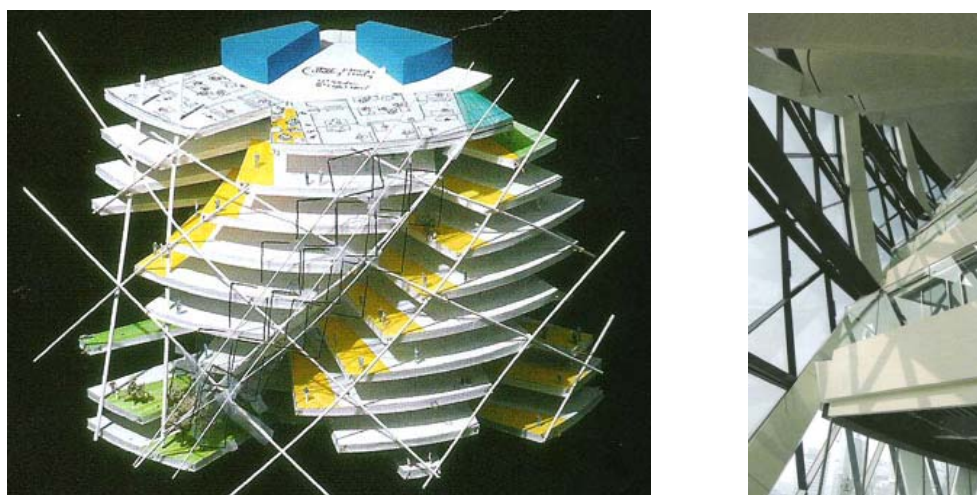


Figura 38 – Swiss Re. Plantas e rotações gradativas.

O *Emergence Design Group*, sediado no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), desenvolve “pesquisas em aperfeiçoamento do design de sistemas organizacionais flexíveis e morfologias estruturais com foco na tecnologia em materiais e processos de fabricação”.<sup>2</sup> Um dos estudos desenvolvidos pelo grupo investigou sistemas materiais adaptáveis ao urbanismo vertical, cujos protagonistas são Michael Weinstock, Achim Menges e Michael Hensel (2004). O atentado às torres do WTC<sup>3</sup>, em 2001, revelou dados sobre comportamento estrutural que

<sup>2</sup> Disponível em: <[http://mit.edu/arch/edg/about/textbox\\_frame\\_set.html](http://mit.edu/arch/edg/about/textbox_frame_set.html)>. Acesso em 03/11/2008.

<sup>3</sup> WTC – Sigla para *World Trade Center*, torres gêmeas em Manhattan, Nova Iorque, destruídas pelo atentado de 11 de setembro de 2001.

desencadearam o interesse pelo tema. Os laudos periciais do desastre revelaram que o colapso da estrutura foi decorrente da sua baixa resistência a esforços laterais, combinada ao calor intenso que potencializou sua deformação. Tal constatação alertou para a necessidade de desenvolver tecnologias capazes de garantir a estabilidade em arranha-céus e, concomitantemente, prover certo grau de flexibilidade, permitindo absorver impactos com maior eficiência.

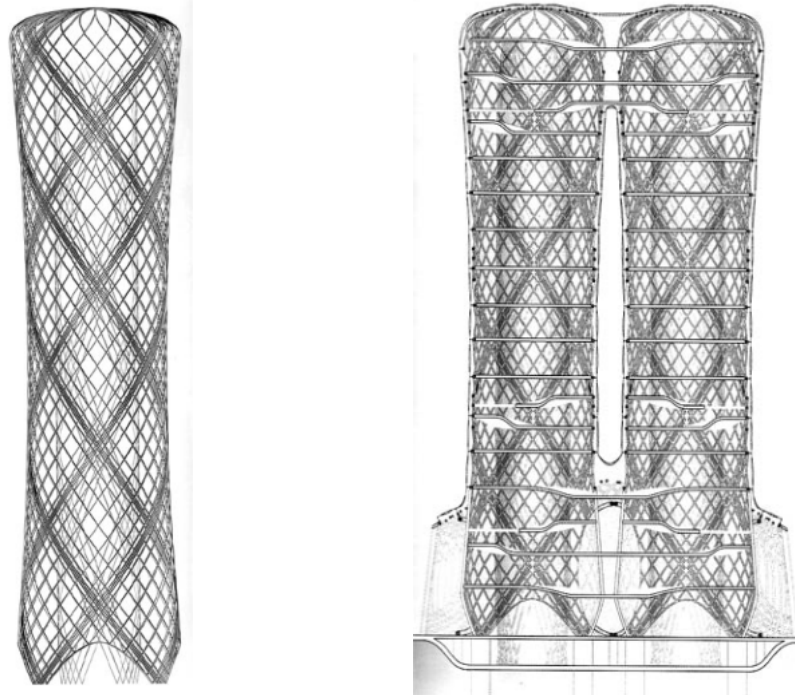


Figura 39 – Modelo Estrutural com replicação helicoidal.  
*Emergence Design Group (2004).*

A combinação de flexibilidade e resistência pode ser encontrada em estruturas naturais e em artefatos produzidos pelo homem, como cestos de palha, por exemplo. Para a concepção do protótipo proposto (Figura 39) os pesquisadores utilizaram um modelo de replicação helicoidal de tubos metálicos, configurando uma matriz estrutural que constitui a superfície do edifício, alterando a concepção tradicional dos arranha-céus. Se a superfície incorpora a resistência e a flexibilidade, ela passa a suportar as cargas verticais constantes e os esforços laterais que porventura venham ocorrer, amparada pela conformação geométrica que viabiliza múltiplos vetores de carga. As hélices espirais que compõem o tramado estrutural proposto são comuns a várias estruturas naturais, desde fenômenos como tomados

ou correntes oceânicas, ou mesmo na conformação proteica do DNA. Algumas estruturas vegetais possuem caules alongados com secção extremamente reduzida, que garantem formidável capacidade de resistir ao vento, como os girassóis, por exemplo. A pesquisa comprova que a análise da conformação geométrica destas estruturas pode fornecer genótipos de replicação modular, com isso, permitindo gerar modelos estruturais com diferentes comportamentos.

Princípio similar utilizado a partir da replicação helicoidal compõe a superfície estrutural de um *stent* (Figura 40), mecanismo utilizado em intervenções cirúrgicas para reforçar ou mesmo desobstruir paredes de vasos sanguíneos, respiratórios, uretrais ou condutos do trato esofágico-intestinal. A similaridade entre diferentes mecanismos a partir de suas fontes, seja para o uso medicinal ou arquitetônico, demonstra que a transposição da analogia biológica abarca um amplo espectro de aplicações, permeando diferentes escalas.



Figura 40 – Modelos de *Stents*.

## CAPÍTULO IV

### Forma

A **forma** ou *shape* consiste no espaço ocupado por um objeto; este, determinado por seus contornos, os quais permanecem invariantes se deles forem abstraídas a cor, o conteúdo ou a composição material (KENDALL, 1984). A partir da civilização grega, a matemática passou a incorporar esforços no estudo e compreensão da forma, sendo que o ponto culminante se deu com a publicação da obra *Elementos*, de Euclides (300 a.C.). Por meio de uma série de axiomas<sup>1</sup>, Euclides descreveu as propriedades das entidades geométricas básicas – o **ponto**, a **linha** e o **plano** – com tamanho rigor e excelência que seus postulados constituem a base da geometria até a atualidade, sendo somente questionadas em 1899, pelo matemático alemão David Hilbert<sup>2</sup>, que propôs uma nova série de vinte axiomas, assim, lançando uma roupagem moderna sobre a geometria euclidiana.

A forma está obrigatoriamente relacionada a duas ou três dimensões, e sua configuração depende de fatores que regem a disposição de suas entidades geométricas fundamentais, a saber, uma única linha ou o arranjo de várias delas, podendo estas serem retas ou curvas, conectadas ou não. (MAYER, 2003).

---

<sup>1</sup> Para a matemática, um axioma se refere a uma hipótese inicial, da qual se derivam por deduções lógicas os enunciados subsequentes. Disponível em : <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Axioma>>. Acesso em: 12/08/2009.

<sup>2</sup> Os axiomas de Hilbert foram organizados em cinco grupos principais: Combinação, Ordem, Paralelismo, Congruência e Continuidade.

A combinação entre linhas retas no plano, realizada a partir do arranjo de pontos organizados em uma trama ou *grid* regular, é conhecida pelo termo *lattice* ou retícula, estando sua regularidade relacionada à presença da simetria translacional. Existem apenas cinco tipos de retículas regulares, ilustradas na figura 41, cuja nomenclatura toma como base a figura que sintetiza os domínios entre os pontos distribuídos no plano, estes que dependem das distâncias entre os pontos e do modo com que se distribuem ao longo da regra de simetria estabelecida. Tais figuras, conhecidas como *domínios de Dirichlet*<sup>3</sup>, são definidas como a região integral do plano “mais próxima do ponto ao qual circunda do que qualquer outro ponto do sistema” (DEVLIN, 1998, p. 214).

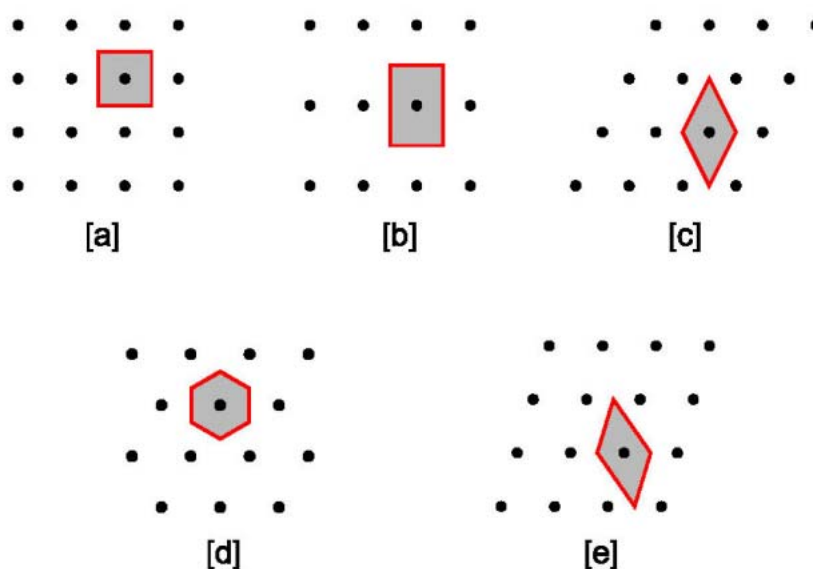


Figura 41 – Os cinco tipos de domínios de Dirichlet para um *grid* bidimensional regular. (a) quadrado, (b) retangular, (c) rômbo, (d) hexagonal, (e) oblíquo.

Dado um arranjo de pontos distribuídos aleatoriamente em um plano (Figura 42-a), também, é possível estabelecer os domínios de Dirichlet para cada ponto do conjunto, seguindo a regra de que tais domínios são representados por polígonos, neste caso, irregulares, com uma área que engloba distâncias imediatamente inferiores aos pontos vizinhos. Tal nuvem de pontos conterà, portanto, uma série de

<sup>3</sup> Johann Peter Gustav Lejeune Dirichlet (1805-59), matemático alemão.

domínios distintos entre si, representados pelo Diagrama de Voronoi (Figura 42-b). O passo anterior para obter este diagrama consiste na triangulação de Delaunay, onde os pontos do conjunto aleatório são interligados por retas cujos pontos médios compõem os vértices dos domínios de Dirichlet para aquele conjunto de pontos.

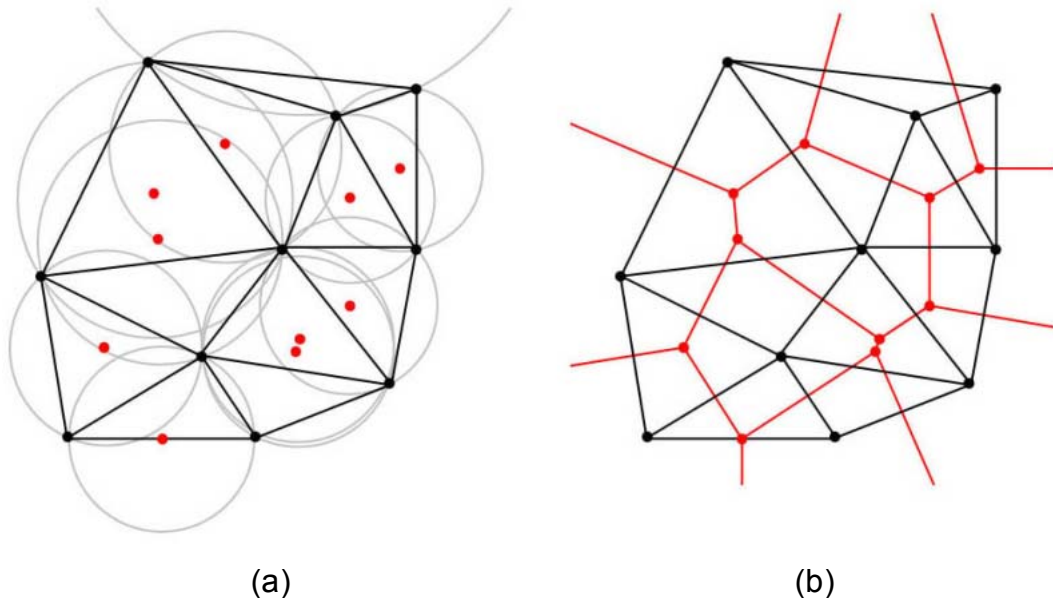


Figura 42 – Triangulação de Delaunay (a), e o correspondente Diagrama de Voronoi (b).

Para a representação em computação gráfica foram produzidos diversos algoritmos para gerar triangulações de Delaunay e seu correspondente diagrama de Voronoi, cujas aplicações são realizadas em diversas áreas para as quais interessa determinar áreas de proximidade para uma rede de pontos. A meteorologia, por exemplo, emprega tais diagramas para interpolar dados em relação à distribuição pluviométrica sob determinada região. No planejamento urbano, tais diagramas auxiliam no estabelecimento de critérios para análise de impacto de vizinhança ou distribuição de infraestrutura.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Fonte: <[www.ae.metu.edu.tr/tuncer/ae546/prj/delaunay](http://www.ae.metu.edu.tr/tuncer/ae546/prj/delaunay)>  
Acesso em: 19/08/2009.



Segundo Kusner e Sullivan (1996), o modelo de tesselações Voronoi se constitui na representação bidimensional de sólidos em estado de relaxamento de tensões superficiais, quando agregados numa geometria tridimensional de espumas naturais ou poliméricas. Como comprovação deste fato, retoma-se o exemplo do Water Cube (BEIJING, 2005) em que a concepção geométrica utilizada na superfície externa está vinculada aos princípios de Voronoi, à medida que a adequação à volumetria ortogonal resultou no seccionamento da matriz estrutural, por sua vez, formulada a partir dos princípios de agregação de Wearie-Phelan.

Polígonos são formas bidimensionais ou planas compostas por linhas retas conectadas entre si formando um circuito fechado, e, quando estas retas possuem iguais dimensões e formam ângulos idênticos entre si, tais polígonos são classificados como regulares (DEVLIN, 1998). O triângulo equilátero, o quadrado e o hexágono são alguns exemplos de polígonos regulares.

As possibilidades de combinação entre figuras planas são definidas por sua configuração em adição a regras de agrupamento que determinam o modo com que podem preencher, parcial ou integralmente, uma determinada área ou região. A tesselação plana ou *tiling* se constitui no agrupamento de formas planas nas quais há um preenchimento completo do plano, sem que existam intervalos ou sobreposições entre as figuras. Existem apenas três tipos de tesselações regulares, originadas a partir da combinação exclusiva de polígonos regulares, e estão representadas pela figura 43.

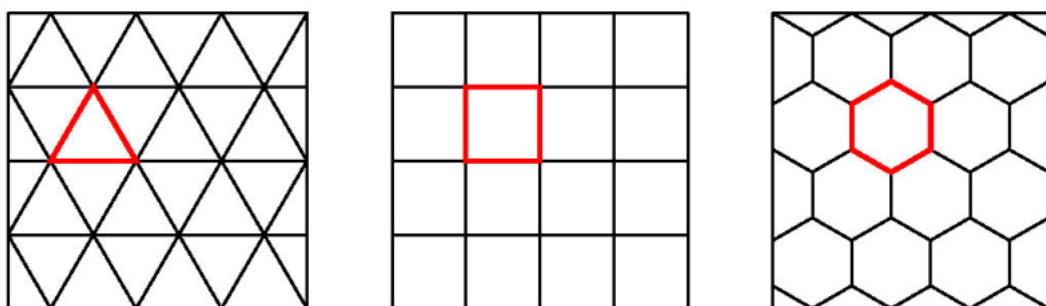


Figura 43 – As três tesselações compostas por polígonos regulares.



Se a tesselação passa a ser composta pela combinação de dois ou mais tipos de polígonos regulares, impondo a restrição de que seja invariante o arranjo destes ao redor de cada vértice, as possibilidades de arranjo são somente oito, como representado pela figura 44.

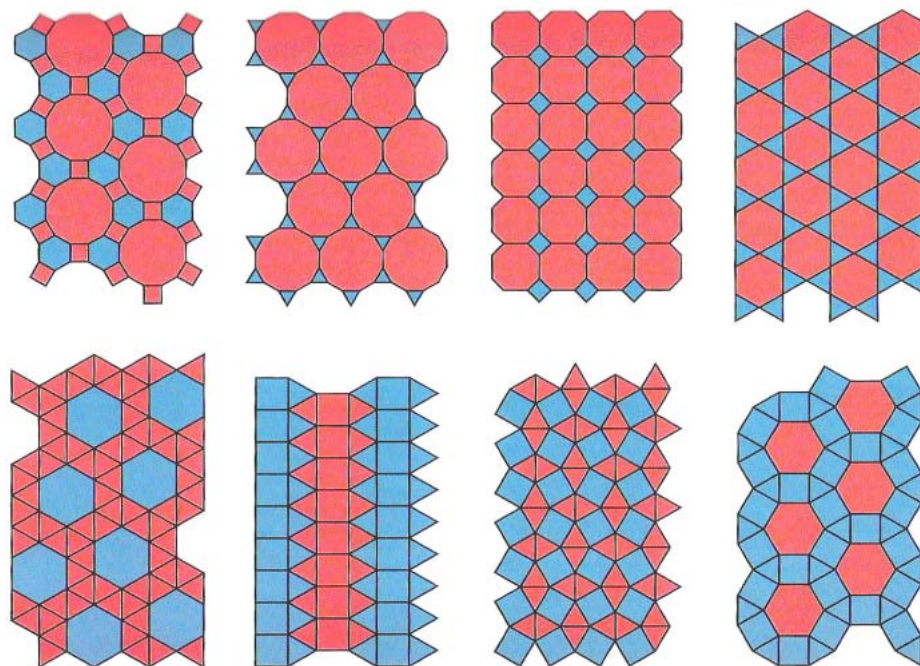


Figura 44 – As oito combinações de preenchimento de um plano com dois ou mais polígonos regulares.

As possibilidades de combinação são infinitas quando os polígonos passam a ser irregulares, ou quando as restrições para o arranjo entre polígonos são reduzidas ou eliminadas. A racionalização do processo construtivo depende da utilização de regras compositivas que permitam a produção em série dos elementos que estruturam as membranas. A importância das tesselações para este componente das edificações reside no fato de que sua utilização pode reger a disposição e o formato dos elementos estruturais ou da própria vedação.

## Emergência

A emergência ocorre quando uma nova forma ou conceito se desprende a partir de um contexto na qual não se faz explícita (EDMONDS e SEEVINCK, 2008). É um fenômeno reconhecido em representação visual (GERO, 1993) e que pode estar associado ao reconhecimento de formas, princípios de semântica visual (PALMER, 1993), ou mesmo a fatores de comportamento e uso, representados pela emergência de função (FINKE, 1990). A figura 45 ilustra a emergência de formas a partir de um modelo gráfico no qual o objeto, na cor preta (a), ao ser agrupado em três copias (b), revela uma nova imagem cruciforme em branco, mesmo não sendo esta uma figura explícita na representação da forma original.

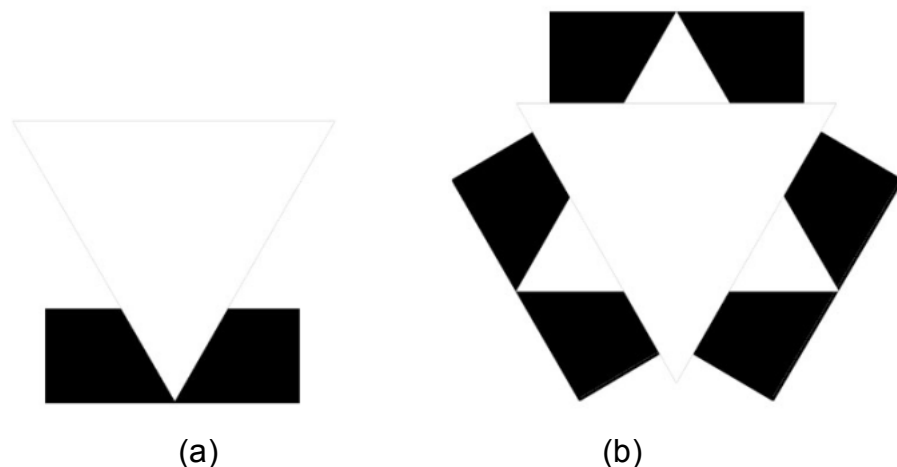


Figura 45 – Emergência visual

Para Devlin (1998), “o sistema cognitivo-visual humano constantemente procura por padrões geométricos”. Assim, o reconhecimento de figuras emergentes, na verdade, consiste numa ilusão de ótica, elaborada a partir da interpretação de um contexto criado pelas figuras circundantes, no qual, o sistema visual complementa a imagem no sentido de obter a coesão geométrica. Gero e Saunders (2006) destacam que a emergência projetual designa o processo de construção de novas representações com o intuito de explicitar características previamente implícitas, o que aponta para a necessidade de planejamento do processo de projeto, desde a identificação das formas emergentes até o resultado final de sua aplicação em

elementos arquitetônicos, preservando, sobretudo, a memória visual concernente à forma inicial.

Os padrões emergentes, primeiramente observados, reconhecidos e extraídos, podem ser empregados como alternativas plásticas e estruturadoras para um tipo especial de envolvente, as membranas autoportantes, em que a intenção é tirar partido da figura do padrão e trazê-lo à tona, fazendo com que sua exposição faça parte da percepção do indivíduo.

Weinstock (2004) traça como uma das metas básicas da arquitetura o delineamento de um processo de concepção a partir da emergência, no qual, o resgate dos fundamentos matemáticos e processos presentes na natureza possam ter utilidade para o designer. Para tal se faz necessária a “busca pelos princípios e pela dinâmica de organização e interação, pelas leis matemáticas a que os sistemas naturais obedecem, e que possam ser utilizadas em sistemas artificialmente construídos” (WEINSTOCK, 2004, p. 46). Sob tal pressuposto, o uso de ferramentas de representação para concepção de soluções arquitetônicas deve ser associado a uma sistemática de projeto, fundamentada numa metodologia de parametrização dos atributos das formas identificadas a partir da observação de padrões naturais.

## **Simetria**

“A arte da natureza pode ser espontânea, mas não é arbitrária” (BALL, 1999, p. 36).

Weyl (1952) afirma que a simetria denota a ideia pela qual o homem, através dos tempos, sempre tentou compreender e criar ordem, beleza e perfeição. Assim, tais atributos presentes nos organismos e fenômenos naturais estão intimamente conectados à noção de simetria, esta que representa a “concordância de várias partes integradas em um todo bem-proporcionado e balanceado”. (WEYL, 1952, p. 3).

Rohde (1982) esclarece que a simetria é uma propriedade pela qual um ente, objeto ou forma exhibe partes correspondentes quando submetida a uma operação

específica. Simetrias se baseiam no princípio da similaridade a partir da repetição ordenada de formas por transformações isométricas de reflexão, translação e rotação, estando estas combinadas ou não (MITCHELL, 1990). Em aperfeiçoamento ao termo similaridade, Weyl (1952) prefere utilizar o conceito de automorfismo, a exemplo do que Leibniz referira, no século XVII, como o conjunto de transformações que torna a estrutura do espaço invariante.

Para Celani (2003), conquanto a simetria seja originalmente relacionada ao processo de reflexão bilateral de uma forma ao longo de um eixo, seu conceito envolve também “todo tipo de composição em que existe uma repetição ordenada de partes ao longo de eixos ou ao redor deles” (CELANI, 2003, p. 1). Assim, a simetria se verifica na recursividade de uma forma ou objeto cuja organização se efetiva por uma operação individual ou mesmo por um conjunto de transformações, o que remete fundamentalmente ao conceito de padrão.

Padrões podem ser entendidos como as próprias formas invariantes por meio da identificação de suas regras de simetria, o que explica a beleza das formas naturais e o fascínio que elas provocam, ou mesmo sugerir a existência de uma regra superior que governa seus princípios de organização. Devlin (1998) afirma que somente nos últimos 30 anos a própria matemática passou a ser reconhecida, ou mesmo aceita como a ciência dos padrões, à medida que estes indubitavelmente compõem seu principal alvo de estudo, estando presentes em todo tipo de manifestação: na forma ou posição, no comportamento e estatística, na transformação e movimento, na simetria e regularidade.

Mitchell (1990) afirma que a simetria pode ser identificada a partir de um único objeto, o que conceitua como *simetria própria*, cuja identificação envolve conceitos relativos à emergência visual: identificação de uma forma primária e seu(s) eixo(s) de simetria, divisão da forma, procura pela correspondência entre suas partes e finalmente a descoberta dos tipos de simetria própria contidos em sua constituição.

Vitruvio (25 a.C.) esclarece que, em arquitetura, a ordenação consiste na concordância balanceada das dimensões dos componentes de uma edificação; enquanto a simetria desempenha “uma apropriada concordância mútua entre os

membros de um edifício, e a relação, concordante com uma determinada parte seleccionada como padrão, das partes independentes da figura de um edifício como um todo”.<sup>5</sup>

O conceito elementar de simetria bilateral foi representado na famosa gravura do Homem Vitruviano (Figura 46), elaborada por Leonardo da Vinci, em 1487, em alusão à figura humana como fonte de ordem e proporção para as ordens clássicas da arquitetura, a exemplo do que referira Vitruvio em sua obra *De Architectura* (25 a.C.).

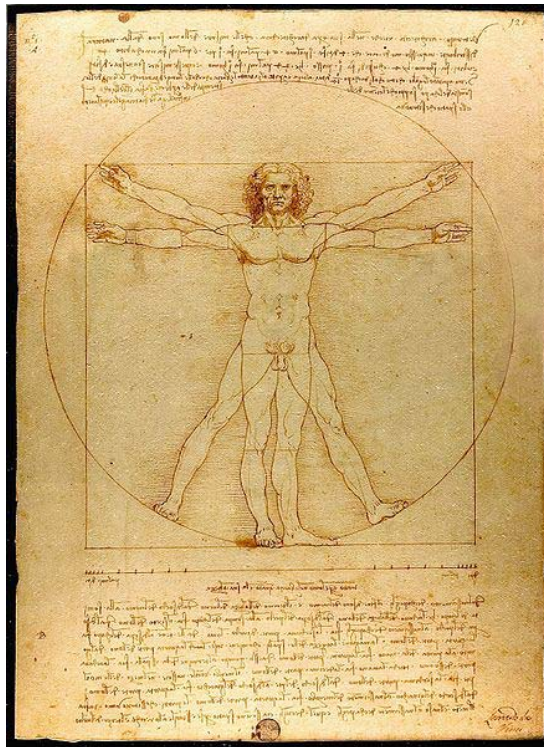


Figura 46 – O Homem Vitruviano. Leonardo da Vinci (1487).

March e Steadman (1974) aludem que elementos de simetria são entidades geométricas sobre as quais se realizam operações isométricas, e a simetria é a propriedade que sintetiza o resultado destas operações. Os grupos básicos de simetria no plano podem ser categorizados conforme a figura 47. Para definir a representação destes grupos, foi adotado um pictograma que representa a

<sup>5</sup> VITRUVIUS, 25 AC, Livro 1, capítulo 2. In: Vitruvius: De Architectura, tradução de Frank Granger; Cambridge (Mass.): Harvard University Press, 1931.

identidade ou forma inicial, vinculando-a aos princípios ordenadores ou eixos de transformação isométrica.

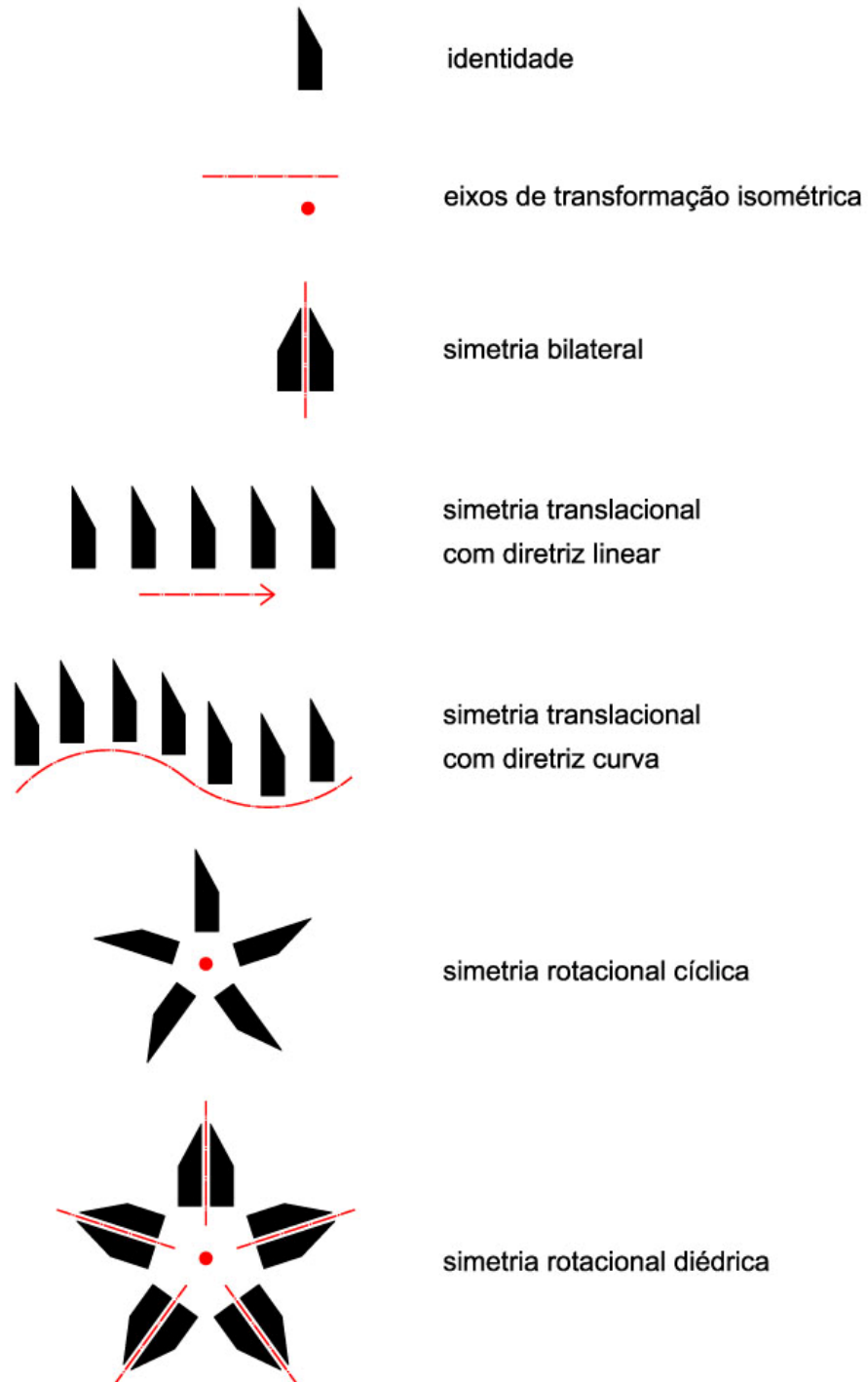


Figura 47 – Grupos de simetria plana.

A simetria bilateral constitui-se na reflexão de uma forma sobre um eixo linear. Já a simetria translacional representa a recursão de uma forma através de um eixo ordenador que pode, por sua vez, ser retilíneo ou curvo. A simetria rotacional representa a repetição da forma ou identidade por meio de um eixo de rotação, podendo ainda ser classificada em dois subgrupos - a simetria rotacional cíclica, onde a forma recursiva permanece invariante, e a simetria rotacional diédrica, em que se adiciona à identidade rotacionada uma ou mais transformações de reflexão.

A figura 48 apresenta dois exemplos de simetrias existentes na natureza. A borboleta (a) apresenta simetria bilateral, através da reflexão por um eixo longitudinal, na qual a identidade é representada por uma de suas asas. No caso da centopeia (b), ocorre a simetria translacional, através da repetição ordenada de suas patas e segmentos do corpo por meio de um eixo de translação que percorre longitudinalmente seu corpo. As identidades e eixos de simetria referentes aos exemplos são representados respectivamente em vermelho e preto na figura 49.

