



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

Desenvolvimento de Estruturas Articuláveis de Madeira

Daniela Cristina Rocha

**Campinas, SP
2010**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

Daniela Cristina Rocha

**Desenvolvimento de Estruturas Articuláveis
de Madeira**

Dissertação apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Arquitetura e Construção.

Orientadora: Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris

**Campinas, SP
2010**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

R582d	Rocha, Daniela Cristina Desenvolvimento de estruturas articuláveis de madeira / Daniela Cristina Rocha. --Campinas, SP: [s.n.], 2010. Orientador: Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. 1. Madeira - Estruturas. 2. Madeira. 3. Arquitetura. I. Harris, Ana Lúcia Nogueira de Camargo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.
-------	--

Título em Inglês: Development of deployable wood structures

Palavras-chave em Inglês: Wood - Structures, Wood, Architecture

Área de concentração: Arquitetura e Construção

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Nilson Tadeu Mascia, Wilson Flório

Data da defesa: 13/12/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

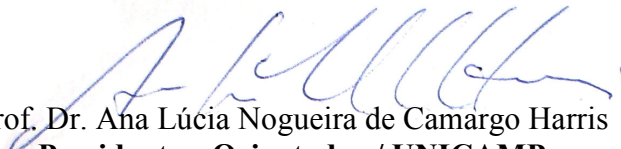
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

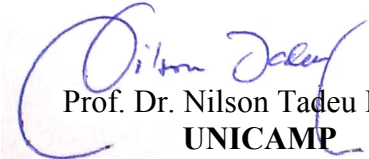
**DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURAS
ARTICULÁVEIS DE MADEIRA**

Daniela Cristina Rocha

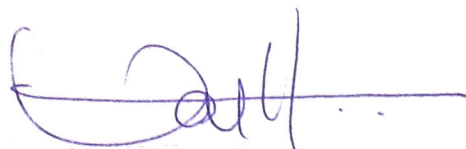
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris
Presidente e Orientador / UNICAMP



Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia
UNICAMP



Prof. Dr. Wilson Florio
UNICAMP

Campinas, 13 de Dezembro de 2010

Aos meus pais
Humberto e Cléria

Agradecimentos

À professora e orientadora Ana Lúcia N. C. Harris, pela oportunidade, confiança e incentivo.

À CAPES, por dar condições para realização deste trabalho e pela concessão de bolsa de estudos.

Aos professores da Pós-Graduação da FEC, pelos ensinamentos repassados.

Aos professores e membros da banca de qualificação, Nilson Tadeu Mascia e Daniel de Carvalho Oliveira, pela contribuição na revisão deste trabalho.

Aos funcionários do Programa, pela presteza e dedicação.

Aos meus pais, pela compreensão, apoio e carinho.

Ao Daniel, por toda dedicação, amor e amizade.

Aos familiares, por compreenderem minha ausência e me apoiarem sempre.

Às minhas amigas de Campinas, pela ajuda nos momentos complicados.

Às minhas amigas de Belo Horizonte, que mesmo de longe sempre me acompanham.

Resumo

ROCHA, Daniela C. **Desenvolvimento de Estruturas Articuláveis de Madeira**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 2010. 164p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 2010.

A madeira é considerada um dos mais importantes materiais de construção. Componentes de madeira usados em construções podem ser encontrados tanto em ruínas de civilizações primitivas, datadas de 500 a.C., como em modernas construções arquitetônicas. Entretanto, o desenvolvimento de técnicas e metodologias relacionadas à aplicação da madeira em estruturas construtivas ganhou intensidade somente a partir da primeira metade do século XX. Desde então, a madeira passou a ser frequentemente utilizada para fins estruturais, como por exemplo, em coberturas e pontes. A flexibilidade de uso da madeira é uma característica favorável para sua abordagem em estruturas articuláveis. Tais estruturas são diferenciadas por conter elementos móveis que são capazes de modificar o desenho de uma construção. Este trabalho tem como objetivo abordar novas técnicas de implementação da madeira em estruturas. Investigou-se uma variedade de estruturas articuláveis com foco na geometria da forma. Inicialmente, foram construídos modelos físicos em escala reduzida em chapas de MDF (Medium Density Fiberboard). Em seguida, foram realizadas simulações virtuais dos modelos articulados desenvolvidos nesta pesquisa com a finalidade de se observar a viabilidade de tais modelos. Foram realizadas simulações quanto ao estado da volumetria e da movimentação em rotação e translação para a análise das articulações. Também foram realizados ensaios de carregamento para se determinar a resistência dos modelos desenvolvidos. Os resultados apontam para soluções estruturais fisicamente factíveis e que permitem a exploração criativa e versátil das formas. Cada um dos modelos pode ser aperfeiçoado no sentido de permitir diferentes aplicações no campo da arquitetura e construção. Com esta pesquisa, abre-se, portanto, um caminho para novos estudos que permitam o uso racional, otimizado e viável economicamente da madeira no Brasil.

Palavras-chave: estruturas articuláveis; arquitetura cinética; madeira; modularidade.

Abstract

ROCHA, Daniela C. **Development of Deployable Wood Structures**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 2010. 164p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 2010.

Wood is considered one of the most important building materials. Building components made by wood were first found in ruins of primitive civilizations dated to around 500 BC. Nowadays, wood components may be encountered in several modern architectural constructions. However, the development of techniques and methodology in which wood is main component were set up only from the first half of the twentieth century. Since then, wood is frequently employed for structural purposes, for instance, in roofs and bridges. The flexibility of wood is a quality that can be exploited in deployable structures. This kind of structures has mobile elements that can transform the design of buildings. This work aims to address issues related to the use of wood structures and implementation of new design techniques. Some types of deployable structures are characterized with focus on the geometry of the form. In experiments, are considered reduced-scale physical models in MDF (*Medium Density Fiberboard*). Computational simulations evaluate the feasibility of the suggested deployable structures. Translation and rotation simulation is taken into consideration to the analysis of the joints. Moreover, loading tests are done to approximate the resistance of the structures. Results reveal physically-feasible structural solutions and point versatile alternatives to explore deployable structures. Improvements can be made to admit more applications in constructions and architectonic projects. This research opens up directions for futures studies on rational, optimal and profitable applications of wood in Brazil.

Key-words: deployable structures, kinetic architecture, wood, modularity.

Lista de Figuras

Figura 01. Móviles com estrutura metálica criados por Alexander Calder	6
Figura 02. Turning Torso, projeto de Santiago Calatrava	8
Figura 03. Instituto do Mundo Árabe, projetado por Jean Nouvel	10
Figura 04. Clarabóias reativas que se movimentam de acordo com a condição climática	10
Figura 05. Torre flexível desenvolvida por pesquisadores do MIT	11
Figura 06. Instalação interativa Power Flower que é ativada por meio de sensores de presença	12
Figura 07. Transformação geométrica de arranjos compactados de estruturas planas e tridimensionais	14
Figura 08. Cobertura articulável do Pavilhão Kuwait na Expo 92 em Sevilha, Espanha	15
Figura 09. Pavilhão Quadracci do Museu de Arte de Milwaukee	16
Figura 10. Estrutura projetada por Calatrava no complexo científico-cultural Cidade das Artes e Ciências	17
Figura 11. Esfera Hoberman – estrutura articulável tridimensional	19
Figura 12. Expansão da esfera cujo diâmetro aumenta de 1,4m para 5,9m	19
Figura 13. Instalação da cúpula articulável ‘Iris Dome’	20
Figura 14. Desenho formado pela movimentação da cúpula	20
Figura 15. Arco articulável criado para os Jogos Olímpicos de Inverno em 2002	21
Figura 16. Movimento de abertura e fechamento do arco	21
Figura 17. Aldar Central Market em Abu Dhabi	22
Figura 18. Desenho da cobertura do Aldar Central Market	23
Figura 19. Diagramas de tipologias cinéticas na arquitetura	24
Figura 20. Principal classificação da Arquitetura Cinética	25
Figura 21. Treliças dobráveis utilizadas em portas de elevadores antigos e em guarda-chuvas	27
Figura 22. Estrutura articulável	28
Figura 23. Elemento de união das barras e configurações desenvolvidas	29

Figura 24. Análise em laboratório da sequência de articulação de um protótipo de antena	29
Figura 25. Tipos de conectores inferiores	31
Figura 26. Conectores superiores	31
Figura 27. Mecanismo articulável analisado no software Solidworks	32
Figura 28. Teatro Móvel - Primeira estrutura tridimensional articulável desenvolvida por Emílio Pérez Piñero	33
Figura 29. Seqüência de articulação de uma antena; antena	34
Figura 30. Mecanismo articulável para expansão/contração do Satélite Sputnik	35
Figura 31. Primeira estrutura articulável de grande porte	35
Figura 32. Seção de um teatro desmontável projetado por Emílio Pérez Piñero	36
Figura 33. Dobradiça para estruturas articuláveis desenvolvida por Pellegrino	36
Figura 34. Estrutura do tipo guarda-chuva desenvolvida por Korkmaz	37
Figura 35. Estrutura articulável tensionada desenvolvida por Vu	37
Figura 36. Estruturas espaciais articuláveis desenvolvidas por Escrig & Sanches	37
Figura 37. Estrutura de cobertura desenvolvida no Laboratório de Estruturas Articuláveis da Universidade de Cambridge	37
Figura 38. Classificação das estruturas cinéticas de acordo com seu sistema estrutural	40
Figura 39. Cobertura do pátio da Câmara Municipal de Viena, na Áustria	42
Figura 40. Estrutura da cobertura formada por vigas longitudinais e transversais	42
Figura 41. Cobertura do tipo guarda-chuva construída em uma mesquita em Madinah	43
Figura 42. Projeto M-Velope desenvolvido por Michael Jantzen	44
Figura 43. Allianz Arena em Munique	45
Figura 44. Reconstrução arqueológica da estrutura de uma casa em 3000 a.C	47
Figura 45. Ponte construída por Julio César para atravessar o rio Reno	47
Figura 46. Pagoda Yakushiji Toto, construída no Japão em 730 e Pagoda Sakyamuni	48
Figura 47. Encaixes tradicionais japoneses entre vigas	49
Figura 48. Típica casa com estrutura de troncos, construída em torno de 1890 na Noruega	50
Figura 49. Estrutura do sistema Balão	51
Figura 50. Estrutura do sistema Plataforma	52
Figura 51. Casa Villa Mairea, projetada por Alvar Aalto na Finlândia em 1939	53
Figura 52. Clínica de reabilitação projetada por Herzog e De Meuron	54
Figura 53. Exemplos de base na Antártida em madeira	55
Figura 54. Exemplos de versatilidade da madeira para estruturas curvas	55

Figura 55. Casas flutuantes na região Amazônica	58
Figura 56. Casas feitas de troncos, tradição polonesa em Curitiba	59
Figura 57. Casa Mozart, construída no Rio Grande do Sul e projetada pela 4D Arquitetura	60
Figura 58. Casa Hélio Olga, construída em São Paulo e projetada pelo arquiteto Marcos Acayaba	60
Figura 59. Estrutura microscópica das coníferas e das dicotiledôneas, respectivamente	62
Figura 60. Planos relacionados às direções da fibra da madeira	64
Figura 61. Inchamento e retração provocados pela variação da umidade na madeira	65
Figura 62. Variação da densidade básica na direção medula-casca de sete espécies de madeira de Eucalyptus	67
Figura 63. Comparação de retratibilidade	68
Figura 64. Seção de uma viga de madeira laminada colada, exposta ao fogo durante 30 minutos	69
Figura 65. Comportamento das fibras da madeira quando solicitada à compressão	71
Figura 66. Deformação da madeira após esforços de tração	71
Figura 67. Diferentes comportamentos da madeira quando submetida ao cisalhamento	72
Figura 68. Comportamento de uma peça de madeira após solicitação por flexão	73
Figura 69. Madeira maciça na forma roliça e serrada	74
Figura 70. Exemplos de madeira laminada colada: igreja na cidade de Syracuse, EUA; jardim de inverno na cidade de Sheffield, Inglaterra	75
Figura 71. Casa para um Casal	76
Figura 72. Banco “Dança”	76
Figura 73. Desenvolvimento de estruturas tridimensionais virtuais articuláveis	78
Figura 74. Detalhe da movimentação da cobertura do Aldar Central Market	80
Figura 75. Desenho do plano de corte das peças no AutoCAD	81
Figura 76. Chapas com as peças já cortadas; peças separadas; e conjunto com três peças coladas	81
Figura 77. Modelo I prototipado..	82
Figura 78. Estrutura do Prague Castle Orangery	83
Figura 79. Peças separadas; detalhe da montagem do nó; montagem do modelo	84
Figura 80. Modelo II prototipado e com fechamentos por linhas flexíveis	85
Figura 81. Estrutura do Pavilhão da Venezuela	86
Figura 82. Peças do Modelo III e elemento de união montado	87
Figura 83. Modelo III prototipado.....	88
Figura 84. Transformação de um desenho bidimensional em um sólido	89

Figura 85. Propriedades da madeira de Cupiúba	91
Figura 86. Etapas de movimentação do Modelo I	92
Figura 87. Detalhes da movimentação do Modelo II	93
Figura 88. Articulação da Estrutura III com detalhe para a geometria do elemento de conexão ..	94
Figura 89. Modelo I fechado	96
Figura 90. Direção e distribuição da força	96
Figura 91. Tensão no Modelo I	98
Figura 92. Deslocamento no Modelo I	99
Figura 93. Deformação no Modelo I	100
Figura 94. Modelo I semi-aberto	101
Figura 95. Direção e distribuição da força	101
Figura 96. Tensão no Modelo I	103
Figura 97. Deslocamento no Modelo I	104
Figura 98. Deformação no Modelo I	105
Figura 99. Modelo I aberto	106
Figura 100. Direção e distribuição da força	106
Figura 101. Tensão no Modelo I	108
Figura 102. Deslocamento no Modelo I	109
Figura 103. Deformação no Modelo I	110
Figura 104. Deslocamento vertical do Modelo I	111
Figura 105. Área de contato entre elementos da estrutura na configuração fechada	112
Figura 106. Deformação dos modelos sob diferentes tensões	113
Figura 107. Modelo II	115
Figura 108. Direção e distribuição da força	115
Figura 109. Tensão no Modelo II	117
Figura 110. Deslocamento no Modelo II	118
Figura 111. Deformação no Modelo II	119
Figura 112. Deslocamento vertical do Modelo II	120
Figura 113. Deformação do modelo sob diferentes tensões	121
Figura 114. Áreas de maior tensão	122
Figura 115. Modelo II fechado	123
Figura 116. Tensão no Modelo III	125

Figura 117. Deslocamento no Modelo III	126
Figura 118. Deformação no Modelo III	127
Figura 119. Modelo III semi-aberto	128
Figura 120. Direção e distribuição da força	128
Figura 121. Tensão no Modelo III	130
Figura 122. Deslocamento no Modelo III	131
Figura 123. Deformação no Modelo III	132
Figura 124. Modelo III aberto	133
Figura 125. Direção e distribuição da força	133
Figura 126. Tensão no Modelo III	135
Figura 127. Deslocamento no Modelo III	136
Figura 128. Deformação no Modelo III	137
Figura 129. Deslocamento vertical do Modelo III	138
Figura 130. Deformação dos modelos sob diferentes tensões	139
Figura 131. Diferença de tensão no Modelo III	140
Figura 132. Simulação da sombra no DIALux	142
Figura 133. Quantificação da luz	143
Figura 134. Simulação de uma cobertura horizontal com o Modelo I	145
Figura 135. Simulação do Modelo I em posição inclinada	146
Figura 136. Utilização do Modelo II como estrutura de cobertura	147
Figura 137. Simulações planas e curvas com o Modelo III	148

Lista de Tabelas

Tabela I. Classificação das estruturas articuláveis	38
Tabela II. Variação da quantidade de carbono na Nova Zelândia	57
Tabela III. Classes de umidade	65
Tabela IV. Resultados da primeira simulação do Modelo I	97
Tabela V. Resultados da segunda simulação do Modelo I	102
Tabela VI. Resultados da terceira simulação do Modelo I	107
Tabela VII. Resultados da simulação do Modelo II	116
Tabela VIII. Resultados da primeira simulação do Modelo III	124
Tabela IX. Resultados da segunda simulação do Modelo III	129
Tabela X. Resultados da terceira simulação do Modelo III	134

Lista de Siglas e Abreviaturas

BVLM - Building with Variable Location or Mobility

BVGM - Building with Variable Geometry or Movement

DLG – Double-layer Grid

SLG - Single-layer Grid

LAPAC - Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp

MDF - Medium Density Fiberboard

MDP - Medium Density Particleboard

MIT - Massachusetts Institute of Technology

OSB – Oriented Strand Board

PSF – Ponto de Saturação das Fibras

Sumário

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Siglas e Abreviaturas	xiv
1 Considerações Iniciais	01
1.1 Introdução	01
1.2 Relevância	03
1.3 Objetivos	03
1.4 Estrutura do trabalho	04
2 Revisão Bibliográfica	07
2.1 Arquitetura Cinética	07
2.1.1 Santiago Calatrava	14
2.1.2 Chuck Hoberman	19
2.1.3 Classificação	25
2.2 Estruturas Articuláveis	27
2.2.1 Contexto histórico	33
2.2.2 Classificação	39
2.2.3 Utilização de estruturas articuláveis nas edificações arquitetônicas	42
2.3 Madeira	47
2.3.1 A madeira na arquitetura e construção	47
2.3.2 Propriedades e características	62
3.3.2.1 Anatomia e Classificação	62

3.3.2.1 Propriedades físicas	64
3.3.2.1 Propriedades mecânicas	70
3.3.2.1 Produtos de madeira	73
3 Materiais e Métodos	77
3.1 Criação dos modelos de estruturas articuláveis	78
3.1.1 Modelos físicos	79
3.2 Simulações virtuais dos modelos criados	89
3.2.1 Simulações de movimento	89
3.2.2 Simulações físicas	95
3.2.3 Simulações de iluminação	141
3.2.4 Simulações de aplicações arquitetônicas	144
3.3 Considerações sobre o ferramental utilizado	148
4 Conclusões	151
Bibliografia	153
Apêndice A	160
Anexo I	163

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

O interesse pela mobilidade surgiu a partir da necessidade de se vencer grandes deslocamentos. Criar um sistema capaz de transportar pessoas e objetos seria uma forma de expandir o conhecimento e a cultura da civilização humana. Assim, a roda se tornou o marco inicial do desenvolvimento de mecanismos capazes de promover a movimentação de uma estrutura. A partir dessa primeira iniciativa, novos sistemas, responsáveis por transportar ou transformar uma estrutura, foram aperfeiçoados de acordo com as necessidades de cada época.

Em meados do século XX, alguns arquitetos começaram a perceber que a ideia de mobilidade, já abordada nas artes visuais, poderia agregar eficiência espacial e adaptabilidade aos seus projetos. O arquiteto e pesquisador da Universidade da Virgínia, William Zuk, escreveu em seu livro ‘Kinetic Architecture’: “Temos que evoluir a arquitetura para que ela se adapte às mudanças constantes” (ZUK & CLARK, 1970). Já nesta época, o arquiteto afirmava que a arquitetura cinética não deveria ser tratada apenas como uma idéia de transformação, mas sim, como um conjunto de estratégias que exigem novas noções conceituais e práticas de construção que superem conceitos antigos baseados na permanência e na monumentalidade. Nota-se, hoje em dia, que a evolução destas estratégias caminha ao mesmo passo do progresso da tecnologia.

Estudos sobre tecnologia aplicada na arquitetura mostram que os sistemas cinéticos estarão cada vez mais presentes nas construções modernas. A automação e a mobilidade

oferecidas pelas construções cinéticas podem fornecer aos usuários novas formas de liberdade e conforto.

As novas necessidades do homem moderno estão se tornando cada vez mais complexas. As construções podem seguir este novo conceito de vida se tornando mais flexíveis a estas mudanças. Para que isso aconteça, são necessárias constantes investigações a respeito de tecnologias, técnicas construtivas e materiais de construção. Considerando-se que o estudo das características e comportamentos dos materiais é de fundamental importância na área construtiva, observa-se que, no caso do material madeira, estes estudos apresentam-se bastante desafiadores. Para que a madeira possa ser utilizada na arquitetura cinética, deve-se considerar a diversidade de espécies de madeira, aliada ao tipo de clima local, à idade da madeira e a influência de suas características ortotrópicas. Além disso, são necessários ensaios de laboratório e testes específicos para uma avaliação mais completa desse material.

O campo de aplicação da madeira como elemento estrutural tem aumentado significativamente nos últimos anos. A disponibilidade deste material associada a novas tecnologias de produção e pesquisas acadêmicas tem contribuído para o aumento de sua utilização racional na construção civil (SZUCS, 2004). O avanço tecnológico, especialmente por meio de pesquisas, aumenta o potencial de utilização da madeira no setor construtivo. Porém, o uso inadequado da madeira nativa e a falta de aplicação de tecnologias mais avançadas em estruturas de madeira dificultam o emprego intensivo ou alternativo desse material na construção civil.

O descaso observado com relação às utilizações racionais de madeira no Brasil é fruto de processos culturais remanescentes desde a colonização. De modo geral, o uso da madeira para habitações ainda é observado com certo preconceito no Brasil, pois é associado aos desmatamentos, incêndios, transformação de áreas em desertos e aos usos em construções precárias. Há, ainda, questionamentos a respeito do preço, da qualidade, da resistência às intempéries, aos ataques de insetos e fungos, etc. Porém, aos poucos, novas pesquisas e novos paradigmas relacionados à necessidade de sustentabilidade dos materiais construtivos, estão fazendo com que os conceitos negativos relacionados à madeira sejam revistos, pois esta, se

cultivada e utilizada de forma adequada, apresenta-se como um material potencialmente sustentável.

Sendo assim, a criação de estruturas articuláveis de madeira no cenário brasileiro é vista nesta pesquisa como uma forma de aprofundar campos de pesquisa, tanto na área de arquitetura cinética, quanto do material madeira, considerando-o para este fim.

1.2 Relevância

A relevância do estudo apresentado nesta dissertação se encontra na área de desenvolvimento de estruturas flexíveis aplicadas na arquitetura. O trabalho é direcionado à criação e estudos para o desenvolvimento de novos modelos de estruturas articuláveis de madeira. Espera-se que, a partir desta dissertação, novas frentes de pesquisa em arquitetura cinética se abram e que em breve, profissionais da área de arquitetura e construção tenham uma maior variedade de possibilidades estruturais cinéticas, em madeiras certificadas comercializadas no Brasil, para utilizarem em suas soluções de projeto.

1.3 Objetivos

- Aplicar os conceitos de mobilidade estrutural para a geração de modelos articuláveis a partir da análise de sistemas estruturais e de arquiteturas cinéticas;
- Propor aplicações arquitetônicas da madeira considerando a produção de peças padronizadas;

- Alcançar resultados que apontem para a viabilização do uso criativo da madeira na arquitetura brasileira com o desenvolvimento viável e versátil de estruturas articuláveis.

1.4 Estrutura do Trabalho

A estrutura desta dissertação apresenta-se no seguinte formato:

- Este Capítulo 1, introdutório, apresenta a relevância do tema abordado e os objetivos pretendidos;
- O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica onde são expostos os seguintes itens:
 - Arquitetura Cinética: a adaptabilidade arquitetônica será analisada como um processo histórico da busca pela funcionalidade e a mobilidade estrutural;
 - Estruturas Articuláveis: definição dos requisitos básicos de sistemas estruturais articuláveis e suas características geométricas;
 - Madeira: análise das características importantes para o uso estrutural e abordagem da madeira como elemento arquitetônico e material sustentável;
- O Capítulo 3 expõe a metodologia aplicada para a criação de protótipos visando novas estruturas articuláveis assim como a realização de simulações virtuais para a avaliação destas estruturas. Neste capítulo são abordados os seguintes itens:
 - Prototipagem física dos três modelos desenvolvidos;

- Simulações de movimento e do comportamento físico dos protótipos com o uso do *software* Solidworks;
- Utilização do *software* de iluminação DIALux para análise de luz e sombra proporcionada pela movimentação do Modelo I;
- Modelagem no *software* Rhinoceros de possibilidades arquitetônicas contendo os modelos articuláveis desenvolvidos;
- Finalmente, as conclusões deste trabalho são expostas no Capítulo 4.
- Após os capítulos são apresentados: a Referência Bibliográfica e o Apêndice.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Arquitetura Cinética

A palavra ‘cinética’, que vem do grego ‘kinesis’ (movimento), foi escolhida pelo escultor russo Naum Gabo para descrever a arte que explora efeitos visuais por meio de movimentos físicos, ilusão de ótica ou truques de posicionamento de elementos. A ‘Arte Cinética’ foi apresentada no Manifesto Realista em 1920 para descrever obras rítmicas que abordam a movimentação como meio de percepção do tempo real (HARRISON & WOOD, 1992). Contudo, alguns pesquisadores acreditam que a arte cinética teve seu início real apenas nos anos 30, quando Alexander Calder incorporou princípios mecânicos em seus ‘móviles’ (ARANDAS, 2007).