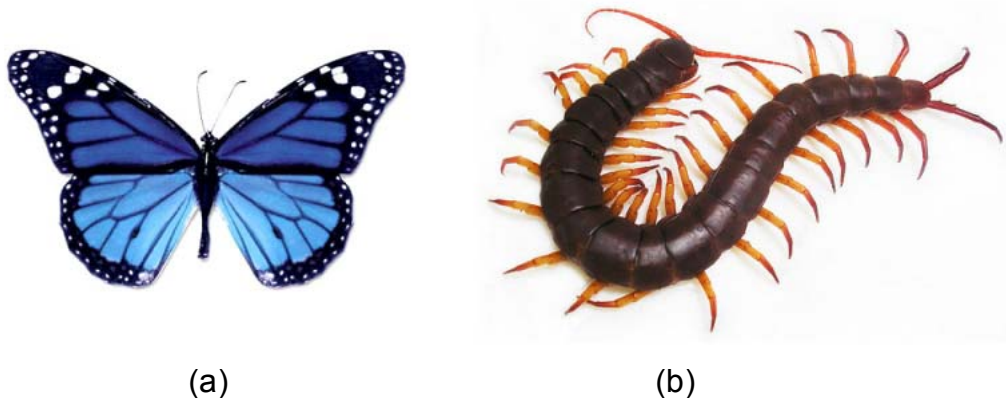


Figura 48 – Exemplos de simetrias encontradas na natureza.

(a) – Borboleta com simetria bilateral. (b) – Centopeia com simetria translacional.

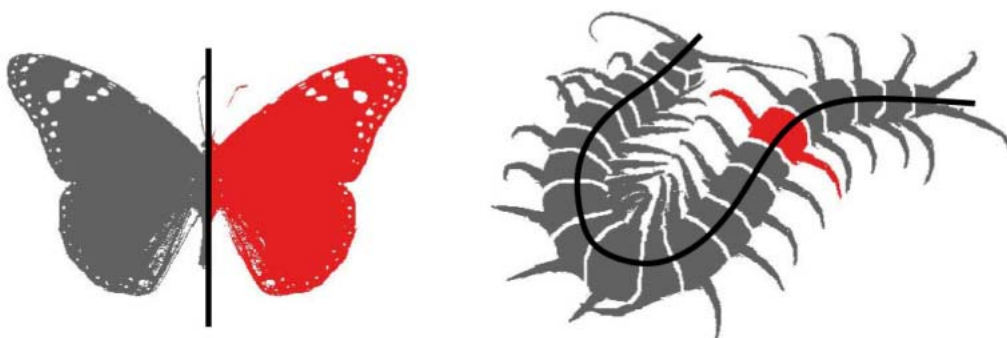


Figura 49 – Identidades e eixos de simetria relacionados à figura 47.



Uma estrutura geométrica pode ainda englobar uma sequência gradual de operações de simetria em que se identificam, passo a passo, as operações isométricas aplicadas sobre as identidades ou formas iniciais. Assim, uma figura pode apresentar a combinação da simetria translacional com a bilateral, inclusive com alternâncias, a exemplo do *fenômeno Kaman Vortex street*<sup>6</sup> (Figura 50).

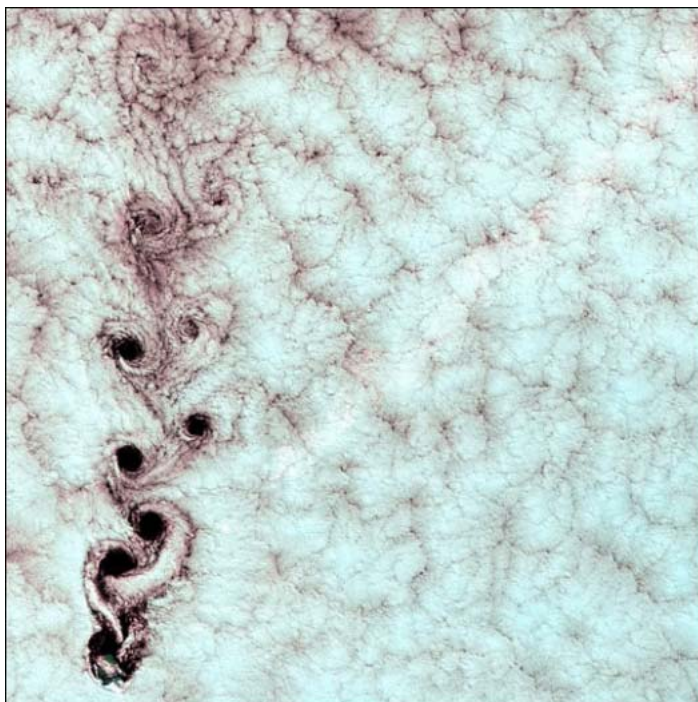


Figura 50 – Kaman Vortex Street.

A associação de diversos grupos de simetria a artefatos produzidos pelo homem é retratada por Leyton (2001), que relaciona o sistema perceptivo humano à organização sistemática de hierarquias com simetrias aninhadas (*nested hierarchy of symmetries*), onde cada estágio de transformações define uma simetria específica na estrutura da figura ou objeto. Tais fatores cognitivos, frequentemente, são explorados por arquitetos, designers, compositores e pintores na elaboração de suas obras.

---

<sup>6</sup> O fenômeno conhecido por Karman Vortex Street ocorre em fluidos ou gases, e se constitui num distúrbio ondular que gera uma sequência de vórtices com velocidades graduais. Sua presença pode ser constatada em correntes de ar divergentes que modelam figuras simétricas em nuvens, sendo possível também simular o fenômeno em laboratório (BALL, 1999).



Os grupos de simetria e seus desdobramentos encontram representação nas mais diversas instâncias do universo, desde a escala cósmica até a subnuclear (ROHDE, 1982). A presença da simetria na natureza explica o fascínio que o homem tem pelo seu estudo, e que se revela nas manifestações culturais representativas de todas as eras. O reconhecimento da simetria ocorre a partir da identificação de sua identidade básica, que pode ser entendida como o módulo padrão que compõe uma organização simétrica.

Padovan (1999) discorre sobre as definições Vitruvianas de ordem, proporção e simetria, definindo demandas básicas sobre as quais elas se baseiam: as dimensões entre as partes e o todo de um sistema devem possuir uma relação constante entre si, o que implica invariavelmente na delimitação de uma unidade ou módulo padrão. Conseqüentemente, as partes intermediárias do conjunto devem obedecer às mesmas relações proporcionais presentes entre o todo e a unidade. Assim, deduz que a escolha por um sistema de proporção deve ser uma estratégia presente na arquitetura de excelência. Armero (2004) define o módulo como a unidade arquitetônica básica de um sistema ordenador, da qual derivam as proporções. A harmonia será o resultado de um planejamento de projeto associado ao rigor geométrico, permitindo tomar o artefato arquitetônico um objeto transmissível, tanto mais potente quanto sintético.

A modulação é um recurso de projeto que se torna relevante com o aperfeiçoamento das técnicas industriais que contextualizaram o surgimento da arquitetura moderna, e é importante compreender como a serialização foi incorporada a este cenário. A partir do movimento moderno, a arquitetura e mesmo o design assumiram novas posturas em relação à produção em série, impulsionados por uma insatisfação atinente à profusão de estilos e tendências do final do século XIX, e suas inconsistências em relação aos métodos produtivos que surgiam com a industrialização. Os precursores do modernismo acreditavam que a viabilização de produtos fabricados em larga escala, destinados ao consumo em massa, sinalizavam que a arquitetura deveria também se modelar a esta realidade. Os componentes da edificação deveriam, por conseguinte, ser modelados a partir da racionalização produtiva pela serialização, traduzindo-se em estratégias

compositivas que promoviam uma separação clara entre estrutura, planos e vedações.

Segundo Montaner (2001, p. 78), “o racionalismo como processo de pensamento se converteu em forma. [...] Toda precipitação, intuição, improvisação, deve ser substituída pela sistematicidade, pelos cálculos precisos e pelos materiais produzidos em série”. O conceito de modularidade foi incorporado como uma alternativa para reger o processo construtivo, desde o projeto, a partir da padronização dos elementos que constituem a edificação.

A sequência numérica de Fibonacci constitui-se num dos exemplos surpreendentes de ordem matemática implícita na natureza. Foi descrita, em 1202, pelo matemático italiano Leonardo de Pisa, para ilustrar numericamente o crescimento de uma população de coelhos. Em virtude da constatação de que a reprodução destes revelava uma sequência gradual, na qual os números subsequentes representavam sempre a soma dos dois números imediatamente anteriores (0,1,1,2,3,5,8,13,21,...), esta sequência numérica trouxe uma série de desdobramentos para as artes visuais, música e arquitetura. A relação proporcional resultante da divisão de cada número pelo seu antecessor tende, gradualmente, a uma razão numérica conhecida como proporção áurea, representada pela constante irracional *Phi* (1,618...), que é capaz de descrever matematicamente uma série de componentes da natureza, como, por exemplo, a concha *Nautilus*, ilustrada na figura 51-a. O organismo possui simetria translacional da qual a identidade ou módulo padrão repete-se ao longo de uma curva espiral logarítmica (Figura 51-b), apresentando ainda variações proporcionais de escala vinculadas à sequência de Fibonacci.

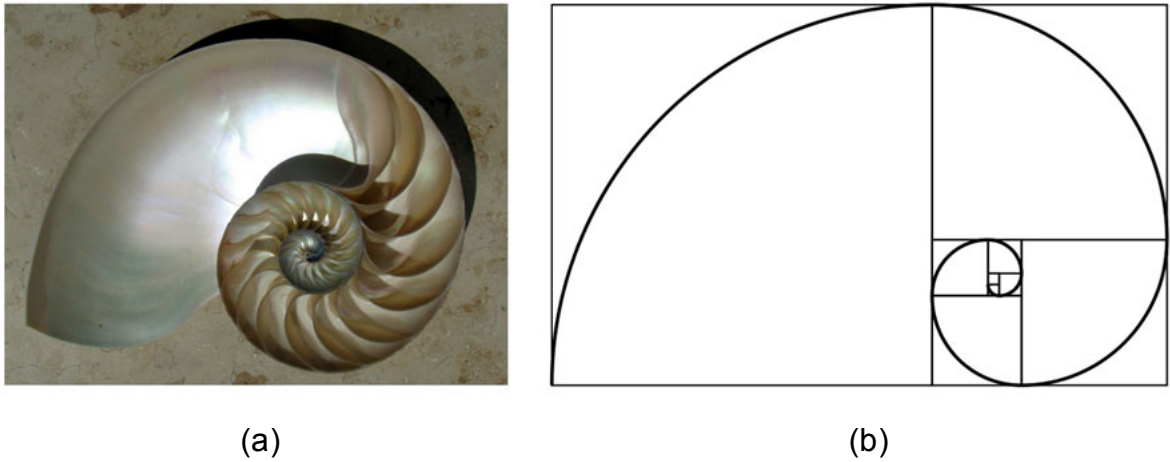


Figura 51 – (a) - Concha *Nautilus*.

(b) – Espiral Logarítmica gerada pela proporção áurea.

O arquiteto Le Corbusier, em 1948, utilizou os conceitos da sequência de Fibonacci na elaboração de um sistema de proporções baseado no corpo humano – o *Modulor* (Figura 52). Consistindo em uma gama de dimensões harmônicas, é formado por um conjunto de três medidas básicas, sendo a primeira delas correspondente à estatura média de um homem com 183cm, a segunda a sua altura somada a seu braço estendido, alcançando o total de 226cm, e a terceira a metade desta, resultando em 113cm, equivalente ao plexo solar. A partir daí, com base em relações geométricas proporcionais, segue-se uma infinidade de medidas que crescem em proporção contínua, tendendo à secção áurea. O sistema criado por Le Corbusier visava a universalização das medidas e ao alcance da visão harmônica da vida, perpassando pela construção dos objetos e suas relações proporcionais com o homem.

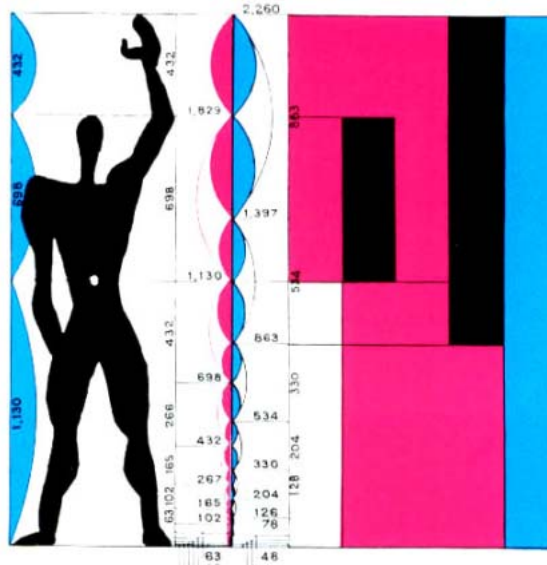


Figura 52 – Modulor. Le Corbusier (1948).

Weinstock (2006) relaciona a recursividade presente na natureza ao princípio da redundância. Enquanto a engenharia clássica a tomaria como o oposto de eficiência; nos organismos biológicos, ela representa uma estratégia fundamental, sem a qual não existiriam mecanismos adaptativos e respostas às variações do meio. Configurando uma instância evolutiva primária, permite uma organização hierárquica baseada na agregação entre partes individuais que trabalham sinergicamente em prol de uma sustentação estrutural robusta e estável, com flexibilidade para atuar em situações de adaptações e rearranjos. O conceito de robustez representa tal capacidade em suportar grandes variações externas, estando programadas nos organismos, já em âmbito genético. Plantas resistem à ação da gravidade ou mesmo a cargas eólicas dinâmicas graças a uma organização hierárquica predefinida, baseada no princípio de agregação e redundância.

Em 1968, o biólogo Aristid Lindenmayer realizou pesquisas para identificar padrões de crescimento em organismos multicelulares, produzindo, então, uma descrição formal e sistematizada destes padrões, gerando uma estrutura abstrata baseada na sequência recursiva de objetos. Assim, o *L-System* pode ser entendido como uma gramática de formas que captura as regras de crescimento recursivo e as aplica numa reescrita em chaves de comando ou *strings*, utilizando como parâmetros o intervalo entre as repetições de segmentos de reta.

Até aqui, esta dissertação concentrou-se em revisar os conceitos relativos às formas da natureza, tomando como fio condutor as regras físicas e matemáticas que regem os organismos naturais. A recursividade presente na biologia, representada pelas simetrias, aliada ao conceito de equilíbrio, existente nas formas mínimas, permitiram traçar um paralelo com a arquitetura, pelo qual foram expostas as possíveis analogias que podem tanto descrever o artefato arquitetônico, ou mesmo servir como base para o processo de fundamentação de ideias de projeto.

Isso posto, o próximo capítulo será dedicado à descrição detalhada do experimento que norteou a complementação deste trabalho, no sentido de discutir o papel da natureza como elemento generativo para a arquitetura. Assim, pela exposição de um método de projeto, o conceito de superfícies mínimas conduz um experimento focado na aplicação de elementos construtivos modulares à estruturação de volumetrias no intuito de demonstrar que a função específica de sustentação pode ser atendida a partir de um repertório formal proveniente do referencial biológico.

## **CAPÍTULO V**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

O experimento desenvolvido nesta pesquisa tem como objetivo aplicar uma metodologia de projeto para estruturação de superfícies mínimas por meio da identificação de padrões naturais que possam fornecer modelos de estruturação aplicáveis nas membranas mínimas, bem como sua posterior avaliação estrutural.

A utilização de modelos geométricos emergentes da natureza pressupõe a existência de uma lógica estrutural coesa e eficiente, o que pode fundamentar sua transposição para os elementos construtivos de arquitetura. Ademais, a harmonia reconhecida nas manifestações simétricas da natureza se constitui em um importante referencial estético e funcional para os artefatos produzidos pelo homem. As formas biológicas, compreendidas por uma cortina científica, fundamentam-se sob um espectro de leis matemáticas e físicas presentes nos organismos e fenômenos naturais. A compreensão destes fenômenos permite traçar um paralelo entre a geometria e a eficiência de meios presentes na biologia, buscando sua transposição para a arquitetura. A analogia biológica, feita a partir da abstração em formas da natureza, com foco no referencial orgânico, oferece possibilidades reais de ampliação do repertório de formas para arquitetura e design.

Sob tal perspectiva, as superfícies mínimas se apresentam como alternativa para conformação volumétrica de edificações, dada sua configuração otimizada entre área e volume edificado. Pressupondo seu povoamento a partir de padrões

emergentes da natureza, a lógica geométrica destes elementos pode ser transposta para um componente específico da edificação, sua superfície envolvente, desempenhando uma função preestabelecida de estruturação. O resgate de padrões transpostos para módulos estruturadores soma-se ao uso de configurações superficiais mínimas, onde existe um natural equilíbrio de tensões proporcionado pela própria configuração da superfície.

O advento da computação gráfica abriu caminho para a descoberta de novos modelos de superfícies mínimas e trouxe possibilidades para ampliar o repertório de volumetrias onde o conceito de estruturação está permeado pela busca do equilíbrio, fato que justifica a futura investigação de alternativas mínimas para a arquitetura. Para tal é necessário se valer de modelos computacionais de representação que possam antecipar a visualização das soluções propostas, bem como avaliar seu desempenho estrutural, o que fundamenta a formulação de uma metodologia que compreenda todo o processo de projeto, desde a identificação do padrão até sua aplicação final no modelo computacional.

Segundo Gero e Saunders (2006), os desenhos trazem ao designer a oportunidade de construir novas representações motivadas por suas crenças e expectativas em relação ao projeto. O desafio em trabalhar com formas complexas que transcendam a ortogonalidade se torna mais palpável com o uso de modelos de representação, sejam eles físicos ou digitais. Nesse sentido, os programas de desenho assistidos por computador, aliados ao emprego de ferramentas digitais de prototipagem, representam avanços no senso de compreender os princípios generativos e estruturais das formas de maior complexidade geométrica. Sarrablo (2004) refere que as topologias complexas exibem volumes e espaços de seção variável, buscando a continuidade superficial de seu envolvente. Neste viés, Couceiro (2005) salienta que, no processo de concepção de formas complexas, não há somente uma questão de tempo ou esforço envolvida, mas existem também fatores contingentes à capacidade em criar e visualizar estruturas além de determinado nível de complexidade.

Prusinkiewicz (2003) aponta uma série de vantagens, no uso de modelos computacionais, relacionadas ao entendimento quantitativo dos mecanismos

desempenhados no modelo e que podem levar a uma compreensão sintética e global das inter-relações que ocorrem no mesmo. Assim, a metodologia proposta para investigação do problema proposto está fundamentada na representação digital. Aliar o processo de projeto à utilização de modelos computacionais facilita a tomada de decisões, a reavaliação de etapas do processo e a interferência nos parâmetros dos elementos construtivos, dessa forma, permitindo gerar, testar e comparar diferentes alternativas de projeto.

Por fim, a formulação de métodos de projeto pode contribuir para o processo de design, pois explicita, em passos predefinidos, um protocolo de ações e etapas organizadas e interligadas com vistas a um objetivo final – a representação e o simulacro de uma realidade futura.



A metodologia proposta está dividida em quatro fases distintas, conforme o que segue:

**Fase 1: Reconhecimento e vetorização do padrão, formulação do módulo básico**

**Ferramental de Apoio: CAD Criativo**

- 1.1. Observação das Amostras e Identificação de Padrões;
- 1.2. Vetorização do Padrão e Controle de Parâmetros da Figura;
- 1.3. Geração de Alternativas de Simetria; e
- 1.4. Ajustes de Continuidade do Perímetro dos Módulos.

**Fase 2: Representação em modelos tridimensionais**

**Ferramental de Apoio: Rhinoceros + Panelling Tools**

- 2.1. Atribuição de Mapeamento;
- 2.2. Atribuição de Diferentes Escalas de *Panelling*; e
- 2.3. Sobreposição e Aplicação nos Modelos Tridimensionais.

**Fase 3: Avaliação preliminar do desempenho estrutural**

**Ferramental de Apoio: Abaqus**

- 3.1. Simulação de Carregamentos: tração e compressão; e
- 3.2. Análise e Registro de Resultados.

**Fase 4: Intervenção na geometria do padrão e reavaliação do desempenho estrutural.**

**Ferramental de Apoio: CAD Criativo + Abaqus**

- 4.1. Redimensionamento do Módulo (revisitação das etapas 1.2 a 1.4); e
- 4.2. Simulação Final com Base no Módulo Redimensionado (revisitação das etapas 3.1 e 3.2).

Cada uma das etapas engloba procedimentos específicos que serão detalhados na descrição pomenorizada de cada etapa.

## **Fase 1: Reconhecimento e vetorização do padrão, formulação do módulo básico**

### **1.1. Observação das amostras e Identificação de padrões**

Foram selecionadas quatro imagens de organismos naturais, ilustradas nas figuras 53 a 56, a partir das quais foram identificados os padrões posteriormente aplicados nas superfícies mínimas.



Figura 53 – Padrão de estruturação de uma folha.



Figura 54 – Padrão de estruturação do cogumelo.



Figura 55 – Padrão de estruturação do tronco de bananeira.



Figura 56 – Padrão de estruturação do Dente-de-Leão.

Para cada uma das amostras selecionadas serão detalhadas as etapas seguintes do experimento, como descrito a seguir:

## AMOSTRA 1 – FOLHA

### 1.2. Vetorização do padrão e controle de parâmetros da figura

A partir da identificação dos padrões, adotou-se o software *AutoCad*, desenvolvido pela empresa *Autodesk*, como ferramenta para criar e manipular um modelo vetorizado do padrão identificado utilizando os comandos de desenho disponíveis no programa. CAD consiste na abreviatura para o termo *Computer-aided-design*, que, segundo Celani (2003), refere-se a *softwares* de projeto para engenharia, arquitetura ou desenho industrial, que podem ter diversas aplicações, seja em análise estrutural, simulação de processos de otimização ou mesmo programas gráficos e vetoriais. Estes, situados no campo do CAD interativo, “permitem a visualização da forma definida matematicamente por meio de uma representação gráfica digital” (CELANI, 2003, Introdução, p. XII).

O processo inicia-se com a inserção da imagem digitalizada, na qual o padrão emergente é identificado por análise visual, e, a partir disso, elabora-se o desenho vetorizado sobreposto à imagem inserida (Figura 57-a). Este desenho é posteriormente isolado (Figura 57-b) e passa-se, então, a manipular seus parâmetros sobre uma área predeterminada que é o módulo padrão a ser repetido no modelo tridimensional (Figura 57-c). Foi adotada para esta amostra o módulo quadrado cuja aresta tem comprimento = 1.

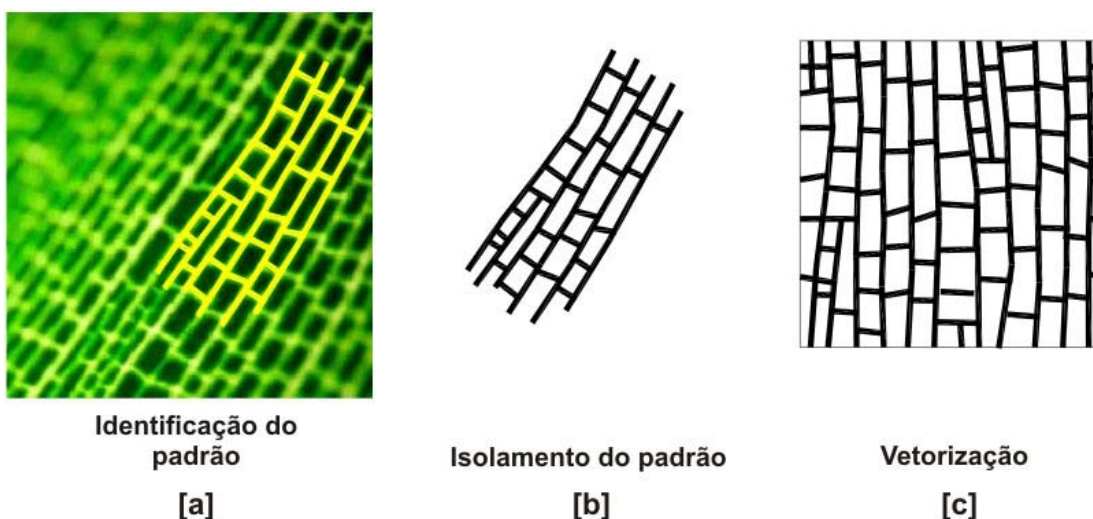


Figura 57 – Etapas de isolamento e vetorização do padrão da amostra 1 (Folha).

São identificados os seguintes elementos gráficos do padrão, conforme ilustrado na figura 58: sucessão de linhas contínuas longitudinais (L1), com inserção eventual de linhas longitudinais parciais (L2), e conexão de L1 e L2 por segmentos transversais (L3) cuja disposição ocorre em alternâncias, promovendo as uniões entre os elementos longitudinais. Este conjunto de linhas conectadas e contraventadas é que garante ao organismo sua sustentação espacial.

A partir destes elementos, são identificados os seguintes parâmetros manipuláveis do padrão:

- Afastamento entre linhas longitudinais, contínuas ou segmentadas (D1);
- Afastamento entre linhas transversais (D2);
- Espessura (*width*) das linhas longitudinais e transversais (H1, H2);
- Altura (*thickness*) das linhas longitudinais e transversais (E1, E2); e
- Angulação das linhas longitudinais e transversais ( $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$ ).

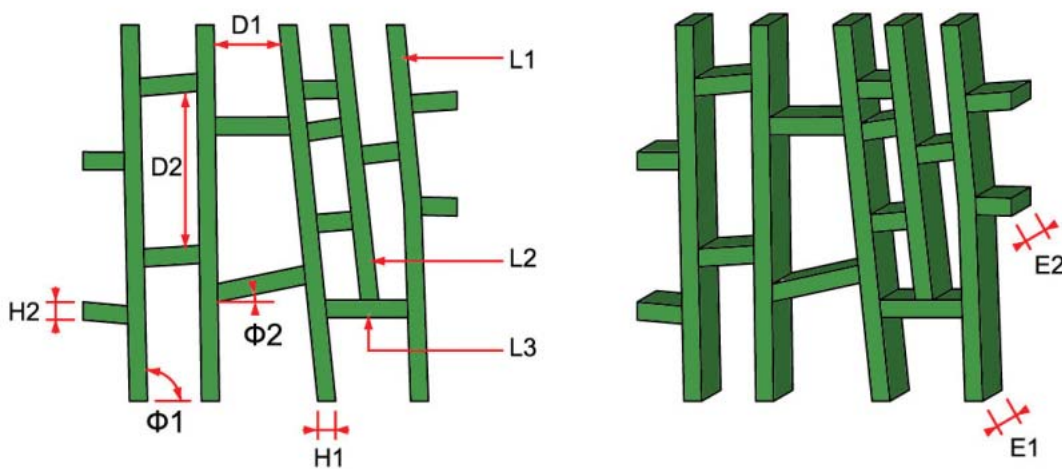


Figura 58 – Elementos e parâmetros manipuláveis do padrão folha.

Vista Frontal e Perspectiva.

O módulo base tem tamanho 1,00 x 1,00, e, para o exemplo em questão, foi inicialmente determinado que os parâmetros de espessura e altura das linhas não apresentariam variação entre si, ou seja:

$$H1=H2 = 0,02$$

$$E1=E2 = 0,05$$



### 1.3. Geração de Alternativas de Simetria

O procedimento que segue consiste em criar um sistema interativo onde serão aplicadas as regras de simetria para repetição do módulo previamente vetorizado. O *AutoCad* tem em sua plataforma de trabalho a possibilidade de utilizar dois ambientes de trabalho, o *Model Space* e o *Paper Space*. O primeiro consiste no sistema de coordenadas cartesianas tridimensionais X, Y e Z, onde fica inserido o modelo de desenho. Já no ambiente *Paper Space*, que consiste no espaço de *Layout*, trabalham-se com coordenadas bidimensionais, onde é possível criar um número máximo de 64 janelas de visualização para o *Model Space*, estas recebem a denominação de *Viewports*.

Celani (2003) ilustra, em seu livro *Cad Criativo*, uma série de experimentos educacionais com CAD, permitindo realizar composições simétricas interativas utilizando recursos próprios do programa. Dentre as estratégias apresentadas na obra citada, foi selecionado, para a metodologia proposta, o recurso de *composições simétricas dinâmicas* por meio da criação de ambientes interativos com o uso de múltiplas *viewports*.

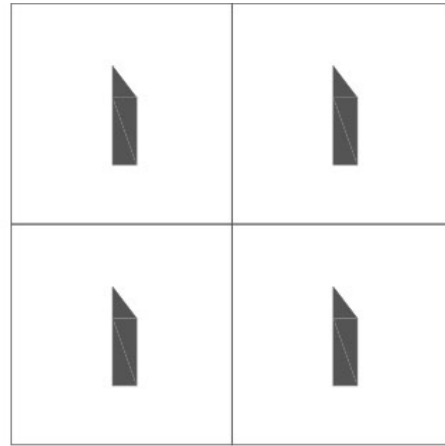
A figura 59 elucida esta etapa do processo. O módulo padrão previamente identificado passa a ser visualizado numa *viewport* exclusiva (Figura 59-b), onde será possível manipular sua forma e averiguar o resultado nas outras *viewports* que formam a composição simétrica (Figura 59-d).

As figuras 59-a e 59-c representam, através de pictogramas, a orientação do módulo nas respectivas *viewports*, sendo relevante mencionar que, para o exemplo em pauta, foi definida uma simetria translacional nos eixos X e Y, sem transformação isométrica.



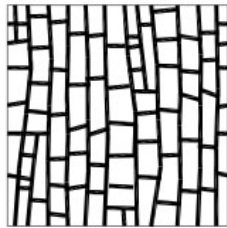
**Pictograma  
de orientação  
do módulo**

**[a]**



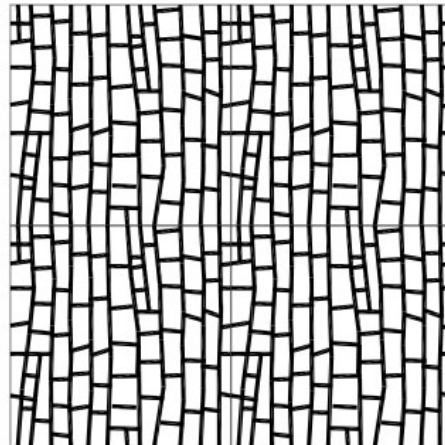
**Aplicação da regra de  
simetria I**

**[c]**



**Módulo**

**[b]**



**Composição resultante da  
regra de simetria I**

**[d]**

Figura 59 – Aplicação de simetria ao módulo pelo sistema de composição dinâmico do CAD Criativo.

#### 1.4. Ajustes de continuidade do perímetro dos módulos

A principal vantagem em trabalhar com o sistema de composições simétricas dinâmicas, proposto por Celani, consiste na possibilidade de manipular a forma do padrão em sua *viewport* exclusiva e visualizar o resultado simultaneamente na composição simétrica. Tal recurso facilitou a etapa de ajustes no perímetro do módulo (Figura 60), de forma a garantir sua continuidade em relação aos módulos vizinhos, o que é uma questão de contingência para uma composição destinada a satisfazer demandas estruturais. É desejável, portanto, que cada linha componente do padrão tenha sua correspondente no módulo imediatamente seguinte, de modo a comportar-se como elemento de suporte aos esforços de tensão e/ou compressão que serão exercidos sobre a estrutura.

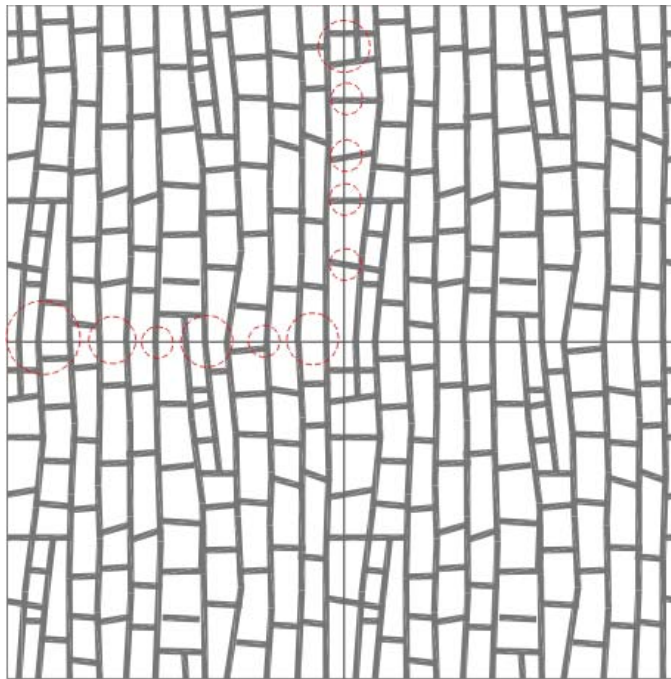


Figura 60 – Ajustes de continuidade no perímetro do módulo.

#### Fase 2: Representação em modelos tridimensionais

Consiste na aplicação dos módulos parametrizados na etapa anterior em modelos tridimensionais, desse modo, permitindo visualizar o resultado da transposição da matriz orgânica para o padrão de povoamento no modelo tridimensional.



O ferramental utilizado passou a ser o Software *Rhinoceros*, desenvolvido por Robert McNeel & Associates, que possibilita a modelagem tridimensional baseada na plataforma NURBS<sup>1</sup>, e com suporte adicional do *plug-in*<sup>2</sup> *Panelling Tools*, apoio ferramental criado para uso específico no software, desenvolvido por Rajaa Issa, em 2008. O *plug-in* foi criado especificamente com o objetivo de "povoar" volumes e superfícies complexas com módulos bi ou tridimensionais, e representá-los a partir do mapeamento de superfícies num sistema de *grids*, e posterior aplicação de módulos pré-selecionados de acordo com as coordenadas pré-configuradas para o *mesh* da superfície.

Cabe ressaltar que a representação proporcionada pelo *Panelling Tolls* aplica módulos de preenchimento como entidades vetoriais, o que se constitui num diferencial em relação aos recursos tradicionais dos *softwares* destinados a produção de modelos renderizados. Estes, comumente, aplicam texturas por meio de imagens digitalizadas, que não se constituem em entidades geométricas (pontos, linhas, superfícies e volumes), e, portanto, não podem ser mapeados vetorialmente, o que impede a posterior utilização do modelo na simulação de solicitações estruturais ou mesmo como base para ferramentas de prototipagem baseadas no sistema de controle numérico CNC<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> NURBS – Abreviatura para *Non-uniform rational basis spline*, refere-se ao modelo matemático utilizado em computação gráfica para gerar e representar curvas e superfícies, oferecendo grande flexibilidade na manipulação de formas analíticas e complexas. Disponível em: <<http://www.en.wikipedia.org/wiki/NURBS>>. Acesso em: 18/09/2009.

<sup>2</sup> *Plug-in* denota um aplicativo adicional que interage com um programa principal hospedeiro (*host application*), para realizar operações específicas ou satisfazer demandas adicionais não atendidas por este. Disponível em: <[http://www.en.wikipedia.org/wiki/Plug-in\\_\(computing\)](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Plug-in_(computing))>. Acesso em: 24/09/2009.

<sup>3</sup> CNC – Abreviatura para *Computer Numeric Control*, ou Controle Numérico Computadorizado, que descreve os sistemas de automação utilizados para aplicação em maquinário industrial cujos comandos são programados por sistemas de codificação baseados em linguagem vetorial, portanto vinculados à linguagem CAD/CAM. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Numerical\\_control](http://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_control)>. Acesso em: 14/10/2009.

## 2.1. Atribuição de Mapeamento

Quando uma superfície é inserida no programa, o *plug-in* inclui o recurso de mapeamento pelo sistema *UV Mapping*, que consiste num sistema de planificação de coordenadas volumétricas inseridas em uma malha de coordenadas cartesianas, convertendo a superfície em mapa bidimensional aplicável sobre um modelo 3D.

As coordenadas U e V referem-se ao mapeamento de uma superfície de maneira similar aos eixos cartesianos X e Y, e, a partir de mecanismos de controle numérico, é possível atribuir valores para as subdivisões da superfície. Finalmente, o aplicativo permite selecionar um módulo bi ou tridimensional e preenche a superfície de acordo com as coordenadas UV, previamente, configuradas para o modelo.

Para esta etapa, adotaram-se três configurações volumétricas baseadas no conceito de superfícies mínimas, a saber: a configuração Plana (Figura 61), o parabolóide hiperbólico ou *Hypar* (Figura 62) e a fita de *Moebius* (Figura 63). Para cada uma delas, as figuras ilustram as coordenadas de mapeamento UV, respectivamente, no modelo tridimensional e sua correspondente planificação.

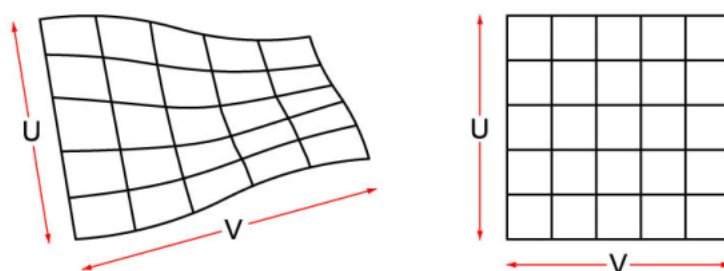


Figura 61 – Mapeamento UV para o modelo Plano.

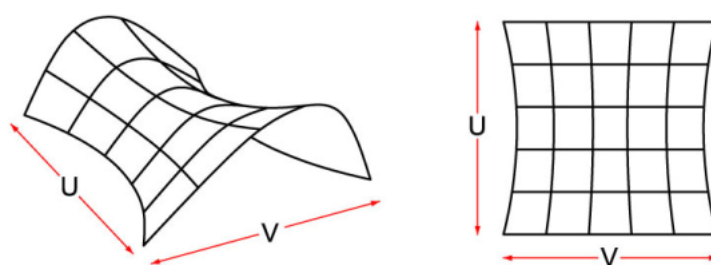


Figura 62 – Mapeamento UV para o modelo Hypar.

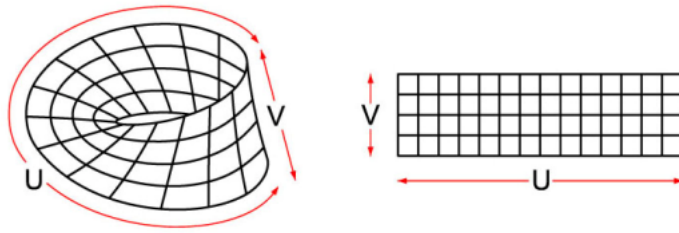


Figura 63 – Mapeamento UV para o modelo Moebius.

Cada um destes modelos foi posteriormente mapeado segundo três opções de módulos básicos (Figuras 64, 65 e 66), utilizando os três modelos possíveis de preenchimento de uma superfície a partir de polígonos regulares, listados no capítulo IV: mapeamento triangular, retangular e hexagonal.



Figura 64 – Modelo de Superfície Mínima Plana e seus respectivos mapeamentos.

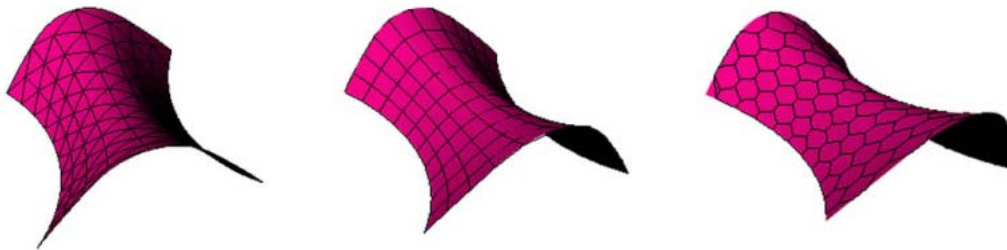


Figura 65 – Modelo de Superfície Mínima *Hypar* e seus respectivos mapeamentos.

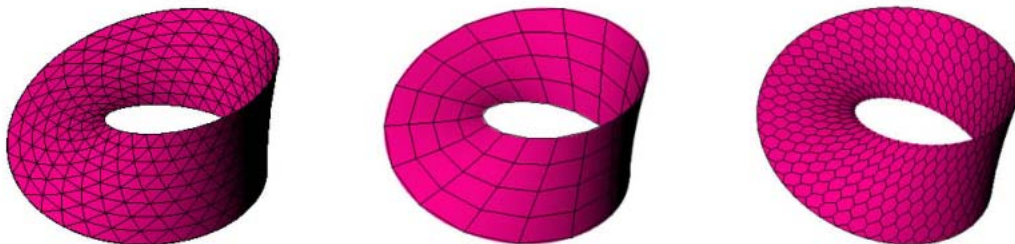


Figura 66 – Modelo de Superfície Mínima *Moebius* e seus respectivos mapeamentos.

A opção por estas três formas de mapeamento se justifica pelo atendimento às demandas de inserção dos diferentes módulos, o que será constatado nos exemplos das amostras seguintes, pois cada uma delas mostrou ter uma configuração modular ideal.

## **2.2. Atribuição de diferentes escalas de *panelling***

Para cada um dos modelos de superfície mínima foram atribuídas três configurações de mapeamento UV, o que caracterizou três escalas distintas de aplicação dos módulos sobre as superfícies. Esta etapa do procedimento demonstrou que é possível alterar a escala de preenchimento de um modelo tridimensional a partir do controle de seu mapeamento, simplificando o processo de representação, visto que não é necessário remodelar o módulo básico para obter resultados diferentes. Ao atribuir diferentes escalas de mapeamento, o *plug-in* as interpreta e reconfigura automaticamente os parâmetros do módulo, mantendo suas proporções entre largura, comprimento e altura. As ilustrações contendo as três configurações de mapeamento UV para cada modelo de superfície estão representadas no Apêndice A, fichas A-01 a A-06, páginas 113 a 118.

## **2.3. Sobreposição e aplicação nos modelos tridimensionais**

Em virtude das escalas de mapeamento preestabelecidas na fase anterior, foram então propostas sobreposições entre elas, gerando diferentes densidades de preenchimento da superfície. Para cada escala de mapeamento foi atribuída uma camada (*layer*) correspondente, recurso que permite visualizar instantaneamente o resultado da sobreposição graças ao controle das camadas que estão ligadas ou desligadas.

A visualização das simulações de sobreposição das escalas de *panelling* para o padrão Folha, aplicadas nos respectivos modelos de superfícies mínimas (Plana, Hypar e Moebius), pode ser feita através de consulta ao Apêndice A, fichas A-01 a A-06, páginas 113 a 118.

## AMOSTRA 2 – COGUMELO

### 1.2. Vetorização do padrão e Controle de parâmetros da Figura



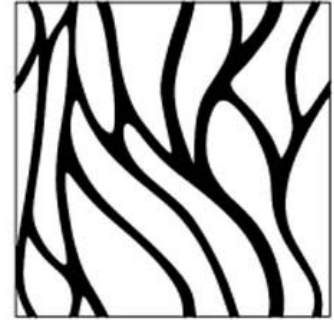
Identificação do padrão

[a]



Isolamento do padrão

[b]



Vetorização

[c]

Figura 67 – Etapas de isolamento e vetorização do padrão da amostra 2 (cogumelo).

### 1.3. Geração de Alternativas de Simetria

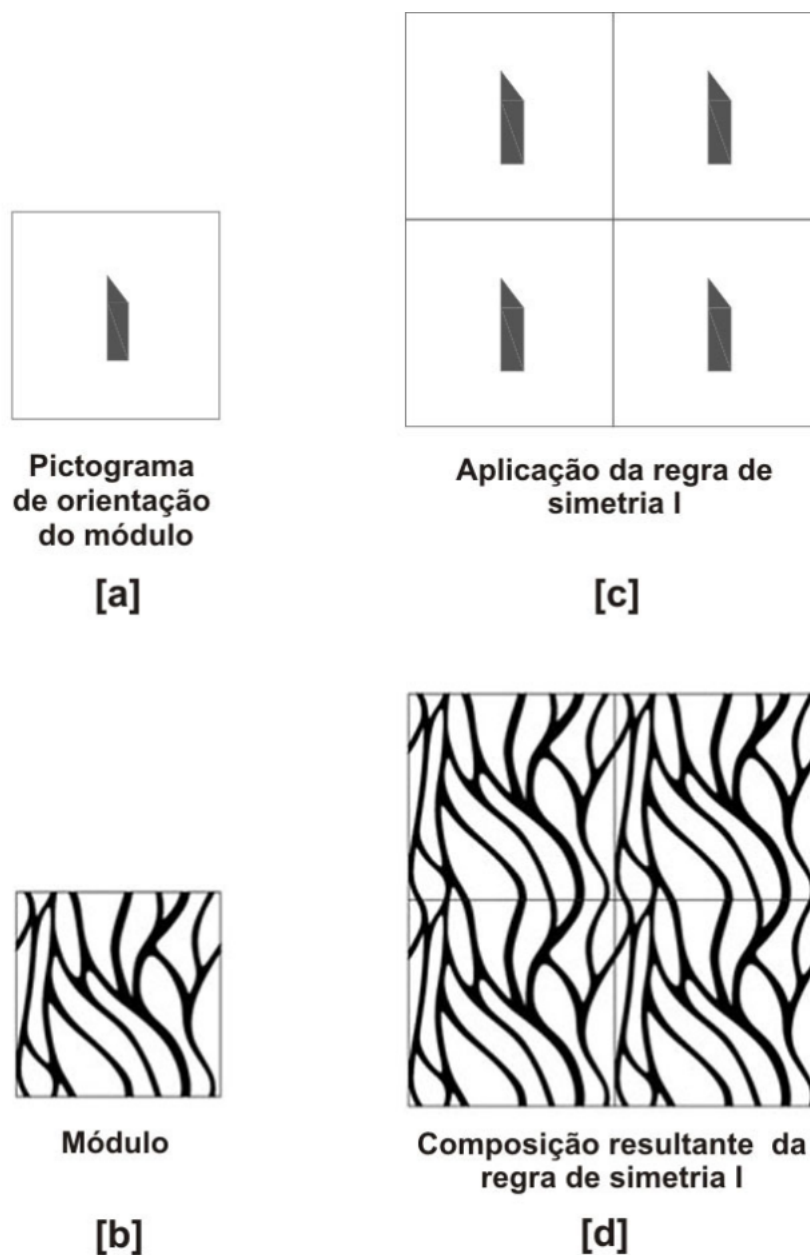


Figura 68 – Aplicação de simetria ao módulo pelo sistema de composição dinâmico do CAD Criativo.

#### 1.4. Ajustes de continuidade do perímetro dos módulos



Figura 69 – Ajustes de continuidade no perímetro do módulo.

#### 2.2. Atribuição de diferentes escalas de *panelling* e 2.3. Sobreposição e Aplicação nos modelos tridimensionais

Para visualizar as simulações de sobreposição das escalas de *panelling* para o padrão Cogumelo, aplicadas nos respectivos modelos de superfícies mínimas (Plana, Hypar e Moebius), consultar o Apêndice A, fichas A-07 a A-12, páginas 119 a 124.

## AMOSTRA 3 – BANANEIRA

### 1.2. Vetorização do padrão e Controle de parâmetros da Figura

A amostra relativa ao padrão do tronco de bananeira adicionou uma variante no experimento conforme o padrão identificado se mostrou adequado à delimitação pelo módulo triangular. Assim, a partir da identificação e isolamento do padrão, delimitou-se o perímetro do módulo com um triângulo equilátero de lado 1, como ilustrado na figura 70.

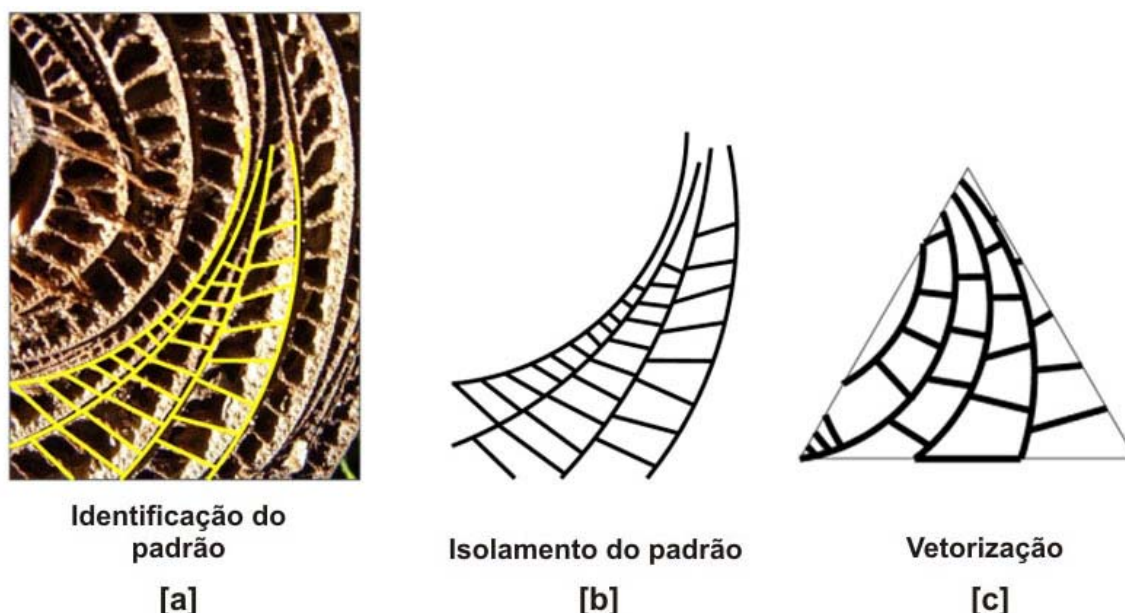


Figura 70 – Etapas de isolamento e vetorização do padrão da amostra 2 (Cogumelo).

### 1.3. Geração de Alternativas de Simetria

Devido à delimitação do padrão em seu módulo triangular, foram propostas duas alternativas de simetria para a amostra da bananeira. A regra de simetria I (Figura 71) caracteriza-se pela combinação de duas simetrias translacionais com rotações alternadas, o que possibilitou a concordância entre as linhas curvas gerando uma combinação harmônica e contínua.



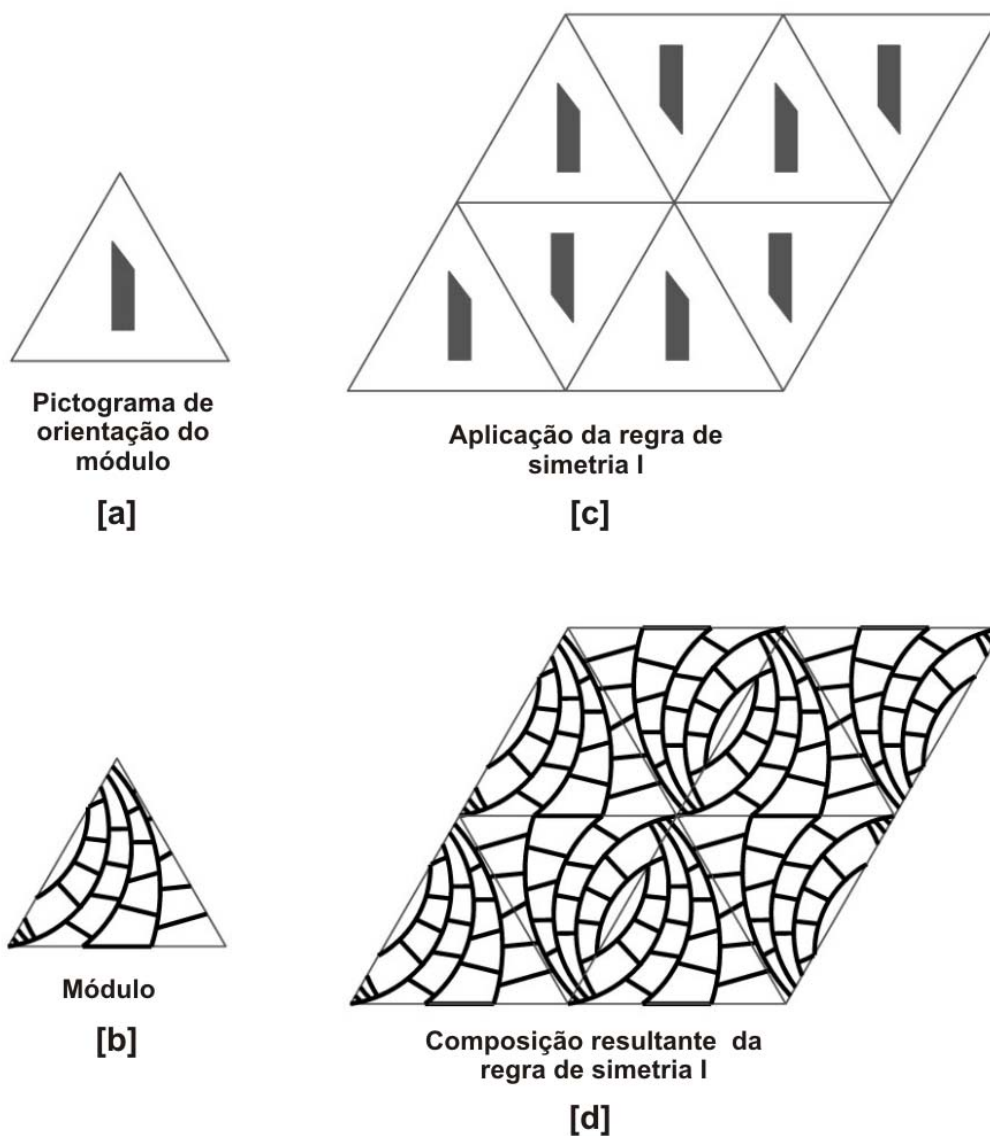


Figura 71 – Aplicação de regra de simetria I ao módulo triangular pelo sistema de composição dinâmico do CAD Criativo.

A regra de simetria II (Figura 72) caracteriza-se pela combinação de simetria translacional com rotação, associada à reflexão bilateral. Neste caso, a composição se difere da regra anterior na concordância entre as linhas curvas, que, na comparação entre as linhas de módulos superiores e inferiores, destaca a presença da simetria reflexiva.

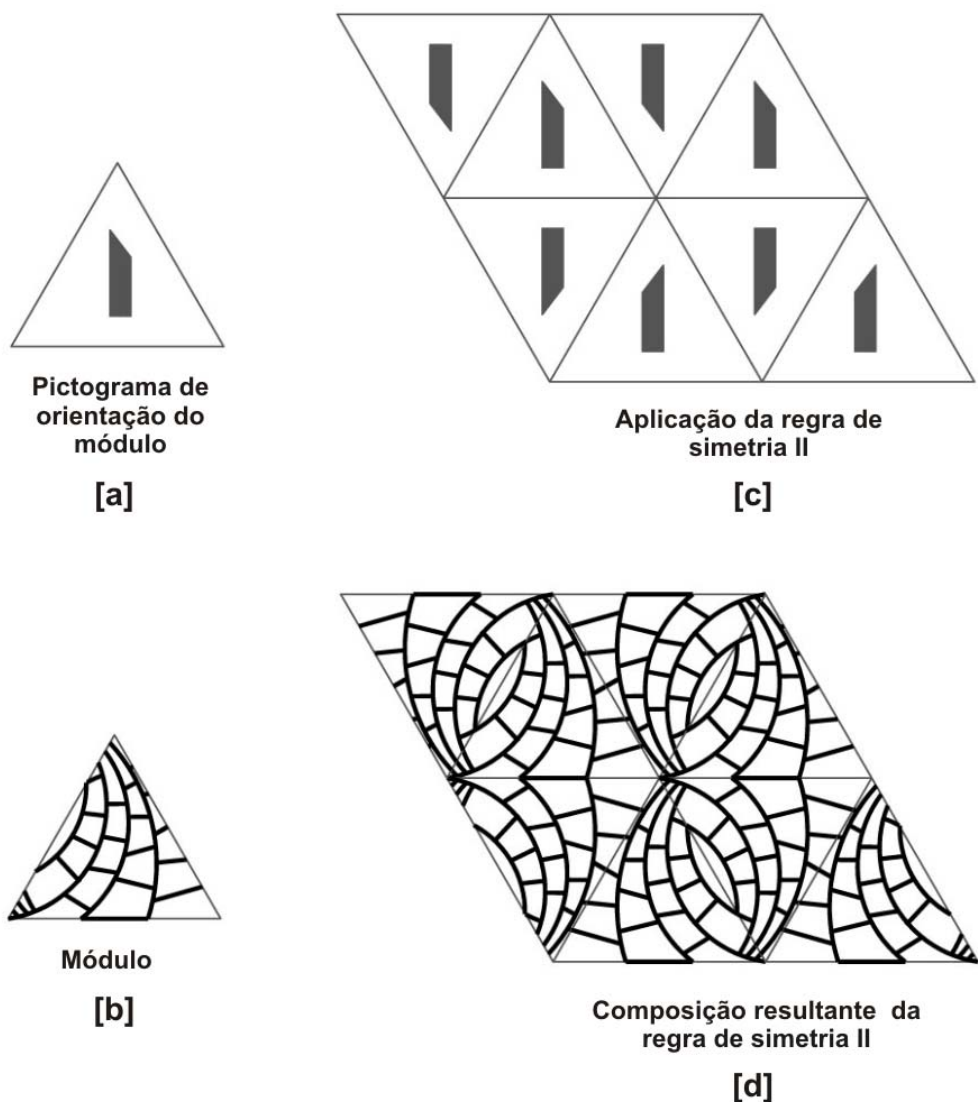


Figura 72 – Aplicação de regra de simetria II ao módulo triangular pelo sistema de composição dinâmico do CAD Criativo.

#### 1.4. Ajustes de continuidade do perímetro dos módulos

Neste exemplo foram propostos ajustes de continuidade que atendessem simultaneamente às duas regras de simetria, ampliando as possibilidades compositivas do módulo (Figura 73). O sistema de composição dinâmica do CAD Criativo permite a geração de *viewports* poligonais com formatos diversos, recurso diferencial em relação aos tradicionais sistemas de composição de papel de parede, por sua vez, limitados à geração de módulos exclusivamente quadrangulares. No exemplo em questão, devido à composição com módulos triangulares, os limites perimetrais foram demarcados com pontos de conectividade equidistantes,

possibilitando o encaixe para as duas variantes de simetria propostas. Tais recursos de composição e conectividade proporcionados pela ferramenta podem ser aplicados a quaisquer módulos e composições simétricas, contanto que se estabeleçam os critérios adequados para tal: seleção de grupos de simetria, delimitação de áreas de continuidade e divisão das arestas perimetrais em segmentos proporcionalmente correspondentes.

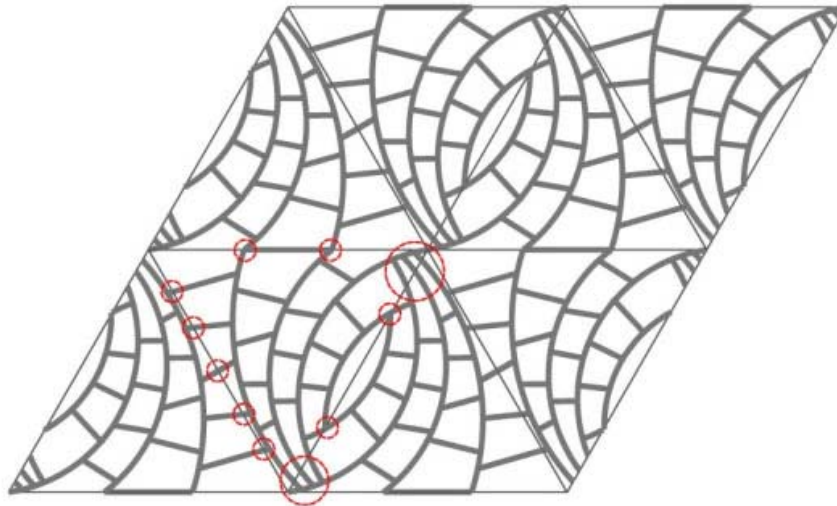


Figura 73 – Ajustes de continuidade no perímetro do módulo.

Apesar das possibilidades de delimitação de módulos diversos proporcionadas pelo sistema interativo do CAD, sua transposição para o ambiente Rhinoceros não pôde ser realizada de forma direta, já que este *software* utiliza o sistema de mapeamento UV, limitado à geração de malhas quadrangulares. Assim, foi necessário compatibilizar a composição simétrica com módulos triangulares ao processo generativo de *panelling* quadrangular. Para tanto, delimitou-se uma área retangular englobando os limites de continuidade em 2 módulos inteiros e 4 meios módulos (Figura 74), de forma que, ao ser aplicada a recursividade na superfície, houvesse correspondência entre o resultado final e o padrão de simetria originalmente proposto.

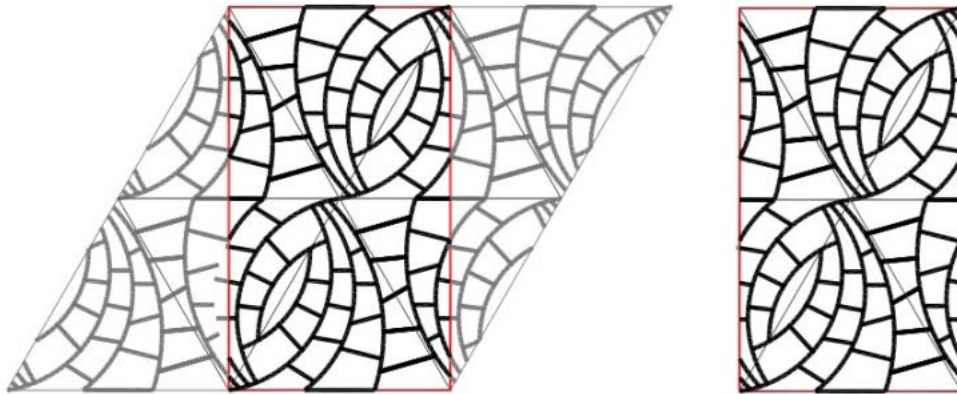


Figura 74 – Compatibilização do módulo triangular ao processo generativo de *panelling*.

## **2.2. Atribuição de diferentes escalas de *panelling* e**

## **2.3. Sobreposição e Aplicação nos modelos tridimensionais**

As simulações de sobreposição das escalas de *panelling* relativas ao padrão Bananeira, aplicadas nos respectivos modelos de superfícies mínimas (Plana, Hypar e Moebius), podem ser consultadas no Apêndice A, fichas A-13 a A-18, nas páginas 125 a 130.

## AMOSTRA 4 – DENTE-DE-LEÃO

### 1.2. Vetorização do padrão e Controle de parâmetros da Figura

A amostra relativa ao padrão do Dente-de-leão ofereceu um módulo com geometria própria cíclica, o que indicou sua adaptação ao perímetro hexagonal, permitindo a aplicação da última configuração modular proposta nesta pesquisa, representada na figura 75.

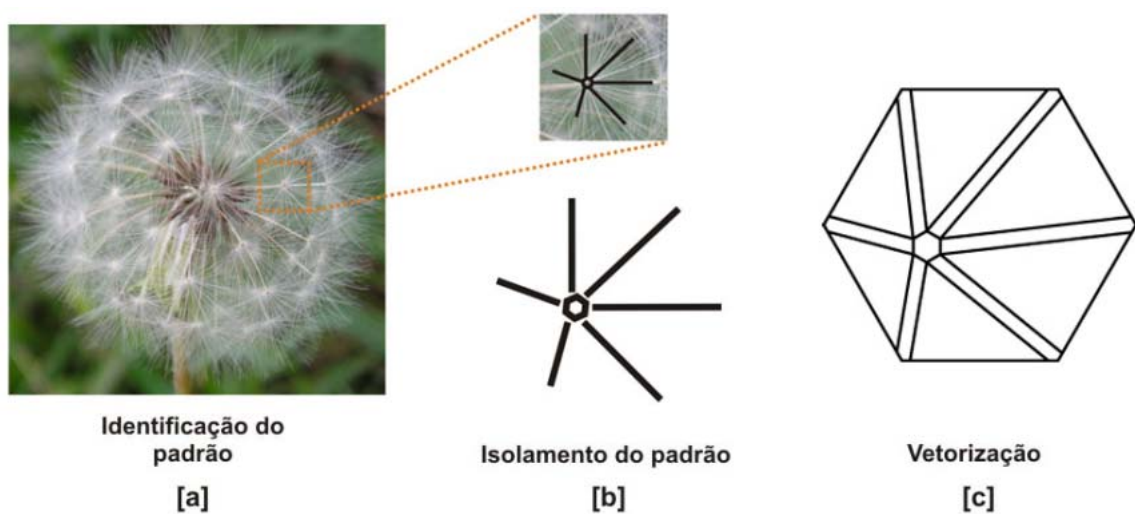


Figura 75 – Etapas de isolamento e vetorização do padrão da amostra 4 (Dente-de-leão).

### 1.3. Geração de Alternativas de Simetria

A delimitação do padrão no módulo hexagonal permitiu a aplicação de uma regra de simetria translacional combinada a duas rotações gradativas de 60 graus (Figura 76), o que poderia ser estendido até seis combinações, pois o módulo oferece relações de vizinhança com seis módulos circundantes. O deslocamento do centro de convergência axial do padrão foi a alternativa adotada para que as composições simétricas tivessem maior visibilidade.

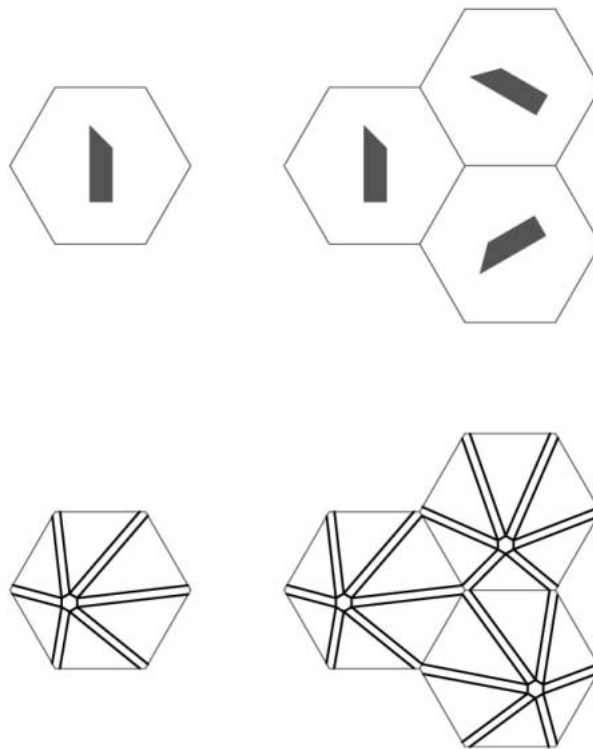


Figura 76 – Aplicação de simetria ao módulo hexagonal pelo sistema de composição dinâmico do CAD Criativo.

#### 1.4. Ajustes de continuidade do perímetro dos módulos

Neste exemplo, os ajustes de continuidade foram realizados nos vértices do hexágono a partir da delimitação de circunferências com raio constante e centro no próprio vértice (Figura 77). Assim, quaisquer condições de simetria seriam atendidas, o que amplia a gama de configurações possíveis para o módulo hexagonal. Combinações podem ser geradas também nas arestas, desde que seja delimitada uma razão proporcional que permita a congruência entre as figuras, resultando numa composição simétrica com continuidade no perímetro, dessa forma, satisfazendo uma provável aplicação estrutural. A exemplo do módulo triangular, esta combinação hexagonal só foi possível graças às possibilidades oferecidas no sistema de composição dinâmica do CAD Criativo e ao recurso de geração de *viewports* poligonais.