As obras de Calder se diferenciam pelo equilíbrio físico dos componentes. Na Figura I são apresentados dois móveis criados por Calder cujas peças se equilibram em uma estrutura metálica.

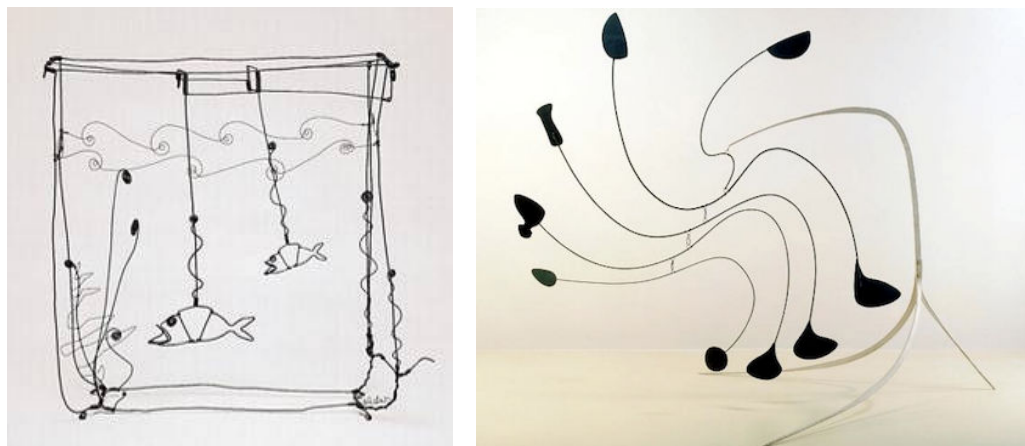


Figura 1. Móviles com estrutura metálica criados por Alexander Calder: Goldfish Bowl (1929) e The Spider (1940) (ENCONTRAMA, 2008; NASHER SCULPTURE CENTER, 2010).

Outros artistas como, por exemplo, Laszlo Moholy-Nagy (1895-1946), George Rickey (1907-2002) e o grupo Archigram (1961-1974), também buscaram na mobilidade, uma forma de tornar o espectador ativo. A interação entre espectador e obra-de-arte se dá por meio da definição do espaço delimitado pelas peças móveis e também pelo efeito da movimentação da sombra gerada pela luz sobre o objeto. Essas características chamaram a atenção de arquitetos que, posteriormente, utilizam esses recursos sem seus projetos.

Na arquitetura, a cinética foi abordada pela primeira vez em 1970 por William Zuk e Roger Clark no livro “Kinetic Architecture” (ZUK & CLARK, 1970). Os conceitos discutidos no livro eram revolucionários para a época e previam as tendências arquitetônicas dos anos subsequentes. De fato, grande parte das previsões, até então futurísticas, tornaram-se realidade. Atualmente, arquitetos e engenheiros empregam o movimento em arquitetura para agregar flexibilidade e funcionalidade ao projeto (FOTIADOU, 2007).

Zuk e Clark analisaram aplicações e consequências do movimento cinético na arquitetura para estabelecer uma relação onde a produção arquitetônica responde fisicamente à dinâmica. O raciocínio em análise e projeto começa a se modificar para se adequar às mudanças físicas do ambiente (HARRY, 2006).

Antes de pensar em grandes construções móveis, deve-se considerar que os elementos cinéticos sempre estiveram presentes na arquitetura. Portas, janelas e posteriormente brises, são

elementos cinéticos tradicionalmente usados para controlar o acesso de pessoas e a penetração de luz e ar. Sistemas simples, com pinos ou deslizantes, foram e ainda são muito usados para resolver diversificados problemas de engenharia e arquitetura (WIERZBICKI, 2006). Contudo, a ideia da cinética mais elaborada ainda é pouco utilizada em projetos estruturais. A tendência pela estabilidade, robustez e imobilidade incorporada à maioria das construções é o principal fator que impede a criação de projetos dinâmicos.

A grande maioria das edificações é completamente estática, ao contrário do ambiente natural que sofre contínuas mudanças. Os seres humanos estão sempre se movimentando, mudando, sentindo e reagindo às alterações do seu habitat natural. Percebe-se, então, a existência de um bloqueio que impede as transformações no ambiente e dificulta a relação deste com o usuário. A remoção desta barreira pode resultar na adaptação e reação da construção às necessidades e anseios dos usuários, amplificando, então, a experiência do ser humano com o espaço.

A inexistência deste bloqueio permite que os sistemas cinéticos sejam implementados na arquitetura para criar um nível de interação interdependente entre usuários e o ambiente habitado. Unir as construções tradicionais a um projeto com design dinâmico é o principal conceito da arquitetura cinética (DRUM, 2007).

O que se pode perceber em projetos contemporâneos como, por exemplo, o Turning Torso de Santiago Calatrava, é o conceito de movimento em construções estáticas. A geometria e o posicionamento de elementos padronizados causam um efeito de movimento mesmo em construções inteiramente estáticas (Figura 2). Neste caso, a noção de movimento é representada por desenhos que implicam relações de causa e efeito. Essa relação é baseada na ideia de que a sucessão de elementos está diretamente relacionada ao movimento físico e também indiretamente relacionada à expressão formal.



Figura 2. Turning Torso, projeto de Santiago Calatrava. (CANALS, 2010).

A operabilidade cinética inclui expansão, retração, deslizamento, dobramento e transformação de tamanho e forma. Os meios capazes de realizar os movimentos podem ser entre outros, pneumáticos, químicos, magnéticos, mecânicos e naturais (FOX, 2001).

A união de vários fatores como *softwares* mais avançados, tecnologia mais acessível, novos materiais e a inserção do movimento no projeto arquitetônico abrem caminho para uma arquitetura mais flexível às necessidades dos usuários. Além disso, pode agregar outras características como eficiência nas fases de elaboração e construção do projeto e redução de custos.

Nos últimos anos, arquitetos e engenheiros têm mostrado grande interesse no uso de aplicações cinéticas devido à necessidade de se construir de forma mais rápida e dinâmica. Como exemplos, têm-se as construções temporárias (arquitetura efêmera) desenvolvidas para atender necessidades emergenciais.

Diversas pesquisas têm sido feitas com o intuito de melhorar a eficiência destes sistemas estruturais cinéticos com o propósito de flexibilizar os projetos arquitetônicos. Outro conceito presente nos últimos anos é o da arquitetura cinética sustentável, ou seja, a utilização da arquitetura cinética para tornar uma construção fisicamente adaptável às mudanças locais e

climáticas (ZUK & CLARK, 1970; FOX, 2001; BEESLEY *et al.*, 2006; TEMMERMAN, 2007; LIEW *et al.*, 2008).

Em suma, a arquitetura cinética sustentável é representada por construções dinâmicas que possuem a capacidade de se transformar diante de variações climáticas com o objetivo de proporcionar maior conforto térmico e luminoso de um ambiente construído. O Instituto do Mundo Árabe projetado por Jean Nouvel e construído em Paris é um exemplo onde se desenvolveu uma idéia de painéis flexíveis que se abre e fecham em um sistema do tipo diafragma. Esse sistema permite a captação da luz natural iluminando o ambiente interno em gradientes desejados. As imagens do edifício são vistas na Figura 3.

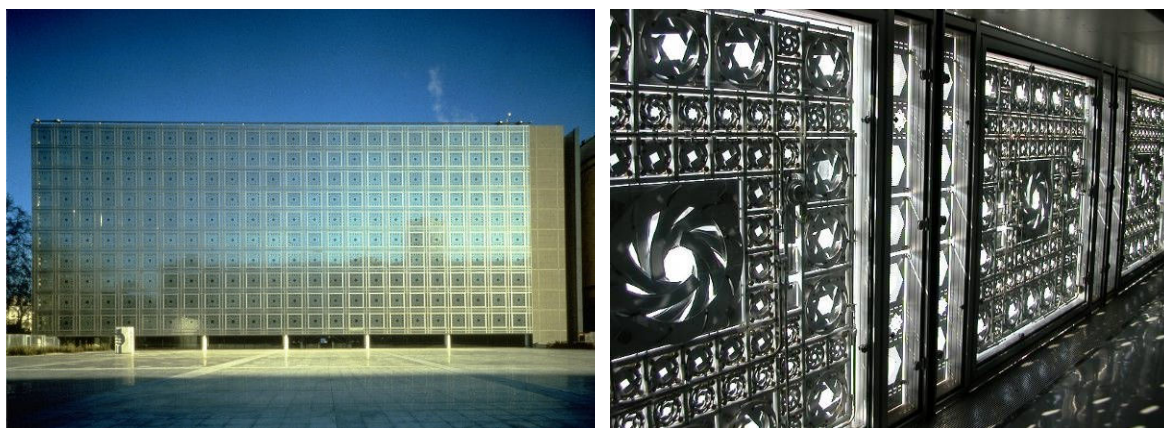


Figura 3. Instituto do Mundo Árabe, projetado por Jean Nouvel (ARCHINSPIRE, 2010).

Michael A. Fox (2000), do Departamento de Arquitetura do MIT (Massachusetts Institute of Technology – EUA), desenvolveu um projeto denominado '*Responsive Skylights*' que explora atributos relativos às funções cinéticas, interação humana, controle adaptativo e condições realísticas de operação. O edifício mantém o ambiente confortável termicamente através de um sistema de clarabóias que responde às mudanças do clima (Figura 4). Além disso, o sistema utiliza a iluminação natural dentro do ambiente de forma eficiente e, conseqüentemente, reduz os gastos com energia elétrica.

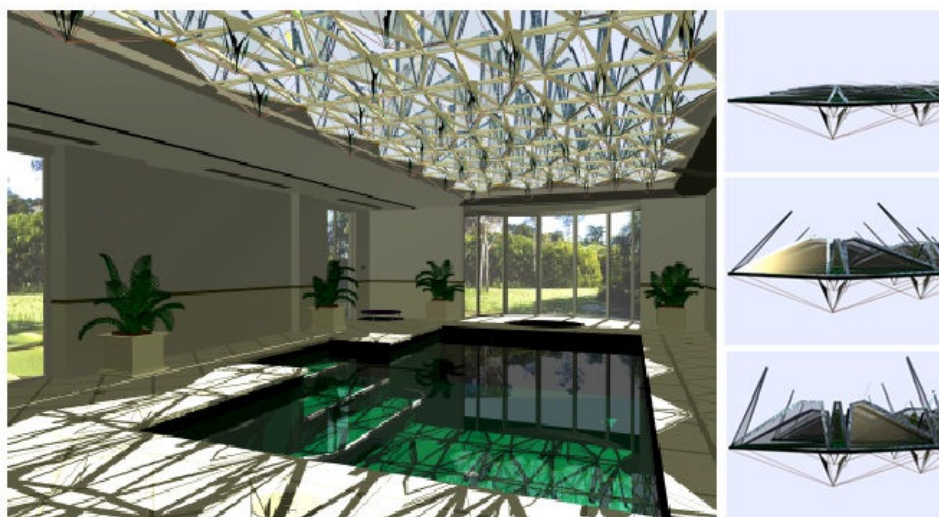


Figura 4. Clarabóias reativas que se movimentam de acordo com a condição climática (FOX, 2000).

Outro exemplo interessante é o trabalho desenvolvido, novamente, por pesquisadores do Departamento de Arquitetura do MIT, onde foi criada uma torre adaptável às condições de vento local. Neste caso, a estrutura possui uma distribuição de cargas semelhante às das árvores, fazendo com que a estrutura seja capaz de se movimentar diante de um vento forte. Na Figura 5, é possível perceber a movimentação da torre sem qualquer intervenção humana.



Figura 5. Torre flexível desenvolvida por pesquisadores do MIT (KILIAN *et al.*, 2006).

A interação física do ser humano com o ambiente é outra forma de abordar a cinética na arquitetura. Neste caso, a tecnologia é o principal recurso para o desenvolvimento de projetos interativos e inovadores (CASTLE, 2005). À medida que a tecnologia avança, principalmente nos campos de engenharia elétrica e mecatrônica, os projetos arquitetônicos interativos ganham mais espaço no mercado de construção.

Drum (2007), classifica a interação do usuário com o ambiente construído pode ser feita de três formas:

- sistemas interativos que descrevem o ambiente ocupado pelo usuário;
- sistemas que definem e alteram o ambiente de acordo com o usuário e;
- sistemas que se comunicam diretamente com o usuário.

Estes meios de interação ambiente/usuário são possíveis com o auxílio de sensores, micro-controladores e atuadores. Desta forma, a tecnologia aplicada à engenharia mecânica e elétrica, a inovação de materiais e de técnicas de fabricação tem feito com que vários conceitos considerados futurísticos se tornem prováveis no presente (FOX, 2003).

Os sistemas interativos direcionados à arquitetura podem transmitir uma ampla variedade de informações a respeito do ambiente construído. Dentre suas capacidades estão a detecção e localização de pessoas, a detecção de atividades e a divulgação interativa das informações (FOX, 2003).

Os designers Masamichi Udagawa e Sigi Moeslinger da Antenna Design aplicaram a ferramenta de detecção de pessoas no projeto da fachada da loja Boomingdales em Nova York, como se pode ver na Figura 6. A instalação dispõe de recursos visuais e sonoros que são visualizados através de um painel com imagens de flores que se acendem de acordo com a movimentação dos pedestres (ANTENNA DESIGN, 2002).



Figura 6. Instalação interativa *Power Flower* que é ativada por meio de sensores de presença (ANTENNA DESIGN, 2002).

Neste caso, foi utilizado um sistema de sensores que detecta a presença do pedestre e divulga essa informação de maneira interativa. A instalação *Enteractive*, desenvolvida pela empresa Electroland, é outro exemplo de divulgação interativa de informações. Neste projeto, um piso formado por vários quadrados é colocado sobre o chão e os quadrados se acendem com a presença de pessoas (ELECTROLAND, 2010). Esse efeito interativo é muito empregado em campanhas de marketing para divulgação de marcas.

Com o intuito de exemplificar as aplicações diretas da arquitetura cinética, as seções a seguir apresentam o trabalho de dois personagens da atualidade. Santiago Calatrava e Chuck Hoberman experimentam a criação de estruturas que alteram a funcionalidade de um espaço e criam ambientes modernos com características únicas. Além disso, será apresentada uma classificação de estruturas cinéticas para, em seguida entrar no contexto das estruturas articuláveis.

2.1.1 Santiago Calatrava

Em 1981, Santiago Calatrava, engenheiro civil e arquiteto, terminou sua tese de doutorado na qual aplicou princípios geométricos simples e também complexos para desenvolver estruturas compostas por barras que, quando em conjunto, formavam elementos básicos de dobramento. O arranjo destes elementos, tanto plano quanto espacial, podia ser projetado para ser

dobrado, além de ter as funções primárias de treliças de carga e de estruturas espaciais. Este arranjo cinético era baseado no princípio modular de construção e usava formas geométricas simples para produzir estruturas complexas bi ou tridimensionais que podiam ser dobradas e desdobradas, expandidas e contraídas (TZONIS, 2001). As estruturas são vistas na Figura 7.

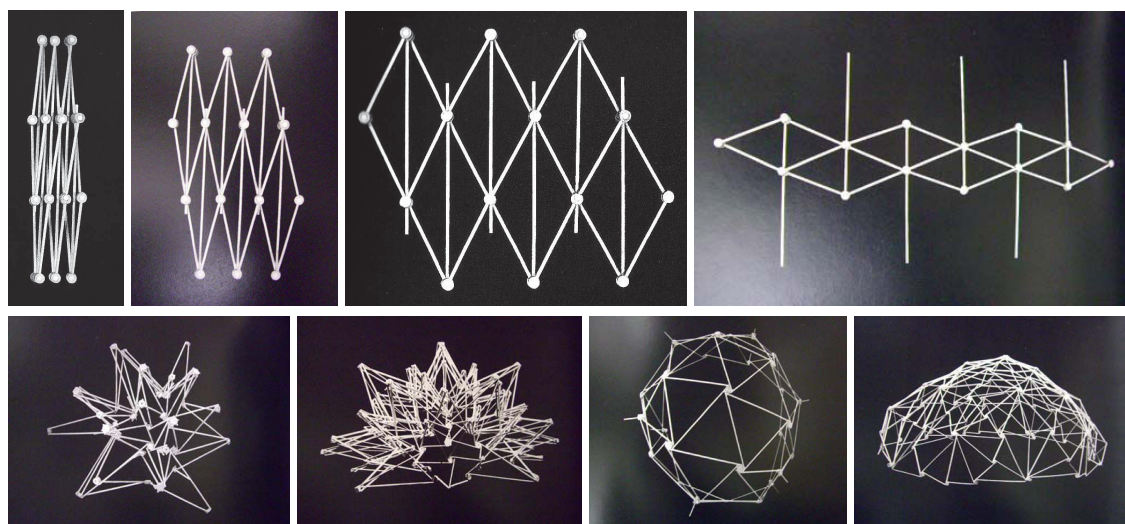


Figura 7. Transformação geométrica de arranjos compactados de estruturas planas e tridimensionais (HALLGREN, 2009).

Desde então, Santiago Calatrava tem desenvolvido diversos trabalhos abordando a arquitetura cinética como um grande diferencial. As formas orgânicas são frequentemente usadas em suas obras, muitas vezes dando idéia de movimento, mesmo quando são fixas (FOTIADOU, 2007). O Pavilhão Kuait, projetado para a Expo 92 e o Museu de Arte de Milwaukee são exemplos de estruturas cinéticas com formas orgânicas.

O Pavilhão Kuait possui em sua estrutura 17 elementos móveis com vinte e 25 m cada, que fazem referência aos dedos das mãos quando entrelaçados. Estes elementos são feitos de seções triangulares de madeira e suportados hidraulicamente por colunas de concreto armado. Durante o dia, os elementos de madeira são entrelaçados no formato de uma abóbada para oferecer sombra ao interior do ambiente. E quando chega a noite, a cobertura é aberta atingindo 525 m³, como ilustra a Figura 8 (HALLGREN, 2009).

O sistema hidráulico de contrapeso permite que os elementos da cobertura rotacionem sobre uma viga tubular que os une às pilastras. Como cada elemento se move de forma

independente, as possibilidades de configurações que a estrutura pode assumir são ilimitadas (ANDREW, 2008).



Figura 8. Cobertura articulável do Pavilhão Kuait na Expo 92 em Sevilha, Espanha (TZONIS, 1999; FLICKR, 2004; WIKIARQUITECTURA, 2010).

O Pavilhão Quadracci no Museu de Arte de Milwaukee foi o primeiro projeto de Calatrava nos Estados Unidos. Construído em 2001, à beira do lago Michigan, o pavilhão chama a atenção para o movimento de abertura e fechamento da cobertura, que faz referência às asas de um cisne. Esta cobertura móvel é formada por barras que produzem diferentes efeitos de sombra no interior da edificação. Para complementar o conforto luminoso, as laterais são compostas de brises que se movimentam durante todo o dia. As imagens do pavilhão são ilustradas na Figura 9.



Figura 9. Pavilhão Quadracci do Museu de Arte de Milwaukee (FLICKR, 2010; CALATRAVA, 2010).

O complexo científico-cultural Cidade das Artes e Ciências, projetado por Calatrava e Félix Candela, foi construído entre 1994 e 2005 sobre o antigo leito do rio Turia, em Valência. O primeiro elemento do complexo construído foi o Hemisférico, com aproximadamente 14.000 m²

e inclui um cinema, um planetário e uma área de lazer (CITY OF ARTS AND SCIENCE, 2010). O destaque desta edificação é a estrutura com sistema articulável que possibilita a abertura e fechamento parcial da cúpula.

A forma orgânica, característica marcante dos projetos de Calatrava, foi abordada novamente neste projeto com o objetivo de simular o movimento das pálpebras superiores dos olhos, como mostra a Figura 10. Este movimento é obtido por meio de um sistema hidráulico que move as cancelas curvas formadas de aço e vidro.



Figura 10. Estrutura projetada por Calatrava no complexo científico-cultural Cidade das Artes e Ciências em Valência, Espanha (ARCHISEEK, 2010; CANAL VALENCIA, 2010).

2.1.2 Chuck Hoberman

O artista e engenheiro Chuck Hoberman, aliado à grandes escritórios de arquitetura, desenvolve em sua empresa projetos dos mais variados setores incluindo produtos de consumo, abrigos temporários e estruturas arquitetônicas espaciais.

Os projetos de Hoberman são similares aos desenvolvidos por Calatrava em sua dissertação. As estruturas possuem sistemas geométricos altamente integrados que se expandem e contraem em duas e três dimensões. Utilizam superfícies articuláveis que dobram e desdobram, manual ou mecanicamente. Outra característica que o arquiteto preza em seus projetos é o máximo de desempenho com o mínimo de material. A integração entre material e mecanismos agrega leveza, estabilidade e fluidez aos projetos (HARRY, 2006). Os sistemas dos mecanismos são claramente vistos nas relações estruturais e no modo como as estruturas se articulam, fazendo com que os movimentos sejam entendidos visualmente (SORGUÇ *et al.*, 2009).

Um exemplo no qual Hoberman aborda o movimento dinâmico na arquitetura é a Esfera Hoberman (Figura 11). Construída pela primeira vez em 1992, a esfera é formada por elementos conectados entre si por meio de juntas rotacionais que, com o auxílio de um motor elétrico, promovem a expansão e contração da estrutura. O diâmetro inicial de 1,4 m se expande para 5,9 m, ou seja, a esfera aumenta cerca de quatro vezes seu tamanho (Figura 12). Esta expansão do diâmetro é conseguida com o auxílio de elementos que se expandem linearmente em relação ao centro (HOBERMAN, 2009).



Figura 11. Esfera Hoberman – estrutura articulável tridimensional (HOBERTMAN, 2009).



Figura 12. Expansão da esfera cujo diâmetro aumenta de 1,4m para 5,9m (HOBERTMAN, 2009).

A ideia fundamental dos projetos de Hoberman se baseia no princípio de que um objeto pode se transformar da mesma forma que um organismo natural. Hoberman argumenta que embora as transformações suaves de forma e tamanho sejam facilmente encontradas no mundo natural, elas ainda são raras em obras humanas (SABIN & JONES, 2008).

A cúpula ‘Iris Dome’, instalada no Museu de Arte Moderna de Nova York em 1994 e na Feira de Hanover em 2000, é um exemplo de como o movimento suave e contínuo pode transformar uma estrutura (Figuras 13 e 14). A cúpula se expande e contrai por meio de barras conectadas formando um sistema do tipo tesoura (*scissor-like element*) (HOBERTMAN, 2009). Essa estrutura pode ser construída em qualquer tamanho, visto que os elementos angulares,

conectados por anéis co-axiais, formam uma estrutura pantográfica que proporciona estabilidade e movimento uniforme (BUHL *et al.*, 2004).



Figura 13. Instalação da cúpula articulável 'Iris Dome' no Museu de Arte Moderna de Nova York em 1994 e na Feira de Hanover em 2000 (HOBERTMAN, 2009).

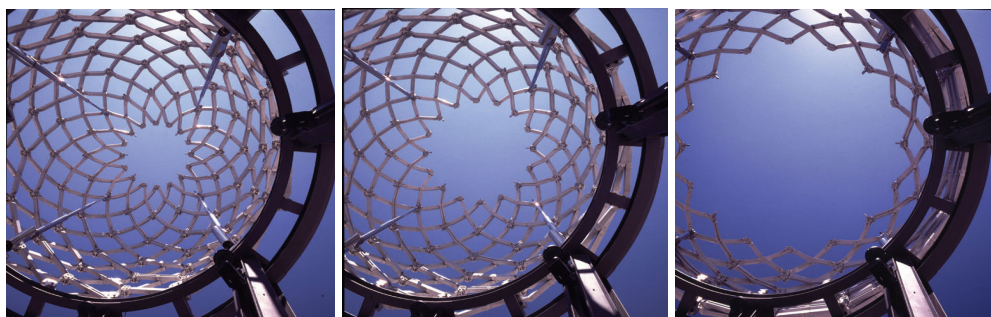


Figura 14. Desenho formado pela movimentação da cúpula (HOBERTMAN, 2009).

O Arco Hoberman, construído em Utah nos Estados Unidos, foi projetado para os Jogos Olímpicos de Inverno em 2002 e possui 10 m de altura por 21 m de largura (Figura 15 e 16). Neste exemplo, a sinergia entre estrutura e mecanismo resulta em uma simetria geométrica operacional entre os elementos, o que é um fator fundamental para suportar as cargas e a movimentação de toda a estrutura.



Figura 15. Arco articulável criado para os Jogos Olímpicos de Inverno em 2002 (HOBERTMAN, 2009).