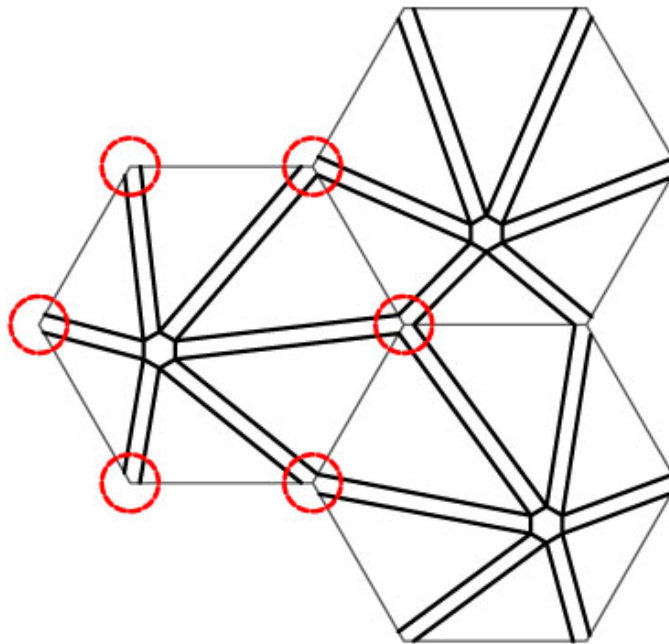


Figura 77 – Ajustes de continuidade no perímetro do módulo.

Neste exemplo, novamente foi necessário compatibilizar a composição simétrica com módulos hexagonais ao processo generativo de *panelling* quadrangular, em decorrência das limitações impostas pelo ambiente Rhinoceros. A delimitação está exposta na figura 78, e o número de hexágonos englobados é proporcional à magnitude da composição simétrica. No exemplo em pauta, exigiu-se a inclusão de seis módulos, sendo dois inteiros e os quatro restantes seccionados junto ao perímetro.



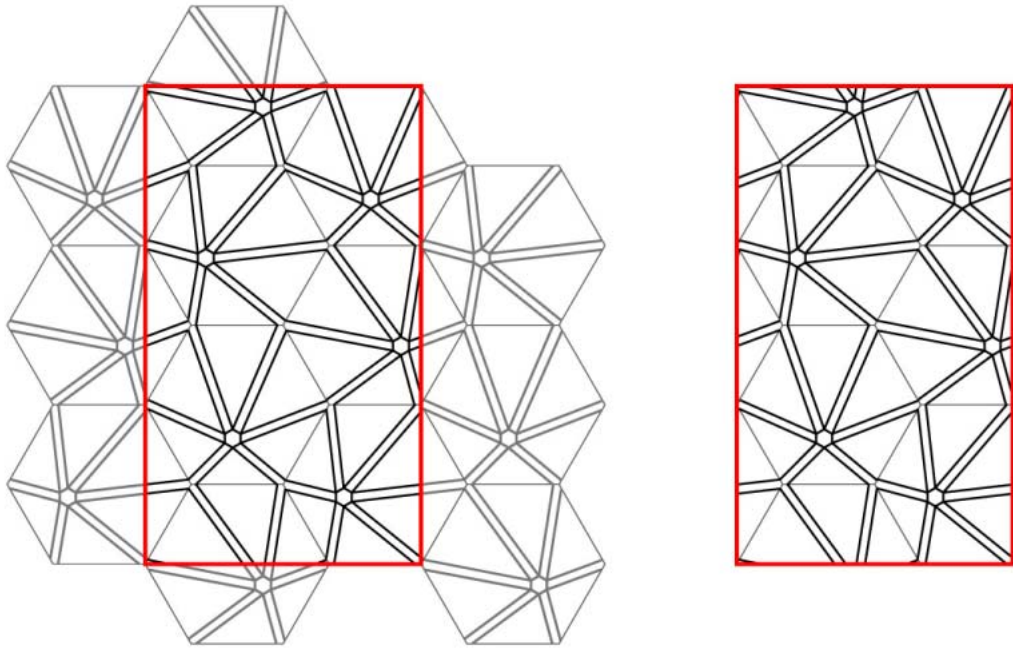


Figura 78 – Compatibilização do módulo hexagonal ao processo generativo do panelling.

## 2.2. Atribuição de diferentes escalas de *panelling*

Não foi realizada para esta amostra.

## 2.3. Aplicação nos modelos tridimensionais

A visualização das aplicações de *panelling* no tocante ao padrão Dente-de-Leão, e seus respectivos modelos de superfícies mínimas (Plana, Hypar e Moebius), pode ser feita através de consulta ao Apêndice A, fichas A-19 a A-21, nas páginas 131 a 133.

O quadro apresentado na figura 79 sintetiza as fases 1 e 2 em todas as quatro amostras selecionadas para o experimento, desde a identificação e parametrização dos padrões, atribuição de simetrias com respectivos ajustes no perímetro dos módulos e aplicação nos modelos tridimensionais de superfícies mínimas.



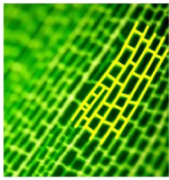
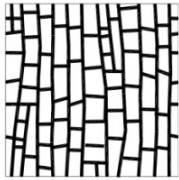
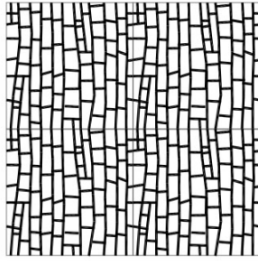
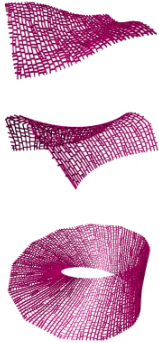


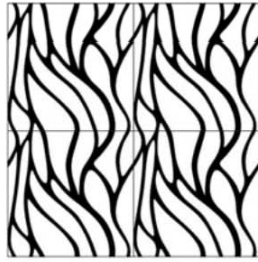



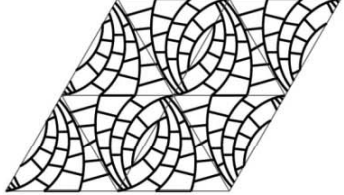


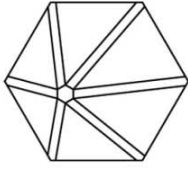
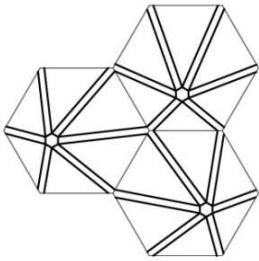
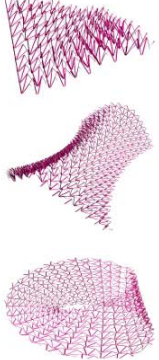
	IDENTIFICAÇÃO	PARAMETRIZAÇÃO	SIMETRIA E AJUSTES DE CONTINUIDADE	APLICAÇÃO NOS MODELOS
FOLHA				
COGUMELO				
BANANEIRA				
DENTE DE LEÃO				

Figura 79 – Quadro síntese referente às fases 1 e 2 do experimento.

### **Fase 3: Avaliação preliminar do desempenho estrutural**

Esta etapa do experimento consistiu em submeter os módulos estruturais previamente concebidos a uma avaliação preliminar de desempenho, nomeada *Pré-Teste*, utilizando como ferramental de apoio o software de análise por elementos finitos *Abaqus*.

Em consonância com Roylance (2001), uma análise de elementos finitos voltada ao desempenho estrutural consiste basicamente de três etapas: Pré-processamento, Análise e Pós-processamento. A primeira se refere à introdução de um modelo geométrico do objeto ou parte a ser analisada, obtida a partir de um modelo tridimensional do sistema CAD ou outro software gráfico, sendo a geometria subdividida em um número controlável de subregiões ou elementos, por sua vez, conectados por pontos ou nós. São então atribuídas variáveis de cálculo a estes elementos, especificando carregamentos, pontos de engaste e conectividade, ou seja, estabelecendo as condições de contorno do modelo e demais propriedades dos materiais a serem simulados. Na etapa de análise, o conjunto de dados previamente vinculado ao modelo é direcionado ao código de elementos finitos propriamente dito, que desenvolve uma matriz de equações sob a qual serão verificadas as interações entre os dados imputados e o modelo. Finalmente, a etapa de pós-processamento vincula os resultados da análise a uma representação gráfica e numérica, disponibilizando ao usuário uma interface de visualização dos dados.

Foram selecionados dois módulos desenvolvidos na etapa anterior para submissão à análise por elementos finitos: os modelos da folha e cogumelo, que, nesta fase de Pré-Teste, receberam respectivamente a nomenclatura *Folha 1* e *Cogumelo 1*.

### 3.1. Simulação de carregamentos: tração e compressão

A determinação qualitativa e quantitativa dos carregamentos foi formulada a partir de um modelo estrutural hipotético, composto por uma superfície mínima *hyper*, contextualizada em duas situações distintas: primeiramente, compondo uma cobertura apoiada nas extremidades laterais, originando principalmente esforços de compressão (Figura 80); em uma segunda hipótese, formando uma estrutura em suspensão (Figura 81), na qual as solicitações predominantes serão esforços de tração. A estrutura vence um vão de 20 metros de largura por 5 metros de altura, sendo composta por módulos de 1,0 X 1,0 metros.

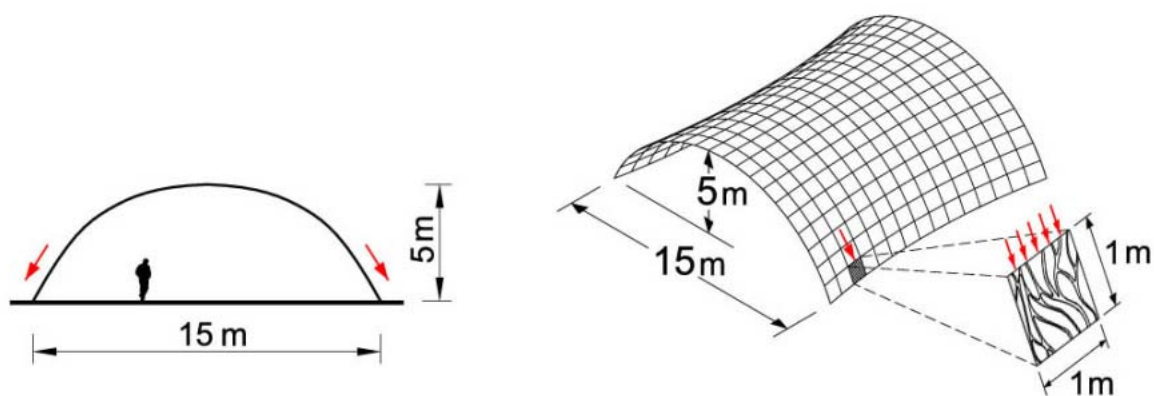


Figura 80 – Modelo hipotético para carregamento de compressão.  
Corte e Perspectiva.

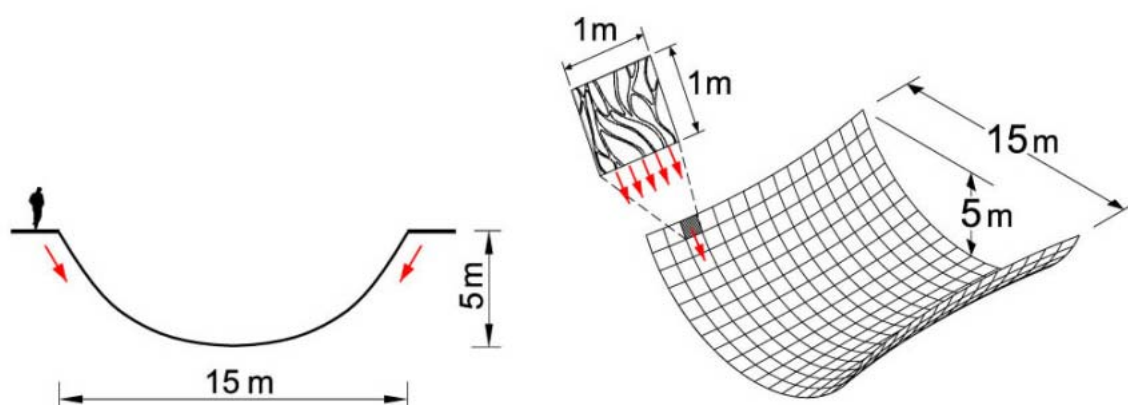


Figura 81 – Modelo hipotético para carregamento de tração.  
Corte e Perspectiva.

Uma estimativa para o carregamento atuante no módulo foi determinada pelo peso próprio da estrutura, constituída em aço, setorizando uma faixa de módulos compreendida entre o eixo médio e a extremidade lateral e tomando como situação de maior solicitação estrutural o último módulo situado junto ao engaste da estrutura, portanto, submetido à carga total correspondente ao peso de 10 módulos. Os cálculos de carregamento foram determinados pelas seguintes equações:

$$P_m = D \times V_m$$

$$P_t = P_m \times Q$$

$$C = P_t \times g$$

Onde:

$P_m$  = Peso do Módulo em kg

$D$  = Densidade Média do Aço =  $7.860 \text{ kg/m}^3$

$V_m$  = Volume em  $\text{m}^3$

$P_t$  = Peso total sobre o Módulo teste

$Q$  = Quantidade de Módulos

$g$  = Gravidade Terrestre =  $9,81 \text{ m/s}^2$

$C$  = Carga Total sobre o Módulo teste em Newtons (N)

O volume de cada módulo ( $V_m$ ) foi obtido pelo comando *Mass Properties* do AutoCad, sendo então multiplicado pela densidade média do aço ( $D$ ), resultando no peso total por módulo ( $P_m$ ) da estrutura. Este multiplicado pela quantidade de módulos ( $Q$ ) resulta no Peso Próprio total ( $P_t$ ) exercido sobre o módulo teste. Finalmente, a carga total ( $C$ ) resulta do produto do peso total pela força da gravidade ( $g$ ). Para efeitos de entrada de dados no Abaqus, o carregamento determinado para os esforços de tração e compressão foi distribuído pelo número de vínculos da borda superior submetida ao carregamento, enquanto a borda inferior foi vinculada a uma condição de engaste. Nas laterais do módulo, foram inseridas condições de contorno de simetria, o que simula a inserção do componente estrutural num contexto de união e continuidade estrutural com módulos vizinhos idênticos.

Os condicionantes, respectivos cálculos e resultados do Pré-Teste referente às amostras Folha 1 e Cogumelo 1 estão representados nas fichas B-01 a B-04, no Apêndice B, páginas 135 a 138.

### **3.2. Análise e Registro de Resultados**

As tensões obtidas na etapa de análise são apresentadas em termos das tensões de von Mises, determinadas com base na teoria de Mises-Hencky, que considera o cálculo da tensão máxima a partir de uma média quadrática das diferenças entre as três tensões principais. Os valores das tensões von Mises são fornecidos em  $\text{N/m}^2$  (Pascal), e a tensão de escoamento do aço se situa na ordem de  $200.000.000\text{N/m}^2$ , ou 200 MPa.

Os valores de carga atribuídos geraram tensões substancialmente abaixo do limite de escoamento, mas forneceram dados importantes atinentes à distribuição de tensões nos modelos. Esta análise preliminar permitiu identificar regiões com acúmulo de tensões em detrimento de outras menos solicitadas, o que fornece indícios para a necessidade de reformulação na geometria proposta, visando a equilibrar a distribuição dos esforços.

No modelo da Folha 1 (Figura 82), as regiões em destaque apresentaram tensões inferiores em relação aos outros elementos do módulo, indicando possibilidades de redução na secção destes elementos de ligação, o que contribuiria para reduzir a quantidade de material e conseqüentemente o peso próprio da estrutura.

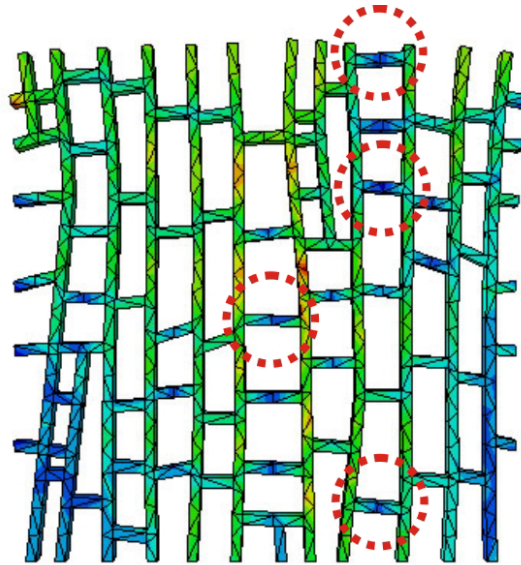


Figura 82 – Modelo Folha 1, com destaque para regiões com tensões inferiores passíveis de redução na secção.

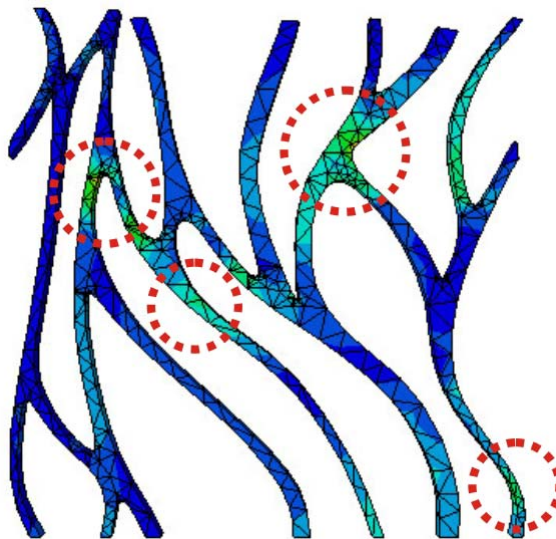


Figura 83 – Modelo Cogumelo 1, com destaque para regiões com tensões inferiores passíveis de redução na secção.

Já o modelo do Cogumelo 1 (Figura 83) apresentou maior uniformidade na distribuição de tensões, porém identificaram-se alguns setores com maiores solicitações que podem receber ajustes como aumento de secção ou mesmo redução no comprimento de flambagem, por meio de contraventamentos adicionais.

#### Fase 4.1: Intervenção na Geometria dos Padrões

Em consonância com os resultados do Pré-Teste, foram propostas adaptações nas formas iniciais objetivando alcançar um maior equilíbrio de tensões, sem, entretanto, comprometer a identidade com o padrão identificado a partir do organismo natural. É importante ressaltar que o objetivo principal da simulação estrutural foi avaliar o desempenho e fornecer indícios para a posterior reavaliação da geometria, mantendo a gramática inicial e preservando a memória em relação ao padrão emergente que gerou o módulo estrutural proposto. Tal estratégia se alinha com o viés da pesquisa, que é vincular uma função de estruturação a uma forma preconcebida, preservando sua identidade e comprovando, portanto, que a função pode ser estabelecida a partir de uma forma referencial (*função segue a forma*).

Assim, os módulos Folha e Cogumelo passaram por uma reformulação geométrica focada nos pontos de maior discrepância de tensões. Para o módulo da folha foi proposto o redimensionamento das linhas transversais, que apresentaram tensões inferiores se comparadas às peças longitudinais, apontando para a possibilidade de reduzir sua secção sem prejuízo ao desempenho do módulo (Figura 84).

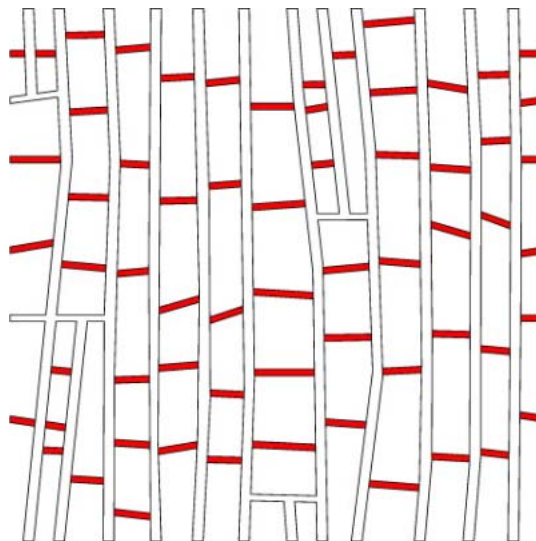


Figura 84 – Reformulação da Geometria do Módulo *Folha 2*, com redução na secção dos elementos transversais.



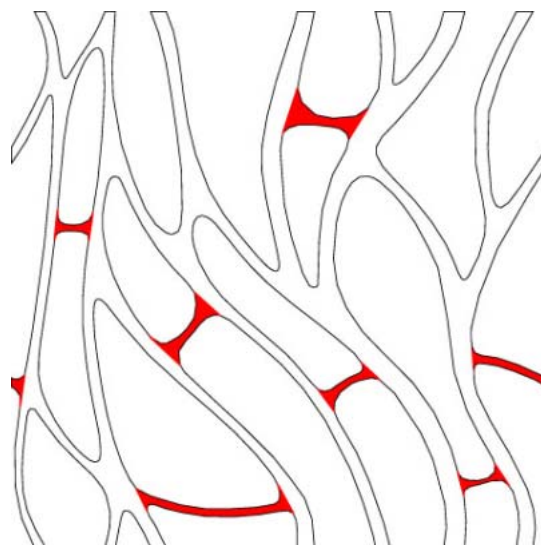


Figura 85 – Reformulação da Geometria do Módulo *Cogumelo 2*, com inserção de contraventamentos e redução nos comprimentos de flambagem.

Já na amostra do Cogumelo, foram propostos aumentos de secção nos pontos de maior solicitação, bem como a inserção de contraventamentos transversais (Figura 85), que contribuem para a redução no comprimento de flambagem que, numa geometria composta predominantemente por segmentos curvos, pode potencializar as deformações. Os modelos reformulados passaram a ser nomeados respectivamente como *Folha 2* e *Cogumelo 2*.

#### **Fase 4.2: Reavaliação do desempenho estrutural**

A última etapa do experimento consistiu em uma nova simulação de desempenho estrutural (*Pós-Teste*) aplicada sobre os modelos reformulados, a partir da avaliação preliminar. Utilizaram-se, portanto, os mesmos condicionantes de contorno e engaste, e as cargas foram recalculadas com base no volume de material dos módulos redimensionados, que, no caso da amostra *Folha 2*, apresentou redução, consequência direta da redução de secção dos elementos transversais; enquanto o modelo *Cogumelo 2* apresentou acréscimo de volume devido à inserção dos elementos de contraventamento. Os condicionantes, respectivos cálculos e resultados do Pós-Teste, referentes às amostras *Folha 2* e *Cogumelo 2* estão representados nas fichas C-01 a C-04, no Apêndice C, páginas 140 a 143.



Esta avaliação posterior comprovou a efetividade das alterações propostas na geometria. A distribuição de tensões, no modelo da Folha 2, atingiu maior equilíbrio aproximando o modelo a uma situação ideal em que os elementos estruturais tenham dimensões proporcionalmente compatíveis aos esforços a que são submetidos os quais, no exemplo em pauta, exigem maior resposta das linhas longitudinais; enquanto os elementos transversais respondem pela estabilidade do conjunto oferecendo restrições a deformações nos elementos principais de sustentação.

Na amostra do Cogumelo 2, os resultados também revelaram maior uniformidade na distribuição de tensões, com exceção de um pequeno trecho isolado na parte superior direita, no entanto não comprometendo o desempenho estrutural do modelo, pois os valores de tensão no setor situaram-se abaixo dos limites de escoamento. A inserção dos contraventamentos contribuiu para a redução dos comprimentos de flambagem, e a eventual presença de um foco de tensões poderia ser sanada utilizando recurso similar.

O quadro apresentado na figura 86 sintetiza as fases 3 e 4 para as duas amostras selecionadas à avaliação estrutural, ilustrando a fase de Pré-Teste, a intervenção na geometria a partir da identificação dos focos de tensões, e o Pós-Teste com as tensões equilibradas por meio desta intervenção geométrica.

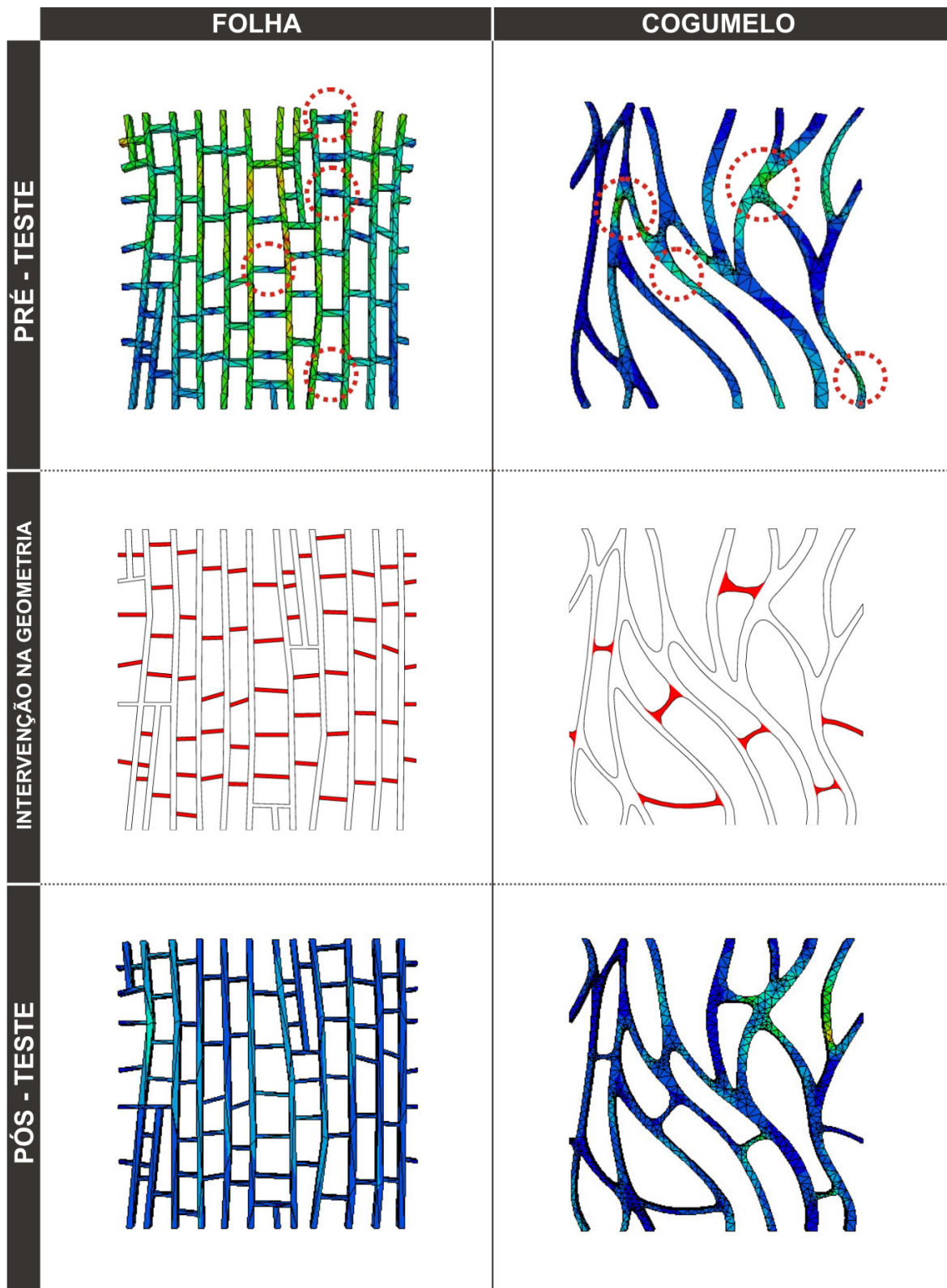


Figura 86 – Quadro síntese referente às fases 3 e 4 do experimento.

## CONCLUSÕES

Na introdução desta dissertação, foi caracterizada a importância para o design e principalmente para a arquitetura da elaboração de processos projetuais alternativos ao paradigma *forma segue função*, indicador de uma invariável dependência das formas dos condicionantes funcionais. Foi sugerida, nessa perspectiva, a vinculação deste paradigma em relação a teorias evolutivas e correntes arquitetônicas.

Como alternativa foi proposta uma metodologia de projeto que opera de forma inversa, isto é, utiliza a forma como elemento generativo. Como exemplo desta inversão a dissertação apresenta referências visuais originadas em formas da natureza animal e vegetal (analogias biológicas) para posterior aplicação em superfície envolvente de edificação, tratada como elemento estruturador e protagonista da forma. Há de se ressaltar que se utilizou o conceito de superfícies mínimas para a criação de um repertório de formas adaptáveis a volumetrias arquitetônicas. Num segundo estágio, superfícies envolventes foram criadas a partir da identificação de padrões emergentes em formas naturais.

A revisão do conhecimento acerca das superfícies e formas mínimas, decorrentes de condições de equilíbrio da forma em relação ao meio, balizou a identificação, na natureza, de padrões equivalentes. Em diferentes escalas, desde níveis moleculares, organismos diversos e fenômenos naturais, o equilíbrio de tensões justifica a ocorrência por arranjos mínimos, baseados na recursividade e

simetrias. Num segundo momento, a pesquisa abordou as aplicações de conceitos mínimos em diversas instâncias de representação, oferecendo um panorama de suas aplicações em áreas como arquitetura, urbanismo, design, ciência dos materiais e engenharias. Sinalizou-se, ainda, quanto ao interesse de diversas áreas do conhecimento na investigação de fenômenos naturais a partir de recursos computacionais, seja para estabelecer e criar formas com base em algoritmos genéticos, ou mesmo simular uma série de condições e variáveis sobre formas naturais, o que permite compreender seu funcionamento e, no contexto deste trabalho, verificar sua viabilidade como componente construtivo.

O método propôs a aplicação de ferramentas computacionais de representação e simulação estrutural no intuito de fundamentar um processo de projeto para estruturação de membranas arquitetônicas. Iniciando pela identificação de geometrias presentes nas formas naturais, que tiveram suas variáveis geométricas parametrizadas, foi possível gerar composições simétricas e continuidades no perímetro dos módulos, contingentes à posterior aplicação como elemento de sustentação em superfícies. Em decorrência da etapa inicial, padrões simétricos bidimensionais foram transpostos para modelos tridimensionais virtuais, representados em diferentes escalas e sobreposições. Os modelos, desagregados em módulos, foram avaliados estruturalmente no comportamento a carregamentos de tração e compressão. Uma vez feita a aferição, a resposta estrutural foi pautando a intervenção na geometria, desse modo, preservando a identidade em relação ao referencial imagético original.

O conjunto de procedimentos apontou para a viabilidade de inversão do paradigma (*forma segue a função* para *função segue a forma*) sugerindo que a relação entre atributos geométricos e demandas funcionais, colocada sob o viés alternativo proposto, depende da aferição da gramática emergente em relação às imposições estruturais. Os ajustes necessários ao atendimento da função estrutural devem ser previstos dentro do contexto geométrico da figura inicial, em complemento e preservação da linguagem.

Desdobramentos possíveis desta pesquisa envolvem ampliar os condicionantes da avaliação estrutural sobre os modelos, incorporando cargas dinâmicas, flexão e torção. Tal análise poderá ser aplicada sobre os modelos completos, assim, permitindo maior aproximação da realidade estrutural. O método utilizado na representação tridimensional pode viabilizar ainda a produção de modelos em escala reduzida, por meio de ferramentas de prototipagem rápida, visto que os modelos foram construídos por entidades geométricas ao invés de texturas visuais. As eventuais incompatibilidades do *Panelling Tools* em relação aos módulos triangulares e hexagonais apontam para a necessidade de aprimoramento do *plugin*, incorporando a possibilidade de utilizar módulos com geometrias poligonais diversificadas, além dos perímetros quadrangulares.

Salienta-se, por fim, que, apesar da pesquisa vincular a aplicação de analogias orgânicas na estruturação de superfícies arquitetônicas, a metodologia proposta tem flexibilidade para atender outros objetivos: outras analogias, vinculadas ao design de produto, podem ser desenvolvidas no intuito de criar padrões originais. Utilizando a metodologia proposta, investimento pode ser feito no campo do design de superfícies, incorporando a representação de texturas visuais e táteis, transponíveis para produtos e artefatos com os mais variados fins.