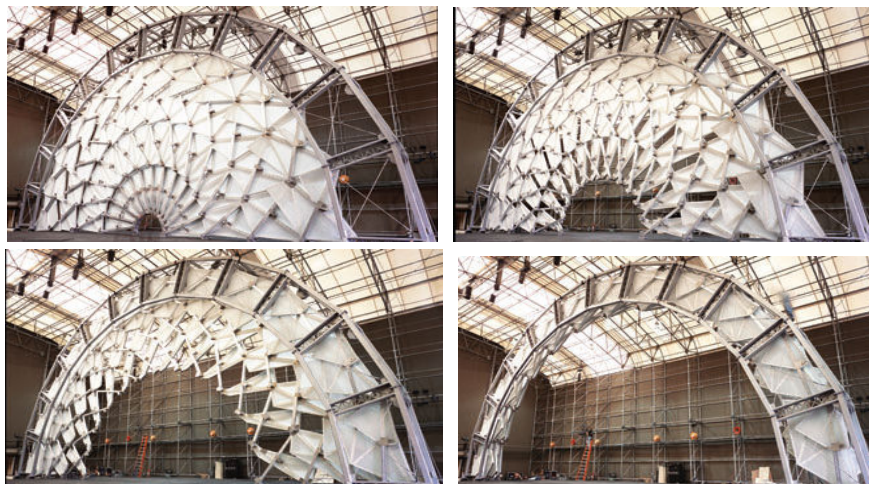


Figura 16. Movimento de abertura e fechamento do arco (HOBERTMAN, 2009).

Como se pode perceber, grande parte das estruturas desenvolvidas por Hoberman possui mecanismo tridimensional do tipo tesoura altamente adaptável. Esse sistema faz com que as

estruturas sejam capazes de se transformar em múltiplas escalas, adaptando-se a diversos ambientes.

Já o projeto do Aldar Central Market, nos Emirados Árabes, possui elementos de madeira que deslizam sobre um esqueleto para permitir a abertura e fechamento da cobertura. Esse mercado, considerado um dos lugares mais antigos da cidade de Abu Dhabi, tem como nova proposta o objetivo de combinar baixo-custo, sustentabilidade e tecnologia. Hoberman desenvolveu um sistema de teto móvel para controlar a luminosidade e a ventilação. Além do aspecto técnico, esta cobertura se diferencia esteticamente, visto que o desenho do telhado fechado referencia os tradicionais telhados islâmicos, como mostrados nas Figuras 17 e 18. O término da construção da cobertura está previsto para 2011 (HOBERMAN, 2009).



Figura 17. Aldar Central Market em Abu Dhabi (ARCHTRACKER, 2010).

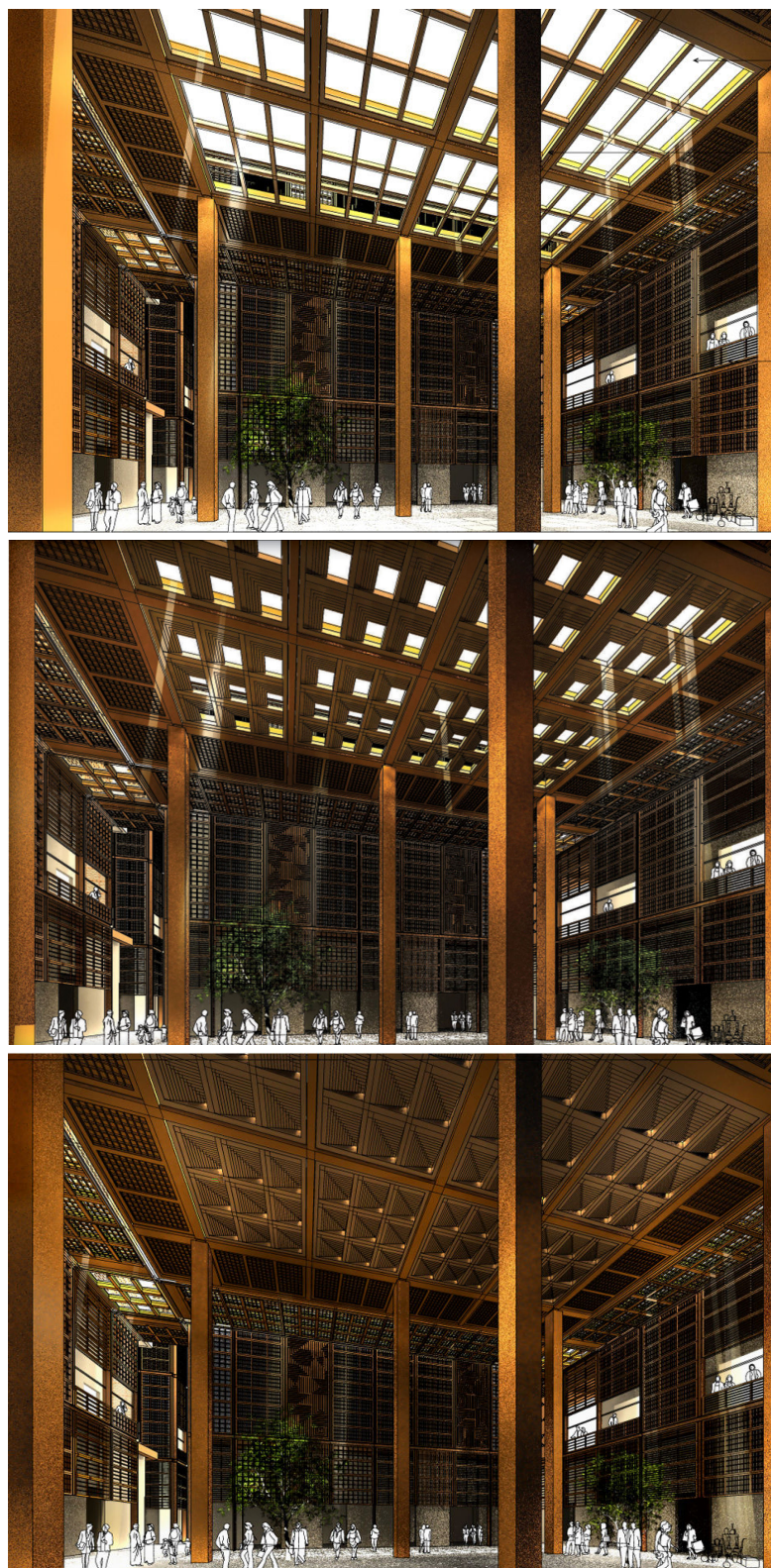


Figura 18. Desenho da cobertura do Aldar Central Market (HOBERTMAN, 2009).

2.1.3 Classificação

No contexto arquitetônico, a cinética é definida como a aplicação de objetos com partes mecânicas que podem se movimentar por meio de três tipologias básicas: estruturas engastadas, dinâmicas e articuladas (ZUK, 1995) (Figura 19).

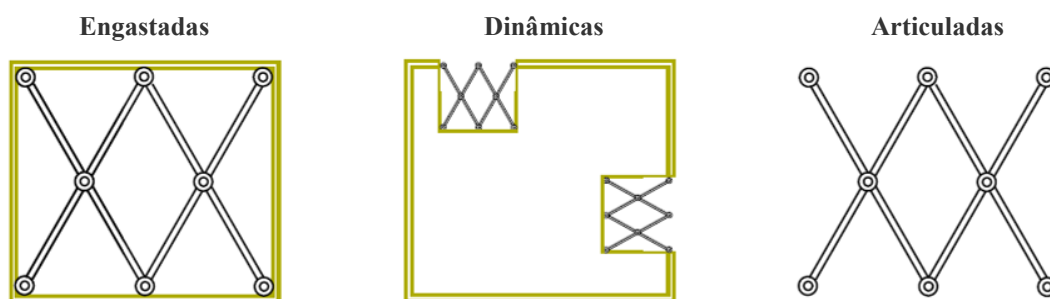


Figura 19. Diagramas de tipologias cinéticas na arquitetura (FOX & YEH, 1999).

As estruturas cinéticas engastadas são sistemas existentes dentro de um conjunto arquitetônico fixo em um determinado local. Sua principal função é controlar a movimentação de massas através de um conjunto de sensores presentes no sistema arquitetônico ou no edifício em si em resposta aos fatores de mudança. Esses fatores podem ser ambientais ou humanos e podem incluir movimentos axiais, torção, flexão, instabilidade e vibrações. Esse sistema é recomendado para construções que foram projetadas como um ‘corpo’, ou seja, mudam a postura e contraem os músculos para se adaptar às adversidades. Como consequência, esta estrutura corre o risco de romper-se (FOX & YEH, 1999).

Os sistemas dinâmicos atuam de forma independente em relação ao conjunto arquitetônico. As aplicações incluem portas, paredes, clarabóias, coberturas e vários outros componentes modulares. Um exemplo interessante de aplicação pode ser um auditório cuja cobertura muda sua forma para fornecer melhores propriedades acústicas (FOX & YEH, 1999).

As estruturas cinéticas articuladas são, tipicamente, construídas em locais temporários e são facilmente transportáveis. A principal vantagem deste sistema é a facilidade de montagem e desmontagem. Dentre as aplicações destacam-se as estruturas para pavilhões de exposições

itinerantes, abrigos temporários, estruturas de antenas aeroespaciais, entre outros (TIBERT, 2002).

Partindo destas três tipologias, chega-se em uma classificação mais específica que avalia a mobilidade, a localização e a geometria das construções (FOX, 2001). Nesta classificação a arquitetura cinética é dividida em dois grupos principais, como mostra a Figura 20.

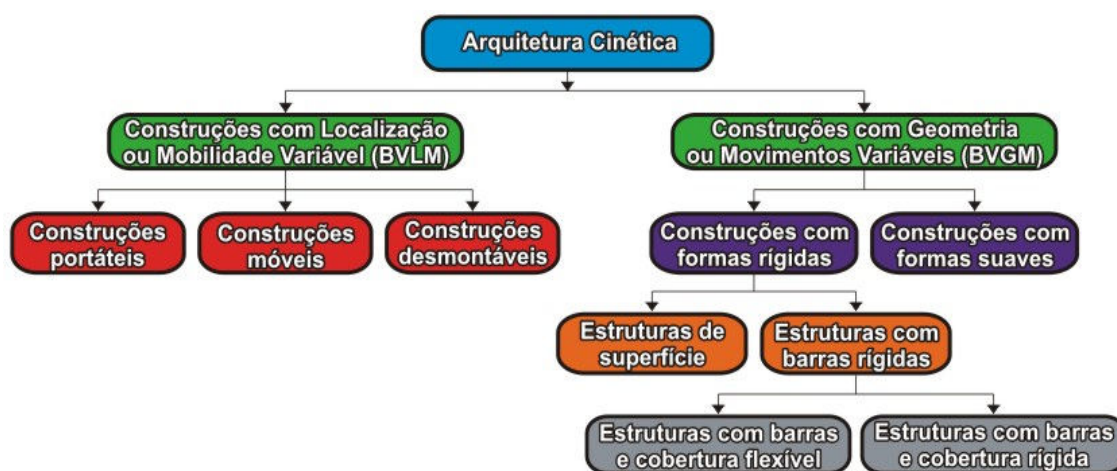


Figura 20. Principal classificação da Arquitetura Cinética (KORKMAZ, 2004).

O primeiro grupo é constituído de edificações ou estruturas com localização ou mobilidade variável, BVLM (*Building with Variable Location or Mobility*), ou seja, construções portáteis e desmontáveis como tendas e barracas pré-fabricadas.

O segundo grupo é composto por edificações ou estruturas com geometria ou movimento variável, BVGM (*Building with Variable Geometry or Movement*). Neste grupo estão os exemplos mais comuns de arquitetura cinética como as estruturas tensionadas e todos os tipos de estruturas com barras (KRONENBURG, 1995). Este grupo se subdivide, ainda, em outros dois, com base no material em que as estruturas são feitas.

No grupo cujas estruturas possuem formas suaves, a capacidade de transformação do material promove a convertibilidade. As estruturas de membrana, estruturas com cabos e estruturas pneumáticas fazem parte deste grupo. Já no grupo composto por formas rígidas, a

convertibilidade é promovida por meio da capacidade do material de se deslizar, dobrar ou girar com o auxílio de conectores.

Uma estrutura com formas rígidas se comporta como um mecanismo estrutural. Este sistema estrutural é formado por elementos com pequena distância entre si e capaz de suportar cargas variáveis. Esses elementos, quando conectados, formam mecanismos capazes de transferir forças e movimentos de forma controlada. A integração de funções estruturais e mecânicas assegura que a estrutura seja capaz de trabalhar sem nenhum suporte estrutural secundário ou dispositivo mecânico externo (KORKMAZ, 2004).

As estruturas de superfícies e as estruturas com barras rígidas são subdivisões das estruturas com formas rígidas. As primeiras são formadas, principalmente, por chapas ou conectores feitos com chapas. Painéis solares de satélites são exemplos deste grupo. As estruturas com barras rígidas possuem ligações estruturais conectadas por articulações que giram ou deslizam. Por serem formadas por mecanismos simples e eficientes, tais estruturas são muito usadas na arquitetura em estruturas espaciais, treliças e estruturas dobráveis (AKGÜN, 2004).

2.2 Estruturas Articuláveis

O termo '*estruturas articuláveis*' foi adotado neste trabalho de forma a traduzir o termo '*deployable structures*' utilizado em diversos artigos internacionais. Observou-se certa dificuldade de tradução, devido à escassez de trabalhos nacionais relativos a estruturas com algum tipo de movimento. Deste modo, esta pesquisa foi baseada, em sua maior parte, em trabalhos de pesquisadores e arquitetos internacionais.

Uma estrutura articulável é qualquer mecanismo capaz de proporcionar expansão ou contração de um objeto. Estas estruturas são compostas por elementos conectados com o auxílio de articulações que permitem a movimentação das peças. Diferentes das estruturas

convencionais, estas articulações são projetadas para controlar mobilidades internas permitindo grandes transformações da forma. As aplicações destas estruturas podem variar desde painéis solares para satélites e para antenas espaciais até implantes médicos (YOU, 2007).

A funcionalidade e a viabilidade dos projetos deste tipo de estrutura dependem não só do comportamento estrutural da configuração no estágio final, mas também da resposta estrutural durante a movimentação e/ou desmontagem. Os múltiplos critérios de projeto existentes durante a movimentação, assim como na estrutura em seu estágio final, fazem estas estruturas serem bem diferentes daquelas convencionais (GANTES, 2001).

O conceito de ‘estrutura articulável’ já vem sendo utilizado há vários anos. Exemplos variados são encontrados no dia-a-dia como, por exemplo, as treliças dobráveis utilizadas em portas de elevadores, as barracas de camping cuja estrutura é compactada e expandida para formação do abrigo, o guarda-chuva que é compactado a partir de um movimento de deslizamento, entre outros (Figura 21).



Figura 21. Treliças dobráveis utilizadas em portas de elevadores antigos e em guarda-chuvas (FLICKR, 2009).

Segundo CHILTON (2000), a primeira estrutura tridimensional articulável direcionada para a área de arquitetura e engenharia foi desenvolvida pelo arquiteto espanhol Emilio Perez Piñero no início dos anos 60. Nesta estrutura, a unidade básica é formada por dois elementos conectados entre si pelo centro ou perto dele, para produzir um mecanismo como o da tesoura

(Figura 22a). As unidades são ligadas na extremidade para formar um arranjo expansível (Figura 22b). Uma série de arranjos planos é unida formando uma estrutura tridimensional (Figura 22c).

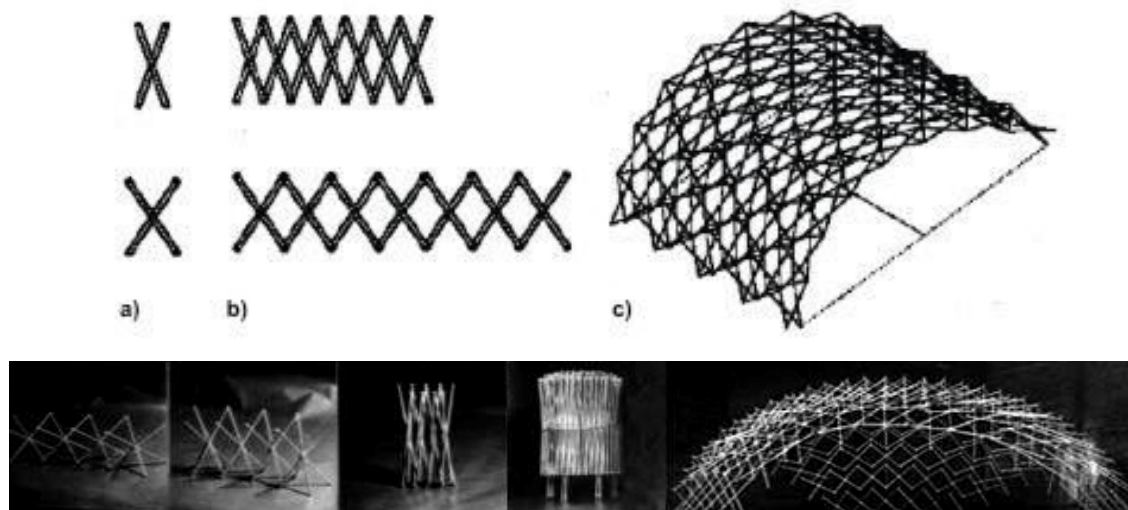


Figura 22. Estrutura articulável: a) mecanismo tipo tesoura, b) conjunto com uniões do tipo tesoura e c) estrutura tri-dimensional dobrável (CHILTON, 2000, PIÑERO, 2010).

Após algum tempo, esse tipo de estrutura, formada por elementos de tesoura foi explorado por diversos pesquisadores. A ideia principal é baseada em pares de barras conectadas entre si em um ponto intermediário e, ao mesmo tempo, suas extremidades são unidas às extremidades de outros pares permitindo-lhes girar livremente sobre um eixo perpendicular em um plano comum (GANTES *et al.*, 2004).

Esse sistema, aparentemente simples, deu origem a várias outras configurações mais avançadas. Para citar um exemplo, ZHAO *et al.* (2008) apresentam várias combinações onde as barras possuem um elemento de união que possibilita diversificadas formas de movimentação, como mostra a Figura 23.

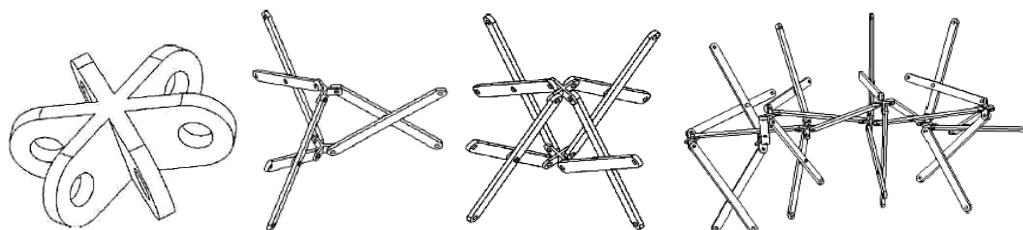


Figura 23. Elemento de união das barras e configurações desenvolvidas (ZHAO *et al.*, 2008).

Em grande parte dos projetos de estruturas articuláveis, o estudo do processo de articulação é a fase mais desafiadora de todo o desenvolvimento e apresenta várias restrições sobre o que pode ou não ser realizado. Deste modo, torna-se impossível abordar este tema baseado em uma única teoria ou conceito. O estudo de uma estrutura bem sucedida e os conceitos nela embutidos identificam regiões factíveis onde é possível evoluir para novos conceitos que ampliam as fronteiras da concepção espacial (PELLEGRINO, 2001).

Do ponto de vista estrutural, as estruturas articuláveis precisam suportar três condições diferentes: posição inicial (antes da movimentação da estrutura); posição intermediária (durante a movimentação da estrutura); e posição final (após a movimentação da estrutura). O estudo desse processo requer atenção e sucessivas repetições para que se consiga alcançar um equilíbrio entre a flexibilidade desejada durante a movimentação e a rigidez na configuração final (GANTES, 1997). Como exemplo, tem-se o protótipo de uma antena espacial desenvolvido no Laboratório de Estruturas Articuláveis da Universidade de Cambridge. A estrutura da antena é formada por barras conectadas formando um mecanismo de tesoura onde as extremidades são unidas para formar uma estrutura circular pantográfica (TIBERT, 2002). As imagens das etapas da articulação são vistas na Figura 24.



Figura 24. Análise em laboratório da sequência de articulação de um protótipo de antena (TIBERT, 2002).

Até recentemente, arquitetos envolvidos com o design das construções não empregavam mecanismos estruturais móveis em seus projetos. Atualmente, esses mecanismos são usados tanto para agilizar a montagem das construções, quanto para promover grandes efeitos visuais.

As estruturas com movimento, utilizadas na engenharia e arquitetura são compostas, basicamente, por mecanismos. Deste modo, entender os conceitos dos mecanismos é fundamental

para o conhecimento mais profundo acerca do comportamento das estruturas móveis.

Um mecanismo é a combinação de alguns elementos rígidos (uma cadeia cinética) conectados por articulações móveis (pares cinéticos) com o objetivo de transmitir um movimento (SHIGLEY, 1996). A mobilidade de um mecanismo é representada por parâmetros independentes que devem ser usados para colocar os elementos do mecanismo em uma posição particular.

REULEAUX (1963) criou o termo ‘conectores inferiores’ para descrever articulações com contato de superfície e ‘conectores superiores’ para descrever articulações com contato puntual ou linear. O autor divide os conectores inferiores em seis categorias, cujos desenhos são ilustrados na Figura 25:

- a) conectores rotativos: possuem movimento rotacional sobre um eixo;
- b) conectores prismáticos: possuem movimento linear sobre um eixo;
- c) conectores helicoidais: combinação de conectores rotativos e prismáticos;
- d) conectores cilíndricos: possuem movimento de deslizamento e rotação sobre um eixo;
- e) conectores esféricos : possuem movimento rotacional sobre três eixos;
- f) conectores planos: possuem movimento de deslizamento sobre dois eixos de uma superfície.

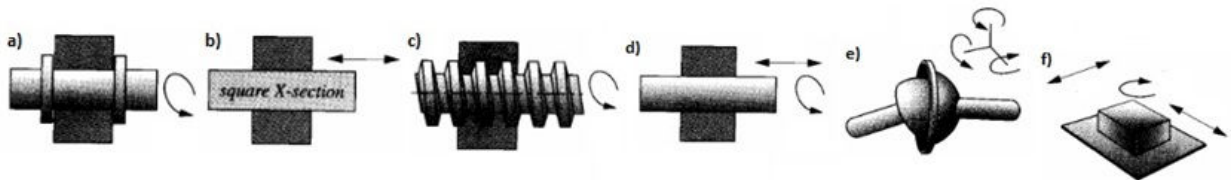


Figura 25. Tipos de conectores inferiores: a) rotativo; b) prismático; c) helicoidal; d) cilíndrico; e) esférico e; f) plano (REULEAUX, 1963).

O autor considera os conectores rotativos e prismáticos como os únicos usados em mecanismos planos. Os conectores helicoidais, cilíndricos, esféricos e planos são combinações entre os conectores rotativos e prismáticos para uso em mecanismos tridimensionais.

Os conectores superiores são classificados de acordo com o número do grau de liberdade permitido entre os elementos conectados (NORTON, 1999). As Figuras 26a e 26b apresentam dois tipos de conectores: rotatório e deslizante, que possuem apenas um grau de liberdade. Já as Figuras 26c e 26d mostram exemplos de conectores com dois graus de liberdade, ou seja, permitem dois movimentos independentes relativos à rotação e translação.

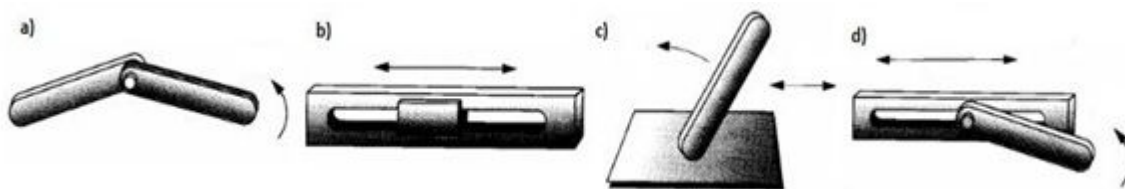


Figura 26. Conectores superiores; a) rotatório; b) deslizante; c) contra-plano e, d) cavilha com fenda (NORTON, 1999).

Para o desenvolvimento de estruturas articuláveis existem softwares que analisam especificamente os movimentos de rotação e translação como, por exemplo, o Solidworks (Dassault Systemes). Este software possui ferramentas de simulação que avaliam o comportamento físico-estrutural de uma estrutura com elementos móveis.

Estas avaliações são feitas, principalmente, em laboratórios acadêmicos cujos resultados são expostos em trabalhos técnicos. Como exemplo, tem-se a análise de um mecanismo articulável desenvolvido por BIDAUD *et al.* (2006), no Laboratório de Robótica da Universidade de Paris. Nesta análise foi aplicada uma carga de 40 daN perpendicular a uma seção do mecanismo. Na Figura 27, são mostradas imagens do Solidworks no qual os valores de tensão e de deslocamento são visualizados com o auxílio da escala de cores.

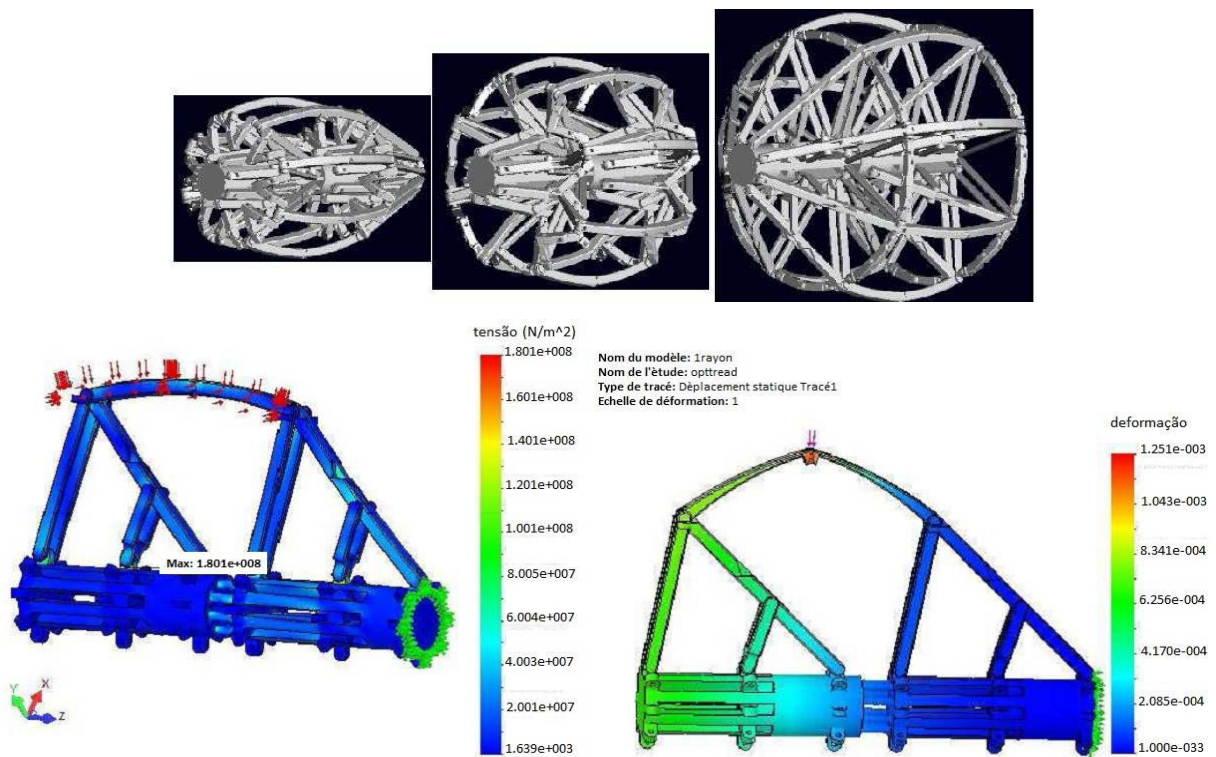


Figura 27. Mecanismo articulável analisado no *software* Solidworks; imagens com os valores de tensão e deformação, respectivamente (BIDAUD *et al.*, 2006).

2.2.1 Contexto histórico

Em 1961, Emílio Pérez Piñero participou do Concurso Internacional para Estudantes de Arquitetura em Londres onde mostrou, pela primeira vez na arquitetura, uma estrutura articulável. Esta estrutura denominada ‘Teatro Móvel’ era composta por módulos dobráveis e podia ser usada tanto no solo quanto em cobertura (Figura 28). Com esta estrutura, Piñero ganhou o primeiro lugar do concurso e iniciou sua trajetória no campo das estruturas com movimento (CHURTICHAGA, 2005).



Figura 28. Teatro Móvel - Primeira estrutura tridimensional articulável desenvolvida por Emílio Pérez Piñero (CHURTICHAGA, 2005).

Paralelo aos estudos de Piñero, pesquisas sobre estruturas articuláveis eram focadas também em aplicações aeroespaciais.

No início, as aeronaves eram pequenas em virtude da capacidade limitada dos veículos de lançamento. Com o passar do tempo, aumentou a necessidade de aeronaves maiores, contudo,

os veículos de lançamento não sofreram grandes mudanças. Isso acarretou na busca por satélites e por outros equipamentos que pudessem ser compactados durante o transporte (TIBERT, 2002).

Grandes estruturas, como antenas e satélites, precisavam ser acondicionadas nos foguetes e, quando em órbita, expandidas. Surgiram, assim, as primeiras estruturas articuláveis que possuíam vantagens como volume pequeno e compactado, montagem rápida e facilidade de dobragem, como os exemplos mostrados na Figura 29 (PELLEGRINO, 1995).

O Sputnik, primeiro satélite lançado no espaço em 1957 pela antiga União Soviética, possuía mecanismos articuláveis para garantir a integridade do satélite durante o transporte. Imagens do satélite compactado e descompactado são vistas na Figura 30 (TIBERT, 2002).

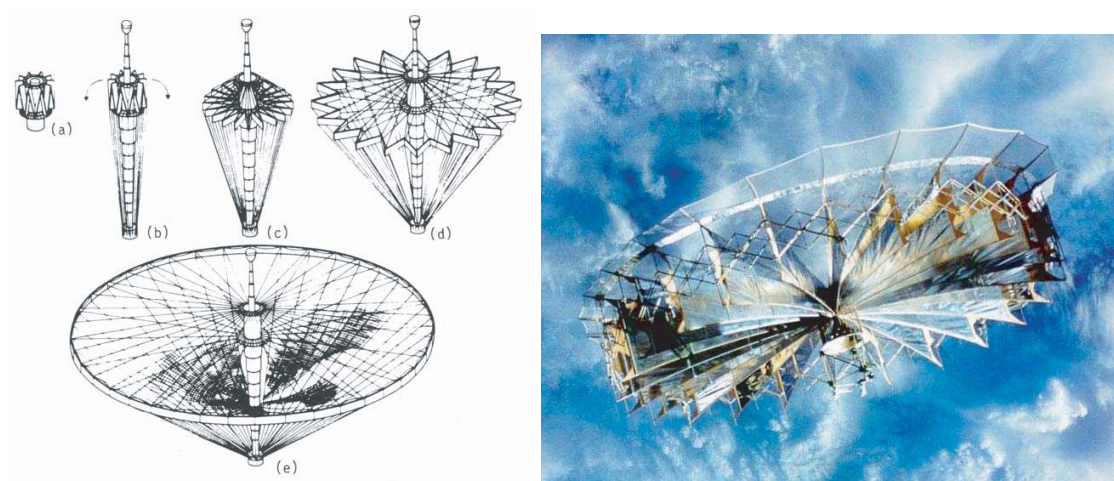


Figura 29. Sequência de articulação de uma antena; antena (TIBERT, 2002).



Figura 30. Mecanismo articulável para expansão/contração do Satélite Sputnik (THEDECIBELTOLLS, 2010; NPOINTERCOS, 2010).

Em 1964, Piñero projeta, constrói e instala o Pavilhão Transportável para Exposições em Madrid, com uma área de 800 m², mostrado na Figura 31. Esta foi a primeira estrutura articulável de grande porte construída no mundo. Era composta por módulos de 12 x 9 m que, quando compactados para transportes, chegavam a 0,8 x 0,7 m. A descompactação era feita com o auxílio de rodas e a estrutura se tornava estável com a introdução de barras adicionais. Para estabilização da estrutura era fixada uma cobertura de painéis metálicos. Após a exposição em Madrid, a estrutura foi transportada para San Sebastian e, em seguida, para Barcelona, onde ficou durante vários anos como instalação permanente (VALCÁRCEL & ESCRIG, 1993).



Figura 31. Primeira estrutura articulável de grande porte (PIÑERO, 2010).

O artigo publicado por Piñero na revista Construcción, em 1971, denominado ‘Teatros Desmontables’ expõe diversas soluções significativas para serem usadas em exposições temporárias. Um destes exemplos é visto na Figura 32.

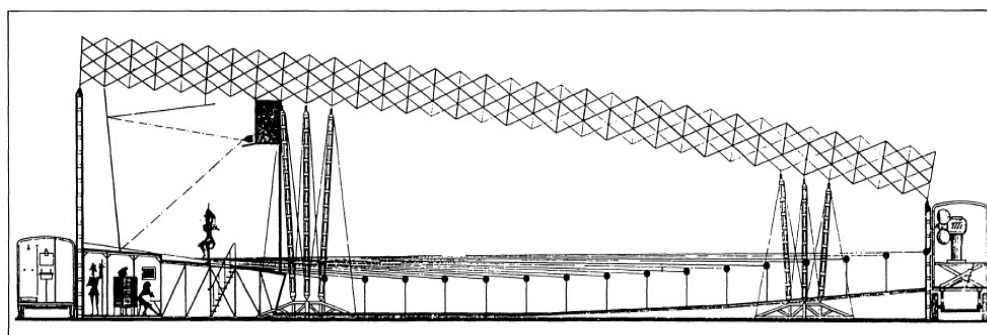


Figura 32. Seção de um teatro desmontável projetado por Emílio Pérez Piñero (VALCÁRCEL & ESCRIG, 1993).

O autor afirma neste artigo que, por não necessitar de fundação, as soluções estruturais articuláveis concebidas por ele podiam ser usadas tanto como instalações temporárias quanto permanentes (PIÑERO, 1971).

Após as pesquisas iniciais desenvolvidas, principalmente, por Piñero, diversos centros de pesquisas começaram a buscar soluções estruturais flexíveis com objetivo de entender o comportamento das estruturas articuláveis. Como exemplo, tem-se o Instituto de Tecnologia de Massachussetts (MIT), a Universidade de Montpellier na França, a Universidade de Coruña na Espanha, entre outros. Destacam-se, também, trabalhos de grande importância desenvolvidos por Pellegrino no Departamento de Engenharia da Universidade de Cambridge e uma série de conferências organizadas por Escrig da Universidade de Sevilha na Espanha (DONLEY, 2001). Nas Figuras 33 a 37 são mostrados alguns exemplos de estruturas e mecanismos desenvolvidos em universidades.



Figura 33. Dobradiça para estruturas articuláveis desenvolvida por Pellegrino *et al.* (2002) na Universidade de Cambridge.

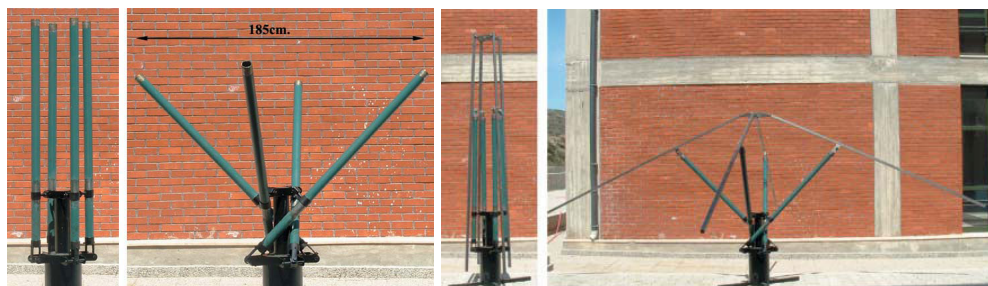


Figura 34. Estrutura do tipo guarda-chuva desenvolvida por Korkmaz (2005) no Instituto de Tecnologia da Turquia.

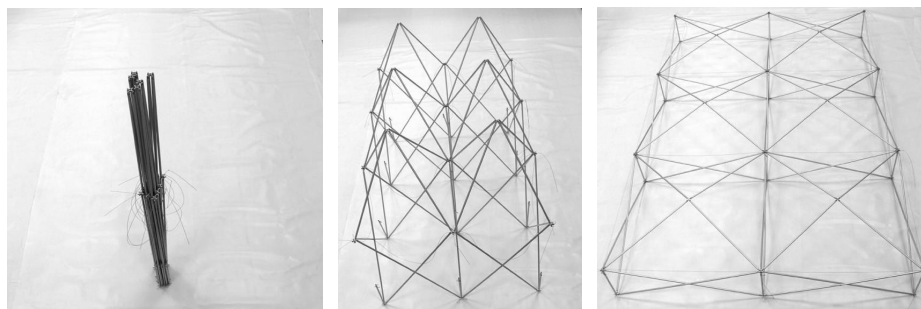


Figura 35. Estrutura articulável tensionada desenvolvida por Vu *et al.* (2006) na Universidade Nacional de Singapura.



Figura 36. Estruturas espaciais articuláveis desenvolvidas por Escrig & Sanches (2006).

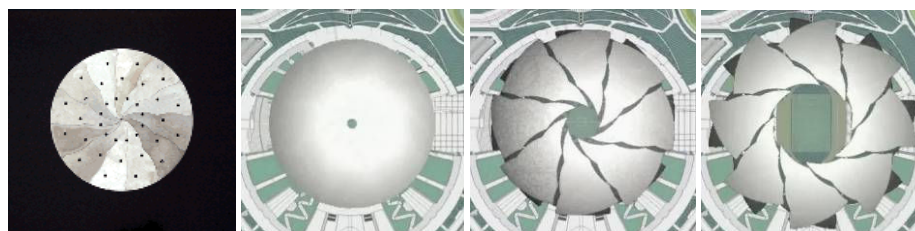
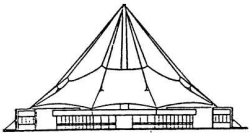
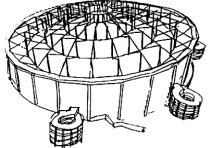
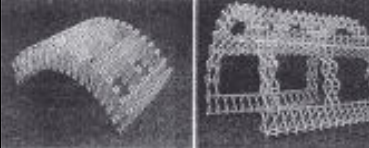


Figura 37. Estrutura de cobertura desenvolvida no Laboratório de Estruturas Articuláveis da Universidade de Cambridge, Inglaterra (MAO & LUO, 2008).

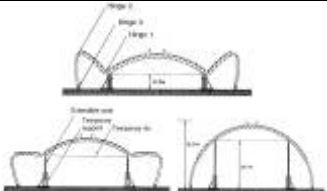
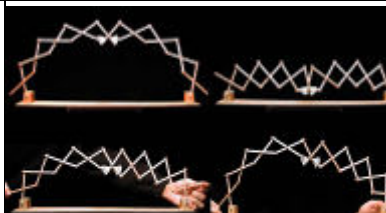
2.2.2 Classificação

Ainda não existe um método universal para classificar as estruturas articuláveis (DONLEY, 2001). Porém, alguns pesquisadores criaram seus próprios métodos de classificação e, dentre os mais conhecidos, destaca-se o método de Escrig, que descreve os tipos de estruturas articuláveis de acordo com combinações de materiais, formas e métodos de articulações (Tabela I).

Tabela I. Classificação das estruturas articuláveis

TIPOS	DESCRIÇÃO	EXEMPLOS
Estruturas com dobramentos tensionados	Dependem da tensão dos componentes estruturais para suportar toda a estrutura e dar a forma pretendida. Quando não expandida, tal estrutura pode ser dobrada, ficando com volume bem menor (ESCRIG, 1996).	 Coberturas para piscina (ESCRIG, 1996).
Cobertura tensionada sob pressão	São estruturas auto-suportáveis com compressão descontinuada, ou seja, as peças sob compressão não tem contato direto com as outras e se mantêm unidas através de membros intermediários pré-tensionados. Tal característica diminui o tempo de ereção, possibilitando seu uso como estruturas retráteis (DONLEY, 2001).	 Desenho da estrutura do Suncoast Dome (ESCRIG, 1996).
Coberturas retráteis	Estrutura cujas partes ou o conjunto inteiro pode ser transferido ou recolhido rapidamente, fazendo com que uma cobertura possa ser utilizada aberta ou fechada (ISHII, 2000).	 Sistemas de coberturas retráteis (ISHII, 2000).
Estruturas dobráveis	Se diferenciam das estruturas retráteis por conter componentes estruturais formados por peças dobráveis que produzem um efeito “sanfona” (ESCRIG & BREBIA, 1996).	 Estrutura de membrana dobrável. (ALBERN & LAGBECKER, 2002).
Estruturas tipo “guarda-chuva”	Estrutura que abre e fecha através de mecanismo deslizante sobre um mastro. Apesar de não prover o isolamento completo do ambiente ou a segurança total dos itens armazenados abaixo, tal estrutura é um escudo contra sol e chuva.	 Domo Izumo (WARAGAYA, 2008).
Estruturas móveis	Estrutura que abre e fecha através de mecanismo deslizante sobre um mastro. Apesar de não prover o isolamento completo do ambiente ou a segurança total dos itens armazenados abaixo, tal estrutura é um escudo contra sol e chuva.	 Kuwait Pavillion, Expo '92, Santiago Calatrava (JODIDIO, 2002).

- Continuação

Estruturas com elevação	A estrutura é posicionada no nível do solo e depois levantada para a posição final com a ajuda de um sistema de elevação. A cobertura por si só não é uma estrutura articulável, mas a estrutura de elevação usada para colocar a cobertura em sua posição final é uma estrutura articulável.	 Três estágios da ereção do World Memorial Hall em Kobe, Japão. (CHILTON, 2000).
Estruturas articuláveis	Possuem membros encaixados às extremidades que permitem sua extensão e contração. Inclui três principais tipos: estruturas de malha dobrável, malhas com uniões não amarradas e estruturas com armação em X.	 Formas alternativas para um sistema do tipo tesoura (AKGÜN, 2004).

Fonte: DONLEY, 2001.

As estruturas cinéticas podem, ainda, ter uma classificação especial de acordo com seu sistema estrutural. Esta classificação é dividida em quatro grupos principais que podem ser distinguidos por: estruturas espaciais com barras interligadas; estruturas articuláveis com chapas interligadas; estruturas com cabos (estruturas *tensegrity*) e estruturas de membrana (HANAOR & LEVY, 2001; TEMMERMAN, 2007). Estes sistemas estruturais são baseados em características morfológicas e cinéticas, como mostra a Figura 38.

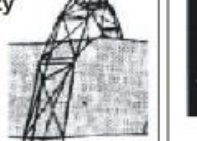
		Morfologia			
Cinemática	Conectores rígidos	Treliça			Contínuo
		DLG*	SLG**	Flexível	Chapas
		Pantográficos (tesoura)			Chapas dobradas
		 Tesouras periféricas  Tesouras radiais 	 Tesouras angulares (coberturas retráteis) 	 Mastros e arcos 	 Articulação linear  Articulação radial
	Deformáveis	Barras			Superfícies curvas
 Conexões articuladas		 Superfícies geométricas  Placas recíprocas (dismontável)	 		
 Tensegrity 		 	Tênsil  Híbrido  Puro	Pneumático  Baixa pressão  Alta pressão	

Figura 38. Classificação das estruturas cinéticas de acordo com seu sistema estrutural. * DLG – *Double-layer Grid*. ** SLD – *Single-layer Grid* (HANAOR & LEVY, 2001 (traduzido)).

O objetivo dessa classificação é destacar de forma hierárquica os princípios utilizados por cada conjunto de objetos em discussão (LEVY & LUEBKEMAN, 1999). As colunas da tabela representam os aspectos morfológicos e as linhas representam as propriedades cinéticas, que são de fundamental importância no contexto de estruturas articuláveis. As duas principais categorias morfológicas, treliça e contínuo, se diferenciam pelo fato de a primeira possuir a

estrutura primária de carga composta por membros discretos enquanto que, na segunda, a superfície da estrutura tem a função principal de suporte de carga (HANAOR & LEVY, 2001).

As duas principais subcategorias relacionadas à cinética, conectores rígidos e deformáveis, são assim classificadas por utilizar barras e chapas na primeira e cabos e tecidos na segunda, resumidamente. Geralmente, a articulação de estruturas compostas de conectores rígidos tende a ser controlada com mais precisão; contudo, sua complexidade mecânica acarreta maior custo (HANAOR & LEVY, 2001). As demais subcategorias geradas pela subdivisão das duas categorias principais são definidas de acordo com características morfológicas bem específicas e podem ser melhor detalhadas em Levy & Luebkehan (1999), Kronenburg (1999), Astudillo e Madrid (1999), Escrig & Brebia (1996), Miura (1993), entre outros.

2.2.3 Utilização de estruturas articuláveis nas edificações arquitetônicas

De um modo geral, as estruturas articuláveis são usadas na arquitetura com o objetivo de flexibilizar um determinado espaço ou facilitar a montagem de uma grande estrutura. As coberturas são os principais elementos construtivos que utilizam a articulação para aumentar ou diminuir áreas cobertas, para controlar a luminosidade de um ambiente ou para promover efeitos visuais causados pela movimentação da estrutura.

Na Figura 39, observa-se a cobertura dobrável de um pátio interno da Câmara Municipal de Viena. Esta cobertura, construída em 2000, possui vigas fixadas nos dois lados do pátio que servem de apoio para as quatro vigas transversais e para os cabos. Tanto as vigas transversais quanto os cabos são fixados a rolamentos axiais e radiais que se movimentam ao longo de um perfil em forma de T, fixado nas vigas longitudinais (Figura 40). A principal função das vigas transversais é captar as dos cabos, que é o peso da cobertura. Desta forma, a estrutura tem de suportar apenas as cargas de compressão. Os cabos presos à cobertura são puxados ou empurrados (de acordo com a direção do movimento) pelas vigas transversais, formando um movimento sanfonado (WALTER, 2006).



Figura 39. Cobertura do pátio da Câmara Municipal de Viena, na Áustria (WALTER, 2006).

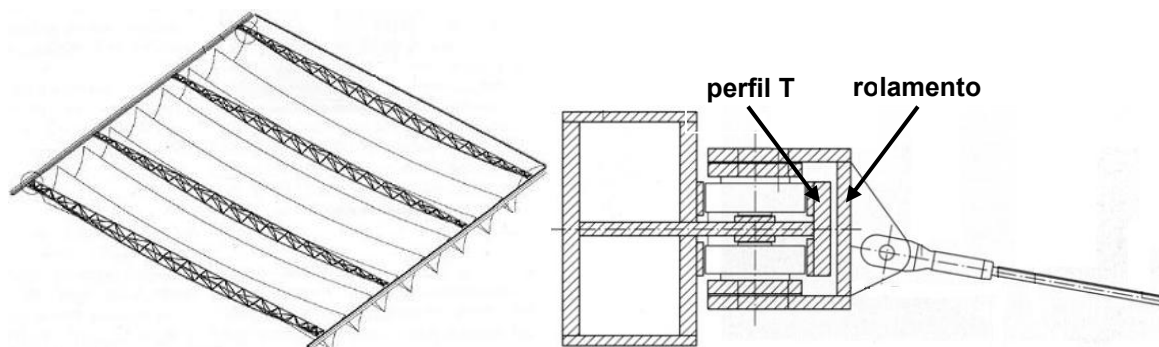


Figura 40. Estrutura da cobertura formada por vigas longitudinais e transversais; rolamento axial e radial (fixado nas vigas transversais) que se movimenta ao longo de um perfil T (fixado nas vigas longitudinais) (WALTER, 2006).

Na Figura 41, é mostrada a maior estrutura do tipo guarda-chuva já construída. Disposta em dois pátios de uma mesquita em Madinah, Arábia Saudita, estas coberturas são abertas durante o dia para minimizar a incidência de raios solares e reduzir a temperatura da mesquita. Os “braços” do guarda-chuva são fixados a um cilindro hidráulico que se movimenta sobre um mastro central. Barras finas de aço carbono são fixadas aos “braços” da estrutura para auxiliar o processo de fechamento e proteger o tecido quando a estrutura está completamente fechada (WALTER, 2006).



Figura 41. Cobertura do tipo guarda-chuva construída em uma mesquita em Madinah, Arábia Saudita (WALTER, 2006).

A Figura 42 apresenta uma estrutura dobrável desenvolvida pelo arquiteto Michael Jantzen. Projetada para ser uma pequena área de lazer, esta estrutura é constituída de painéis que se dobram com o auxílio de dobradiças e deslizam sobre perfis de aço. Os painéis são feitos de chapas de madeira com espaços entre as chapas que garantem uma iluminação diferenciada (MEINHOLD, 2008). A ideia principal do projeto é flexibilizar o espaço de acordo com as necessidades dos usuários.



Figura 42. Projeto M-Velope desenvolvido por Michael Jantzen (MEINHOLD, 2008).

A maioria das estruturas articuláveis desenvolvidas para projetos arquitetônicos é usada em coberturas transformáveis. Grande parte são coberturas retráteis usadas para cobrir, principalmente, quadras esportivas e grandes estádios. Esse tipo de cobertura facilita a manutenção dos estádios e permite que os espectadores possam assistir as atrações mesmo em más condições climáticas (BLOCK, 2003).

As coberturas retráteis são estruturas vinculadas a uma construção fixa ou móvel. Tais coberturas possuem partes móveis ou transformáveis com o objetivo de converter completa ou parcialmente um interior em um espaço ao ar livre. O projeto de coberturas retráteis requer conhecimentos especiais em técnicas construtivas, materiais, desempenho estrutural, etc. Em grandes construções, sua execução é mais difícil e complexa quando comparada a coberturas convencionais. Contudo, nos últimos anos, projetos complexos de coberturas retráteis têm se tornado possíveis com o auxílio de tecnologias que tornam as coberturas mais leves e otimizadas. A Allianz Arena em Munique é o exemplo mais recente de cobertura transformável. Projetada por Jacques Herzog e Pierre de Meuron, suas membranas retráteis movimentam-se radialmente e

são apoiadas por vigas construídas sob cobertura fixa (Figura 43) (ASEFI & KRONEMBURG, 2006).