# **APÊNDICES**

## **APÊNDICE A**

**FICHAS RELATIVAS À SIMULAÇÃO EM MODELOS TRIDIMENSIONAIS**

## **APÊNDICE B**

**FICHAS RELATIVAS À AVALIAÇÃO ESTRUTURAL – PRÉ-TESTE**

## **APÊNDICE C**

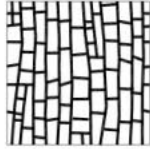
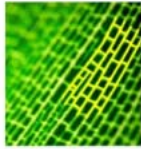
**FICHAS RELATIVAS À AVALIAÇÃO ESTRUTURAL – PÓS-TESTE**

# APÊNDICE A

## FICHAS RELATIVAS À SIMULAÇÃO EM MODELOS TRIDIMENSIONAIS

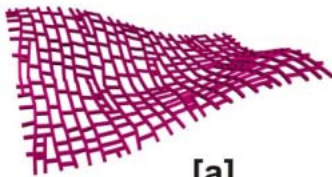
<b>A-01</b>	Padrão Folha, superfície Plana 1
<b>A-02</b>	Padrão Folha, superfície Plana 2
<b>A-03</b>	Padrão Folha, superfície Hypar 1
<b>A-04</b>	Padrão Folha, superfície Hypar 2
<b>A-05</b>	Padrão Folha, superfície Moebius 1
<b>A-06</b>	Padrão Folha, superfície Moebius 1
<b>A-07</b>	Padrão Cogumelo, superfície Plana 1
<b>A-08</b>	Padrão Cogumelo, superfície Plana 2
<b>A-09</b>	Padrão Cogumelo, superfície Hypar 1
<b>A-10</b>	Padrão Cogumelo, superfície Hypar 2
<b>A-11</b>	Padrão Cogumelo, superfície Moebius 1
<b>A-12</b>	Padrão Cogumelo, superfície Moebius 2
<b>A-13</b>	Padrão Bananeira, superfície Plana 1
<b>A-14</b>	Padrão Bananeira, superfície Plana 2
<b>A-15</b>	Padrão Bananeira, superfície Hypar 1
<b>A-16</b>	Padrão Bananeira, superfície Hypar 2
<b>A-17</b>	Padrão Bananeira, superfície Moebius 1
<b>A-18</b>	Padrão Bananeira, superfície Moebius 2
<b>A-19</b>	Padrão Dente de Leão, superfície Plana
<b>A-20</b>	Padrão Dente de Leão, superfície Hypar
<b>A-21</b>	Padrão Dente de Leão, superfície Moebius

# A-01

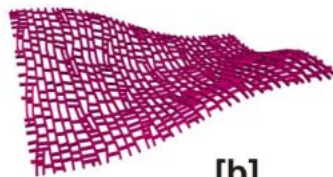


Padrão > Folha  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > Plano

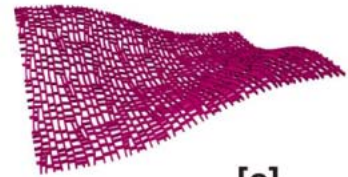
**condicionantes**



**[a]**  
U=4, V=2

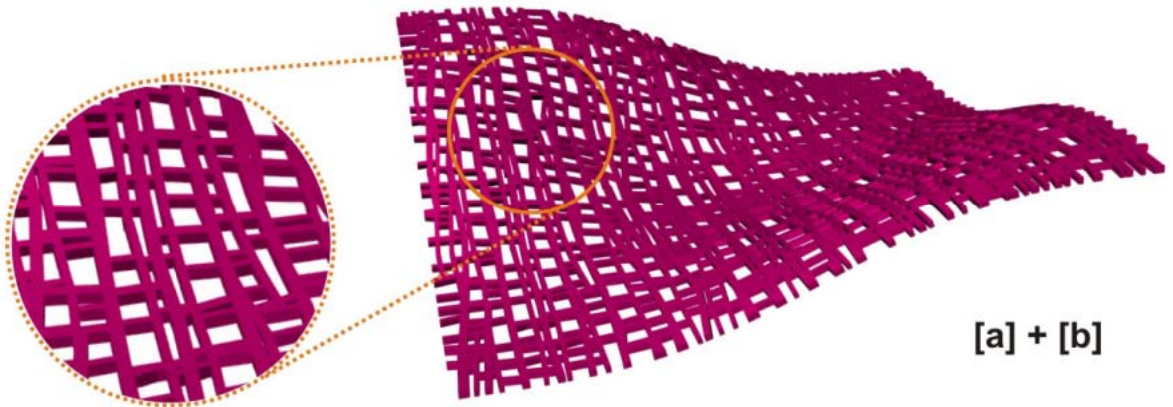


**[b]**  
U=6, V=3

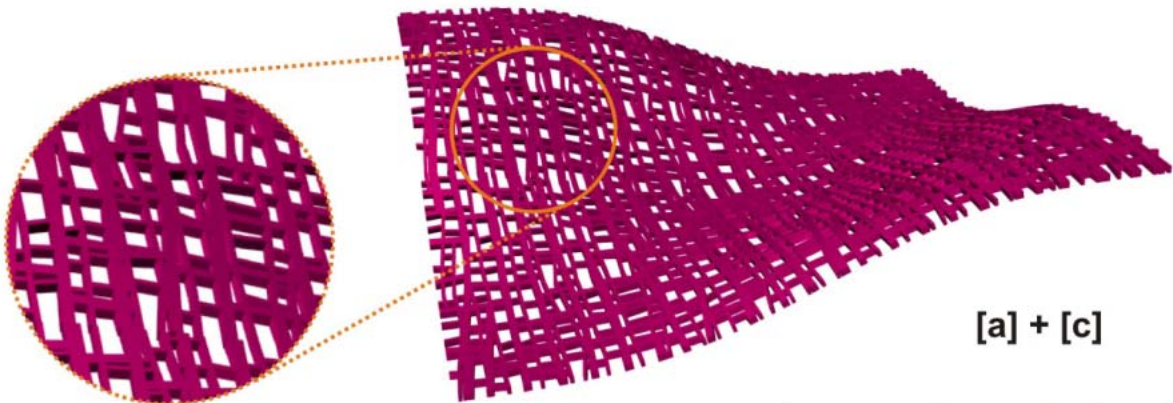


**[c]**  
U=8, V=4

**escalas de panelling**



**[a] + [b]**

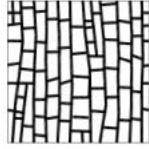
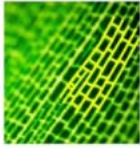


**[a] + [c]**

**sobreposições**

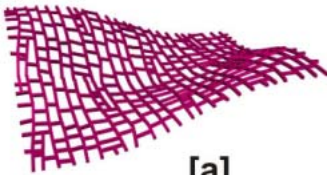


# A-02

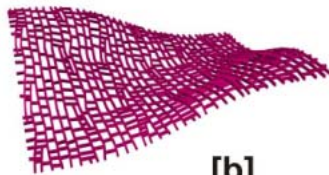


Padrão > Folha  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > Plano

**condicionantes**



**[a]**  
U=4, V=2

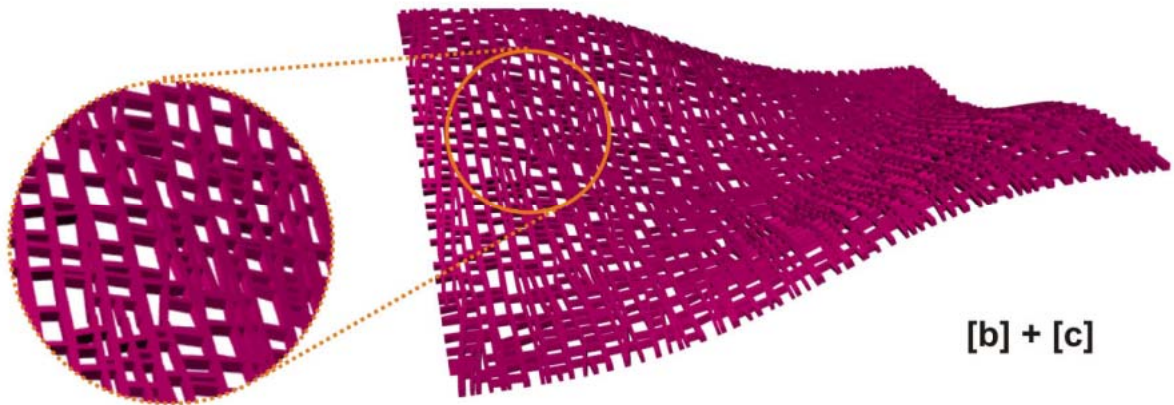


**[b]**  
U=6, V=3

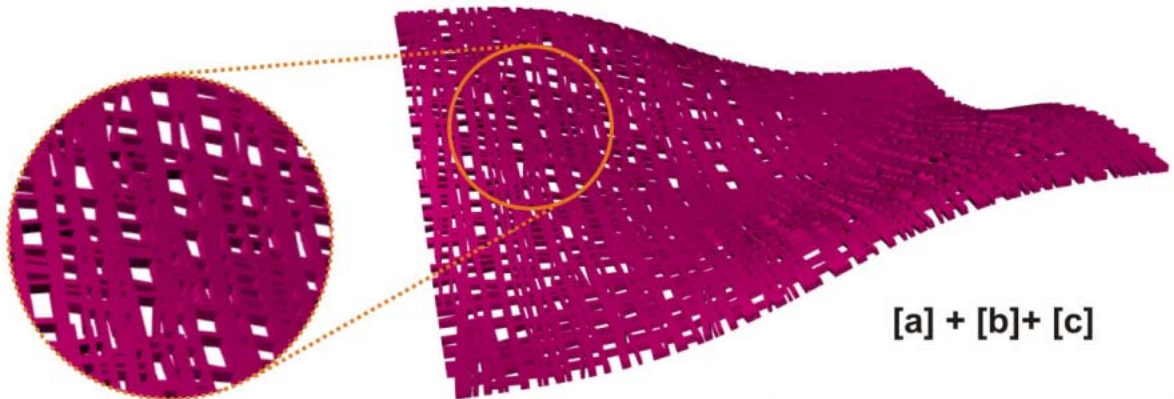


**[c]**  
U=8, V=4

**escalas de panelling**



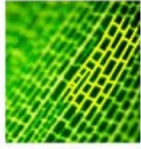
**[b] + [c]**



**[a] + [b] + [c]**

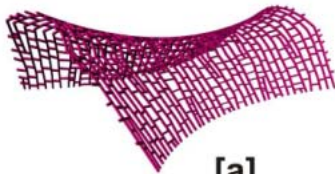
**sobreposições**

# A-03

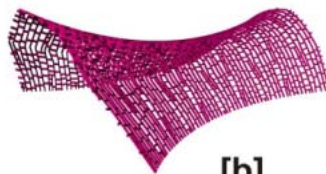


Padrão > Folha  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > HyPar

**condicionantes**



**[a]**  
U=3, V=3

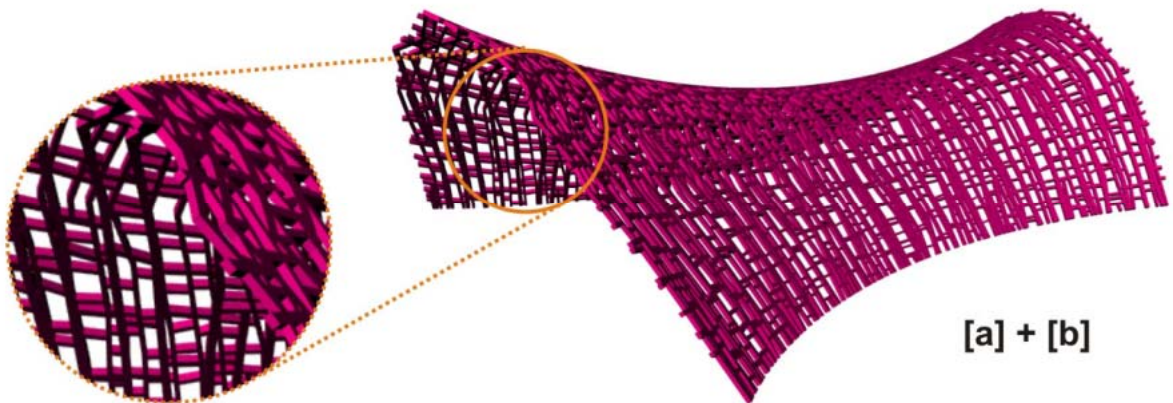


**[b]**  
U=5, V=5

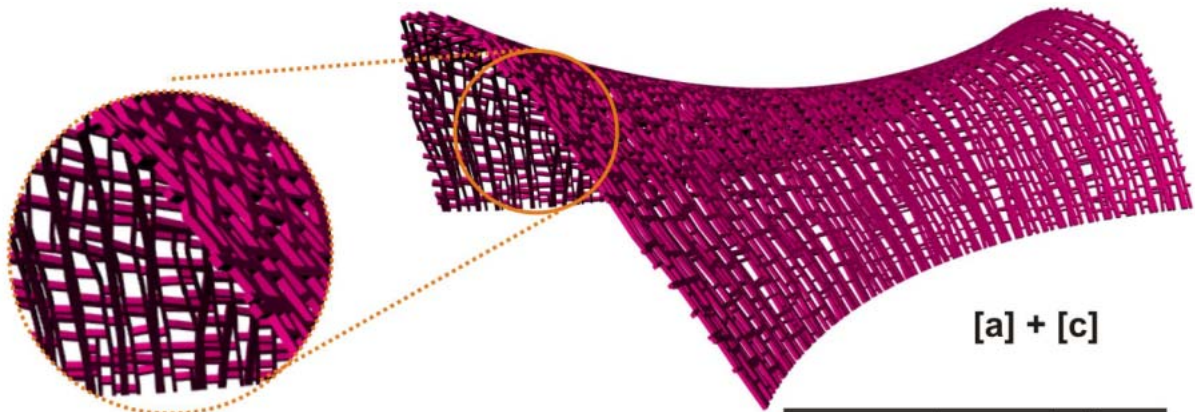


**[c]**  
U=6, V=6

**escalas de panelling**



**[a] + [b]**

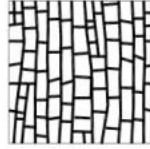
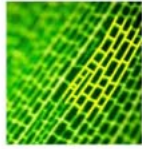


**[a] + [c]**

**sobreposições**

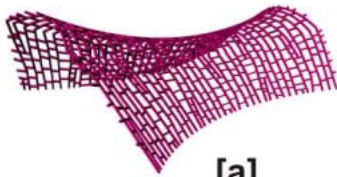


# A-04

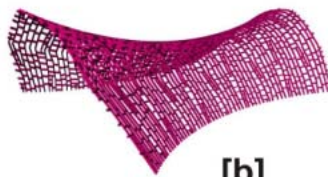


Padrão > Folha  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > Hypar

**condicionantes**



**[a]**  
U=3, V=3

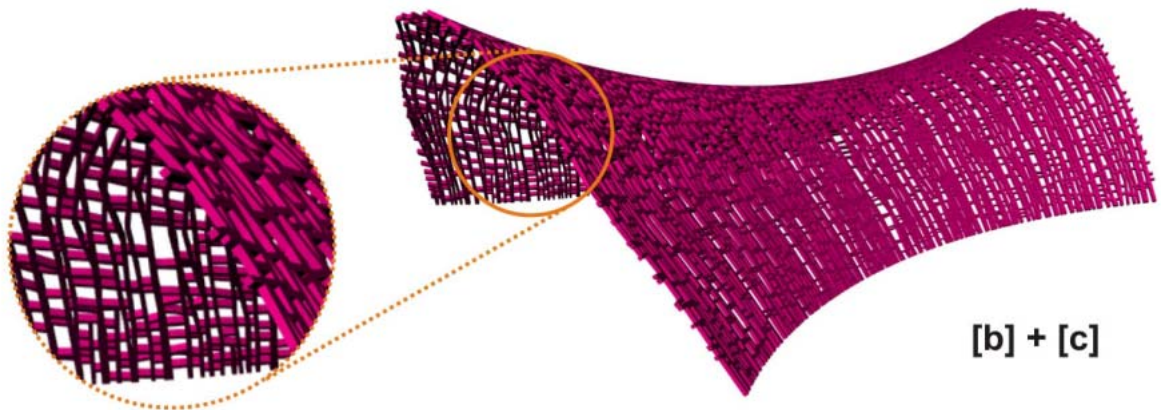


**[b]**  
U=5, V=5

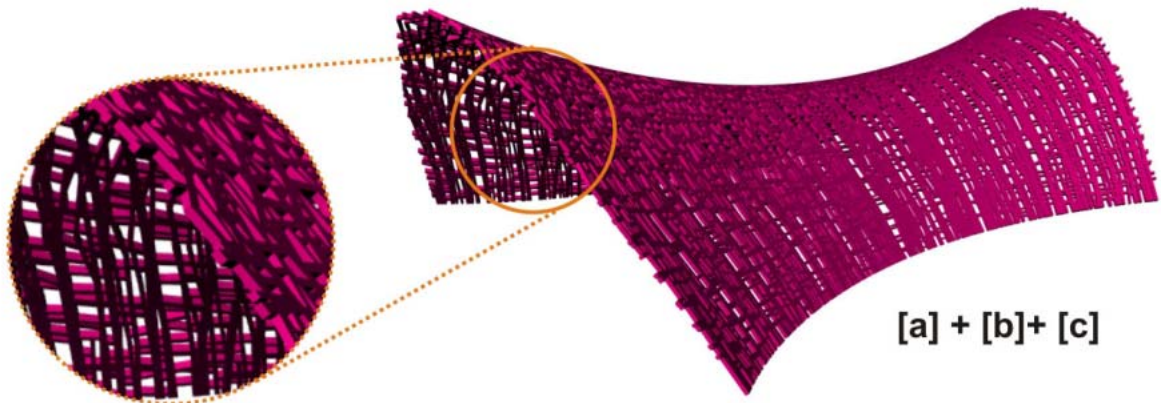


**[c]**  
U=6, V=6

**escalas de panelling**



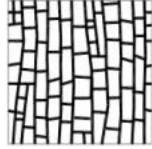
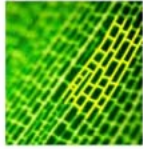
**[b] + [c]**



**[a] + [b] + [c]**

**sobreposições**

# A-05



Padrão > Folha  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > Moebius

**condicionantes**



**[a]**  
U=7, V=2

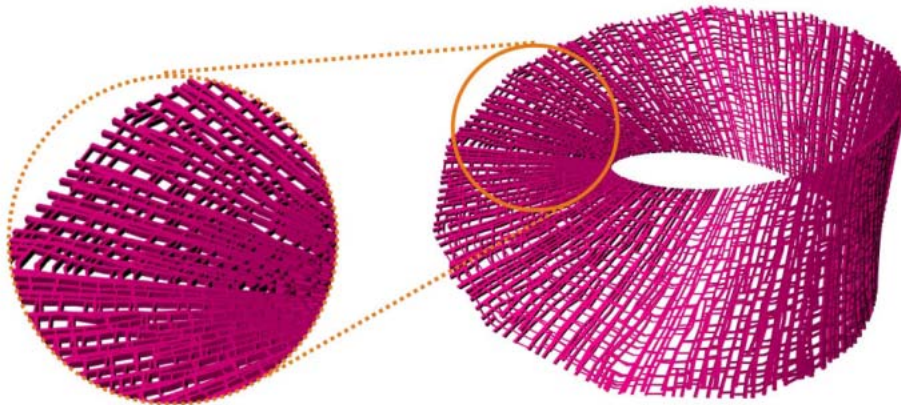


**[b]**  
U=11, V=3

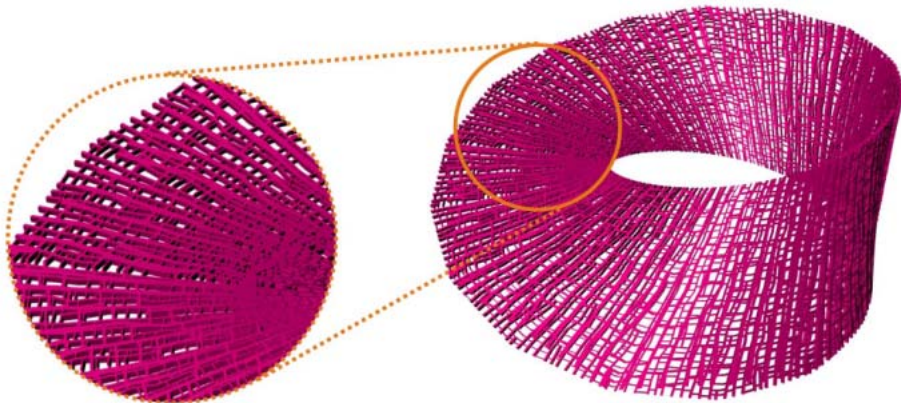


**[c]**  
U=15, V=4

**escalas de panelling**



**[a] + [b]**

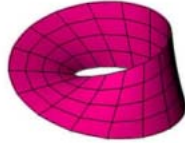
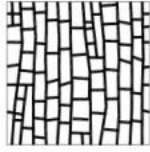
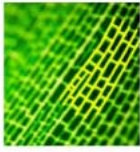


**[a] + [c]**

**sobreposições**



# A-06



Padrão > Folha  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > Moebius

**condicionantes**



[a]

U=7, V=2



[b]

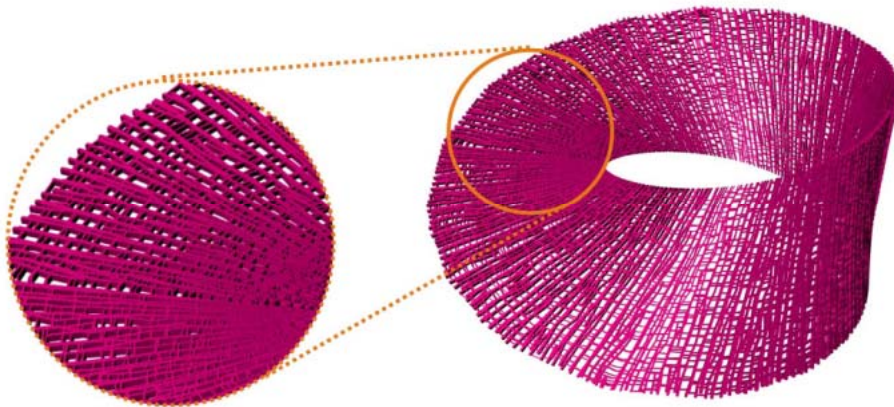
U=11, V=3



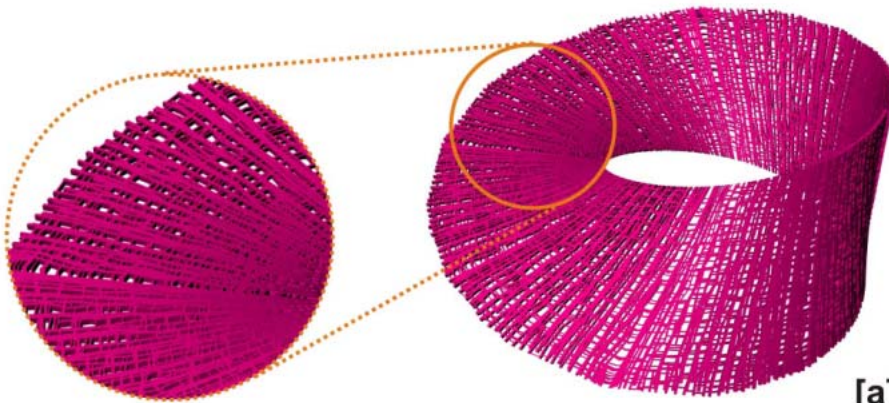
[c]

U=15, V=4

**escalas de panelling**



[b] + [c]



[a] + [b] + [c]

**sobreposições**

# A-07

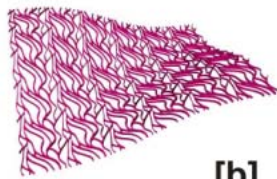


Padrão > Cogumelo  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > Plano

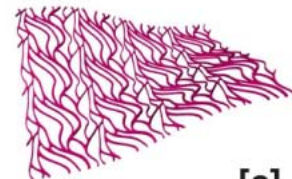
**condicionantes**



**[a]**  
U=2, V=2

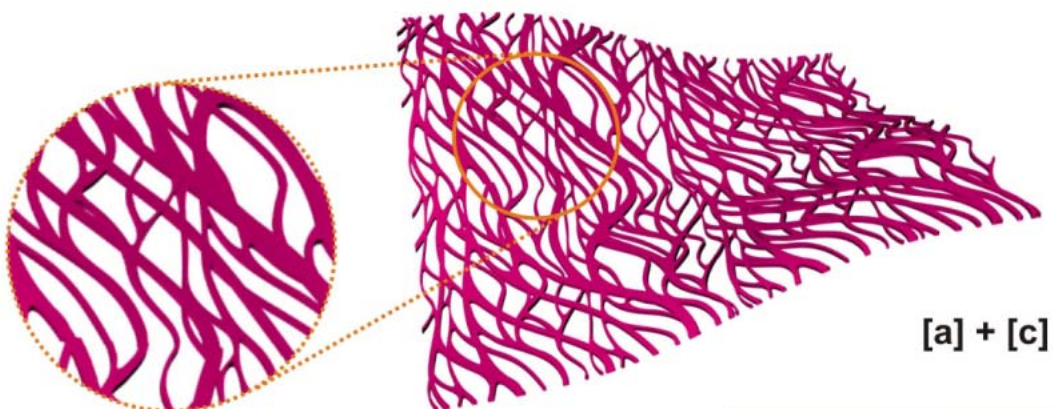
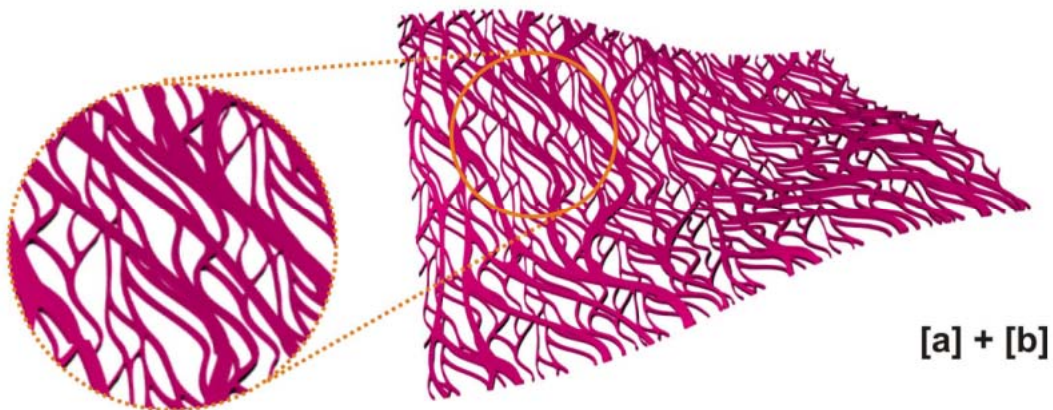


**[b]**  
U=6, V=6



**[c]**  
U=4, V=4

**escalas de panelling**



**sobreposições**

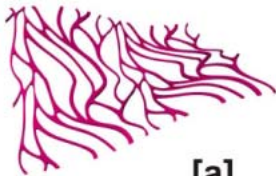


# A-08

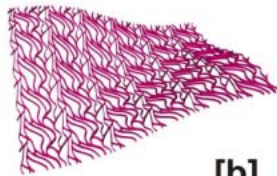


Padrão > Cogumelo  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > Plano

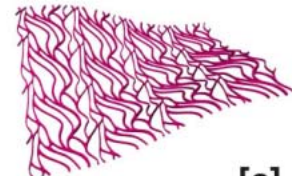
**condicionantes**



**[a]**  
U=2, V=2

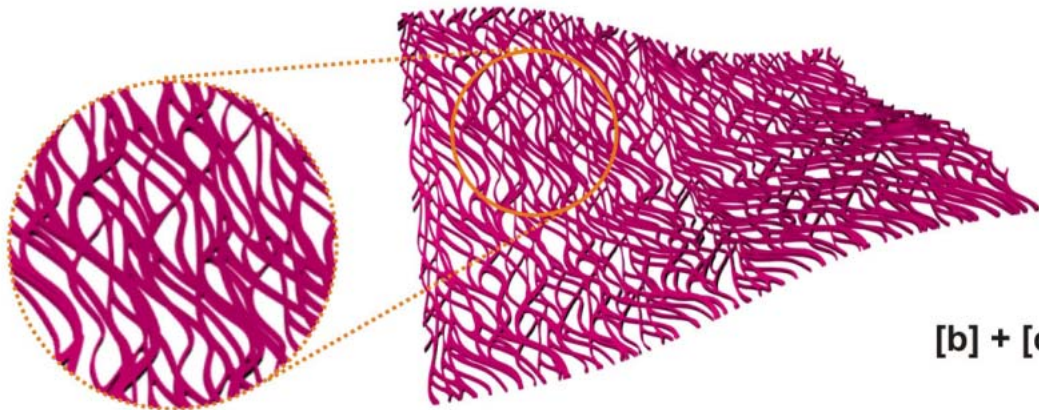


**[b]**  
U=6, V=6

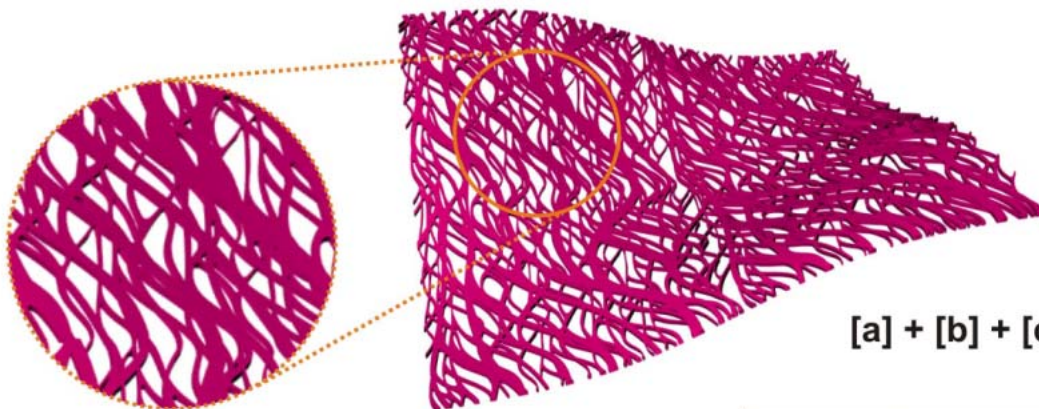


**[c]**  
U=4, V=4

**escalas de panelling**



**[b] + [c]**



**[a] + [b] + [c]**

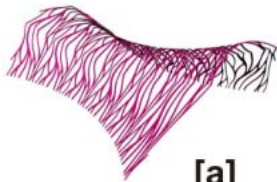
**sobreposições**

# A-09

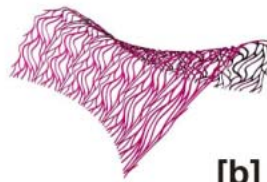


Padrão > Cogumelo  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > Hypar

**condicionantes**



**[a]**  
U=4, V=2

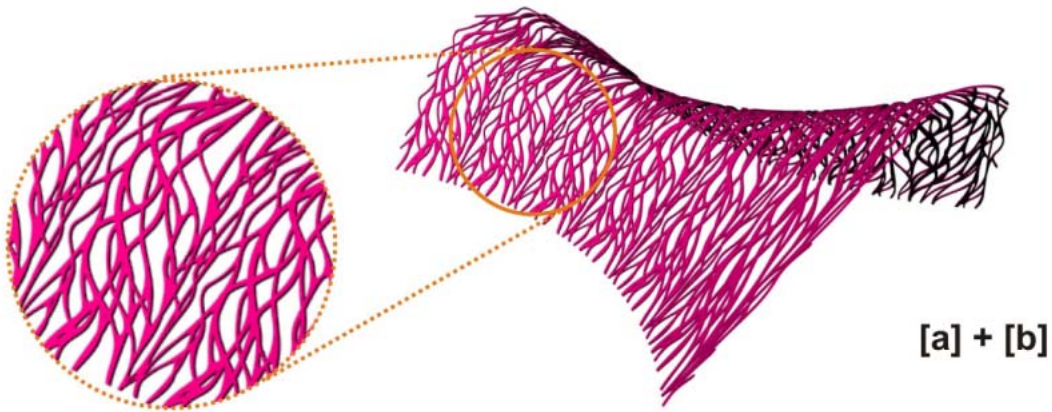


**[b]**  
U=6, V=3

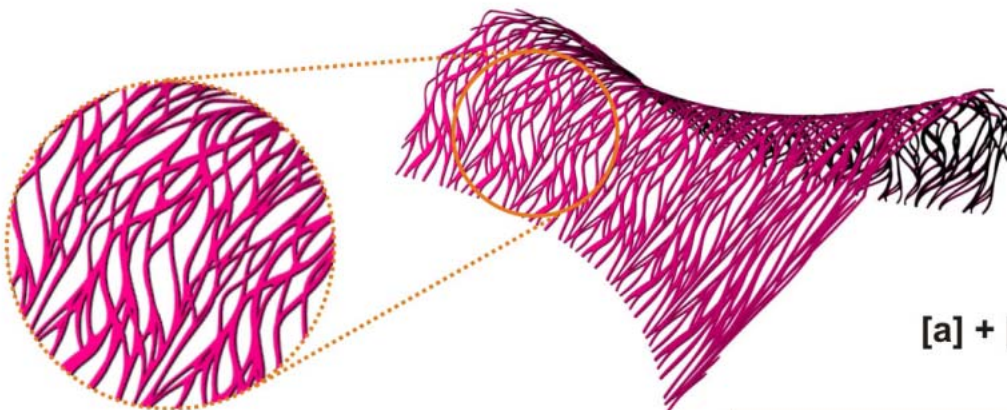


**[c]**  
U=8, V=4

**escalas de panelling**



**[a] + [b]**



**[a] + [c]**

**sobreposições**

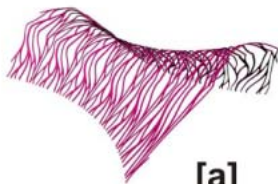


# A-10

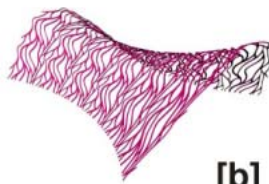


Padrão > Cogumelo  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > Hypar

**condicionantes**



**[a]**  
U=4, V=2

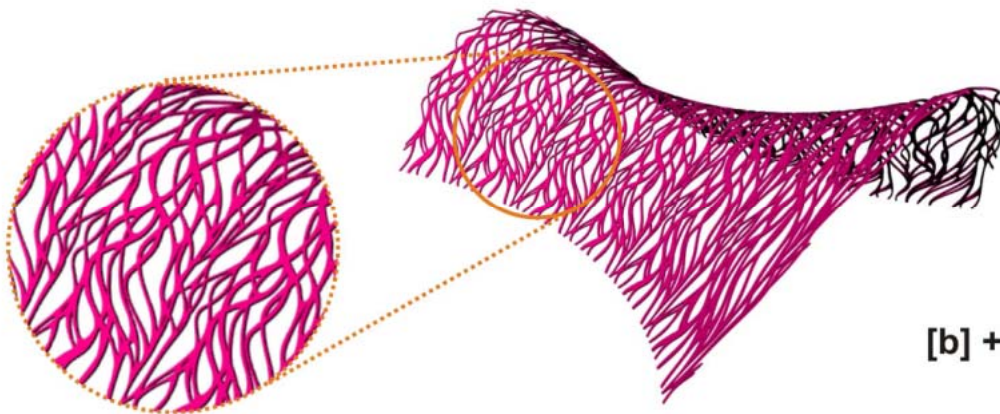


**[b]**  
U=6, V=3

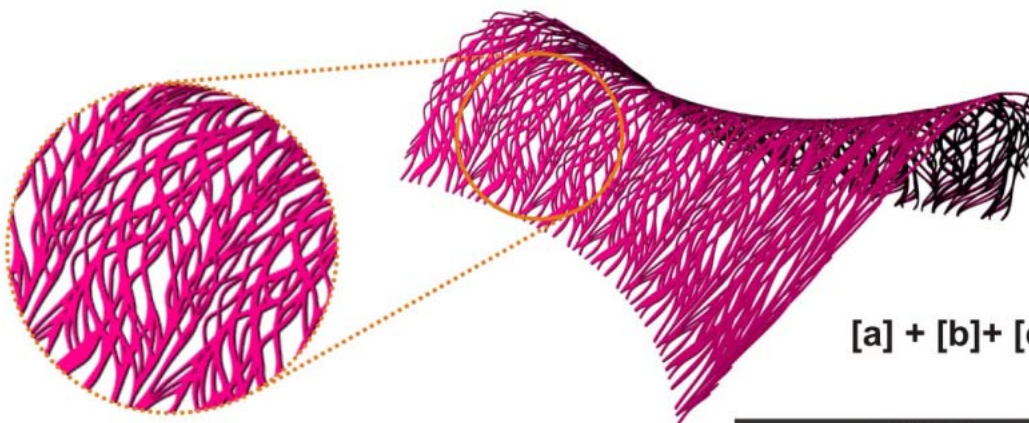


**[c]**  
U=8, V=4

**escalas de panelling**



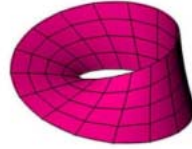
**[b] + [c]**



**[a] + [b] + [c]**

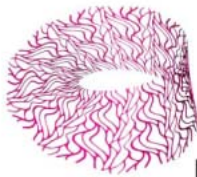
**sobreposições**

# A-11



Padrão > Cogumelo  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > Moebius

**condicionantes**



**[a]**

U=10, V=3



**[b]**

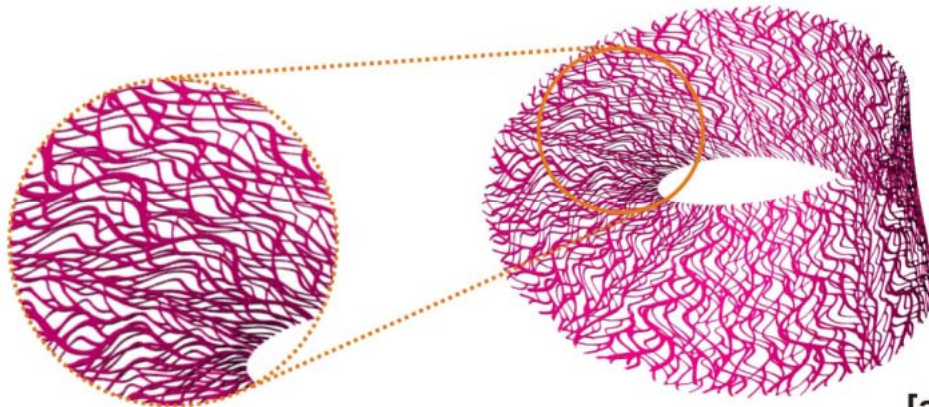
U=14, V=6



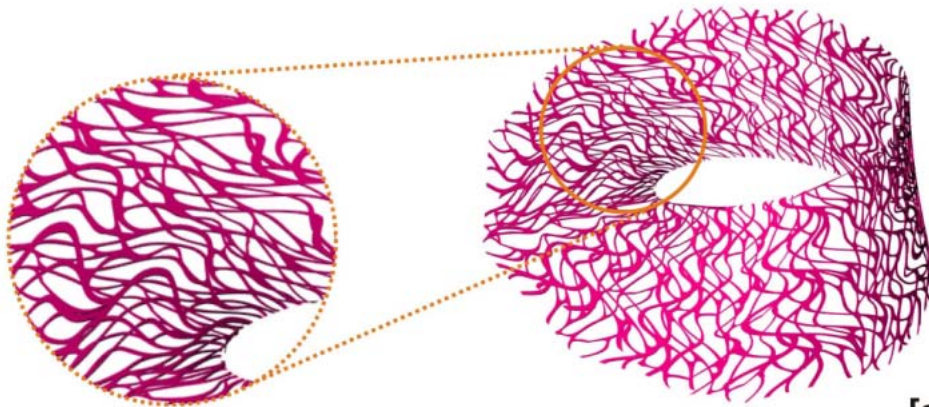
**[c]**

U=6, V=3

**escalas de panelling**



**[a] + [b]**

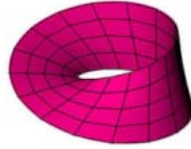


**[a] + [c]**

**sobreposições**

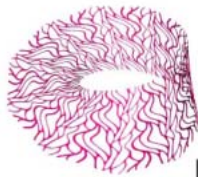


# A-12



Padrão > Cogumelo  
Módulo > Quadrado  
Modelo de Superfície > Moebius

**condicionantes**



**[a]**  
U=10, V=3

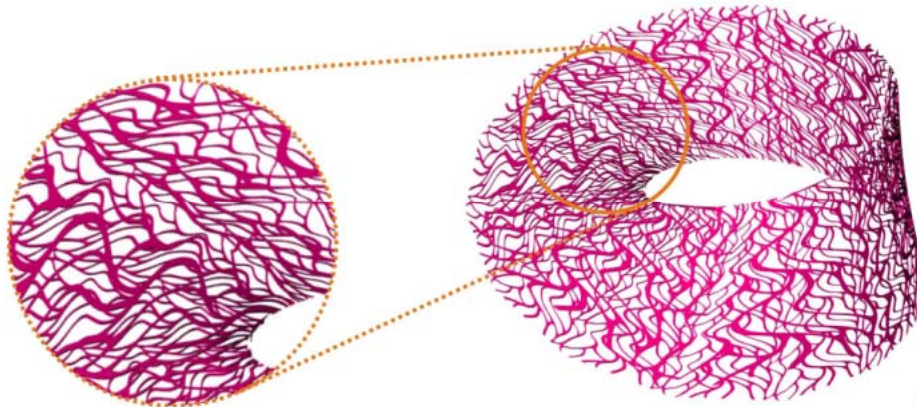


**[b]**  
U=14, V=6

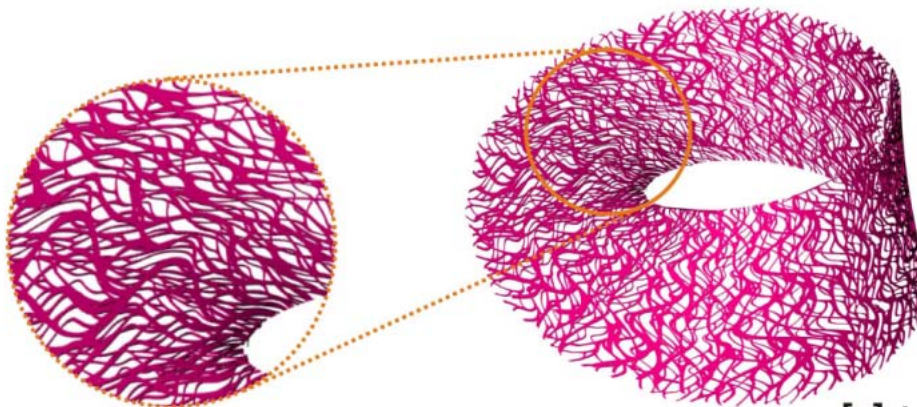


**[c]**  
U=6, V=3

**escalas de panelling**



**[b] + [c]**



**[a] + [b] + [c]**

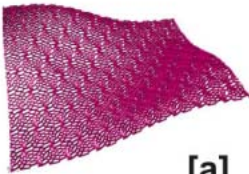
**sobreposições**

# A-13

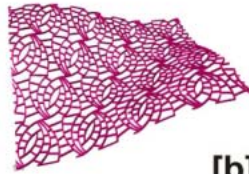


Padrão > Bananeira  
Módulo > Triângulo  
Modelo de Superfície > Plano

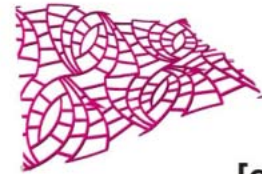
**condicionantes**



**[a]**  
U=5, V=9

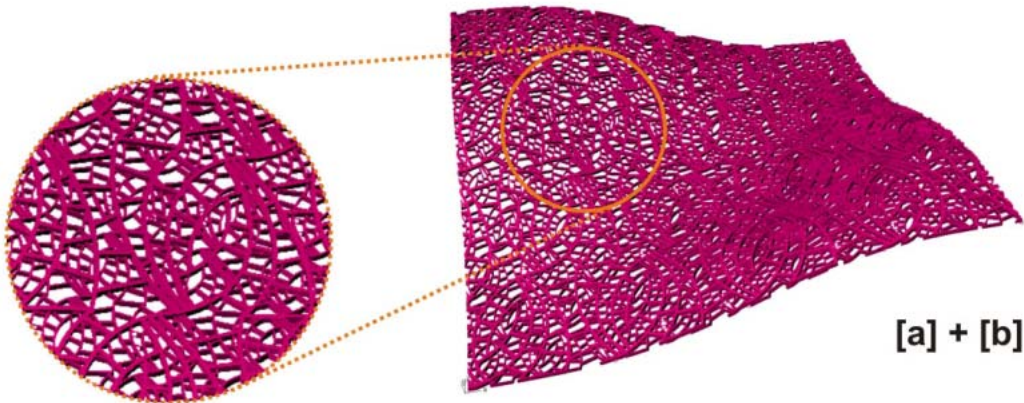


**[b]**  
U=2, V=4

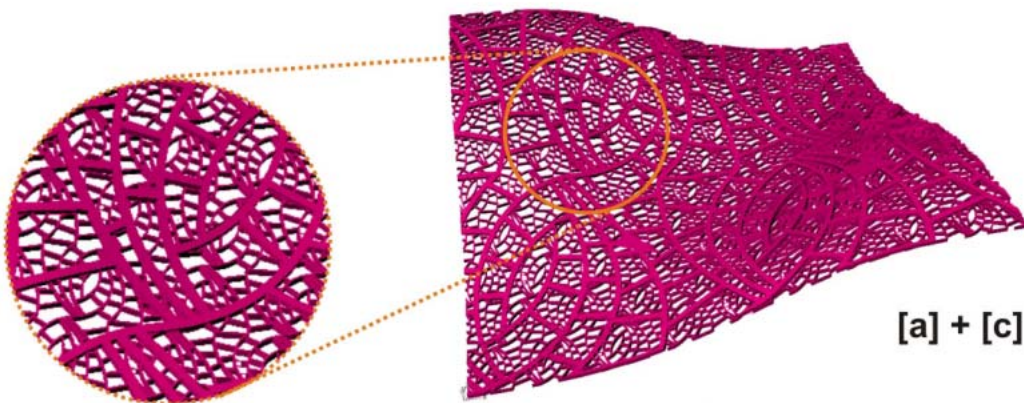


**[c]**  
U=1, V=2

**escalas de panelling**



**[a] + [b]**



**[a] + [c]**

**sobreposições**

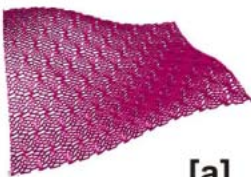


# A-14

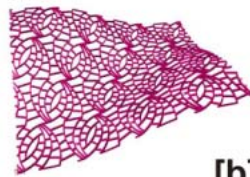


Padrão > Bananeira  
Módulo > Triângulo  
Modelo de Superfície > Plano

**condicionantes**



**[a]**  
U=5, V=9

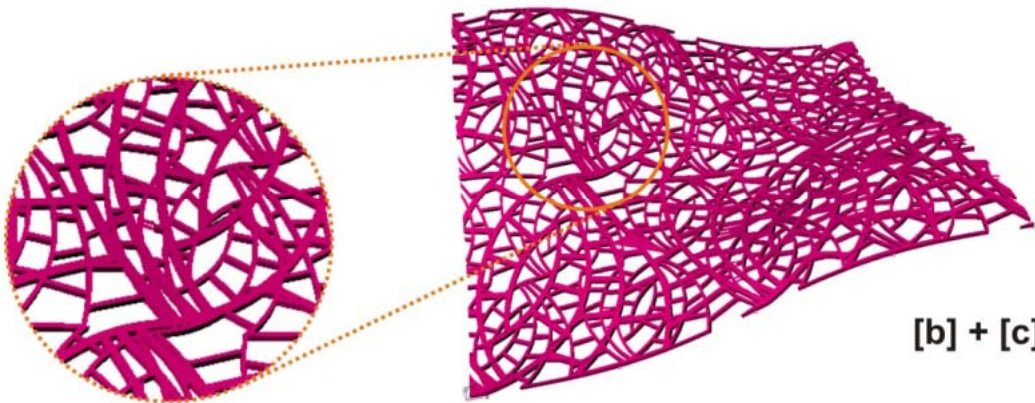


**[b]**  
U=2, V=4

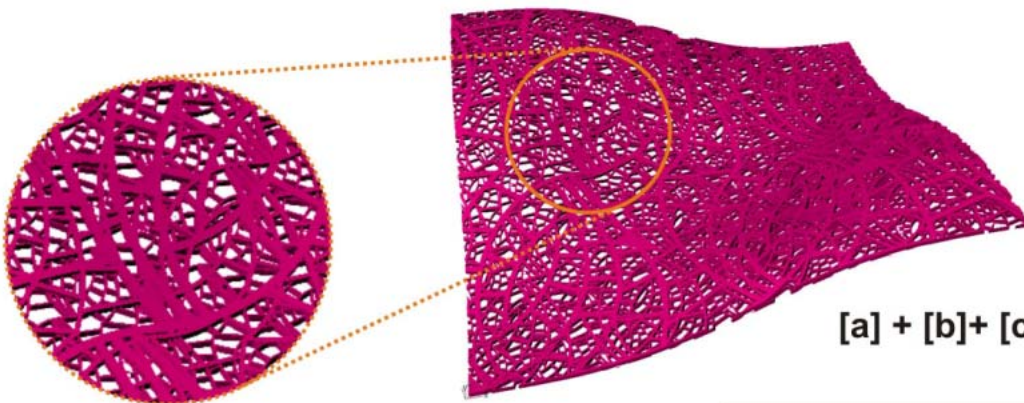


**[c]**  
U=1, V=2

**escalas de panelling**



**[b] + [c]**



**[a] + [b] + [c]**

**sobreposições**

# A-15



Padrão > Bananeira  
Módulo > Triângulo  
Modelo de Superfície > Hypar

**condicionantes**



**[a]**  
U=3, V=3

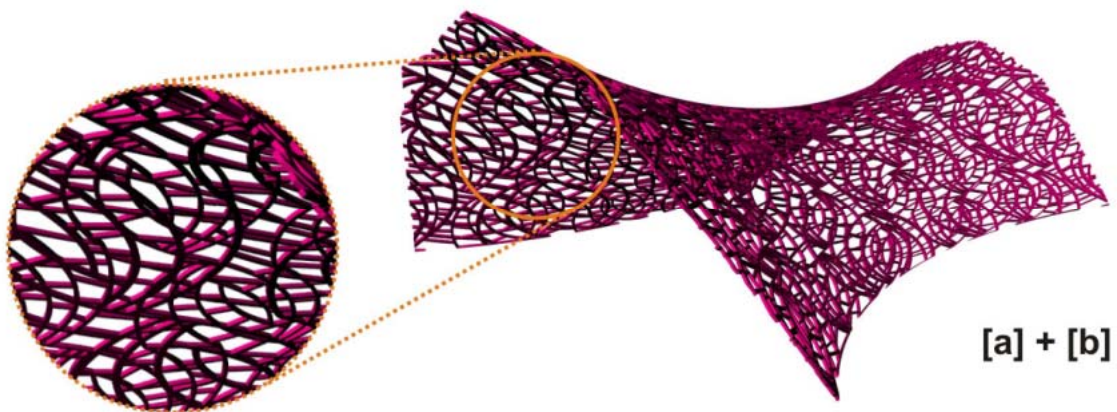


**[b]**  
U=5, V=5

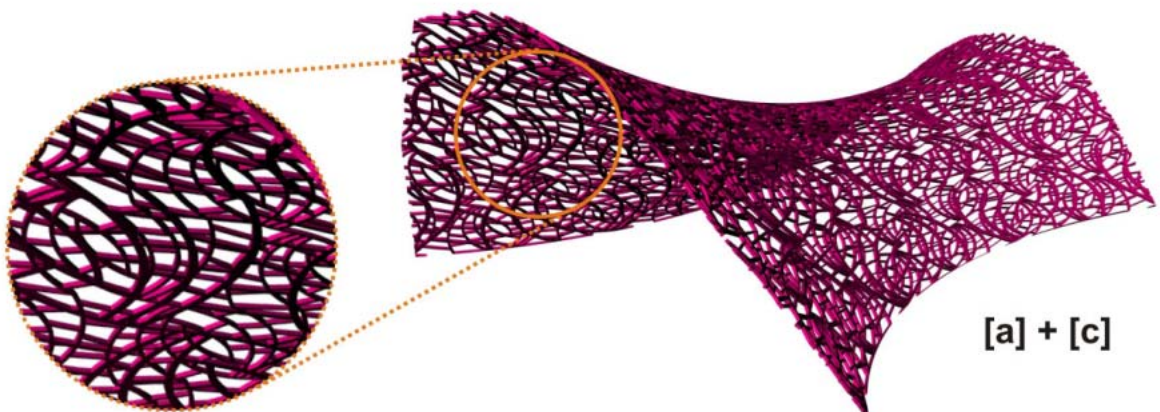


**[c]**  
U=6, V=6

**escalas de panelling**



**[a] + [b]**



**[a] + [c]**

**sobreposições**



# A-16

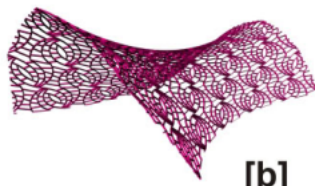


Padrão > Bananeira  
Módulo > Triângulo  
Modelo de Superfície > Hypar

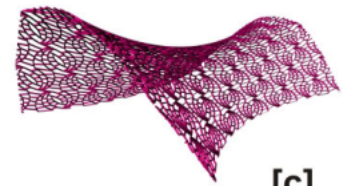
**condicionantes**



**[a]**  
U=3, V=3

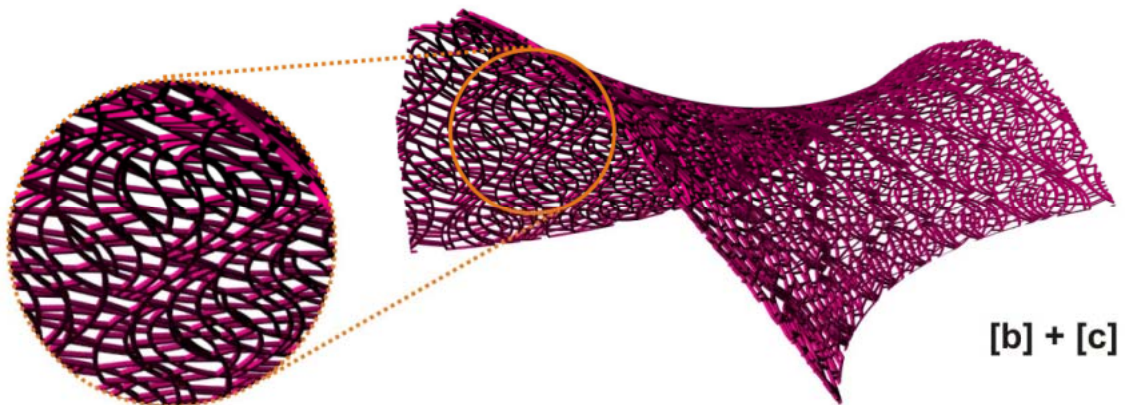


**[b]**  
U=5, V=5

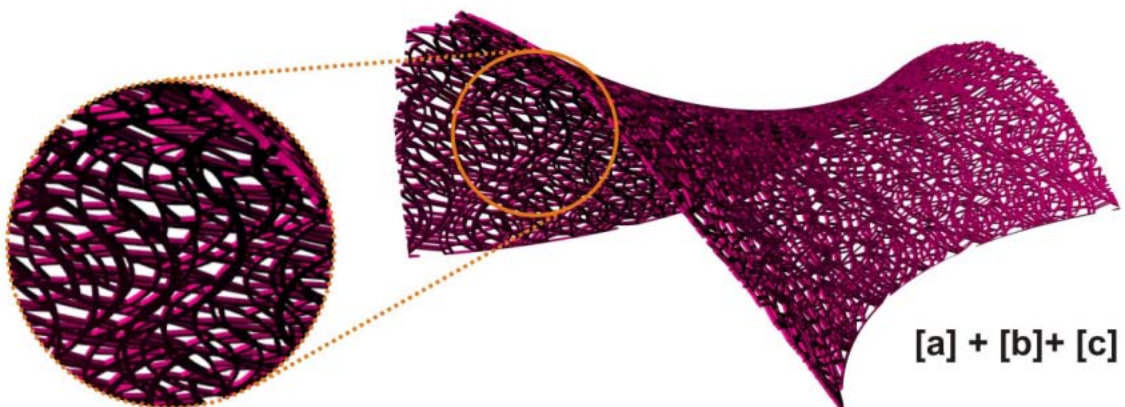


**[c]**  
U=6, V=6

**escalas de panelling**



**[b] + [c]**



**[a] + [b] + [c]**

**sobreposições**

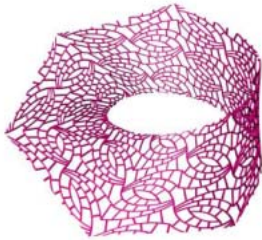


# A-17



Padrão > Bananeira  
Módulo > Triângulo  
Modelo de Superfície > Moebius

**condicionantes**



**[a]**  
U=3, V=3

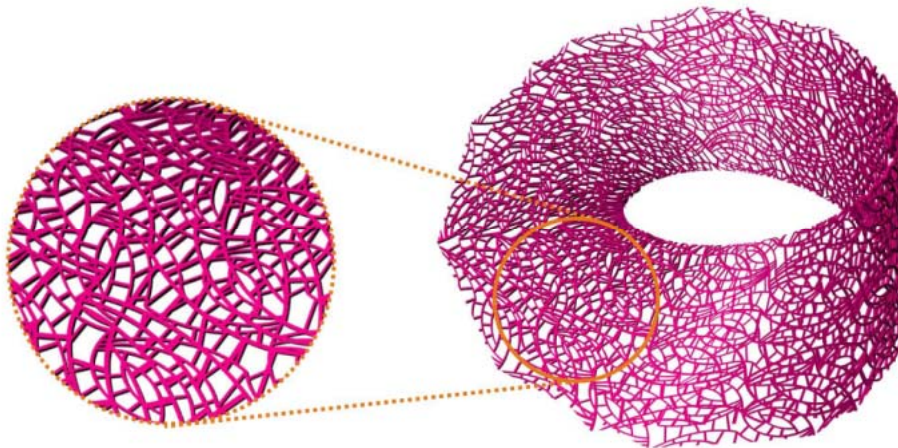


**[b]**  
U=5, V=5

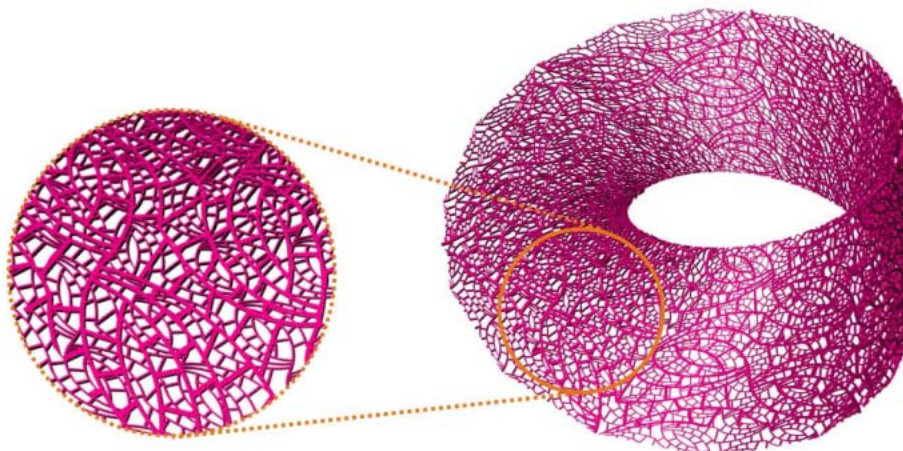


**[c]**  
U=6, V=6

**escalas de panelling**



**[a] + [b]**



**[a] + [c]**

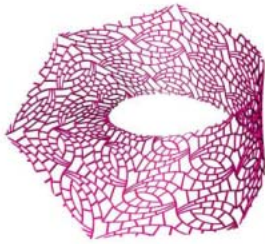
**sobreposições**

# A-18



Padrão > Bananeira  
Módulo > Triângulo  
Modelo de Superfície > Moebius

**condicionantes**



**[a]**  
U=3, V=3

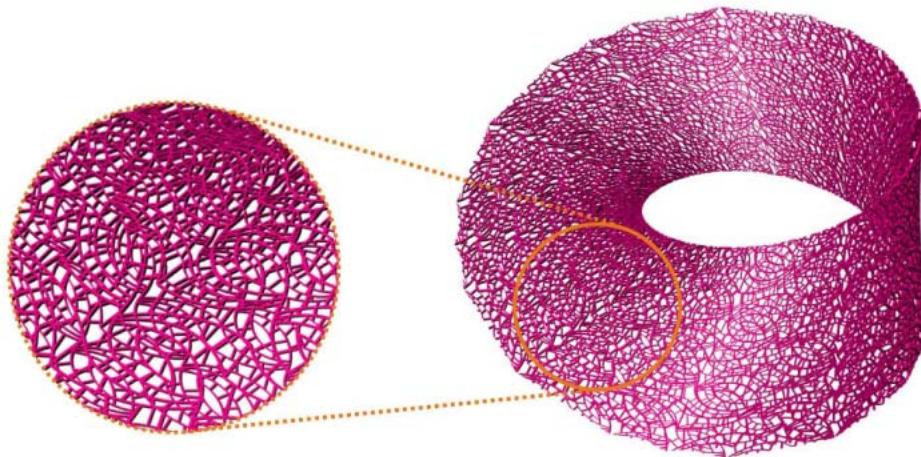


**[b]**  
U=5, V=5

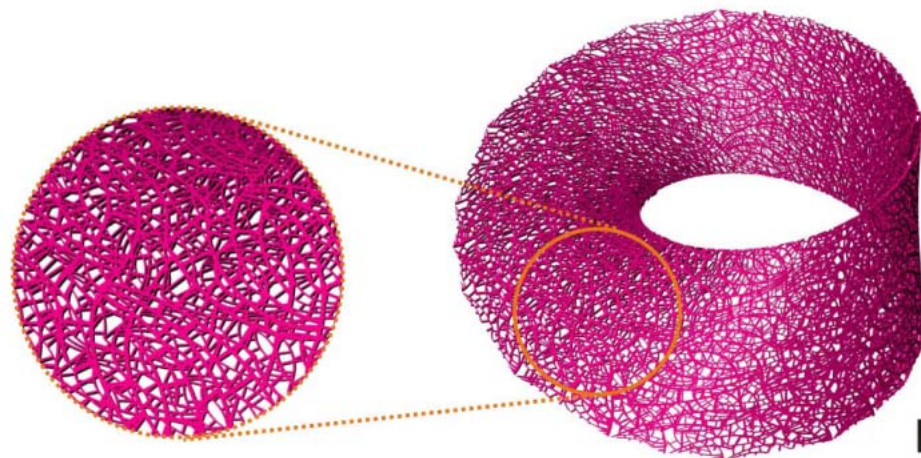


**[c]**  
U=6, V=6

**escalas de panelling**



**[b] + [c]**

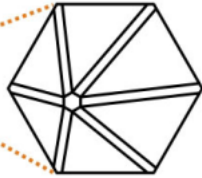


**[a] + [b] + [c]**

**sobreposições**

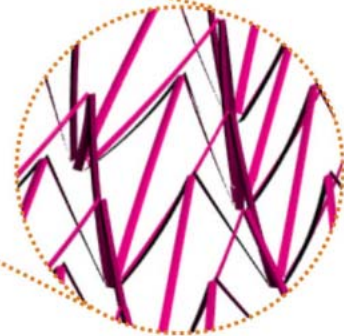
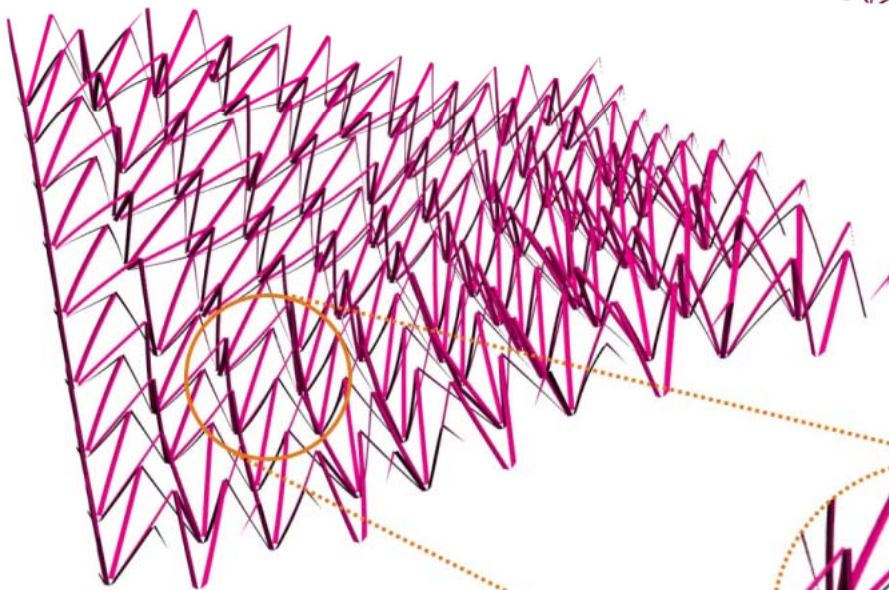
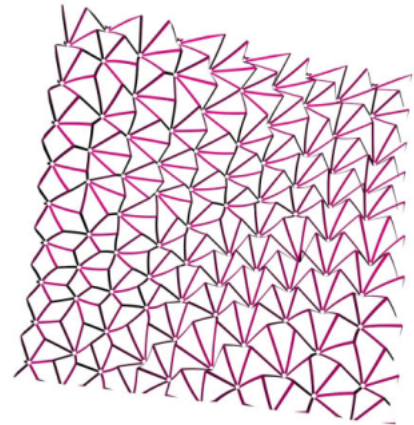


# A-19



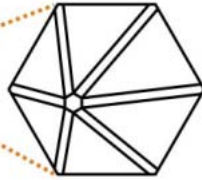
Padrão > Dente de Leão  
Módulo > Hexágono  
Modelo de Superfície > Plano