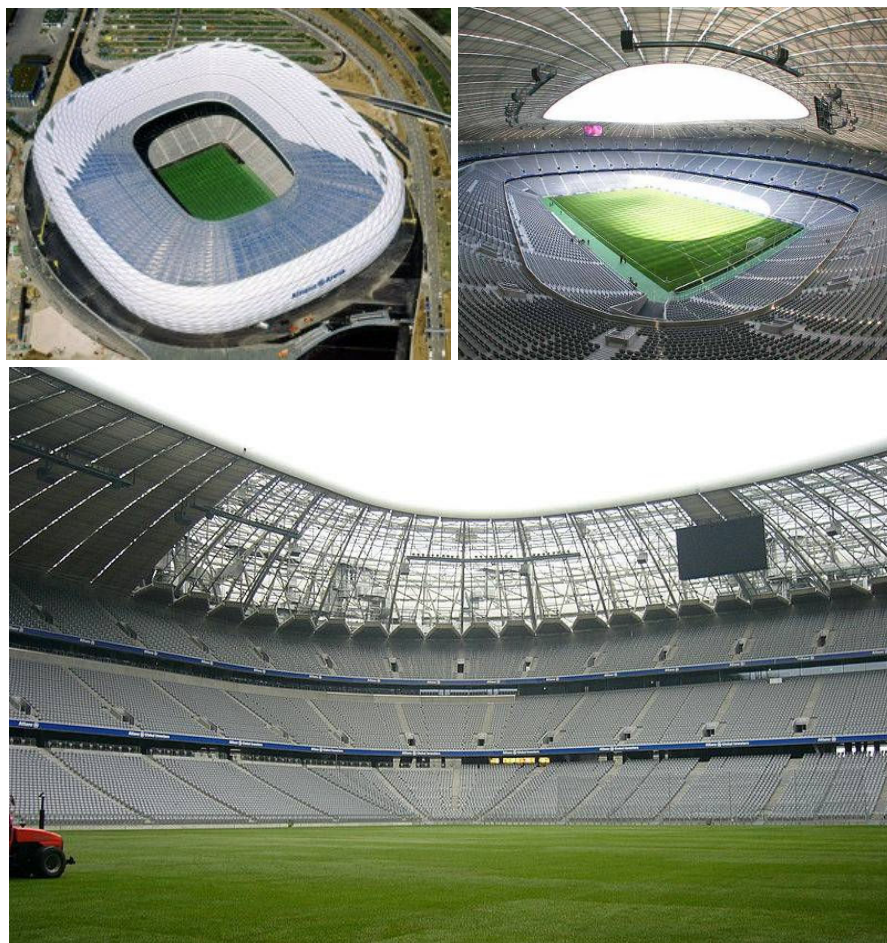


Figura 43. Allianz Arena em Munique (SIAP, 2008; FOOTBALLTRACK, 2009; MORITZ, 2009).

Na avaliação das coberturas retráteis é importante definir quais princípios estruturais podem ser usados para alcançar as expectativas. Isto é necessário para determinar os critérios de avaliação que consideram não somente os requisitos gerais de arquitetura, como sua relação forma/função, mas também requisitos específicos como multi-funcionalidade e adaptabilidade. Existem quatro questões principais que a arquitetura transformável e, mais especificamente, as coberturas retráteis devem responder a fim de confirmarem seu potencial. São elas: adaptabilidade em relação às mudanças; estética; condições operacionais; e manutenção (ASEFI & KRONEMBURG, 2006).

As coberturas transformáveis precisam ser adaptáveis não só em relação às condições ambientais locais, mas também em relação às necessidades dos usuários. Considerações sobre diferentes tipos de coberturas revelam que o sucesso delas está diretamente relacionado ao grau de integração entre os elementos estruturais, material utilizado, mecanismos de movimentação e flexibilidade operacional. Pode-se considerar que estes quatro fatores determinam a eficiência das coberturas e também estendem sua aplicação a outros sistemas de fechamento (ASEFI & KRONENBURG, 2006).

2.3 Madeira

2.3.1 A madeira na arquitetura e construção

A madeira é o recurso natural mais antigo e valioso utilizado para proteção contra intempéries. Em alguns casos, durante muito tempo a madeira foi o único material disponível para construção de casas, em meios de transportes, em grandes estruturas de locais públicos, em pontes, etc. A arte da construção de casas de madeira é conhecida desde 3000 a.C., quando se tem relatos de grandes construções que foram feitas na Europa Central, como esta mostrada na Figura 44 (KUKLIK, 2000).

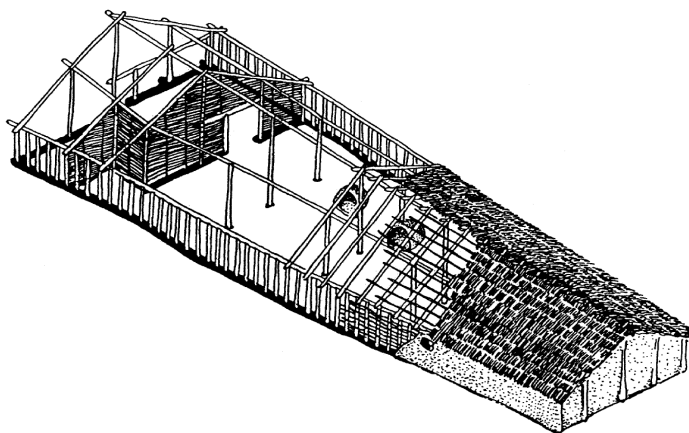


Figura 44. Reconstrução arqueológica da estrutura de uma casa em 3000 a.C. (KUKLIK, 2000).

Os povos das antigas Roma e Grécia tinham grande habilidade na criação de esculturas de madeira e na construção de estruturas onde os encaixes eram feitos sem qualquer material

metálico. Os carpinteiros desenvolviam um conhecimento intuitivo acerca da capacidade estrutural de madeiras de diferentes espécies e, desta forma, eram capazes de construir grandes estruturas (ULRICH, 2007). Como exemplo, tem-se a ponte construída por Júlio César em 55 a.C. para atravessar o rio Reno, um dos mais longos e importantes da Europa (Figura 45).

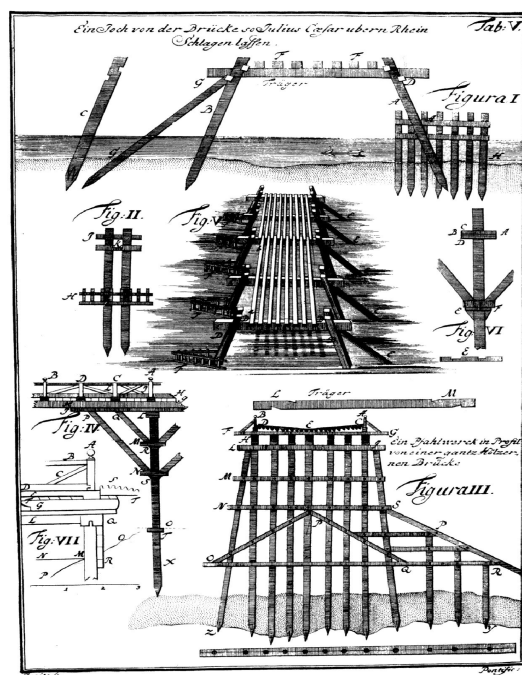


Figura 45. Ponte construída por Julio César para atravessar o rio Reno (JACOB, 1982).

Nos países asiáticos, em especial na China e Japão, as construções em madeira denominadas “pagodas” são tradicionalmente conhecidas por resistirem há milhares de anos e estarem associadas ao conceito de construção leve, capaz de resistir aos terremotos. No Japão, a pagoda Yakushiji Toto foi construída no ano de 730 e ainda hoje pode ser vista na cidade de Nara. Ela é constituída de três andares e suportada por um mastro central, como ilustra a Figura 46 (YOUNG & YOUNG, 2007)

As pagodas chinesas são compostas por elementos de vigas e pilares com ligações por conectores e são caracterizadas por apresentarem grande precisão geométrica. A pagoda mais antiga ainda existente, totalmente construída em madeira, encontra-se na província de Shanxi, no Templo de Fugong, e foi construída em 1056 durante a Dinastia Liao (Figura 46). Esta

construção é formada por uma estrutura octogonal com 63 m de altura e 30 m de diâmetro na base (KUHN, 2000).



Figura 46. Pagoda Yakushiji Toto, construída no Japão em 730 e Pagoda Sakyamuni do Templo de Fugong, construída em 1056, respectivamente (STEINHARDT, 1997; CLUZEL, 2007).

Além das pagodas japonesas, as diversas técnicas de encaixe também se tornaram tradição na cultura japonesa. Esses encaixes, também chamados de sambladuras, são geralmente feitos para unir pilar e viga de madeira sem utilização de qualquer material metálico (NUMAZAWA, 2009). A Figura 47 apresenta as sambladuras entre as vigas mais conhecidas na arquitetura japonesa.

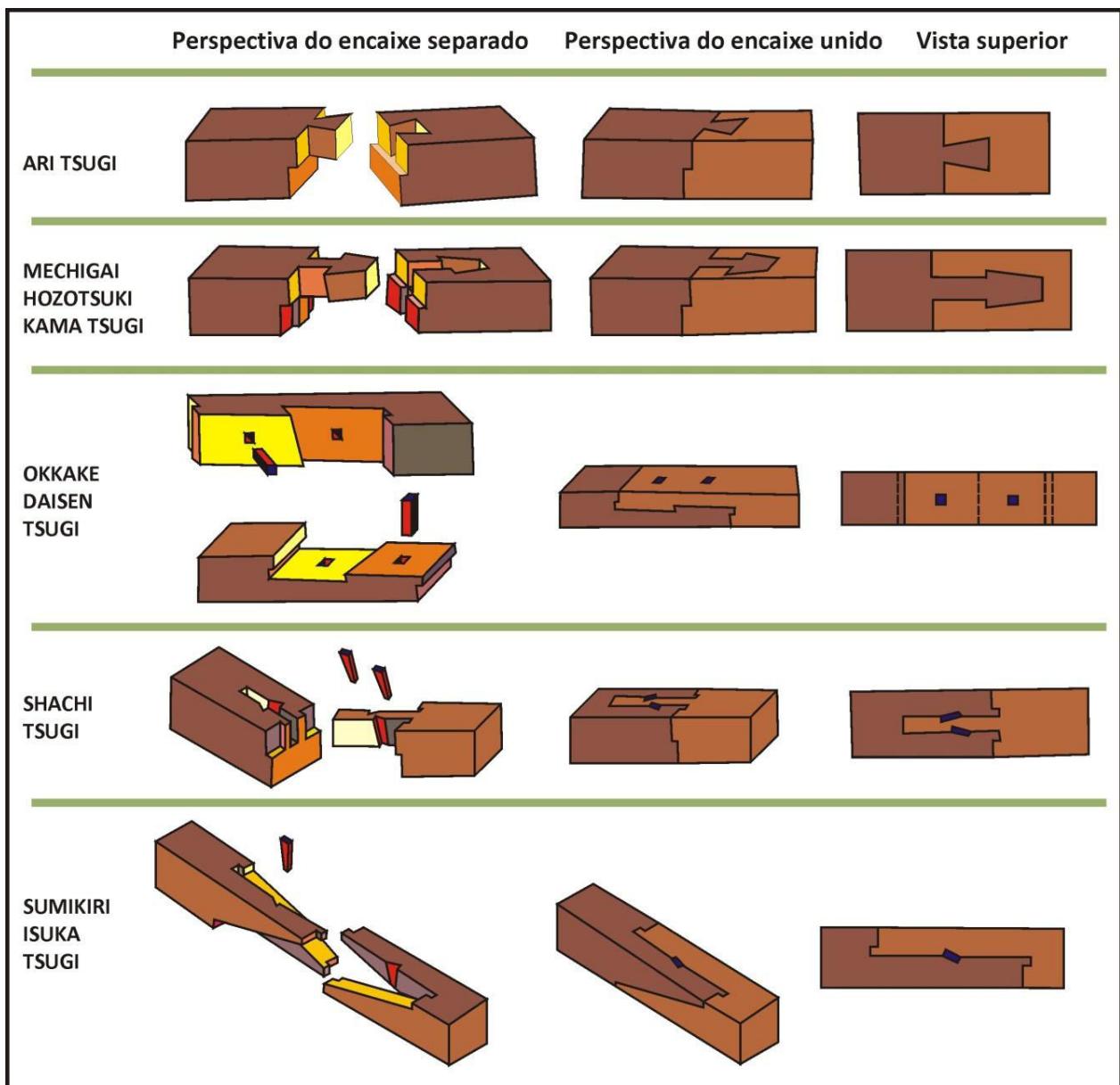


Figura 47. Encaixes tradicionais japoneses entre vigas (NUMAZAWA, 2009).

Embora o uso da madeira na construção seja de longa data, foi com advento da Revolução Industrial que seu uso foi racionalizado.

As máquinas a vapor começaram a ser usadas para cortar troncos de madeira. Tal fato permitiu a produção em série de componentes para construção e, consequentemente, a propagação de casas de troncos de madeira nas áreas rurais e urbanas da Europa (Figura 48). As

paredes feitas de troncos com seção circular ou quadradas produziam um excelente isolamento térmico.



Figura 48. Típica casa com estrutura de troncos, construída em torno de 1890 na Noruega (WAPEDIA, 2010).

Os Estados Unidos e Canadá, por possuírem grandes reservas de madeira, passaram a produzir casas de madeira em escala industrial por volta do ano de 1830, quando surgiu o sistema construtivo conhecido como Sistema Balão (*Balloon Framing*). Neste sistema a estrutura é formada por elementos reticulares de pequena seção transversal distribuídos ao longo do piso e das paredes. Deste modo, as paredes exercem função estrutural e de vedação, como mostrado na Figura 49 (SILVA, 2004).

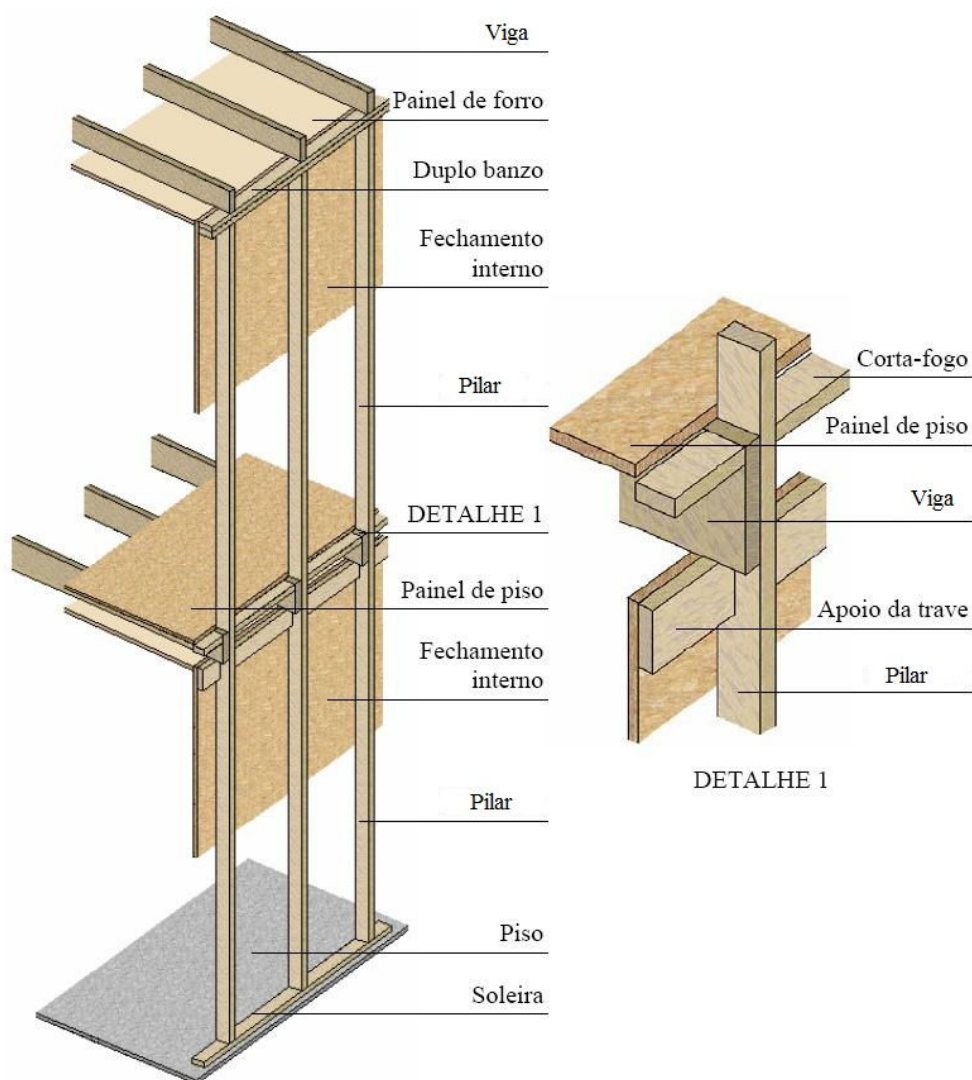


Figura 49. Estrutura do sistema Balão (SILVA, 2004).

Esta técnica foi modificada no final de 1960 e se transformou no Sistema Plataforma (*Platform Frame*). Este sistema segue o mesmo princípio do Sistema Balão, com pequenos perfis de madeira integrados a painéis de fechamento, porém os montantes são interrompidos ao nível de cada piso (Figura 50) (AWC, 2002). Com as peças em menor comprimento, surgiu a possibilidade de pré-fabricação dos quadros, o que tornou a montagem mais rápida (SILVA, 2004).

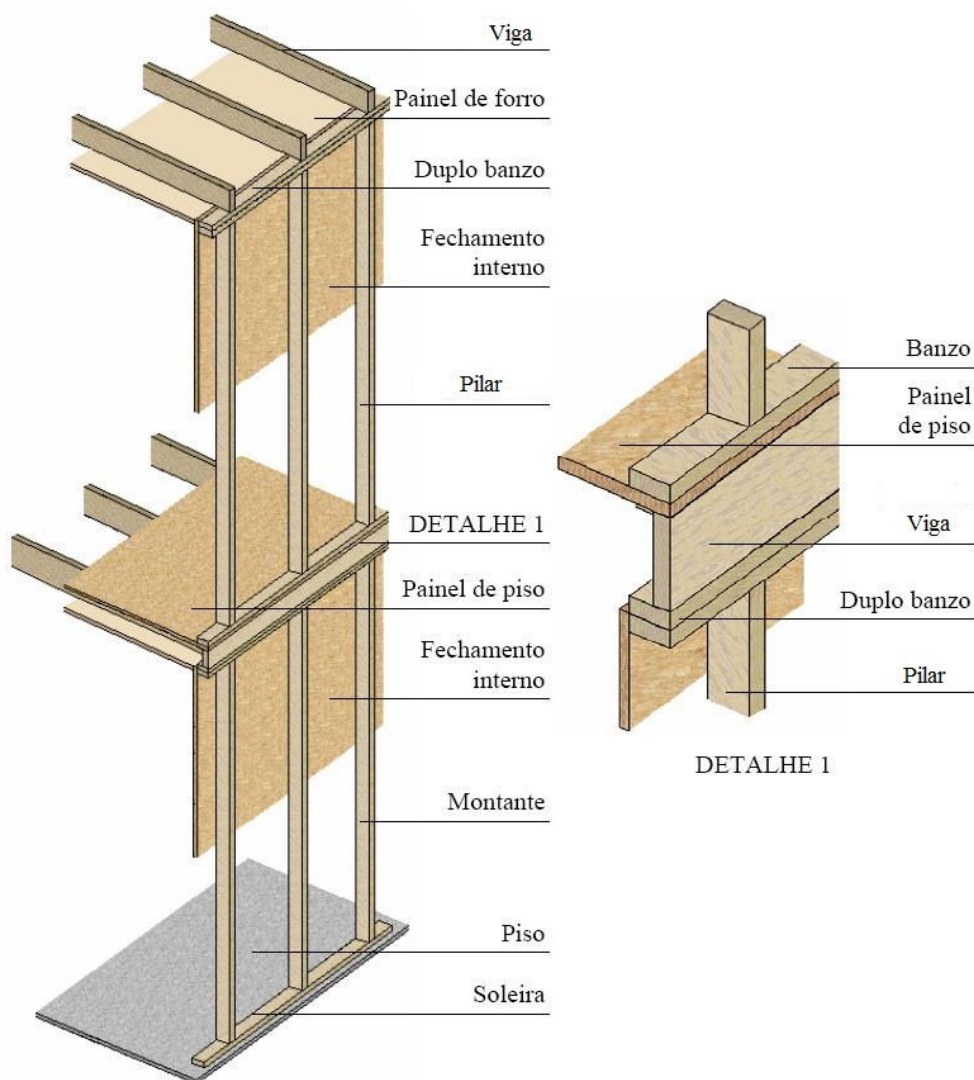


Figura 50. Estrutura do sistema Plataforma (SILVA, 2004).

A arquitetura mostra, ao longo da sua história, como se transformaram os sistemas construtivos e as tecnologias. Mas um fator comum a todas as épocas é a idéia da durabilidade e a resistência do material (ESTUQUI FILHO, 2006).

Com a expansão da tecnologia e dos meios de divulgação de informações, diversos arquitetos começaram a buscar na madeira inovação para seus projetos. A necessidade por construções mais sustentáveis, com menor geração de resíduos e menos desperdício impulsionou o uso da madeira na arquitetura do século XX e, principalmente, do século XXI.

Alvar Aalto foi um dos arquitetos que ressaltou criativamente as características biológicas e estruturais da madeira em seus projetos. A facilidade de ser trabalhada, a diversificada gama de texturas e a agradável sensação de acolhimento que a madeira proporciona foram características essenciais para o arquiteto desenvolver projetos inovadores que consideram os valores da natureza e as necessidades dos seres humanos. A casa Villa Mairea, projetada por Aalto na Finlândia, mostra como a integração entre a natureza e o ser humano pode valorizar um ambiente e torná-lo mais aconchegante. As imagens da casa são mostradas na Figura 51.



Figura 51. Casa Villa Mairea, projetada por Alvar Aalto na Finlândia em 1939 (OUNO, 2009).

Os arquitetos Jacques Herzog e Pierre de Meuron também abordam a madeira na arquitetura com o intuito de transmitir maior conforto, principalmente térmico, aos usuários. Esta

característica foi adequadamente utilizada no projeto de uma clínica de reabilitação onde os pacientes com lesões cerebrais precisavam se sentir acolhidos para suportar os longos tratamentos. Nesta abordagem, além do aspecto estrutural e estético, a madeira se comunica com os usuários de forma sensorial e até emocional, visto que a sensação de conforto que a natureza proporciona pode ter efeito calmante nos pacientes. Na Figura 52 são apresentadas imagens da clínica.



Figura 52. Clínica de reabilitação projetada por Herzog e De Meuron na cidade de Basel, Suíça (DANDA, 2010).

Como descreve Harris (1993), pode-se notar, em várias partes do mundo, a utilização da madeira como um material construtivo de primeira linha: da autoconstrução aos postos de

observação na Antártida, mostrando suas excelentes características de resistência, superando o aço em lugares gelados, como os pólos (Figura 53).



Figura 53. Exemplos de base na Antártida em madeira (HARRIS, 1993).

Harris (1993) apresenta várias estruturas esteticamente trabalhadas com o uso da madeira exemplificando sua aplicabilidade para superfícies curvas e orgânicas (Figura 54).

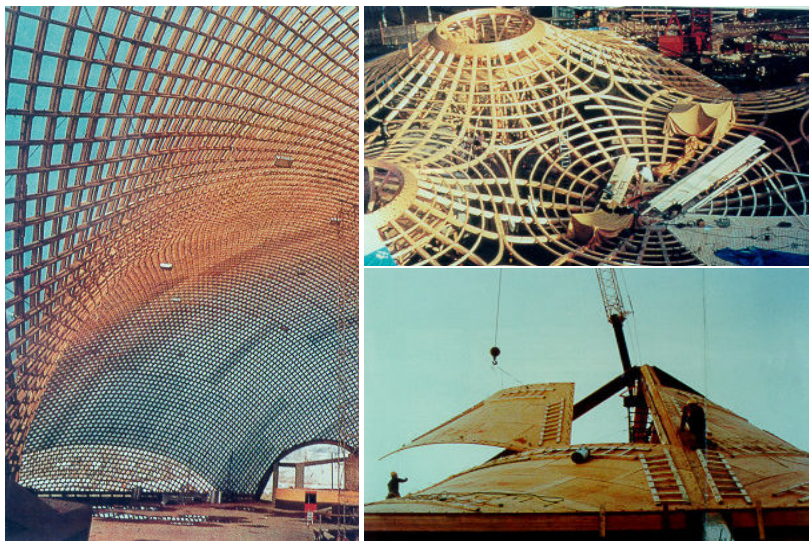


Figura 54. Exemplos de versatilidade da madeira para estruturas curvas (HARRIS, 1993).

Estruturalmente, a madeira pode ser empregada no desenvolvimento de coberturas, de construções rurais, de cimbramentos em estruturas de concreto armado, de pontes, entre outros

(DIAS & ROCCO LAHR, 2004). Como descreve Carrasco (2004) entre outros, a madeira possui virtudes peculiares que podem torná-la um material estrutural de primeira escolha em várias situações.

Características como alta durabilidade, excelente isolamento térmico, acústico e elétrico e versatilidade de cores e texturas permitem que arquitetos e engenheiros desenvolvam soluções estruturais resistentes e esteticamente agradáveis.

A utilização de madeira em estruturas oferece diversas vantagens em relação a outros materiais. Ao contrário do que se imagina, por exemplo, a madeira é mais resistente ao fogo do que o aço. Isto se deve a má condutividade térmica da madeira, seu teor de água e à crosta carbonizada que se forma, criando rapidamente uma camada isolante que freia a combustão e chega até mesmo impedi-la. Já o aço perde sua capacidade de receber cargas quando a temperatura é maior do que 500°C, o que significa, que a estrutura entrará em colapso na eventualidade de incêndios. Outra característica importante da madeira com relação ao fogo é o fato de não apresentar torção quando submetida a altas temperaturas, tal como ocorre com o aço (CALIL *et. al.*, 2003).

Outro ponto importante é que uma parte do carbono que as árvores retiram da atmosfera permanece sequestrada nos produtos de madeira e, ao longo da sua vida útil. Desta forma, minimizam-se os impactos do gás sobre o efeito estufa (IPCC, 1996).

Tomando a Austrália como exemplo, em 2004, quando o país possuía 21% de sua área coberta por florestas, cerca de 89 milhões de toneladas de dióxido de carbono foi removido da atmosfera (AUSTRALIAN GREENHOUSE OFFICE, 2006). Na Nova Zelândia, pesquisadores mostraram que é possível diminuir as emissões de carbono e ainda armazená-lo em produtos de madeira quando estes são utilizados em construções habitacionais.

Na Tabela II, são apresentados os valores da quantidade de carbono em relação à quantidade de madeira utilizada nas construções da Nova Zelândia. De acordo com a tabela, substituir os tijolos de paredes externas e as janelas de alumínio por madeira torna a construção mais sustentável. Esta substituição de materiais faz com que a energia incorporada nos elementos

construtivos seja menor. A quantidade de carbono liberado para a produção destes elementos construtivos também diminui e, conseqüentemente, a quantidade de carbono armazenado aumenta. Sendo assim, uma pequena alteração na escolha de materiais em uma construção pode acarretar em uma grande melhora das condições ambientais do planeta.

Tabela II. Variação da quantidade de carbono pelo aumento da utilização de madeira em construções na Nova Zelândia

	Madeira utilizada	Energia incorporada	Carbono	
			Libertado	Armazenado
	1000 m ³	10 ¹⁵ J	Tons	Tons
<i>Construção convencional</i>	632	18,1	363.000	158.000
<i>Construção com base em madeira²</i>	688	8,0	158.000	172.000
<i>Porcentagem de alteração pela utilização de mais madeira</i>	8,9%	-55,8%	-56,5%	8,9%

². Substituição de tijolos de paredes externas e janelas de alumínio por madeira.

Fonte: BUCHANAN & LEVINE, 1999 / WBCSD, 2006.

Na construção civil brasileira, a madeira é empregada principalmente em usos temporários e em componente da edificação, como painéis, pisos, forros, esquadrias, mobiliário e lambris. As regiões Sul e Norte são consideradas exceções por utilizar a madeira abundantemente em construções de habitações. Neste caso, a quantidade significativa de madeira disponível associada às condições ambientais locais e à baixa renda da população são os principais fatores para a disseminação da madeira nas habitações nortistas.

A Figura 55 é um exemplo de casa flutuante construídas sobre o rio Negro na região Amazônica. A técnica construtiva é precária, do ponto de vista estético. No entanto, são construções que sobrevivem às constantes variações dos níveis dos rios e sob diversas condições climáticas. O sistema de flutuação é feito com toras de árvores de madeiras de baixa densidade como, por exemplo, a Assaçu. Essa árvore, encontrada em beira de rios e várzeas inundáveis,

conserva-se durante décadas sob a água, o que permite seu reuso após a desmontagem da estrutura flutuante (OLIVEIRA JR).



Figura 55. Casas flutuantes na região Amazônica (OLIVEIRA JR, 2009).

Em contraponto, na região Sul do Brasil, as construções em madeira são mais trabalhadas tecnicamente e esteticamente. Isto se deve, principalmente, à influência da arquitetura alemã e polonesa trazidas por imigrantes destes países. Os imigrantes alemães têm como tradição construir estruturas de madeira com peças diagonais de travamento cujos intervalos são preenchidos por tijolos. Já os poloneses utilizam madeiras com seção quadrada ou retangular sobrepostas horizontalmente com encaixes nos cantos das paredes, como se pode ver na Figura 56 (GARCIA *et al.*, 1987).



Figura 56. Casas feitas de troncos, tradição polonesa em Curitiba (PARANÁ ONLINE, 2009).

Mesmo tendo exemplos positivos do uso da madeira em construções no Brasil, o preconceito com relação a este material ainda é muito grande. A madeira é considerada por muitos como material relacionado às construções provisórias e de baixa durabilidade.

No que diz respeito à durabilidade da madeira, exemplos apresentados anteriormente, como as pagodas japonesas, mostram que quando tratada com preservativos adequados e com a devida manutenção, a madeira pode durar muito mais que construções de alvenaria. Já em relação à extração desordenada, normas relativamente rigorosas já estão sendo implantadas no Brasil para que só possam ser comercializadas madeiras com selo de garantia de procedência.

Além disso, alguns arquitetos brasileiros estão utilizando a madeira em seus projetos de forma diferenciada e praticamente artística para, assim, quebrar o mito de que sejam realizadas apenas construções simplistas e de baixa qualidade. Exemplos bem sucedidos são mostrados na Figura 57 e 58.



Figura 57. Casa Mozart, construída no Rio Grande do Sul e projetada pela 4D Arquitetura (4D ARQUITETURA, 2010).



Figura 58. Casa Hélio Olga, construída em São Paulo e projetada pelo arquiteto Marcos Acayaba da ITA Construtora (ITA, 1990).

O estudo da madeira em laboratórios acadêmicos e em departamentos de desenvolvimento de novos produtos em empresas tem comprovado a qualidade para três requisitos básicos de projeto arquitetônico: durabilidade, flexibilidade e economia (FACCHIN *et al.*, 2006). Porém, o sucesso da madeira usada como elemento construtivo depende, não somente de sua adequação ao uso, proporcionado pela seleção da espécie da madeira e dos métodos corretos de tratamento e utilização, mas também da qualidade do projeto arquitetônico. Esta qualidade pode ser adquirida por meio de mão-de-obra suficiente e qualificada e de cuidados adequados com cada sub-componente de uma construção.

Os sistemas construtivos em madeira desenvolvidos em países como EUA, Canadá e Japão são mais evoluídos devido ao interesse destes países pela pesquisa e, conseqüentemente, pela inovação destes sistemas. No Brasil, embora o consumo da madeira seja significativo, com um consumo *per capita* de madeira serrada apresentando percentual próximo ao de países como Canadá e Japão (FAO, 2001), grande parte da madeira é direcionada às construções provisórias, fabricação de papel e carvão vegetal. Isso acarreta uma falta de interesse em se desenvolver e aperfeiçoar tecnologias referentes à sua utilização no setor construtivo. Os conhecimentos

provenientes das pesquisas desenvolvidas em universidades e em institutos de pesquisa raramente são transferidos para a população em geral.

A utilização de tecnologia apropriada pode alavancar a aplicação da madeira em larga escala e em soluções criativas e inovadoras, como acontece em países onde não existe o preconceito em relação ao uso da madeira em construções. A madeira apresenta características peculiares que, quando bem aproveitadas, proporcionam design diferenciado e ecologicamente correto.

2.3.2 Propriedades e características

A escolha da madeira para uso estrutural deve ser feita após o conhecimento de suas principais características e propriedades. É importante entender a anatomia da madeira, conhecer suas propriedades físicas e mecânicas e os produtos derivados utilizados nas construções.

2.3.2.1 Anatomia e Classificação

As árvores pertencem à divisão das *fanerógamas* e se dividem em duas categorias: gimnosperma, cuja classe mais importante é a das coníferas; e angiosperma, cuja classe de maior interesse para a construção é a das dicotiledôneas (CALIL *et. al.*, 2003).

Uma das maiores diferenças entre as duas categorias é a constituição de suas estruturas celulares. As coníferas apresentam estrutura anatômica relativamente simples, possuindo 90 a 95% de traqueídes (ou traqueóides) axiais em sua composição. Já as dicotiledôneas, também chamadas de folhosas, possuem estrutura celular mais complexa, tendo como principais elementos os vasos e as fibras (BURGER & RICHTER, 1991). A Figura 59 apresenta imagens da estrutura microscópica das coníferas e das dicotiledôneas.

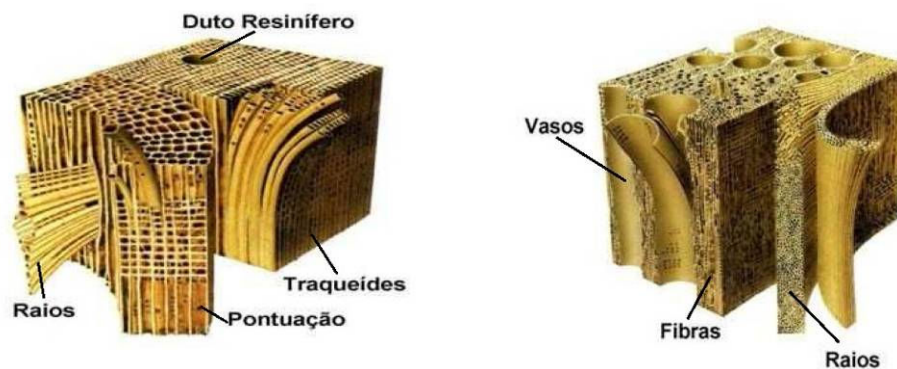


Figura 59. Estrutura microscópica das coníferas e das dicotiledôneas, respectivamente (TAYLOR, 1978).

Como se pode ver na Figura 59, a estrutura das coníferas é formada, em sua maior parte, por traqueídes. Estes elementos têm as funções de conduzir a seiva bruta, de depósito substâncias polimerizadas e de conferir resistência mecânica ao tronco da árvore. Os raios, presentes tanto nas coníferas quanto nas dicotiledôneas, têm a função de conduzir a seiva elaborada da periferia do lenho até a medula. Os dutos (ou canais) resiníferos são espaços intercelulares onde se encontra a resina produzida por algumas árvores. As pontuações são responsáveis pela comunicação entre os traqueídes. Os vasos e as fibras, presentes apenas nas angiospermas, são responsáveis pelo transporte ascendente da seiva bruta e pela sustentação da árvore, respectivamente.

No Brasil, há uma predominância de alguns tipos de madeiras sendo elas: angelim pedra, angelim vermelho, angico-preto, bacuri, cedrinho, cupiúba, garapa, goiabão, itaúba, jacareúba, louro-vermelho, maçaranduba, pau roxo e tatajuba. Porém, durante muito tempo, o mercado brasileiro se abasteceu de apenas duas espécies de madeira: peroba-rosa e o pinho-do-paraná. Com a escassez destas madeiras, surgiram as chamadas ‘madeiras alternativas’, provenientes de reflorestamentos. As madeiras mais usadas em reflorestamentos são procedentes principalmente de outros países como, por exemplo, aquelas do gênero *Eucalyptus* e do *Pinus*.

2.3.2.2 Propriedades físicas

Por ser um material natural, além de apresentar características que variam de acordo com a espécie e até mesmo dentro da mesma espécie, também apresenta características distintas em relação às direções radial, tangencial e longitudinal. Esta particularidade, que está presente em materiais anisotrópicos, como a madeira, afeta seu comportamento e suas propriedades de resistência e elasticidade. (BODIG & JAINE, 1982; BURGER & RICHTER, 1991; MASCIA, 1993; DIAS & ROCCO LAHR, 2004).

Como mostrado na Figura 60, o plano radial (P1) é a direção dos raios referentes aos anéis de crescimento; o plano tangencial (P2) é tangente aos anéis de crescimento; e o plano longitudinal (P3) corresponde à direção paralela às fibras da madeira.

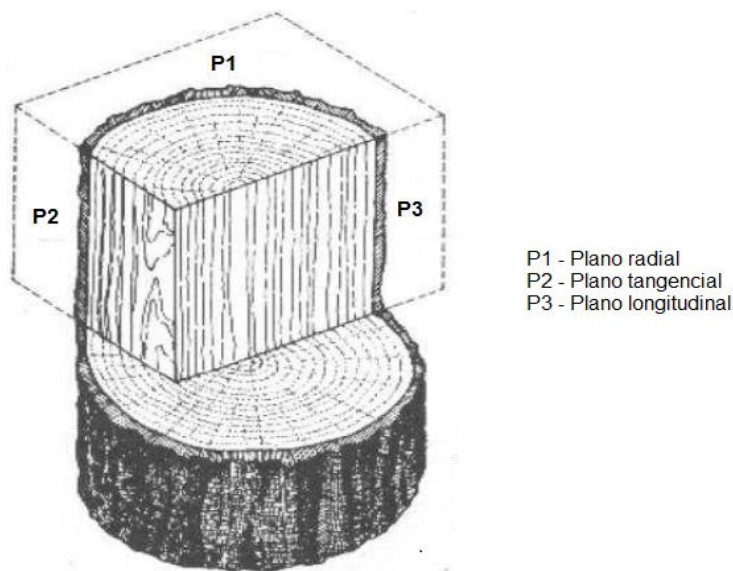


Figura 60. Planos relacionados às direções da fibra da madeira (LEPAGE, 1986).

Umidade

A madeira é um material higroscópico, ou seja, tem a capacidade de liberar e absorver umidade até que este nível se equilibre ao nível de umidade do ambiente local. Para assegurar a

durabilidade de uma construção de madeira, o projeto da estrutura e envelope deve levar em conta fatores que influenciam o teor de umidade da madeira e as mudanças que ocorrem durante a variação da umidade (STEFFEN, 2000). Esse processo ocorre desde o corte até o equilíbrio da madeira ao clima onde será usada (PFEIL, 1994). Em relação às estruturas, a umidade da madeira deve ser levada em consideração por provocar variação nas dimensões, principalmente em estruturas onde os elementos estejam sob a ação de esforços de compressão. Para isso, a Tabela III, disponível na NBR 7190, apresenta os valores da umidade de equilíbrio, necessários para o uso da madeira em estruturas, de acordo com a umidade relativa do ar.

Tabela III. Classes de Umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio da madeira U_{eq}
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos período	$\geq 25\%$

Fonte: NBR 7190 (1997).

Dentre os problemas relacionados à umidade na madeira, a retratibilidade e o inchamento são os que mais interferem na integridade do material (Figura 61). Provocados pela variação dimensional, estes fenômenos acontecem quando a madeira é armazenada de forma inadequada ou já utilizada como produto final antes de atingir o equilíbrio da umidade. Também pode acontecer variação dimensional quando há alterações da temperatura e/ou umidade relativa do ar local (VITAL *et al.*, 2005). Tal característica pode ser facilmente percebida quando, por exemplo, as portas de madeira emperram devido ao inchamento provocado em dias com umidade relativa elevada.



Figura 61. Inchamento e retração provocados pela variação da umidade na madeira (autor, 2010).

As propriedades de resistência e elasticidade aumentam quando a madeira está abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). Este ponto, em torno de 33%, se refere ao estado no qual a madeira possui apenas água de impregnação, ou seja, toda a água livre já foi evaporada (CARRASCO, 2004).

Densidade

A densidade é um dos principais parâmetros de qualidade da madeira utilizada como matéria prima industrial ou energética (MENDES *et. al.*, 2004). A norma brasileira apresenta duas definições de densidade a serem utilizadas em estruturas de madeira: a densidade básica e a densidade aparente (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

A densidade básica (ρ_{bas}) é definida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado (quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume), dado pela expressão:

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_m} \quad (g/cm^3)$$

onde, m_s = massa em quilogramas (ou gramas) do corpo-de-prova seco;

V_m = volume em metros cúbicos (ou centímetros cúbicos).

A densidade aparente (ρ_a) é a umidade padrão de referência calculada para umidade de 12%, dado pela expressão:

$$\rho_a = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (g/cm^3)$$

Existe variação de densidade na direção radial, da medula para a casca, e no sentido da base até o topo da árvore (OLIVEIRA *et al.*, 2005). Na Figura 62, é apresentado um gráfico referente a um estudo que mostra a diferença de densidade entre árvores do gênero *Eucalyptus*. Além da variação referente às árvores de espécies diferentes, também é apresentada variação de densidade na direção medula-casca.

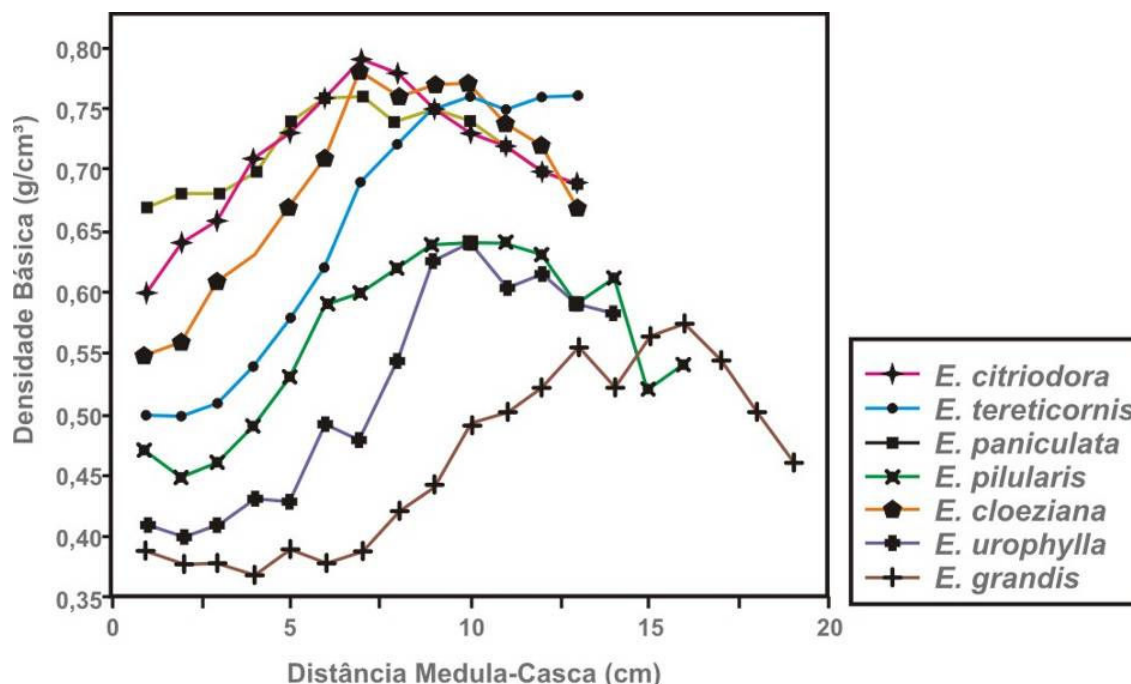


Figura 62. Variação da densidade básica na direção medula-casca de sete espécies de madeira de *Eucalyptus* (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

Percebe-se que houve aumento da densidade básica na direção medula-casca, com cada espécie apresentando um perfil diferente de variação. As diferentes propriedades anatômicas e químicas dos troncos das árvores pode ser uma explicação para essa variação de densidade. O diâmetro dos vasos, a altura dos raios e o acúmulo de extrativos na parede celular são fatores que afetam diretamente a densidade da madeira (LONGUI *et al.*, 2010).

Alguns autores como Trugilho *et al.* (1996), Latorraca e Albuquerque (2000) e Cruz *et al.* (2003) mencionaram que a densidade é a característica mais utilizada em pesquisas relacionadas à qualidade física e tecnológica da madeira, podendo limitar seu uso.

Retratibilidade

A retratibilidade na madeira está relacionada à variação das dimensões de uma peça ocorrida após a saída da água de impregnação, ou seja, quando a madeira está abaixo do PSF. Diferente da água livre, aquela que é encontrada nas cavidades das células e que pouco afeta as propriedades da madeira, a água de impregnação infiltrada nas paredes celulósicas altera o volume da peça de madeira e todo seu comportamento físico e mecânico (GALVÃO & JANKOWSKY, 1985; COSTA *et al.* 2001).

Em geral, a contração na direção tangencial é, aproximadamente, duas vezes maior do que na direção radial, como se pode ver no gráfico da Figura 63; a razão entre a contração tangencial e radial (relação T/R), comumente chamada de fator de anisotropia, geralmente varia de 1,5 a 2,5, e tornou-se um índice muito importante nos estudos de contração de madeira; quanto maior essa relação, maior será a tendência ao fendilhamento e empenamento da madeira (OLIVEIRA & SILVA, 2003).

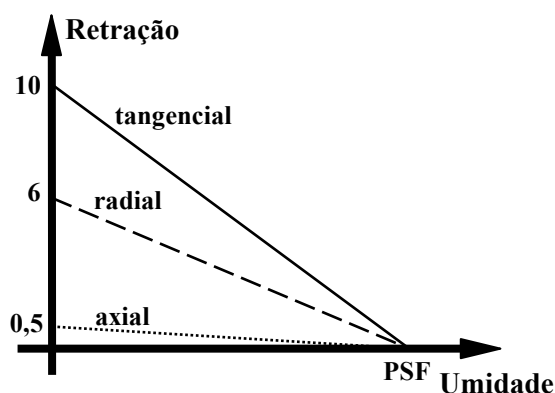


Figura 63. Comparação de retratibilidade (GESUALDO, 2003).

O processo inverso pode ocorrer quando a madeira absorve umidade. Neste caso, acontece o inchamento provocado pelo aumento das dimensões da peça de madeira (SZÜCS *et al.*, 2006).

Resistência ao fogo

A madeira, quando exposta ao fogo, torna-se combustível para a propagação de chamas. Contudo, a camada mais externa da madeira se carboniza em alguns minutos, tornando-a um isolante térmico. A área carbonizada retém o calor e, assim, auxilia na contenção do incêndio e evita que toda peça seja destruída (SZÜCS *et al.*, 2006).

A área carbonizada varia de acordo com a espécie e as condições de exposição ao fogo. Forma-se, também, uma região intermediária afetada pelo fogo, mas, não carbonizada, que não deve ser considerada na avaliação da resistência (Figura 64).

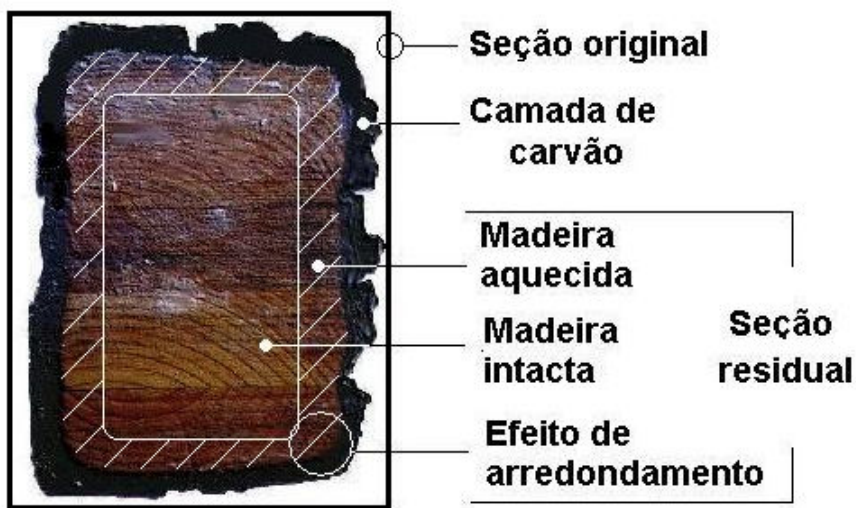


Figura 64. Seção de uma viga de madeira laminada colada, exposta ao fogo durante 30 minutos (PINTO, 2004).

Devido a esta característica, mesmo sendo considerada como material inflamável, a madeira pode apresentar alta resistência diante de altas temperaturas. Sendo assim, a madeira pode ser responsável pela propagação do fogo, contudo, suportará a ação do fogo em alta temperatura durante um período de tempo maior, quando comparado ao aço, por exemplo (GESUALDO, 2003).

Durabilidade natural

Assim como a maioria dos materiais de construção, a madeira pode degradar-se ao longo do tempo. Além da degradação provocada pelo tempo, o fato da madeira ser um material orgânico e natural faz com que sua durabilidade dependa das condições de umidade, temperatura e oxigênio. De acordo com Szücs *et al.* (2006), a espécie e as características anatômicas também podem definir a resistência natural da madeira ao ataque de agentes degradadores, principalmente em relação aos fungos, bactérias e insetos xilófagos.