**condicionantes**



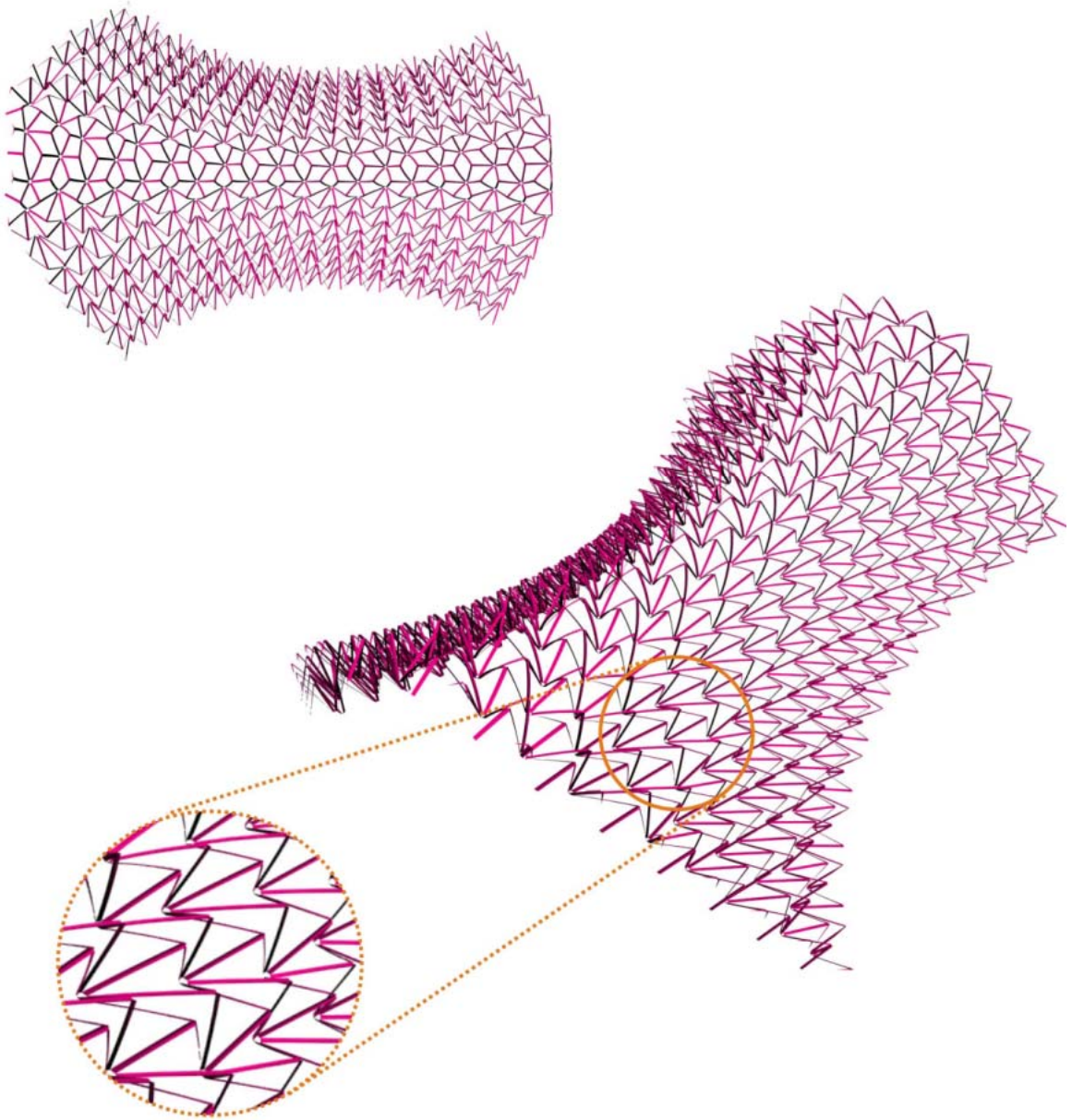
**aplicação de panelling**

# A-20



Padrão > Dente de Leão  
Módulo > Hexágono  
Modelo de Superfície > Hypar

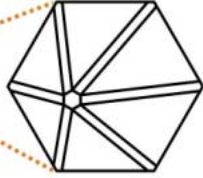
**condicionantes**



**aplicação de panelling**

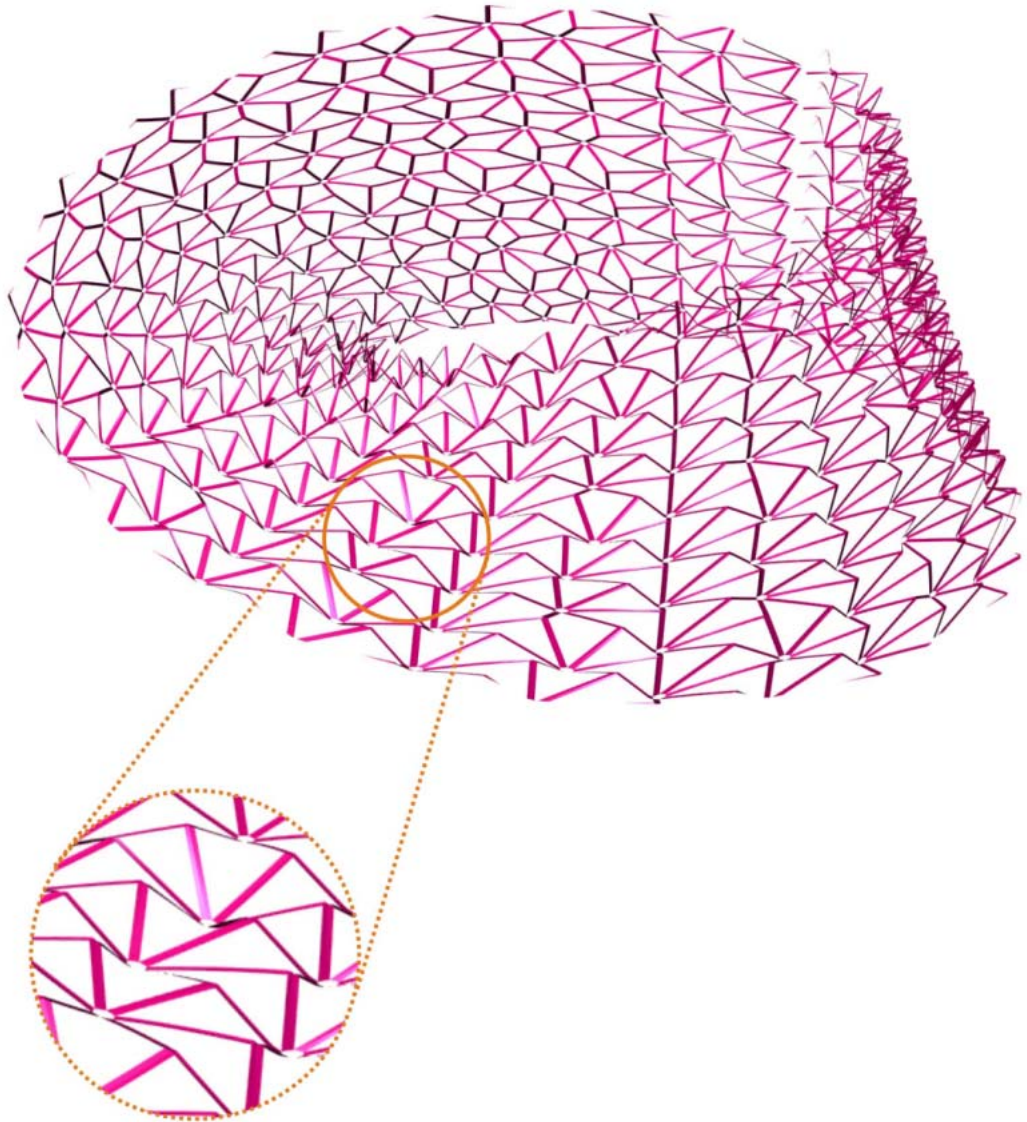


# A-21



Padrão > Dente de Leão  
Módulo > Hexágono  
Modelo de Superfície > Moebius

**condicionantes**



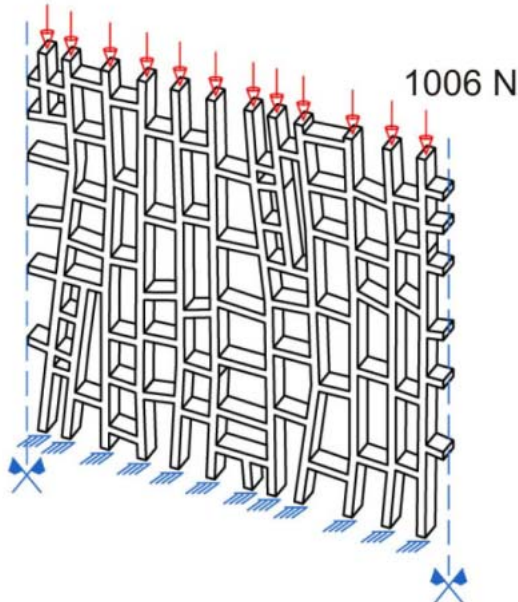
**aplicação de panelling**

# APÊNDICE B

## FICHAS RELATIVAS À AVALIAÇÃO ESTRUTURAL – PRÉ-TESTE

- B-01** Pré-Teste de Compressão aplicado sobre o módulo Folha 1
- B-02** Pré-Teste de Tração aplicado sobre o módulo Folha 1
- B-03** Pré-Teste de Compressão aplicado sobre o módulo Cogumelo 1
- B-04** Pré-Teste de Tração aplicado sobre o módulo Cogumelo 1

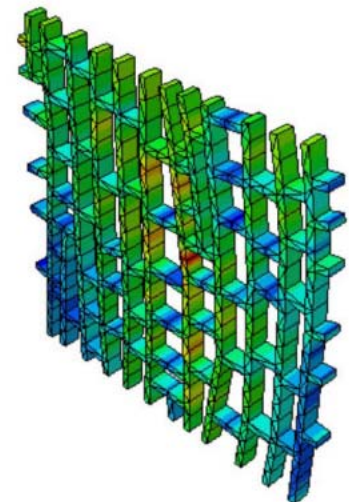
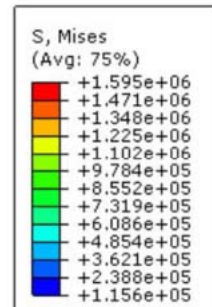
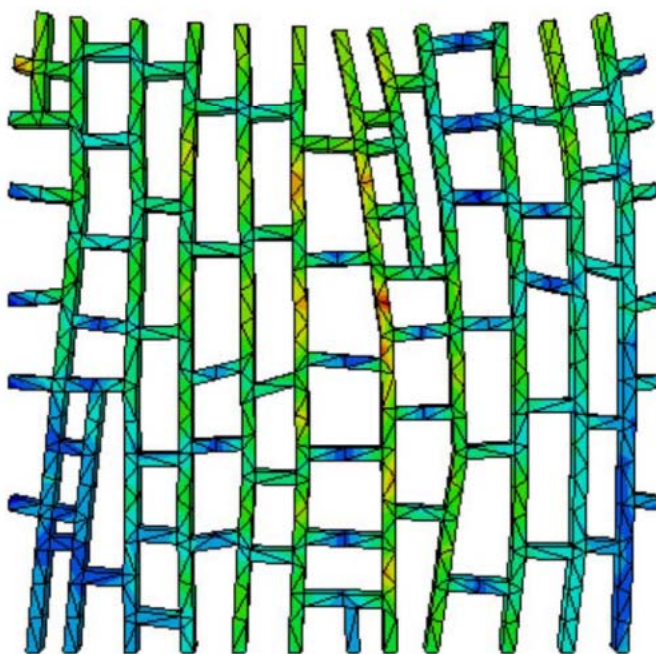
# B-01



- Carga de Tração
- Carga de Compressão
- Eixo de Simetria
- Engaste

E1 = 2,0 cm; H1 = 5,0 cm  
E2 = 2,0 cm; H2 = 5,0 cm  
Volume = 0,0157 m3  
Peso por módulo = 123,40 kg  
Peso Total = 1230,40 kg  
Carga Total = 12070.224 N  
Carga pontual = 1006 N

## condicionantes



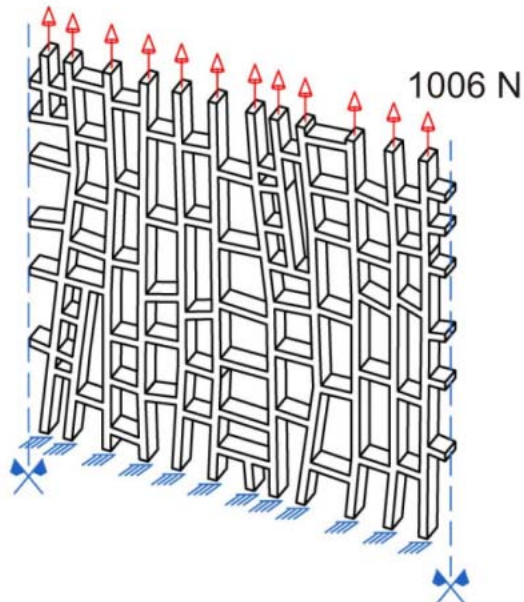
Padrão > Folha 1 [ Pré-Teste]





Carga > Compressão

## resultados



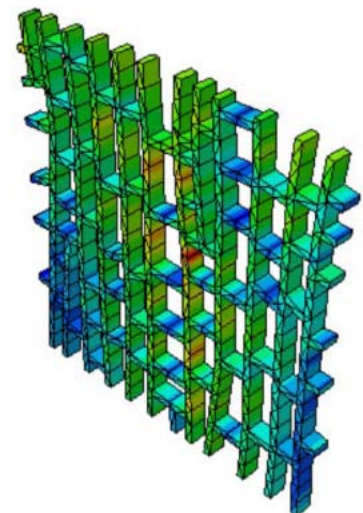
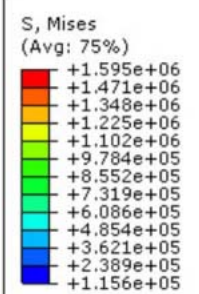
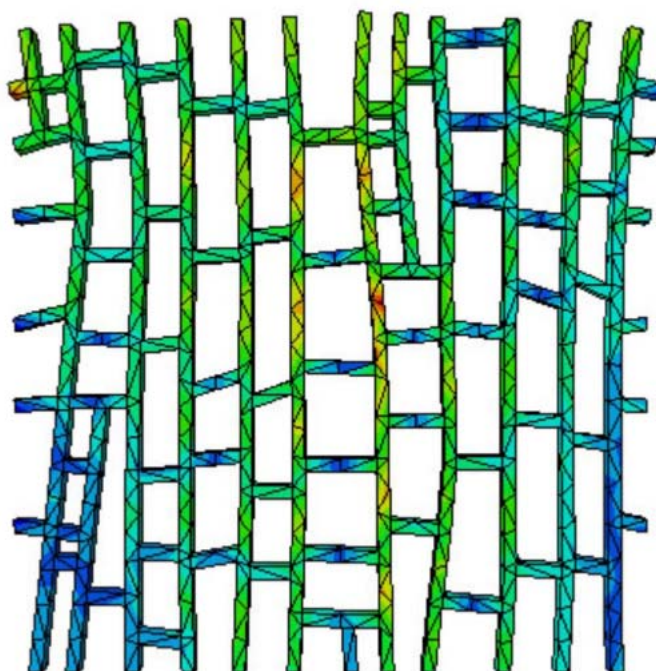
## B-02



Carga de Tração   
Carga de Compressão   
Eixo de Simetria   
Engaste 

E1 = 2,0 cm; H1 = 5,0 cm  
E2 = 2,0 cm; H2 = 5,0 cm  
Volume = 0,0157 m<sup>3</sup>  
Peso por módulo = 123,40 kg  
Peso Total = 1230,40 kg  
Carga Total = 12070.224 N  
Carga pontual = 1006 N

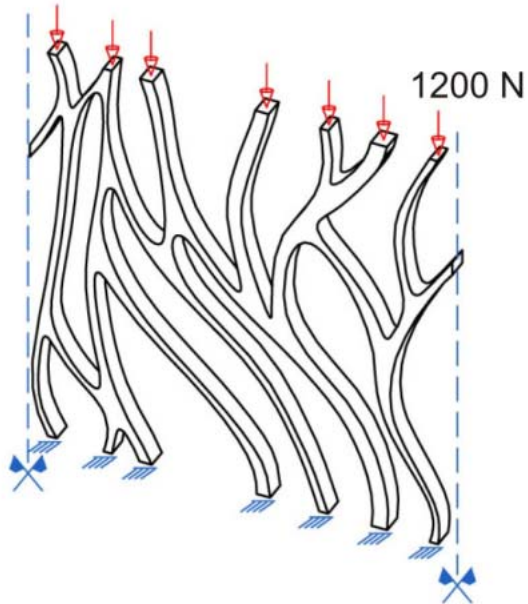
**condicionantes**







Padrão > Folha 1 [ Pré-Teste]  
Carga > Tração

**resultados**

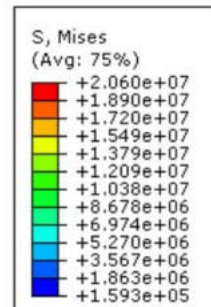
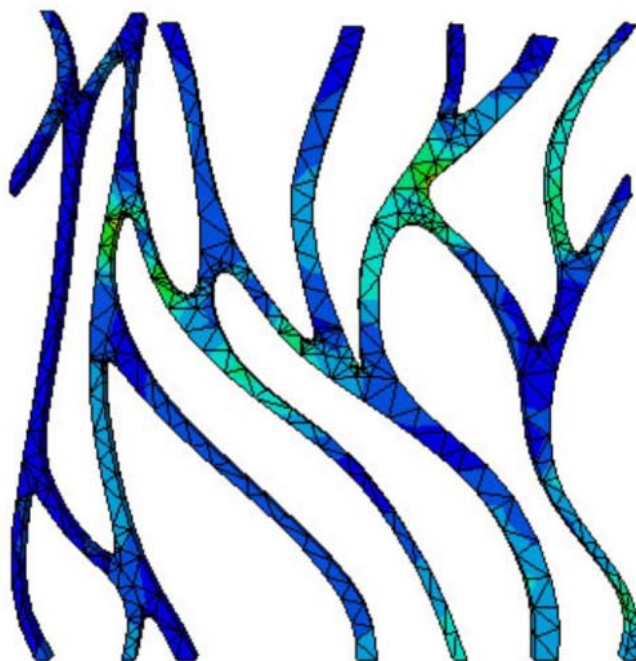
## B-03



Carga de Tração   
Carga de Compressão   
Eixo de Simetria   
Engaste 

$E1 = 2,0 \text{ cm}$ ;  $H1 = 5,0 \text{ cm}$   
Volume =  $0,0109 \text{ m}^3$   
Peso por módulo =  $85,67 \text{ kg}$   
Peso Total =  $856,70 \text{ kg}$   
Carga Total =  $8404.227 \text{ N}$   
Carga pontual =  $1200 \text{ N}$

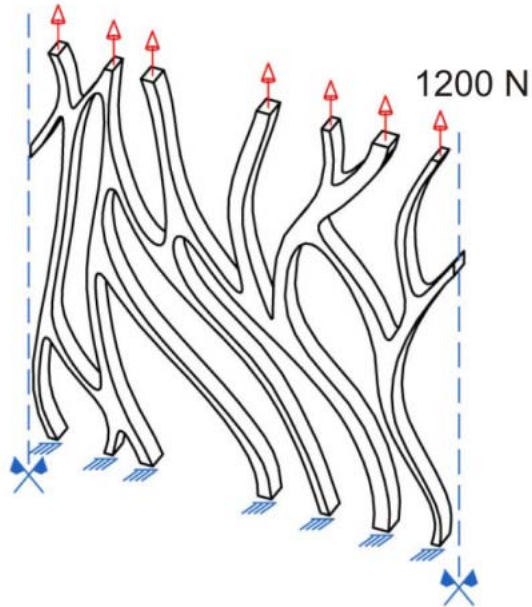
**condicionantes**



Padrão > Cogumelo 1 [ Pré-Teste]  
Carga > Compressão

**resultados**

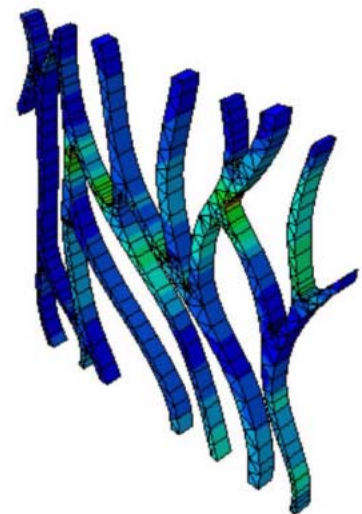
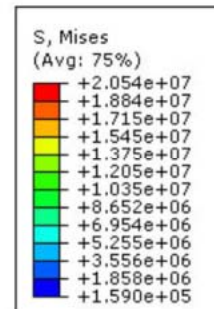
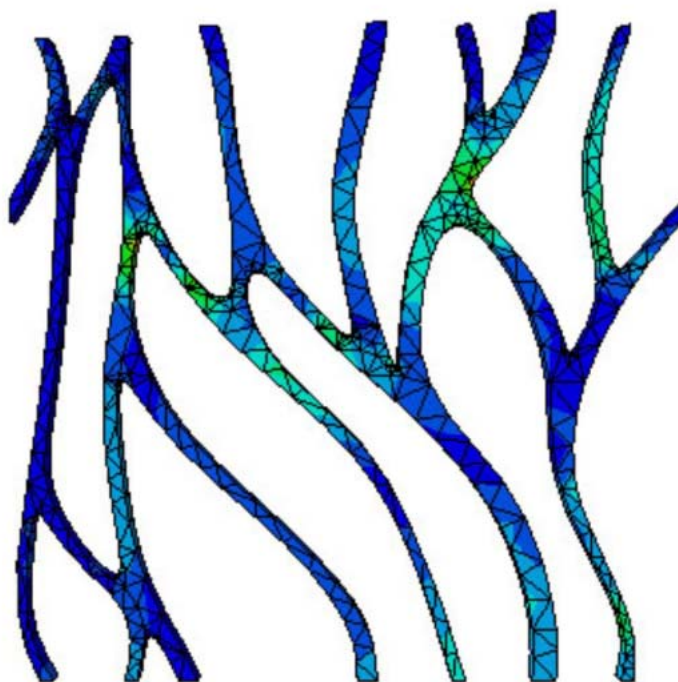
# B-04



- Carga de Tração
- Carga de Compressão
- Eixo de Simetria
- Engaste

E1 = 2,0 cm; H1 = 5,0 cm  
Volume = 0,0109 m3  
Peso por módulo = 85,67 kg  
Peso Total = 856,70 kg  
Carga Total = 8404.227 N  
Carga pontual = 1200 N

## condicionantes



Padrão > Cogumelo 1 [ Pré-Teste]  
Carga > Tração

## resultados

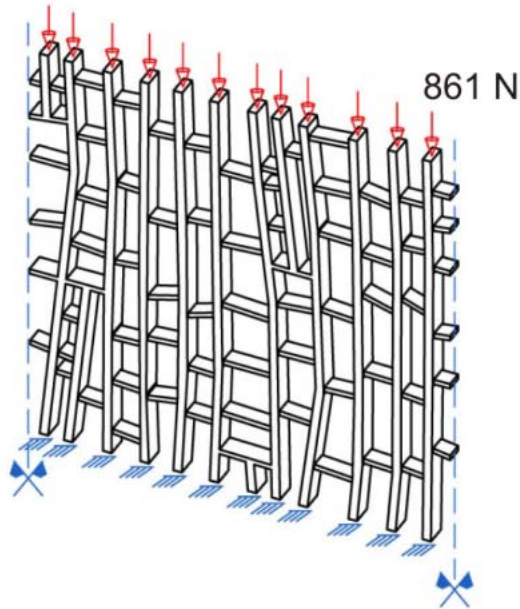
# APÊNDICE C

## FICHAS RELATIVAS À AVALIAÇÃO ESTRUTURAL – PÓS-TESTE

- C-01** Pós-Teste de Compressão aplicado sobre o módulo Folha 2
- C-02** Pós-Teste de Tração aplicado sobre o módulo Folha 2
- C-03** Pós-Teste de Compressão aplicado sobre o módulo Cogumelo 2
- C-04** Pós-Teste de Tração aplicado sobre o módulo Cogumelo 2

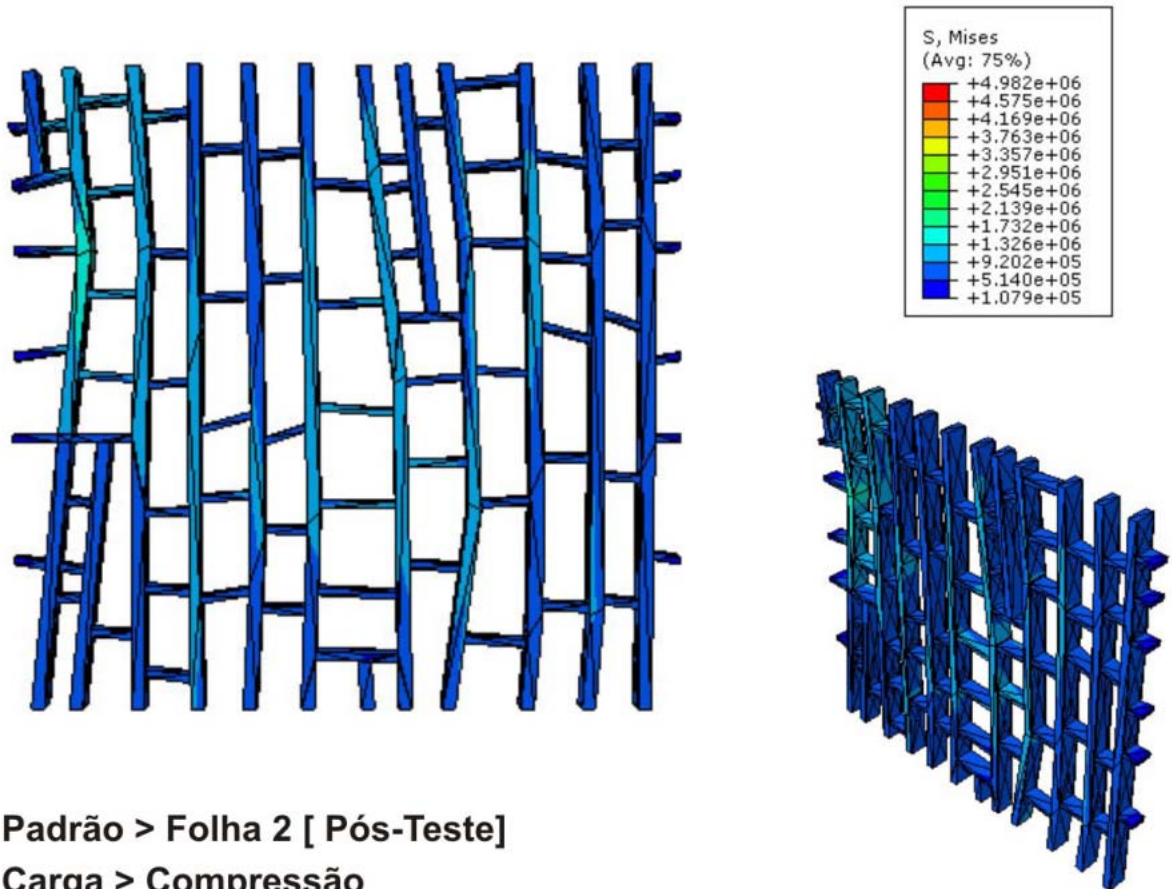


# C-01



- Carga de Tração
  - Carga de Compressão
  - Eixo de Simetria
  - Engaste
- E1 = 2,0 cm; H1 = 5,0 cm**  
**E2 = 1,2 cm; H2 = 4,0 cm**  
**Volume = 0,0134 m3**  
**Peso por módulo = 105,32 kg**  
**Peso Total = 1053,20 kg**  
**Carga Total = 10331.892 N**  
**Carga pontual = 861 N**

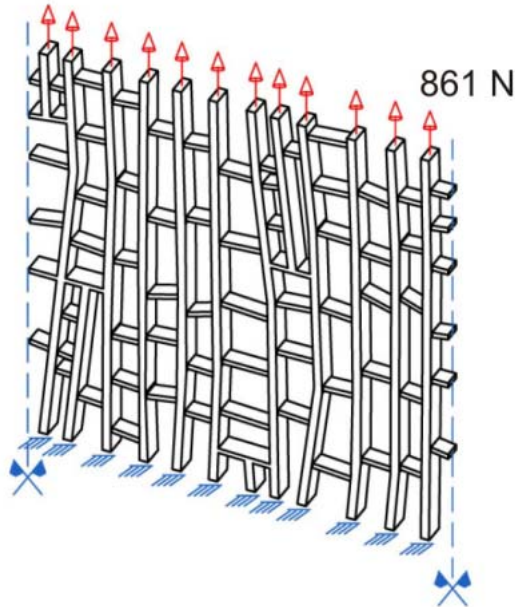
## condicionantes



**Padrão > Folha 2 [ Pós-Teste]**  
**Carga > Compressão**

## resultados

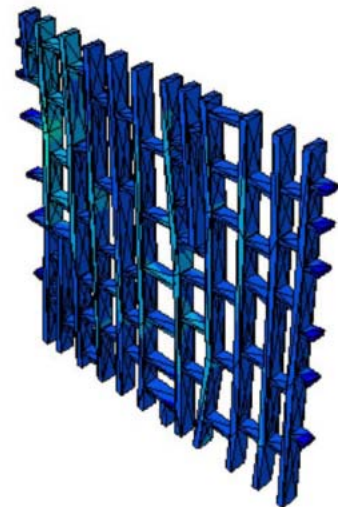
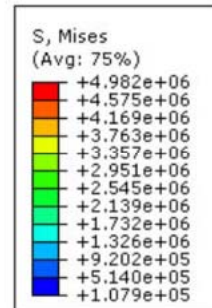
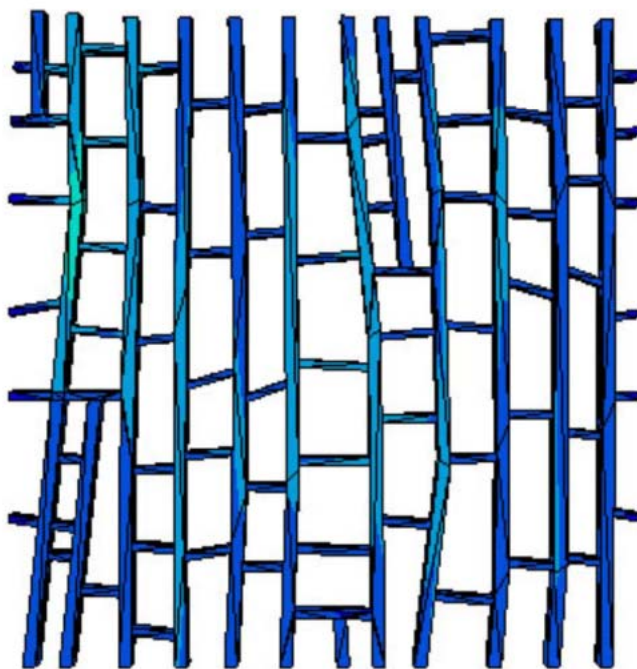
# C-02



- Carga de Tração
- Carga de Compressão
- Eixo de Simetria
- Engaste

E1 = 2,0 cm; H1 = 5,0 cm  
 E2 = 1,2 cm; H2 = 4,0 cm  
 Volume = 0,0134 m<sup>3</sup>  
 Peso por módulo = 105,32 kg  
 Peso Total = 1053,20 kg  
 Carga Total = 10331.892 N  
 Carga pontual = 861 N

## condicionantes

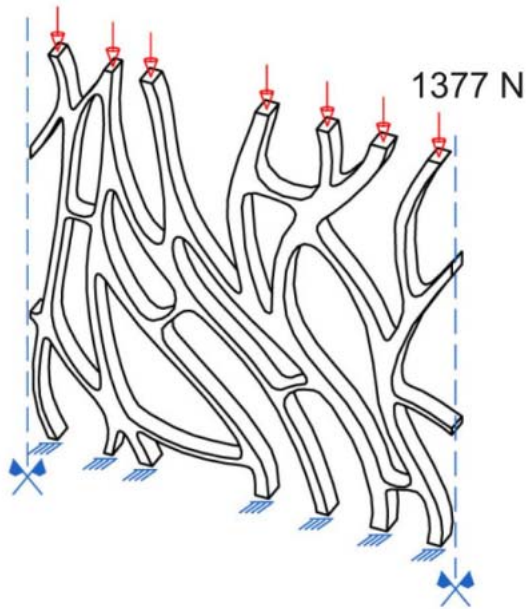


Padrão > Folha 2 [ Pós-Teste]  
 Carga > Tração

## resultados



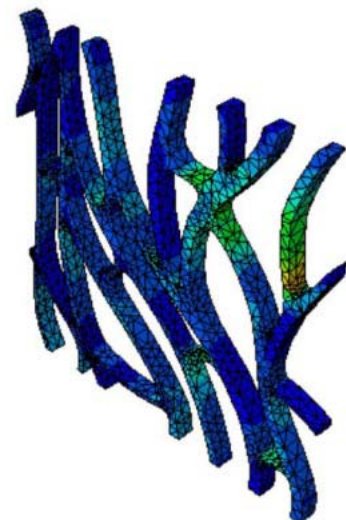
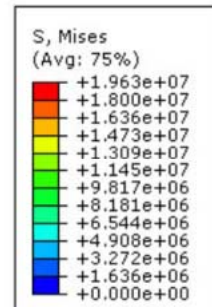
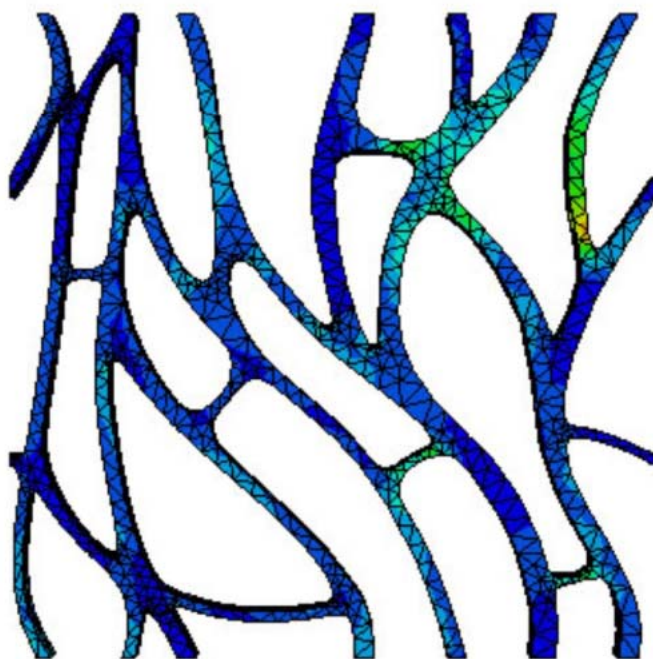
# C-03



- Carga de Tração
- Carga de Compressão
- Eixo de Simetria
- Engaste

E1 = 2,0 cm; H1 = 5,0 cm  
Volume = 0,0125 m3  
Peso por módulo = 98,25 kg  
Peso Total = 982,50 kg  
Carga Total = 9638.325 N  
Carga pontual = 1377 N

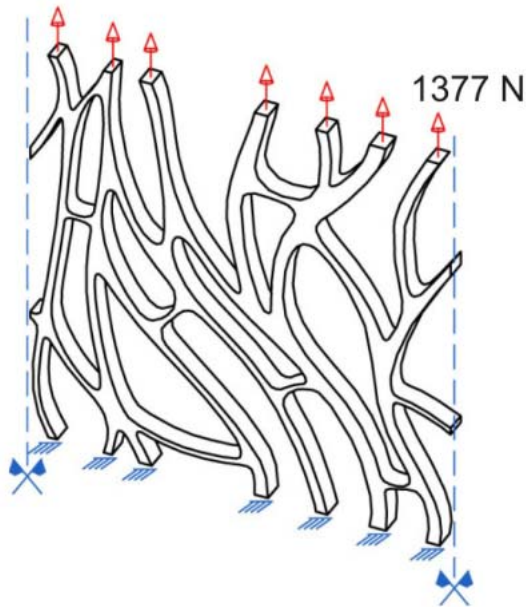
## condicionantes



Padrão > Cogumelo 2 [ Pós-Teste]  
Carga > Compressão

## resultados

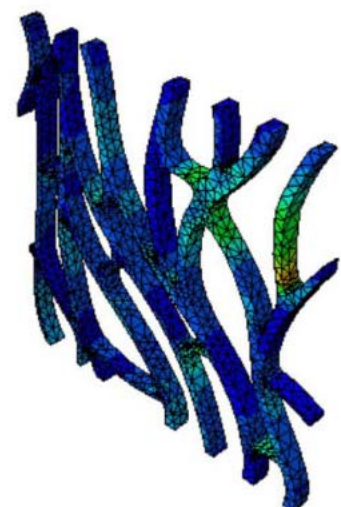
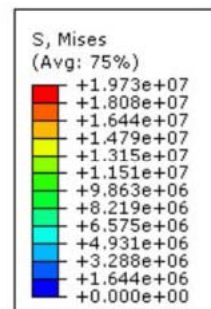
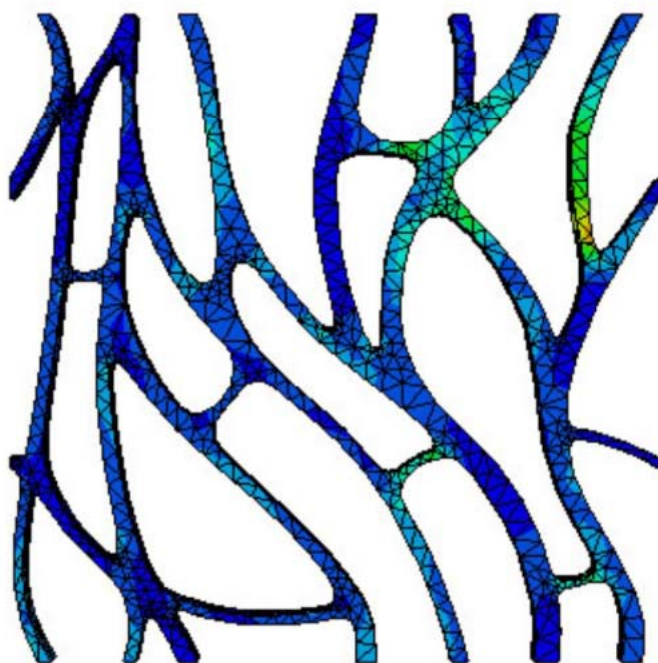
# C-04



- Carga de Tração
- Carga de Compressão
- Eixo de Simetria
- Engaste

E1 = 2,0 cm; H1 = 5,0 cm  
Volume = 0,0125 m3  
Peso por módulo = 98,25 kg  
Peso Total = 982,50 kg  
Carga Total = 9638.325 N  
Carga pontual = 1377 N

## condicionantes



Padrão > Cogumelo 2 [ Pós-Teste]  
Carga > Tração

## resultados

## REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Christopher. **Notes on the synthesis of form**. Harvard University Press. Cambridge. 1979.