A baixa durabilidade natural de algumas espécies pode ser compensada por um tratamento preservativo adequado às peças, alcançando-se assim melhores níveis de durabilidade, próximos dos apresentados pelas espécies naturalmente resistentes (SZÜCS *et al.*, 2006).

2.3.2.3 Propriedades mecânicas

As propriedades de resistência e elasticidade são influenciadas, principalmente, pela disposição das fibras, quando em dicotiledôneas, e dos traqueídes, no caso das coníferas, visto que, estes elementos são responsáveis pela resistência mecânica da madeira (CALIL *et. al.*, 2003).

De acordo com a NBR 7190 (1997), a resistência mecânica à tração e/ou compressão é a capacidade da matéria suportar tensões na direção paralela ou perpendicular às fibras da madeira. Os maiores valores de resistência e rigidez são encontrados na direção longitudinal, que é aquela paralela às fibras. Em termos práticos de construção civil, não é possível fazer distinção entre as direções radial e tangencial, que são denominadas direção normal (ou perpendicular) às fibras.

Resistência à compressão

A madeira é um material elástico, ou seja, quando solicitada por carregamentos pequenos, se deforma sem romper. A ruptura acontece quando o carregamento ultrapassa o limite suportado pela peça.

Quando uma peça é solicitada por compressão paralela às fibras, as forças agem paralelamente aos elementos anatômicos responsáveis pela resistência à compressão, o que atribui grande resistência à madeira (CALIL *et. al.*, 2003).

Já na solicitação normal às fibras, a força é aplicada perpendicularmente ao comprimento das fibras (ou traqueídes), o que provoca esmagamento da área afetada e, conseqüentemente, menores valores de resistência, como mostrado na Figura 65.

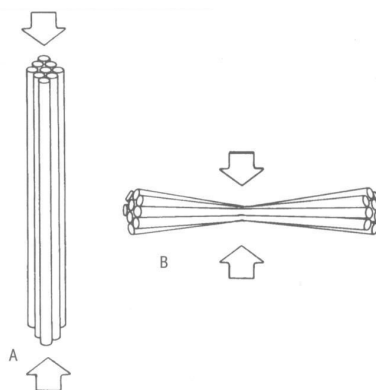


Figura 65. Comportamento das fibras da madeira quando solicitada à compressão paralela (A) e normal (B) às fibras (CALIL *et. al.*, 2003).

Resistência à tração

A solicitação por tração pode ser paralela ou normal às fibras da madeira. A ruptura por tração paralela ocorre quando há deslizamento entre as fibras (ou traqueídes) ou ruptura das paredes celulares. Nos dois casos, a madeira apresenta baixos valores de deformação e elevados valores de resistência. Já na tração normal às fibras, os valores de resistência são menores, já que

os esforços atuam perpendicularmente às fibras, provocando a separação das mesmas (CALIL *et. al.*, 2003). A Figura 66 mostra o comportamento de uma peça de madeira quando solicitada por tração nas direções paralela e normal às fibras.

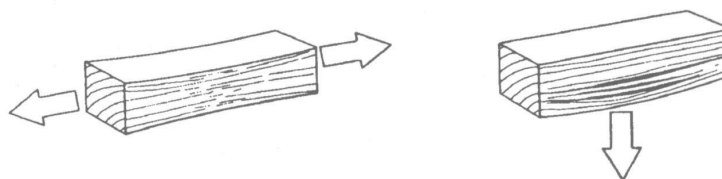


Figura 66. Deformação da madeira após esforços de tração paralela e normal às fibras, respectivamente (CALIL *et. al.*, 2003).

Cisalhamento

Assim como nas propriedades anteriores, a direção de atuação das tensões de cisalhamento influencia os resultados referentes à resistência e deformação da madeira. Quando o plano de atuação das tensões é perpendicular à direção das fibras (ou traqueídes), antes da ruptura por cisalhamento, a madeira apresenta sinais de deformação por compressão (CALIL *et. al.*, 2003).

Quando as tensões de cisalhamento são paralelas às fibras, duas situações podem acontecer: se a direção das tensões for paralela às fibras, haverá cisalhamento horizontal; se a direção das tensões for perpendicular às fibras, poderá ocorrer uma sobreposição das fibras, como ilustrado na Figura 67.

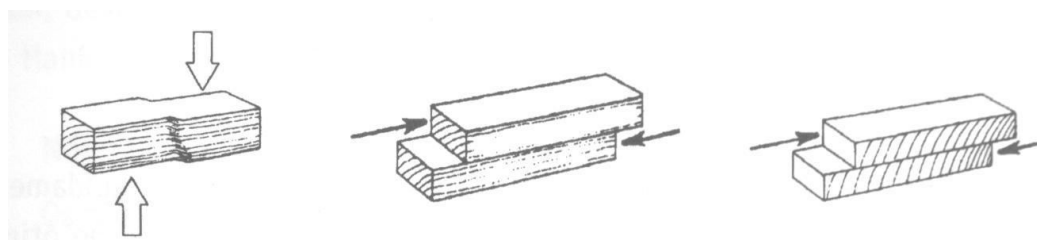


Figura 67. Diferentes comportamentos da madeira quando submetida ao cisalhamento (CALIL *et. al.*, 2003).

Flexão simples

Na solicitação por flexão simples acontece deflexão (encurvamento) do material. Tal deformação é resultado de um conjunto de tensões aplicado ao material, visto que, ocorre compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e cisalhamento horizontal.

A ruptura de uma peça de madeira solicitada à flexão ocorre quando são formadas falhas e enrugamentos referentes à compressão das fibras em um lado da peça e tração das fibras em outro lado, como mostrado na Figura 68.

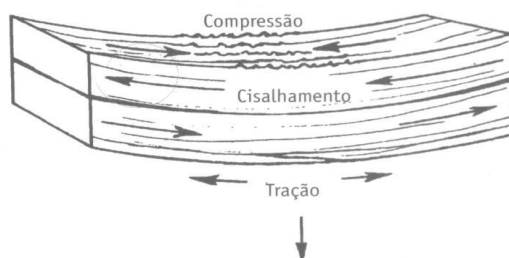


Figura 68. Comportamento de uma peça de madeira após solicitação por flexão (CALIL *et. al.*, 2003).

2.3.2.4 Produtos de madeira

Segundo IPT (2003), a madeira utilizada em construção pode ter vários níveis de processamento. A madeira roliça, por exemplo, é um dos produtos que apresenta menor grau de processamento. Já para a produção da madeira industrializada são necessárias várias etapas de beneficiamento.

Madeira maciça

A madeira maciça é utilizada em construções na forma roliça (ou bruta) ou serrada (Figura 69). O produto estrutural de madeira mais utilizado é a madeira serrada. Processada

mecanicamente em serrarias, a madeira serrada é comercializada em peças de seção retangular ou quadrada (BARRETO, 2010).

A madeira roliça é empregada, geralmente, em cimbramentos, em escoramentos, em estaqueamentos, em construções rústicas e em pontes. Há ainda as casas pré-fabricadas em toras, chamadas de *log homes*, que são mais populares da América do Norte (MELLO, 2007).



Figura 69. Madeira maciça na forma roliça e serrada, respectivamente (STAMATO, GOÉS, 2010).

Madeira industrializada

Os produtos de madeira produzidos em indústria são, geralmente, utilizados como lâminas, como chapas de partículas ou como chapas de fibras.

A madeira laminada é produzida a partir de um processo industrial onde as toras são cozidas e, em seguida, cortadas em lâminas. O corte das lâminas pode ser feito por meio de dois métodos: o torneamento, cuja tora é colocada em um torno e as lâminas são destinadas à produção de compensados; e o faqueamento, no qual são produzidas fatias a partir de madeiras de boa qualidade e alto valor comercial, para utilização em revestimento decorativos (IPT, 2003). Além de chapas de madeira compensada e lâminas decorativas, esse tipo de processamento pode ser utilizado, também, para a fabricação de madeira laminada colada. Nesse caso, a madeira é selecionada e cortada na forma de tábuas com espessura de 1,5cm ou mais, e, em seguida,

coladas sob pressão para formar grandes vigas de madeira, como as apresentadas na Figura 70 (BARRETO, 2010).



Figura 70. Exemplos de madeira laminada colada: igreja na cidade de Syracuse, EUA; jardim de inverno na cidade de Sheffield, Inglaterra (AITC, 2002; POPPENSIEKER-DERIX, 2010).

As chapas de partículas são divididas, geralmente, em três grupos: chapas de aglomerado, que são feitas de partículas de madeira prensadas com adesivos sintéticos; chapas de MDP (Medium Density Particleboard), que são chapas de partículas de média densidade, ligadas por resinas específicas; e chapas de OSB (Oriented Strand Board), que possuem, em média, três a cinco camadas de partículas ou feixes de fibras prensados com resinas (COSTA *et al.*, 2008).

Existem, também, outros tipos de chapas feitas de partículas, por exemplo, de bambu, que são desenvolvidas em laboratórios de pesquisa, mas ainda não comercializadas. Para aplicação estrutural, o OSB é muito utilizado em suportes de piso e forro, componentes de vigas, fechamento de paredes, etc (CABRAL, *et al.*, 2006). A edificação apresentada na Figura 71, desenvolvida pelo arquiteto André Eisenlohr, é um exemplo de aplicação estrutural e arquitetônica de OSB.



Figura 71. “Casa para um Casal”, edificação que utiliza OSB, principalmente, como fechamento das paredes (EISENLOHR, 2007).

Dentre os materiais compostos por fibras de madeira, o MDF é um dos mais utilizados, principalmente, para fabricação de móveis. O MDF é composto por fibras lignocelulósicas combinadas com resina sintética, ou outro adesivo, unidas entre si por meio de pressão e calor. É considerado como um produto homogêneo e uniforme que oferece boa trabalhabilidade, alta capacidade de usinagem, economia no consumo de adesivo por metro quadrado, além de apresentar ótima aceitação para receber revestimentos com diversos acabamentos (CAMPOS & ROCCO LAHR, 2002). A Figura 72 ilustra peças de mobiliário feitas com MDF.



Figura 72. Banco “Dança”, projetado por Eduardo Baroni; e poltrona “Pantosh” da Latoog Design (BARONI, 2010; CASA, 2010).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa, inserida na área de arquitetura e construção, apresenta um tema que aborda o desenvolvimento criativo de estruturas articuladas em madeira, e com isso, adquire aspectos de interdisciplinaridade, que incluem diversas áreas, como arquitetura, estruturas em madeira, design e engenharia de produção.

Com o objetivo de abordar os conceitos da arquitetura cinética encontrados na pesquisa bibliográfica, foram desenvolvidos novos modelos de estruturas articuláveis.

A seguir são apresentados os ensaios de desenvolvimento criativo realizados com o objetivo de experimentar possibilidades de estruturas articuláveis para elementos arquitetônicos, focando os seguintes parâmetros:

- Variações de fechamento articulável para uso em coberturas;
- Variações de fechamento articulável para uso em fachadas;
- Variações de cobertura para uso em superfícies como um todo.

3.1 Criação dos Modelos de Estruturas Articuláveis

Com foco nas estruturas articuláveis, foram selecionadas algumas das tipologias desenvolvidas e realizados ensaios exploratórios para estudos sobre a geometria da forma. Para isso, utilizou-se nesta primeira etapa o *software* 3D Rhinoceros 4.0, por ter uma interface objetiva e adequada a realização de modelagens 3D, proporcionando, assim, maior facilidade e rapidez no desenvolvimento das estruturas. As estruturas desenvolvidas nessa primeira etapa são mostradas na Figura 73.

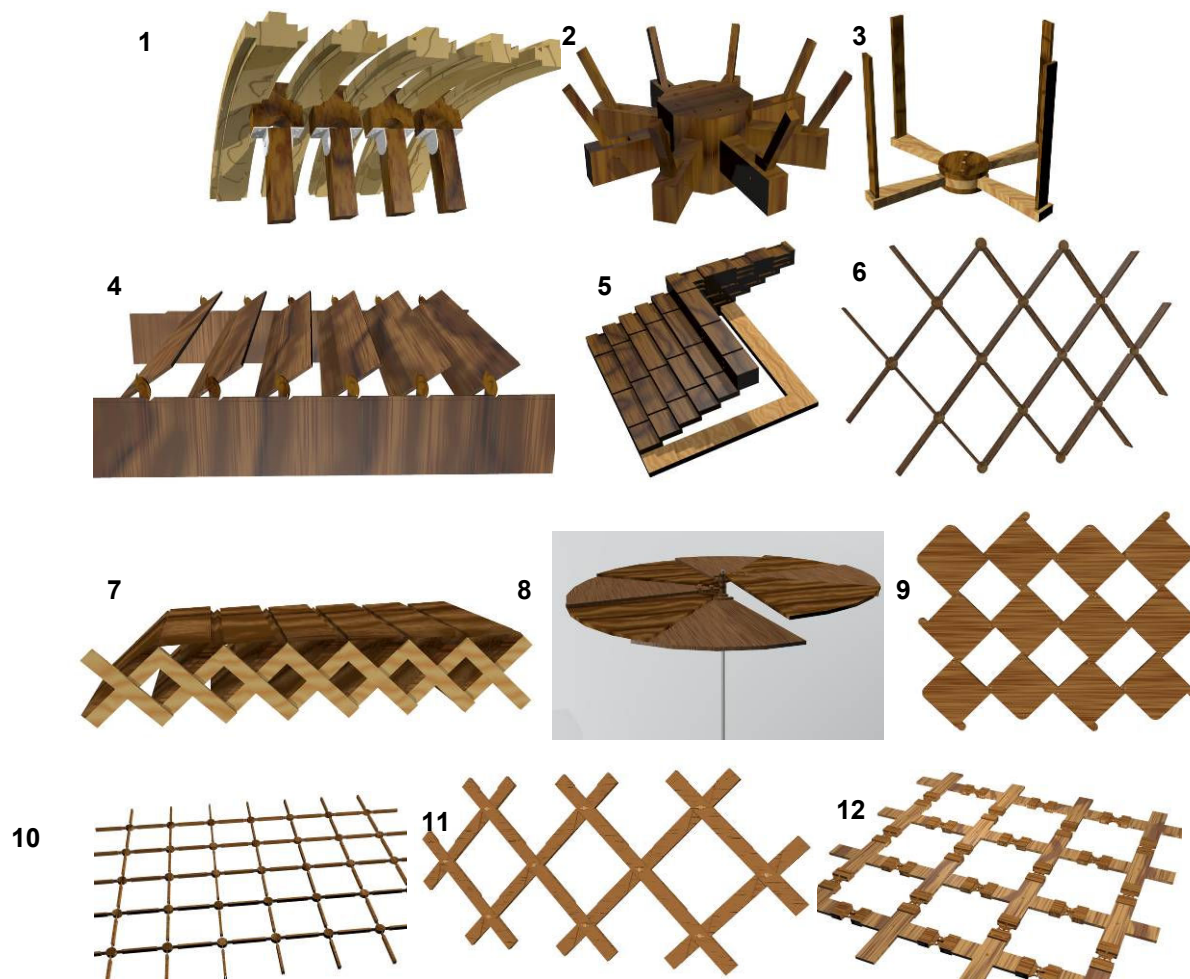


Figura 73. Desenvolvimento de estruturas tridimensionais virtuais articuláveis, com o uso do software Rhinoceros (autor, 2010).

A partir destes ensaios foi realizada uma análise para determinar quais dos desenhos criados apresentavam as características necessárias para serem prototipados

posteriormente. Nesta escolha foram observadas as seguintes características:

- Possibilidade de prototipagem com chapas;
- Complexidade da forma das peças;
- Complexidade das ligações;
- Movimentação das peças.

Assim sendo, foram selecionados os desenhos 6, 9 e 10, por apresentarem maior facilidade para serem prototipados e possuírem características favoráveis, levando-se em consideração as possibilidades de movimentos e suas formas.

3.1.1 Modelos físicos

Esta etapa teve como finalidade a realização de estudos físicos de movimento. Os modelos virtuais foram aprimorados nos *softwares* Rhinoceros e AutoCAD e em seguida prototipados numa cortadora laser do tipo UNIVERSAL no LAPAC-FEC¹. Como material, foram utilizadas chapas de MDF de 3mm. O MDF supriu as necessidades requeridas para este primeiro ensaio, apresentando características como facilidade de corte e resistência nas áreas que necessitavam de elementos de ligação.

O objetivo principal da produção destes modelos físicos foi o de realizar estudos volumétricos para análises sobre a geometria das formas em desenvolvimento e de suas

¹ LAPAC – Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da UNICAMP.

possibilidades de movimentação e flexibilidade. Além disso, o desenvolvimento das peças a partir de chapas de madeira cortadas, foi uma premissa para posteriores viabilidades de utilização racional, otimizada e de fácil industrialização das peças em madeira.

Modelo I

O Modelo I foi inspirado na estrutura do Aldar Central Market, descrita anteriormente. A escolha foi devido ao conceito utilizado para a realização da movimentação dos elementos da cobertura. O sistema de deslizamento dos elementos modifica o desenho da cobertura, fazendo com que ela tenha um formato anterior à movimentação e outro formato depois da movimentação. Os detalhes são vistos na Figura 74.

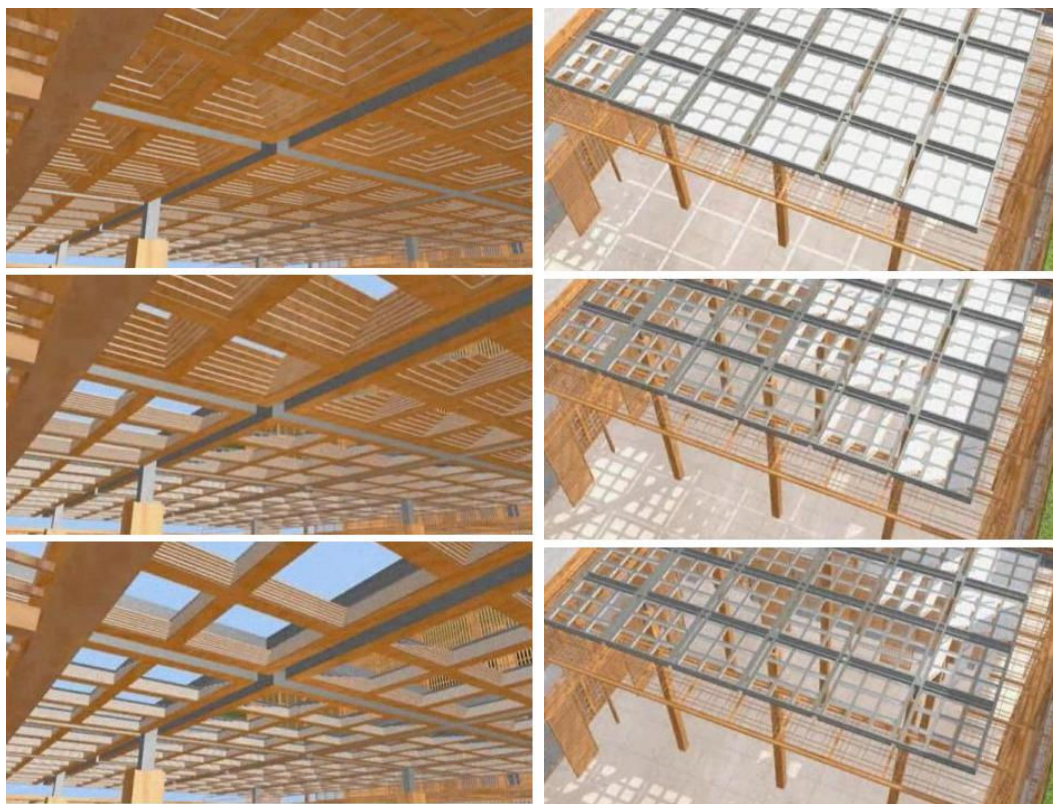


Figura 74. Detalhe da movimentação da cobertura do Aldar Central Market (HOBERTMAN, 2009).

O desenho 9 foi aperfeiçoado para que fosse possível movimentar as peças quadradas. Para isso, foram estudadas as posições dos nós que possibilitassem uma articulação diferenciada como a do Aldar Central Market.

Assim, o desenho 9 foi transformado em Modelo I. As peças foram desenhadas separadamente no AutoCAD para serem, posteriormente, cortadas na impressora a laser. O processo de corte é detalhado na Figura 75.

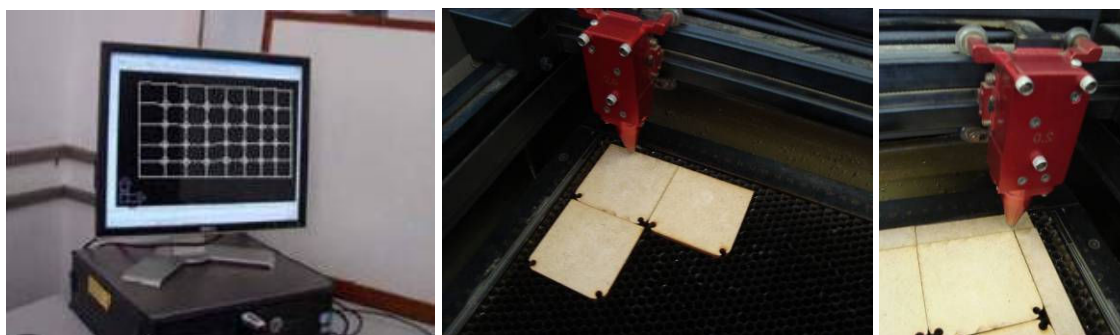


Figura 75. Desenho do plano de corte das peças no AutoCAD; cortadora a laser, corte das peças (autor, 2010).

Depois de cortadas, as peças foram coladas em forma de sanduíche, adquirindo uma espessura total de 9 mm. Na Figura 76, é possível notar os diferentes cortes das peças para que se pudesse gerar encaixes. A peça intermediária, aquela que possui furos para encaixes, permite a realização do engaste.



Figura 76. Chapas com as peças já cortadas; peças separadas; e conjunto com três peças coladas (autor, 2010).

Como resultado, foi obtida uma estrutura de malha ortogonal compacta e fechada, que se transforma em uma estrutura de malha em xadrez vazada. O processo de articulação do Modelo I é visto na Figura 77.

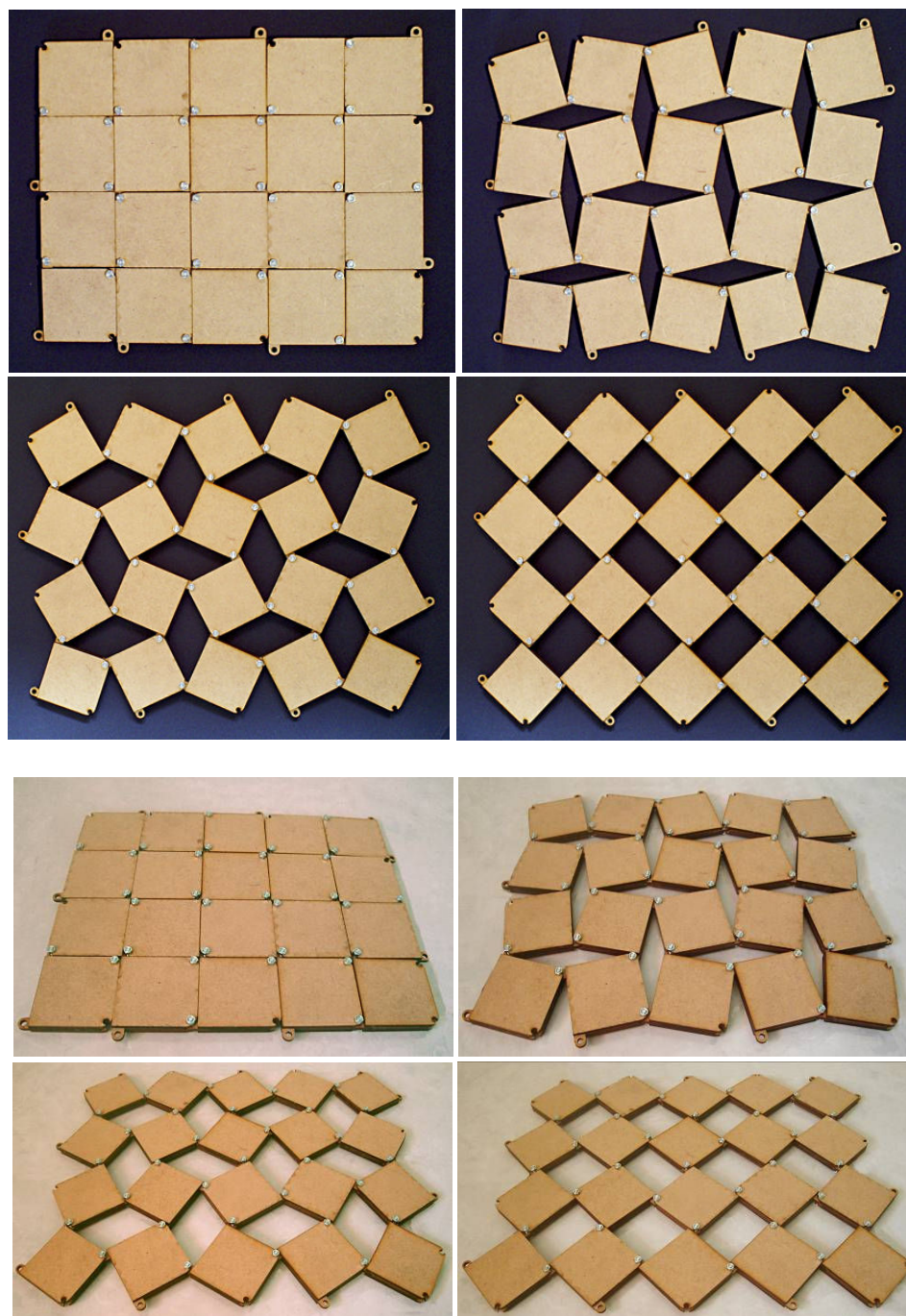


Figura 77. Modelo I prototipado (autor, 2010).