ARMERO, Ramón Araújo. **Geometría, técnica y arquitectura**. Tectónica, Edición 2004, Número 17, Junio 2004. Págs 4 -17.

ARNHEIM, Rudolf. **La Forma Visual de la Arquitectura**. Barcelona. 2001.

BALL, Philip. **The self-made tapestry: pattern formation in nature**. New York: Oxford University Press Inc., 1999.

BECHTHOLD, Martin. **Innovative Surface Structures – Technologies and Applications**. Taylor & Francis, New York, 2008.

BENEVOLO, Leonardo. **História da Cidade**. São Paulo: Martins Fontes, 2001.

BENYUS, Janine M. **Biomimicry: Innovation Inspired by Nature**. London: Paperback, 2007.

BERTMAN, Martin. **Kant's Theology and Teleology**. Helsinki University, 2006.

Disponível em:

[www.sdu.dk/~media/Files/Om\\_SDU/Institutter/lfpr/rescogitans/vol3/RC%20%20%20Bertman.aspx](http://www.sdu.dk/~media/Files/Om_SDU/Institutter/lfpr/rescogitans/vol3/RC%20%20%20Bertman.aspx)

BEUNINGS, Janine. **Bionics : nature as a model**. Munich: World Wide Fund for Nature, 1993.

CACHE, Bernard. **Philibert de L'Orme Pavillion: Towards an Associative Architecture**. Architectural Design, Vol. 73, No 2. Mar/Apr 2003. p. 20 – 25.

CANDELA, Felix. **The Hiperbolic Paraboloid**. In C. Faber, Candela: The Shell Builder. New York, 1963.

CELANI, Gabriela. **CAD Criativo**. Rio de Janeiro : Editora Campus, 2003.

COUCEIRO, Mauro. **Architectural and Biological Analogies. Finding a generative design process based on biological rules**. Proceedings of Education in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2005. p. 599 – 606.

DALTON, ALAN B. **Super-tough carbon-nanotube fibres**. Nature 423, 2003, pag. 703.

DARWIN, Charles. WALLACE, Alfred Russel. **On the Tendency of Species to form Varieties; and on the Perpetuation of Varieties and Species by Natural Means of Selection**. London: Journal of the Proceedings of the Linnean Society of London, 1858.

DEVLIN, Keith J. **The Language of mathematics: making the invisible visible**. New York: Freeman and Company, 1998.

DOCZI, Gyorgy. **O poder dos limites: harmonias e proporções na natureza, arte e arquitetura**. São Paulo: Mercuryo, 1990.

EMMER, Michele. **Architecture and Mathematics: Soap Bubbles and Soap Films**. p. 53-65 in Nexus: Architecture and Mathematics, ed. Kim Williams, Fucecchio Florence: Edizioni dell'Erba, 1996.

FLEMMING, U. **The secret of the Casa Guiliani Frigerio.** Environment and Planning B 8, 1981. p. 87-96.

FOX, Howard N. **Portrait of an Atomist. Catalog Essay for Kenneth Snelson Exhibition.** Texas: University of Houston, January - February 1982. Disponível em <http://www.kennethsnelson.net/icons/art.htm>

FRUMAR, Jerome. ZHOU, Yiyi. **Beyond Representation. Real Time Form Finding of Tensegrity Structures with 3D “Compressed” Components.** Proceedings of Education in Computer Aided Architectural Design In Europe, 2009. p 21 – 30.

GARLOCK, Maria E. Moreyra; BILLINGTON, David P. **Felix Candela: Engineer, Builder, Structural Artist.** London: Princeton University Art Museum, 2008.

GERO, John S. **Creativity, Emergence and Evolution in Design.** 2006.

GERO, John S.; SAUNDERS, Robert. **Constructed Representations and their Functions in Computational Models of Designing.** University of Sydney, 2006.

Disponível em:

<http://web.arch.usyd.edu.au/~rob/publications/2000GeroSaundersCAADRIA.pdf>

Acesso em 05 out 2009.

GOSLING, P.D.; LEWIS, W.J. **Optimal Structural Membranes – II. Form-Finding of Prestressed Membranes using a curved quadrilateral finite element for surface definition.** Computers & Structures Vol. 61, No. 5, pp. 885-895. Great Britain: Elsevier Science Ltd., 1996.

GROPIUS, Walter. **Bauhaus: novarquitectura.** 4.ed. São Paulo: Perspectivas, 1988. 220 p. : il.

GUERRA, Abílio. **Niemeyer e Artigas: sobrevivências da tradição clássica.**

Vitruvius, Resenhas online outubro 2004, ano 3, vol. 34, p. 103. Tese resenhada: *Diálogos silenciosos. Arquitetura moderna brasileira e tradição clássica*, de Ana Paula Pontes. Dissertação de Mestrado, Departamento de História da Pontifícia

Universidade Católica do Rio de Janeiro / PUC-RJ, orientador João Masao Kamita, Rio de Janeiro, outubro de 2004. Disponível em:  
<http://www.vitruvius.com.br/resenhas/textos/resenha103.asp>

HARRE, R. **The philosophies of science**. London: Oxford University Press, 1972.

HENSEL, Michael. **Computing Self - Organisation: Environmentally Sensitive Growth Modelling**. Architectural Design, Vol. 76, No 2. Mar/Apr 2006. p. 12 – 17.

HILBERT, David; COHN-VOSSSEN, Stephan. **Geometry and the Imagination**. Chelsea, 1952.

HILBERT, David. **Grundlagen der Geometrie**. Leipzig: B.G. Teubner, 1903.

INGBER, Donald E. **The Architecture of Life**. Scientific American Magazine. January 1998. Disponível em:  
<http://web1.tch.harvard.edu/research/ingber/PDF/1998/SciAmer-Ingber.pdf>

JERONIMIDIS, George. **Biodynamics**. Architectural Design, Vol. 74, No 3. May/June 2004. p. 90 – 96.

KENDALL, D.G. **Shape Manifolds, Procrustean Metrics, and Complex Projective Spaces**. London: Bulletin of the London Mathematical Society, 1984.

KINDLEIN, Wilson; GUANABARA, Andrea Seadi; SILVA, Everton Amaral da; PLATCHECK, Elisabeth Regina. **Proposta de uma Metodologia para o Desenvolvimento de Produtos baseados no estudo da Biônica**. Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<http://dqsperb.files.wordpress.com/2009/05/metodologia-projetual-com-enfase-em-bionica.pdf>>

KINDLEIN, Wilson. **Estudo da Síntese e Caracterização de Diamantes Obtidos por Alta Pressão**. Tese de Doutorado. UFRGS, Porto Alegre, 1999. Orientador: João Alziro Herz da Jornada.



KINDLEIN JÚNIOR, W.; CÂNDIDO, Luis Henrique; MARQUES, André Canal ; SANTOS, Sandra Souza dos ; VIEGAS, Maurício da Silva. **Development of junction elements from study of Bionics**. Journal of Bionic Engineering, v. 4, p. 41-46, 2007.

KNIGHT, T. W. **Comparing Designs**. Environment and Planning B: Planning and Design, 1988, volume 15, pages 73-110.

KNIGHT, T. W. **Constructive Symmetry**. Environment and Planning B: Planning and Design, 1995, volume 22, pages 419-450.

KONING, H.; EIZENBERG, J. **The language of the prairie: Frank Lloyd Wright's prairie houses**. Environment and Planning B 8, 1981. p. 295-323.

KROTO, H. W.; HEATH, J. R.; O'BRIEN, S. C.; CURL, R. F.; SMALLEY, R. E. "**C<sub>60</sub>: Buckminsterfullerene**". Nature 318, 1985. pags: 162–163.

KRÜGER, Mário Júlio T. **Teorias e Analogias em Arquitetura**. São Paulo: Projeto, 1986.

KUHN, Thomas Samuel. **The Structure of Scientific Revolutions**. Chicago: University of Chicago Press, 1962.

KUSNER, Rob. SULLIVAN, John M. **Comparing the Weaire-Phelan equal volume foam to Kelvin's foam**. Forma, 11 (3), pag 233-242. London, 1996. Disponível em: <http://torus.math.uiuc.edu/jms/Papers/foams/forma.pdf>. Acesso 07 set 2009.

LAMARCK, J.B. **Philosophie zoologique ou exposition des considérations relatives à l'histoire naturelle des animaux**. Paris: Dentu, 1809. Disponível em: [http://www.lamarck.cnrs.fr/ice/modules/ice2pdf/pdf/extraitPDF31-10-2009\\_17-00-44.pdf](http://www.lamarck.cnrs.fr/ice/modules/ice2pdf/pdf/extraitPDF31-10-2009_17-00-44.pdf) Acesso em 16 out 2009.

LEATHERBARROW, David. **Surface Architecture**. Cambridge, 2005.

LE CORBUSIER. **Por uma arquitetura.** São Paulo: Perspectiva, 1977. Título original: Vers une Architecture. In: L'Esprit Nouveau, 1923.

LEYTON, Michael. **Group Theory and Architecture 1: Nested Symmetries.** Nexus Network Journal, Vol. 3, n. 3, 2001. Disponível em: <http://www.emis.de/journals/NNJ/Leyton3.3.html>

LIVIO, Mario. **Razão Áurea: a história de fi, um número surpreendente.** Rio de Janeiro: Record, 2006.

LÖBACH, Bernd. **Design Industrial: Bases para a configuração dos produtos industriais.** Edgard Blucher Editora, 2001.

LOSS, Adolf. **Ornament and Crime.** Innsbruck, 1908. Reprint Vienna, 1930.

MANZINI, Ezio. **A matéria da invenção.** Coleção Design, tecnologia e gestão. Centro Português de Design, 1993.

MARCH, L.; STEADMAN, J. P. **The Geometry of environment.** London: Methuen, 1974.

MAYER, Rosirene. **A Linguagem de Oscar Niemeyer.** Dissertação de Mestrado. PROPARG – UFRGS, Porto Alegre, 2003. Orientador: Benamy Turkienicz.

MITCHELL, William J. **The Logic of Architecture.** MIT, London, 1990.

MONTANER, J. M. **A beleza da arquitetura ecológica: a modernidade superada. Arquitetura, arte e pensamento do século XX.** Barcelona: Gustavo Gili, 2001.

MOREIRA, Fernando Diniz. **As caixas decoradas: ornamento e representação em Venturi & Scott Brown e Herzog & De Meuron.** Arqtextos 056, janeiro 2005. Disponível em: [www.vitruvius.com.br/arqtextos/arq056/arq056\\_01.asp](http://www.vitruvius.com.br/arqtextos/arq056/arq056_01.asp)>. Acesso 22 Jan. 2008.

ORR, K. **Thinking beyond the square: innovation theory and technology transfer as they apply to the Beijing Water Cube.** Disponível em: <<http://epress.lib.uts.edu.au/dspace/handle/2100/486>>. Acesso em 01 jul. 2008.

OZENFANT, A. JEANNERET, Ch.-E. (Le Corbusier). **La Peinture Moderne.** Paris, 1925.

OXMAN, R. E. **The Thinking Eye: Visual recognition in design emergence.** Design studies, 23-2 (2002) pp. 135-164.

PADOVAN, Richard. **Proportion: science, philosophy, architecture.** London: E & FN Spon, 1999.

PAHL, Gerharrd; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jorg; GROTE, Karl-Heinrich. **Projeto na Engenharia: Fundamentos do Desenvolvimento eficaz de produtos, Métodos e Aplicações.** Tradução Hans Andreas Werner; revisão Nazem Nascimento. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. pág 58.

PIÑÓN, Helio. **Teoria do Projeto.** Tradução de Edson Mahfuz. Porto Alegre: Livraria do Arquiteto, 2006.

PLATEAU, Joseph. **Statique Expérimentale et Théorique des Liquides Soumis aux Seules Forces Moléculaires.** Paris: Gauthier-Villars, 1873.

POTTMANN, Helmut; LIU, Yang; WALLNER, Johannes; BOBENKO, Alexander; WANG, Wenping. **Geometry of Multi-layer Freeform Structures for Architecture.** ACM Trans. Graphics 26/3, 2007.

PRENIS, John. **The Dome Builder's handbook.** Philadelphia, Pennsylvania: Running Press, 1976.

PRUSINKIEWICZ, Przemyslaw. **Modeling plant growth and development.** Department of Computer Science, The University of Calgary, Alberta, Canada, 2003.

ROYLANCE, David. **Finite Element Analysis**. Department of Materials Science and Engineering. MIT, Cambridge, 2001. Disponível em:  
<http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Materials-Science-and-Engineering/3-11Mechanics-of-MaterialsFall1999/Modules/fea.pdf>

RÜTHSCHILLING, Evelise Anicet. **Definição Design de Superfície 2008**.  
Disponível em: <[www.nds.ufrgs.br](http://www.nds.ufrgs.br)>. Acesso 23 Jan. 2008.

SARRABLO, Vicente. **La construcción de formas complejas**. Tectónica, Edición 2004, Número 17, Junio 2004. Págs 18 -29.

SCHWARTZ, Ada Raquel Doederlein. **Design de Superfície: por uma visão projetual geométrica e tridimensional**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, 2008.

SHELLEY, C. **Multiple analogies in Science and Philosophy**.  
Amsterdam/Philadelphia: John Benjamins Publishing Company, 2003.

SKINNER, Stephen. **Sacred geometry**. New York: Sterling Publishing, 2006.

SPENCER, Herbert. **Principles of Biology**. Vol. 1, 1864.

STANTON, Michael. **As mudanças de paradigma**. Portal do Jornal O Estado de São Paulo, 2004. Disponível em:  
<http://www5.estadao.com.br/tecnologia/coluna/stanton/2004/jun/30/197.htm>

STEADMAN, Philip. **The evolution of designs. Biological analogy in architecture and the applied arts**. London: Cambridge University Press, 1979.

STINY, G.; MITCHELL, W. J. **The Palladian grammar**. Environment and Planning B 5, 1978. p. 5-18.

SULLIVAN, Louis. **The tall office building artistically considered**. Kindergarten Chats and Other Writings. New York: George Wittenbom Inc., 1896. Disponível em:

[http://books.google.com.br/books?id=T3VrsjmRckgC&printsec=frontcover&source=gs\\_v2\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false](http://books.google.com.br/books?id=T3VrsjmRckgC&printsec=frontcover&source=gs_v2_summary_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false) Acesso em 22 out 2009.

THOMPSON, D'Arcy Wentworth. **On Growth and Form**. New York: Dover Publications, 1942.

**VERB. NATURES**. Architecture Boogazine. P. 76. Actar; Architecture Boogazine edition (March 1, 2007).

VIOLLET-LE-DUC, Eugène-Emmanuel. **Entretiens sur l'architecture**. Paris: Pierre Mardaga éditeur, 1858.

VITRUVIO. **The Ten books of Architecture**. In: Vitruvius: De Architectura, translated by Frank Granger; Cambridge (Mass.): Harvard University Press, 1931.

WEBER, Raquel. **A linguagem da estrutura na obra de Vilanova Artigas**. Dissertação de Mestrado. PROPAR – UFRGS, Porto Alegre, 2005. Orientador: Benamy Turkienicz.

WEINSTOCK, Michael. **Self-Organisation and Material Constructions**. Architectural Design, Vol. 76, No 2. Mar/Apr 2006. p. 34 – 41.

WEINSTOCK, Michael; MENGES, Achim; HENSEL, Michael. **Frei Otto in Conversation with the Emergence and Design Group**. Architectural Design, Vol. 74, No 3. May/June 2004. p. 18 – 25.

WEINSTOCK, Michael; MENGES, Achim; HENSEL, Michael. **Fit Fabric: Versatility Through Redundancy and Differentiation**. Architectural Design, Vol. 74, No 3. May/June 2004. p. 40 – 47.

WEISSTEIN Eric W. **Klein Bottle**. From MathWorld -A Wolfram Web Resource. Disponível em: <http://mathworld.wolfram.com/KleinBottle.html> Acesso em 13 de setembro 2009.

WESTPHAL, Eduardo. **A Linguagem de João Filgueiras Lima - Lelé**. Dissertação de Mestrado. PROPAR – UFRGS, Porto Alegre, 2007. Orientador: Benamy Turkienicz.

WEYL, Hermann. **Symmetry**. New Jersey: Princeton University Press, 1952.

WOLF, W. **Biomimicry: solutions hidden in plain sight**.

Disponível em: <<http://www.environmental-expert.com/resultEachArticle.aspx?cid=19453&codi=4111&idproducttype=6&idmainpage=62&level=0>>. Acesso em 02 jul. 2008.

ZIEGLER, SAMC. **A Cloud That's Dragonish**. 2008.

Disponível em: <http://www.scribd.com/doc/18346561/A-Cloud-That's-Dragonish>

#### **Sites pesquisados:**

#### **Minimal surfaces:**

<http://www.mbhonaker.com/sauemann.html>

<http://paraclouding.com/WP/?p=1264>

<http://cliptic.wordpress.com/gallery/>

<http://www.generativeart.com/on/cic/papers2005/37.SemraArslanSelcuk.htm>

[http://epinet.anu.edu.au/mathematics/p\\_surface](http://epinet.anu.edu.au/mathematics/p_surface)

<http://www.indiana.edu/~minimal/research/index.html>

<http://mathworld.wolfram.com/topics/MinimalSurfaces.html>

<http://page.mi.fu-berlin.de/polthier/booklet/intro.html>

#### **Galeria de imagens das superfícies mínimas:**

<http://www.indiana.edu/~minimal/archive/>



## FONTES DAS FIGURAS

### CAPÍTULOS I A IV

Figura 01- Restaurante *Los Manantiales*, Felix Candela, 1958.

Fonte: <http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkes/abc-structures-2005/concrete/HyparManantiales.jpg>  
Acesso em 10 set 2009.

Figura 02 - Composição dos *hypars* do Restaurante *Los Manantiales*.  
Axonométrica, Elevação e Corte.

Fonte: <http://www.greatbuildings.com>  
Acesso em 12 set 2009.

Figura 03 – Shukhov Rotunda, 1896. Átrio Central, Elevação e Corte.

Fonte: [www.shukhov.org](http://www.shukhov.org)

Figura 04 - Sidney Myer Music Bowl. Barry Beauchamp Patten, 1957.

Fonte: [http://www.pbase.com/ianm\\_au/image/36954928](http://www.pbase.com/ianm_au/image/36954928)

Figura 05 – Modelo de Tensegridade proposto por Kenneth Snelson.

Fonte: <http://www.kennethsnelson.net/i/cons/struc.htm>

Figura 06 - Bolhas de sabão em formato esférico

Fonte: [http://www.collegehoopsnet.com/blog/marchmadness/uploaded\\_images/bubbles-787600.jpg](http://www.collegehoopsnet.com/blog/marchmadness/uploaded_images/bubbles-787600.jpg)

Figura 07 - Formação tetraédrica de bolha de sabão.

Fonte: BALL, Philip. *The self-made tapestry: pattern formation in nature*. Oxford University Press Inc., New York, 1999, p. 23.

Foto: Michele Emmer.

Título original: Plateau borders converge at fourfold vertices, where they meet at the tetrahedral angle of about 109,5°.

Figura 08 - Diagrama construtivo da *Callimitra*

Fonte: Darcy thompson – on growth and form – pág 713, figura 329

Título original: Diagrammatic construction of Callimitra. A, a bubble suspended within a tetrahedral cage. B, another bubble within a skeleton of the former bubble.

Figura 09 - Exoesqueleto calcificado da *Calimitra agnesae*.

Fonte: Darcy thompson – on growth and form – pág 712, figura 328

Título original: A Nesselarian Skeleton (*Callimitra agnesae*)

Figura 10 – Eletro-micrografia de esponja do mar.

Fonte: Revista Architectural Design, Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, pag 37.

Figura 11 – Componente estrutural formulado a partir das leis de Plateau.

Girsewald e Subercaseaux (2006)

Fonte: *Ibid.*

Figura 12 – Alótropos de Carbono

(a) - diamante

(b) - grafite

Fonte - [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Diamond\\_and\\_graphite2.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Diamond_and_graphite2.jpg)

Acesso em 3 out 2009.

Figura 13 - Molécula de Buckminsterfullereno, Carbono 60.

Fonte: [www.webelements.com/carbon/allotropes.html](http://www.webelements.com/carbon/allotropes.html)

Figura 14 – Superfícies mínimas de revolução e respectivas geratrizes  
Fonte: elaborada pelo autor

Figura 15 – Catenoide  
Fonte: <http://www.soapbubble.dk/en/bubbles/geometry.php>

Figura 16 – Modelo genérico de superfícies mínimas. Gosling, 2005.  
Fonte: Gosling, pag 890.

Figura 17 – Modelos de Superfície Mínima.  
(a) Single Enneper Surface  
(b) Enneper com Simetria Cíclica  
Fonte: <http://www.indiana.edu/~minimal>

Figura 18  
(a) - Moebius Strip  
(b) - Sua correspondente tridimensional Klein Bottle  
Fonte: <http://www.indiana.edu/~minimal>

Figura 19 - Mobius Strip II. M.C. Escher, 1963.  
Fonte: <http://www-vrl.umich.edu/project2/moebius/>

Figura 20 – Superfícies Mínimas Periódicas.  
(a) - Scherk Surface  
(b) - Schwarz P-Surface  
Fonte: <http://www.indiana.edu/~minimal>

Figura 21 – Modelos Computacionais de Superfícies Mínimas.  
(a) - Costa Minimal Surface  
(b) - Horgan Minimal Surface.  
Fonte: <http://www.indiana.edu/~minimal>

Figura 22 – Projeto da cidade ideal de Chaux. Ledoux, 1775.  
Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Projet\\_pour\\_la\\_ville\\_de\\_Chaux\\_-\\_Ledoux.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Projet_pour_la_ville_de_Chaux_-_Ledoux.jpg)

Figura 23 - Cidade Medieval de Arles séc. VI  
Fonte: BENEVOLO, Leonardo. História da Cidade. São Paulo: Martins Fontes, 2001.

Figura 24 - Cenotáfio de Newton. Étienne Louis Boullée, 1790.  
Fonte: [http://arq.unne.edu.ar/catdep/arq/hyc2/documentales\\_0203/neo01/images/ceno02\\_jpg.jpg](http://arq.unne.edu.ar/catdep/arq/hyc2/documentales_0203/neo01/images/ceno02_jpg.jpg)

Figura 25 - Modelo de conformação mínima para filme de sabão realizado por Frei Otto.  
Fonte: EMMER, Michele. Architecture and Mathematics: Soap Bubbles and Soap Films. pp. 53-65 in *Nexus: Architecture and Mathematics*, ed. Kim Williams, Fucecchio (Florence): Edizioni dell'Erba, 1996. Fig 3, pág 60.

Figura 26 - Complexo Olímpico de Munique – Günther Behnisch & Frei Otto, 1972.  
Fonte: [http://farm2.static.flickr.com/1268/881130714\\_5cfba6e75b.jpg](http://farm2.static.flickr.com/1268/881130714_5cfba6e75b.jpg)

Figura 27 – Arranjos bi-dimensionais de círculos.  
(a) - configuração retangular  
(b) - configuração hexagonal  
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 28 - Colméia de abelhas.

Fonte: [http://wallpaperstock.net/honeycomb\\_wallpapers\\_4679\\_1024x768\\_1.html](http://wallpaperstock.net/honeycomb_wallpapers_4679_1024x768_1.html)

Figura 29 – Relação entre o padrão hexagonal encontrado na radiolária e o módulo estrutural do Pavilhão de Montreal (Fuller, 1967).

Fontes:

Radiolária: [http://www.morphographic.com/Gallery/Images/Image\\_Radiolarian.jpg](http://www.morphographic.com/Gallery/Images/Image_Radiolarian.jpg)

Fuller: <http://www.educatorium.com>

Figura 30 – Éden Project. Nicholas Grimshaw, 2001.

Fonte: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eden\\_Project\\_geodesic\\_domes\\_panorama.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eden_Project_geodesic_domes_panorama.jpg)

Figura 31 – Modelo de agregação mínima proposto por Kelvin (1887).

(a) - octaedro truncado

(b) - agregado composto por octaedros truncados.

Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Truncated\\_octahedra.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Truncated_octahedra.jpg)

Figura 32 – Estrutura de Weaire-Phelan

Fonte: <http://www.structuremag.org/images/0908-f2-8.gif>

Figura 33 - Modelo tridimensional da Geometria de Weaire-Phelan.

Fonte: <http://www.designbuild-network.com/projects/watercube>

Figura 34 - Etapa de construção do Water Cube

Fonte: Verb. Natures. Architecture Boogazine. P. 76. Actar; Architecture Boogazine edition (March 1, 2007). Foto: Ben McMillan.

Figura 35 - Centro Aquático das Olimpíadas de Beijing. *PTW architects*.

Fonte: <http://2008gamesbeijing.com/images/national-quaic-center-water-cube.jpg>

Figura 36 – Secção de um estema vegetal.

Fonte: Architectural Design, Vol. 74, No 3. May/June 2004. p. 93.

Figura 37 – *Swiss Re*. Arquiteto: Foster & Partners.

Fonte: Paiva, Cida - Torre Aerodinâmica na City - Revista Finestra jan-fev-mar 2005 nº 40

Figura 38 – *Swiss Re*. Plantas e rotações gradativas.

Fonte: *Ibid.*

Figura 39 – Modelo Estrutural com replicação helicoidal. *Emergence Design Group*.

Fonte: Architectural Design, Vol. 74, No 3. May/June 2004. p. 40.

Figura 40 – Modelos de *Stents*.

Fonte: <<http://lifeondialysis-waitingforthecall.blogspot.com/2008/07/i-have-uploaded-some-of-pictures-from.html>> Acesso em 22/01/2010.

Figura 41 – Os cinco tipos de domínios de Dirichlet para um *grid* bidimensional regular.

(a) quadrado

(b) retangular

(c) rômbo

(d) hexagonal

(e) oblíquo

Elaboradas pelo autor

Figura 42 – Triangulação de Delaunay (a),  
e o correspondente Diagrama de Voronoi (b).

Fonte: <http://blog.121pcs.com/terrain-modeling-delaunay-triangulation.html>

Figura 43 – As três tesselações compostas por polígonos regulares.  
Elaboradas pelo autor

Figura 44 – As oito combinações de preenchimento de um plano com dois ou mais polígonos regulares.

Fonte: DEVLIN, Keith J. The Language of mathematics: making the invisible visible. plate 9

Titulo original: The eight ways to tile the plane with two or more regular polygons, when it is required that the arrangement of polygons around each vertex be the same.

Figura 45 – emergência visual

Fonte: Gero, 2006. Computers and Creative Design.

Figura 46 – O Homem Vitruviano. Leonardo da Vinci, 1487.

Fonte: <http://www.italian-renaissance-art.com/Vitruvian-Man.html>

Figura 47 – Grupos de simetria plana.

Elaborada pelo autor.

Figura 48 – Exemplos de simetrias encontradas na natureza.

(a) – Borboleta com simetria bilateral

(b) – Centopéia com simetria translacional

Fontes:

(a) - <http://www.bymk.com.br/looks/42966>

(b) - <http://www.flickr.com/photos/choobaine/3781101869/in/pool-myriapoda>

Figura 49 – Identidades e eixos de simetria relacionados a figura xx.

Elaborada pelo autor

Figura 50 – Kaman Vortex Street.

Fonte: [http://hsu.as.ntu.edu.tw/cyber\\_course\\_II/chapter7/doud/von-karman-vortex.jpg](http://hsu.as.ntu.edu.tw/cyber_course_II/chapter7/doud/von-karman-vortex.jpg)

Figura 51

(a) - Concha *Nautilus*.

(b) - Espiral Logarítmica gerada pela proporção áurea.

Fontes:

(a) - <http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:NautilusCutawayLogarithmicSpiral.jpg>

(b) - [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fibonacci\\_spiral\\_34.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fibonacci_spiral_34.svg)

Figura 52 – Modulor. Le Corbusier (1948).

Fonte: <http://www.khg.bamberg.de/comenius/gold/art/modulor.jpg>

## **FONTES DAS FIGURAS**

### **CAPÍTULO V**

**Figura 53 – Padrão de estruturação de uma Folha.**

Fonte: [www.flickr.com](http://www.flickr.com)

**Figura 54 – Padrão de estruturação do Cogumelo.**

Fonte: <http://bibliotecamaterial.blogspot.com/search?q=Cogumelo>

Estudo de magnificação realizado por Guilherme Manfrin e Fernanda Antonio, para a Disciplina ARQ01029 – Tópicos Especiais em Projeto Arquitetônico I-C, 2009/1 (Atelier Material)

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFRGS.

<http://ateliermaterial.blogspot.com/>

**Figura 55 – Padrão de estruturação do tronco de Bananeira.**

Fontes: <http://www.morguefile.com/archive/display/103875>

Fonte: <http://www.sheilafinkelstein.com/PSE4/banana-tree-cut-trunk.jpg>

Acesso em 12 Jun. 2009.

**Figura 56 – Padrão de estruturação do Dente de Leão.**

Fonte: [http://www.baixaki.com.br/imagens/wpapers/BXK17054\\_dente-de-leao800.jpg](http://www.baixaki.com.br/imagens/wpapers/BXK17054_dente-de-leao800.jpg)

**Figuras 57 a 63**

Elaboradas pelo autor, com auxílio dos softwares AutoCAD e Corel Draw.

**Figuras 64 a 66**

Elaboradas por Pablo Resende, com auxílio do software Rhinoceros.

**Figuras 67 a 78**

Elaboradas pelo autor, com auxílio dos softwares AutoCAD e Corel Draw.

**Figura 79 – Quadro síntese referente às fases 1 e 2 do experimento.**

Elaborada pelo autor, com auxílio dos softwares AutoCAD e Corel Draw.

Renderizações dos Modelos por Pablo Resende e Mário Guidoux, com auxílio do software Rhinoceros e Plug-in Panelling Tools.

**Figuras 80 e 81**

Elaboradas pelo autor, com auxílio dos softwares AutoCAD e Adobe Photoshop.

**Figuras 82 e 83**

Elaboradas por Moisés Krützmann e Felipe Nassif, com auxílio do software Abaqus.

Marcação dos Focos de tensões elaborado pelo autor, com auxílio do software Adobe Photoshop.

**Figuras 84 e 85**

Elaboradas pelo autor, com auxílio dos softwares AutoCAD e Corel Draw.

**Figura 86 – Quadro síntese referente às fases 3 e 4 do experimento.**

Elaborada pelo autor, com auxílio dos softwares Adobe Photoshop e Corel Draw.

Figuras Pré e Pós-Teste elaboradas por Moisés Krützmann e Felipe Nassif, com auxílio do software Abaqus.

## **FONTES DAS FIGURAS**

### **APÊNDICE A**

Fichas relativas à simulação em modelos tridimensionais  
Elaboradas por Mário Guidoux e Carlos Eduardo Binato de Castro,  
com auxílio do software Corel Draw.

### **APÊNDICE B**

Fichas relativas à avaliação estrutural – Pré-teste  
Elaboradas pelo autor, com auxílio dos softwares AutoCAD, Adobe Photoshop e Corel Draw.  
Figuras Pré e Pós-Teste elaboradas por Moisés Krützmann e Felipe Nassif, com auxílio do software Abaqus.

### **APÊNDICE C**

Fichas relativas à avaliação estrutural – Pós-teste  
Elaboradas pelo autor, com auxílio dos softwares AutoCAD, Adobe Photoshop e Corel Draw.  
Figuras Pré e Pós-Teste elaboradas por Moisés Krützmann e Felipe Nassif, com auxílio do software Abaqus.



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)