Modelo II

O Modelo II, que é o desenho 10 aperfeiçoado, foi inspirado na estrutura do Prague Castle Orangery, projetada pela arquiteta Eva Jiricna e mostrada na Figura 78. Nessa estrutura, o elemento de união dos tubos facilita sua montagem, de modo a permitir, com apenas um parafuso, o ajuste de pequenas variações da geometria.



Figura 78. Estrutura do Prague Castle Orangery, projetado por Eva Jiricna (JIRICNA, 2008).

Tratando-se de uma estrutura com uniões metálicas e tubos, esse conceito de união de quatro peças por meio de uma peça central foi explorado para se desenvolver um modelo com todas as peças em madeira. Sempre considerando a articulação das peças como uma característica favorável, o Modelo II foi desenvolvido de modo que suas peças também fossem interligadas por meio de uma peça central. Como no Modelo I, o nó e as hastes são formados por três peças de

dois formatos diferentes, sendo que a peça do meio possui espaços para o encaixe, como mostra a Figura 79. Nas hastes foram feitos rebaixos e furos, de um modo conceitual, para demonstrar as várias possibilidades que podem ser utilizadas como fechamento da estrutura, ilustrada na Figura 80.

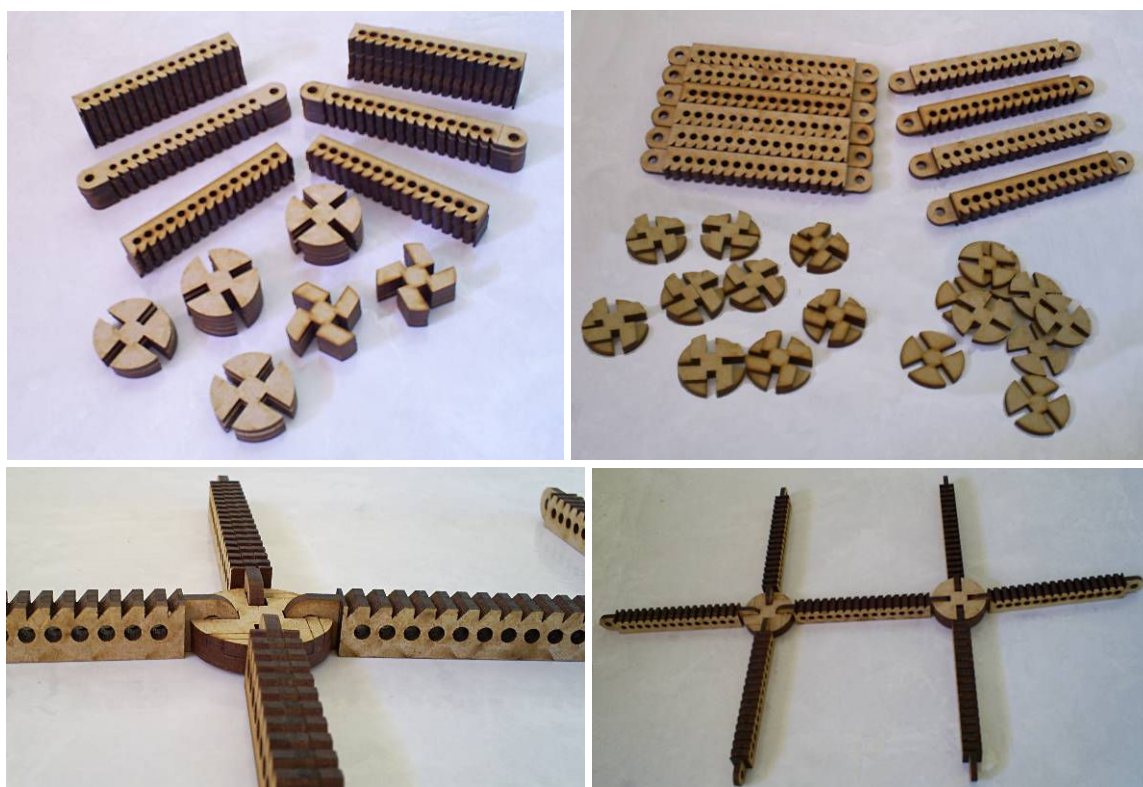


Figura 79. Peças separadas; detalhe da montagem do nó; montagem do modelo (autor, 2010).

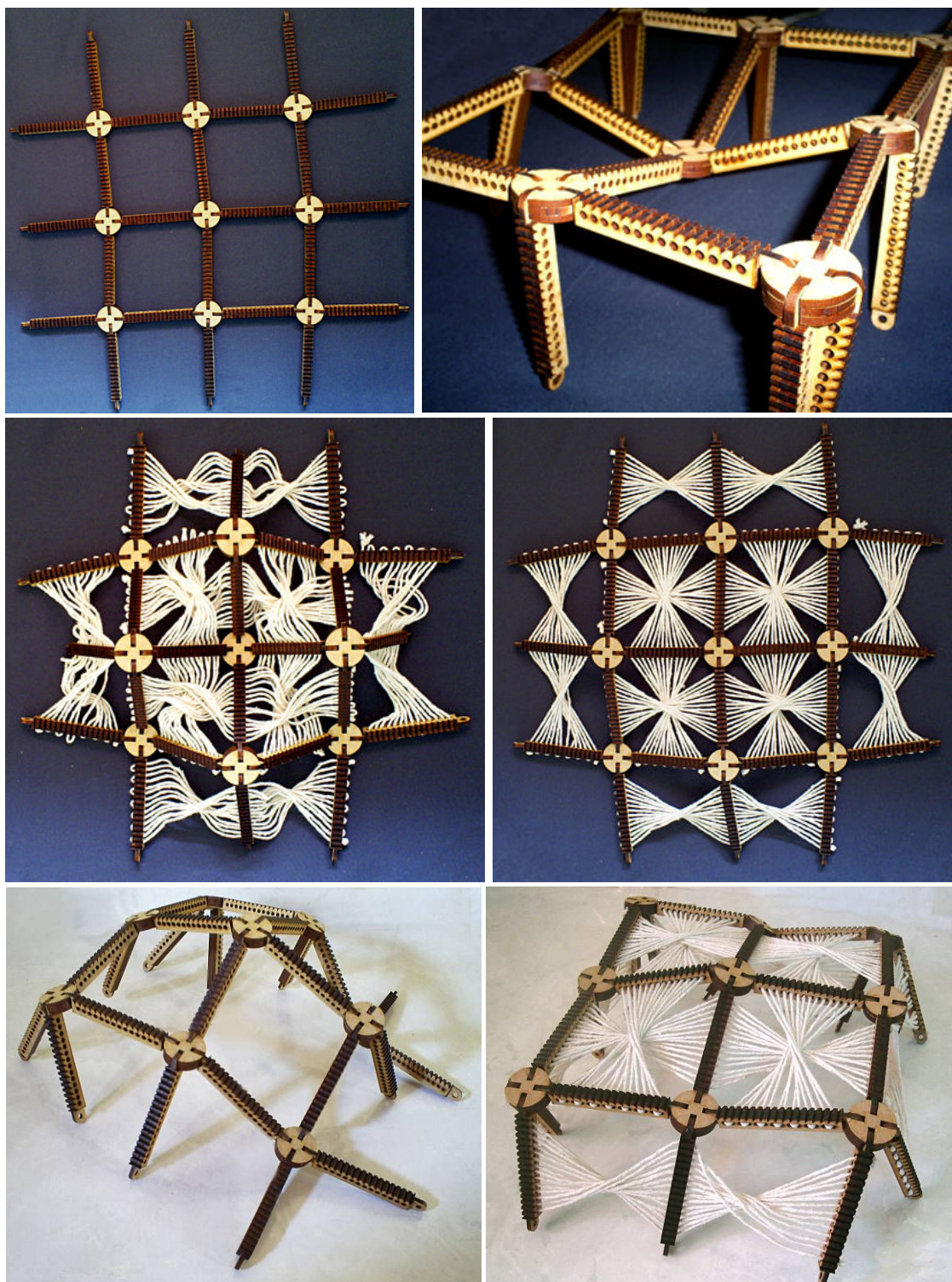


Figura 80. Modelo II prototipado e com fechamentos por linhas flexíveis permitindo uma variação no desenho (autor, 2010).

Modelo III

O desenho 6 foi desenvolvido e transformado no Modelo III. Este modelo foi baseado no Pavilhão da Venezuela, construído para a Expo'92 em Sevilha na Espanha. O elemento básico da estrutura é constituído de uma seção triangular que permite a dobra plana da estrutura, como ilustrado na Figura 81. Tomou-se como modelo esta estrutura por conter um elemento de ligação diferente dos convencionais.

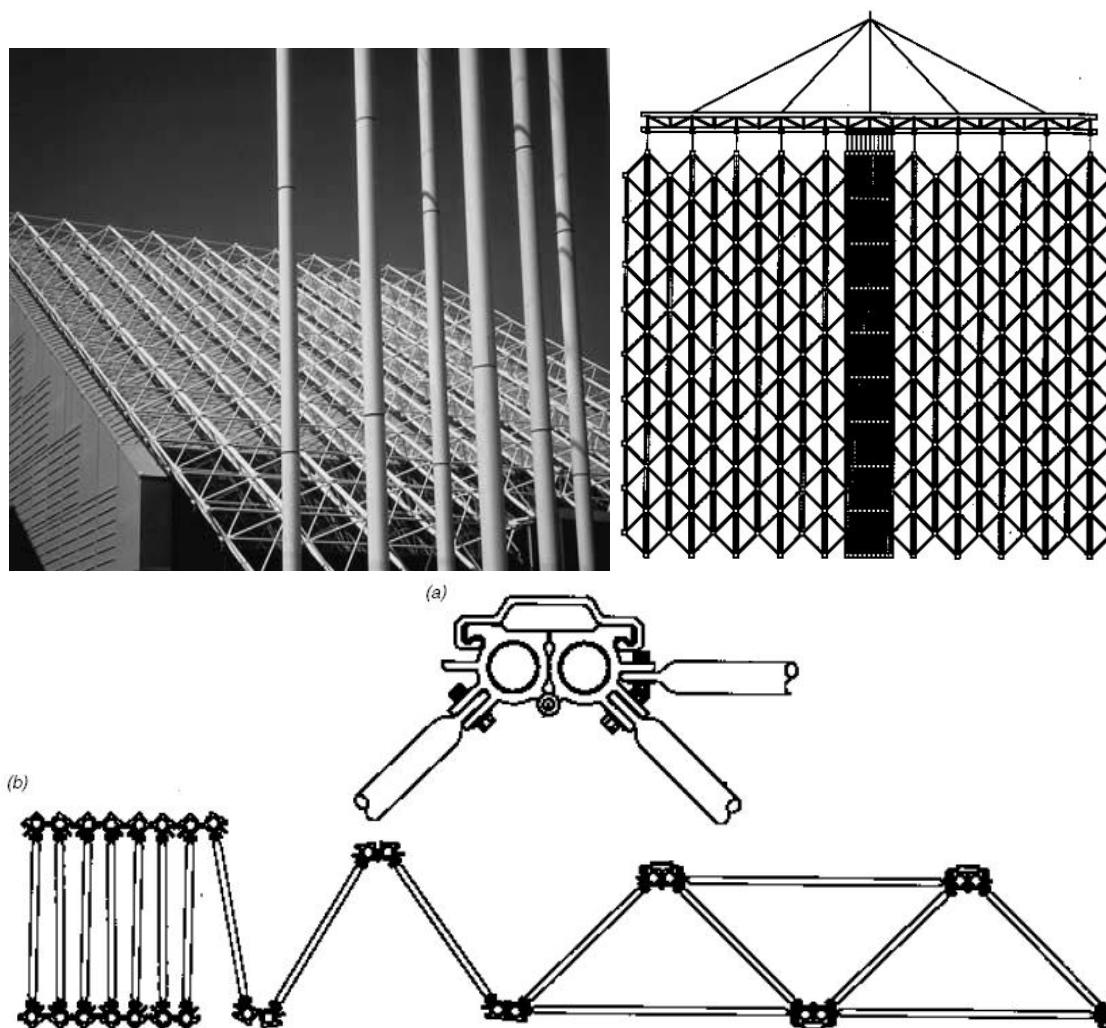


Figura 81. Estrutura do Pavilhão da Venezuela com o detalhe do nó que produz abertura e fechamento da estrutura (CHILTON, 2000).

Mais uma vez, a idéia principal para o desenvolvimento de um novo modelo articulável foi partir de uma estrutura metálica para se chegar a uma estrutura feita inteiramente de madeira.

O maior desafio deste desenvolvimento articulável foi a criação de um mecanismo que unisse as hastes da estrutura e ao mesmo tempo possibilitasse a movimentação da mesma. Para isso, foram cortadas peças de três formatos diferentes que, quando unidas, formam um elemento de união. A colagem de duas peças de formatos diferentes forma um quarto do nó, como mostra a Figura 82.

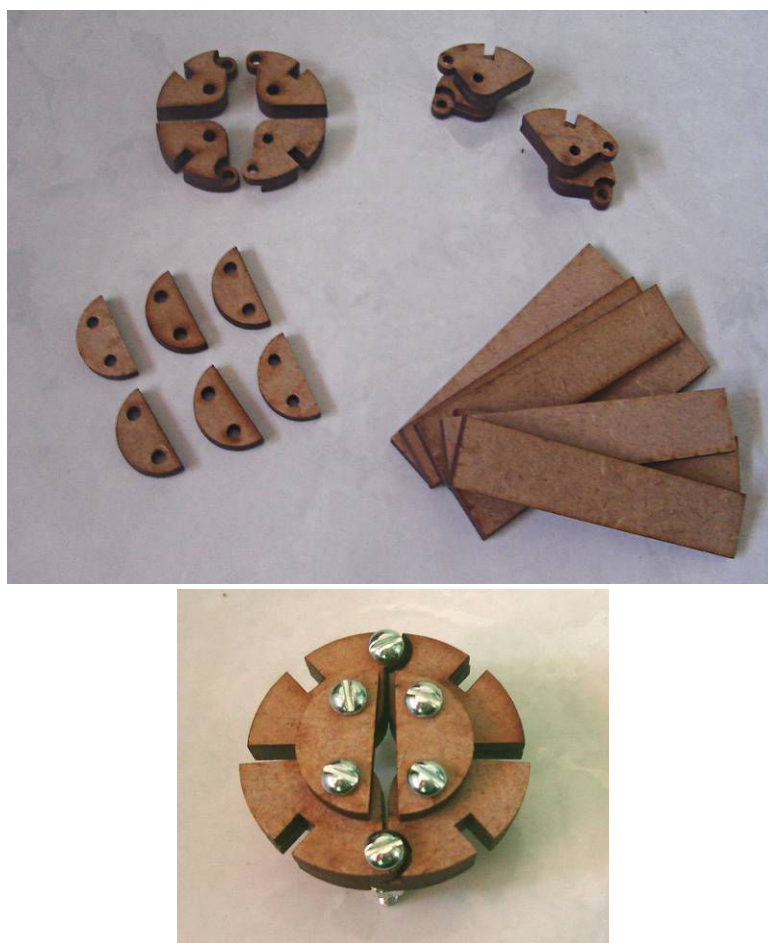


Figura 82. Peças do Modelo III e elemento de união montado (autor, 2010).

A peça de união do modelo foi desenhada de forma que possibilitasse uma articulação diversificada. Percebeu-se, também, que a montagem das hastes poderia ser feita de modo que o modelo se tornasse curvo. Para esta primeira análise optou-se pela montagem plana, com foco na articulação das peças e do desenho do modelo como um todo. A Figura 83 ilustra o Modelo III e suas movimentações.

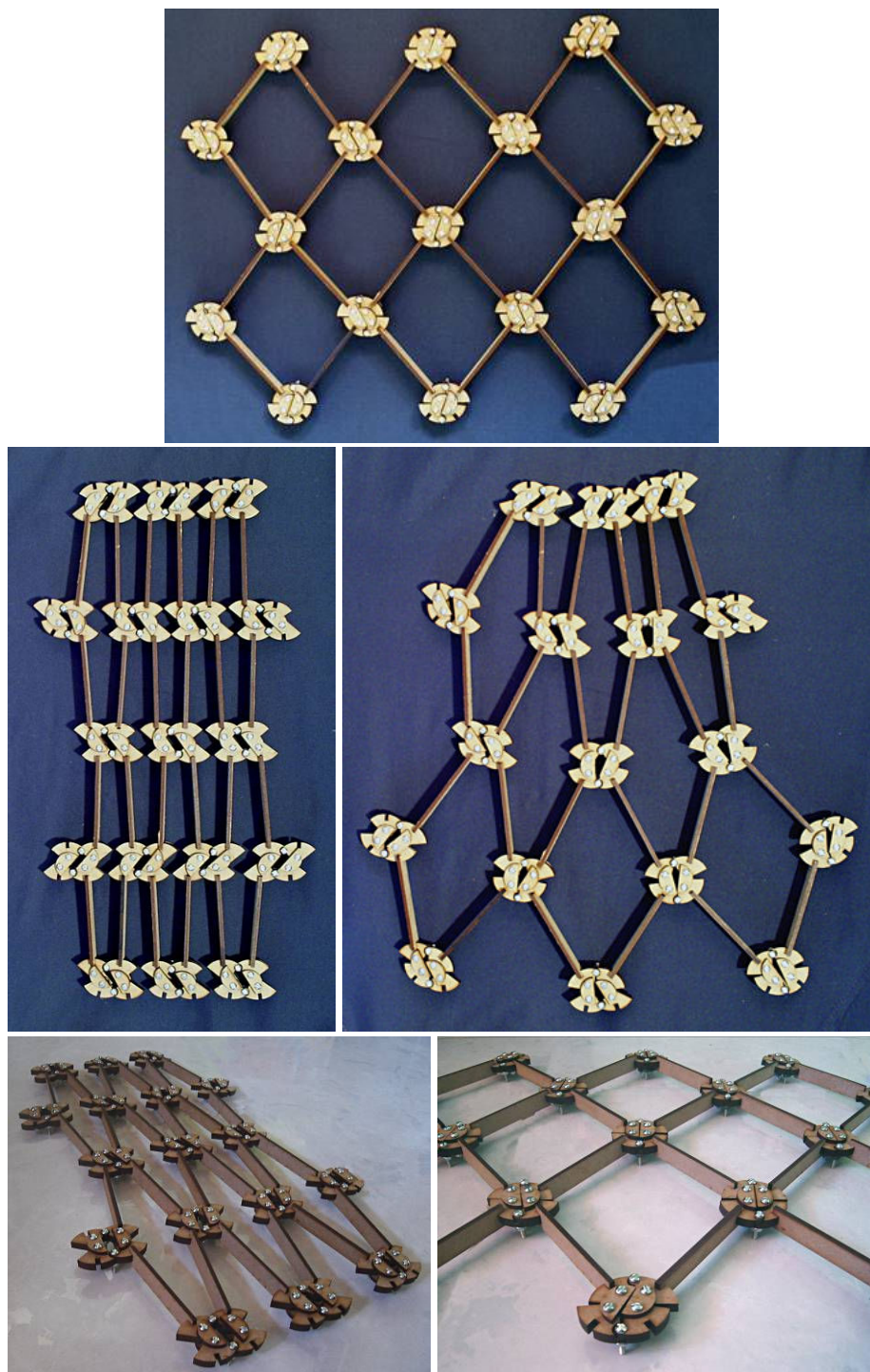


Figura 83. Modelo III prototipado (autor, 2010).

3.2 Simulações virtuais dos modelos criados

Com o objetivo de realizar uma avaliação virtual dos modelos desenvolvidos, foram feitas simulações com o uso dos *softwares* Solidworks (versão 2010), DIALux 4.7, e Rhinoceros 4.0. A escolha do Solidworks se deu pela possibilidade de se efetuarem avaliações físicas e de movimento oferecidas pelo *software*. O DIALux foi utilizado nesta pesquisa devido à possibilidade de analisar o efeito da variação da sombra proporcionada pelo Modelo I. Já o Rhinoceros, foi usado para demonstrar possibilidades arquitetônicas de usos dos modelos articuláveis desenvolvidos nesta pesquisa.

3.2.1 Simulações de movimento

Para estas simulações foi utilizado o *software* Solidworks, que é um aplicativo CAD, para desenvolvimento de modelagem paramétrica de sólidos. Nos planos de representação (superior, direito e frontal) são feitos desenhos bidimensionais e, posteriormente, aplicada espessura na coordenada Z para torná-los tridimensionais, como mostrado na Figura 84.

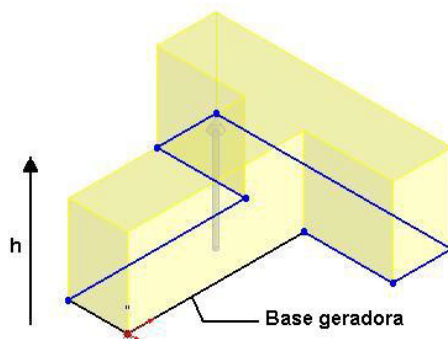


Figura 84. Transformação de um desenho bidimensional em um sólido (WEINFURTER, 2003).

Cada peça de uma estrutura é desenhada separadamente e depois inserida em um arquivo de montagem. No ambiente de montagem, é possível realizar análises estáticas e dinâmicas para

avaliação do comportamento físico de uma montagem, determinando valores de tensão, deformação e deslocamento.

Na presente pesquisa, o Solidworks, foi usado para se efetuarem análises de movimentação e de comportamento físico dos modelos. Para isso, eles foram modelados no *software* com dimensões baseadas em escala real. O desenho técnico, onde podem ser visualizadas as dimensões dos modelos, encontra-se no Apêndice A.

Tanto na avaliação da movimentação quanto na avaliação do comportamento físico foi utilizado como material a madeira de Cupiúba. Esta madeira é considerada de boa aceitação no mercado internacional, nacional e, principalmente, no estado de São Paulo. Suas principais características são descritas no Anexo I.

As propriedades do material necessárias para as avaliações foram inseridas no *software*, como mostrado na Figura 85. Os valores do módulo elástico à compressão paralela às fibras, da massa específica (densidade aparente a 15% de umidade) e da resistência à compressão paralela às fibras, foram baseados nas informações obtidas em IPT (2003). O valor do coeficiente de Poisson teve como referência os trabalhos de Mascia (1993) e Oliveira (2002). O módulo de cisalhamento, também chamado de módulo de rigidez ou ainda módulo de elasticidade transversal, foi calculado com base no valor do módulo de elasticidade, como descrito em Gesualdo (2003) e Goés (2006). O cálculo é feito por meio da seguinte expressão:

$$G = \frac{E_0}{20}$$

onde, G = módulo de cisalhamento;

E_0 = módulo elástico à compressão paralela às fibras.

O valor da resistência à tração paralela às fibras foi adotado com base no trabalho de Dias & Rocco Lahr (2004). Os valores das demais propriedades não iriam interferir nos ensaios, portanto, não foram preenchidos.

Tipo de modelo:

Unidades:

Categoria:

Nome:

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico em X	17142	N/mm ²
Coefficiente de Poisson em XY	0.471	N/A
Módulo de cisalhamento em XY	857	N/mm ²
Massa específica	870	kg/m ³
Resistência à tração em X	77	N/mm ²
Resistência à compressão em X	67.2	N/mm ²
Limite de escoamento		N/mm ²
Coefficiente de Expansão Térmica em X		/K
Condutividade térmica em X		W/(m·K)
Calor específico		J/(kg·K)
Razão de Amortecimento do Material		N/A

Figura 85. Propriedades da madeira de Cupiúba utilizadas nas simulações no Solidworks (autor, 2010).

A avaliação de movimento foi feita com o auxílio de um aplicativo incorporado ao Solidworks, denominado *Solidworks Motion*TM, que reproduz as condições de testes realizadas em estruturas reais.

Modelo I

No Modelo I, após a modelagem da peça padrão, foi criado um arquivo de montagem onde foram inseridas 25 peças. Em seguida, estas peças foram montadas e as áreas de encaixe foram definidas para que se mantivessem unidas, porém permitindo o movimento de rotação.

Desta forma, foi possível avaliar se os elementos de encaixes estavam operando de forma eficiente, ou seja, permitindo a movimentação desejada das peças. Os resultados são visualizados na Figura 86.

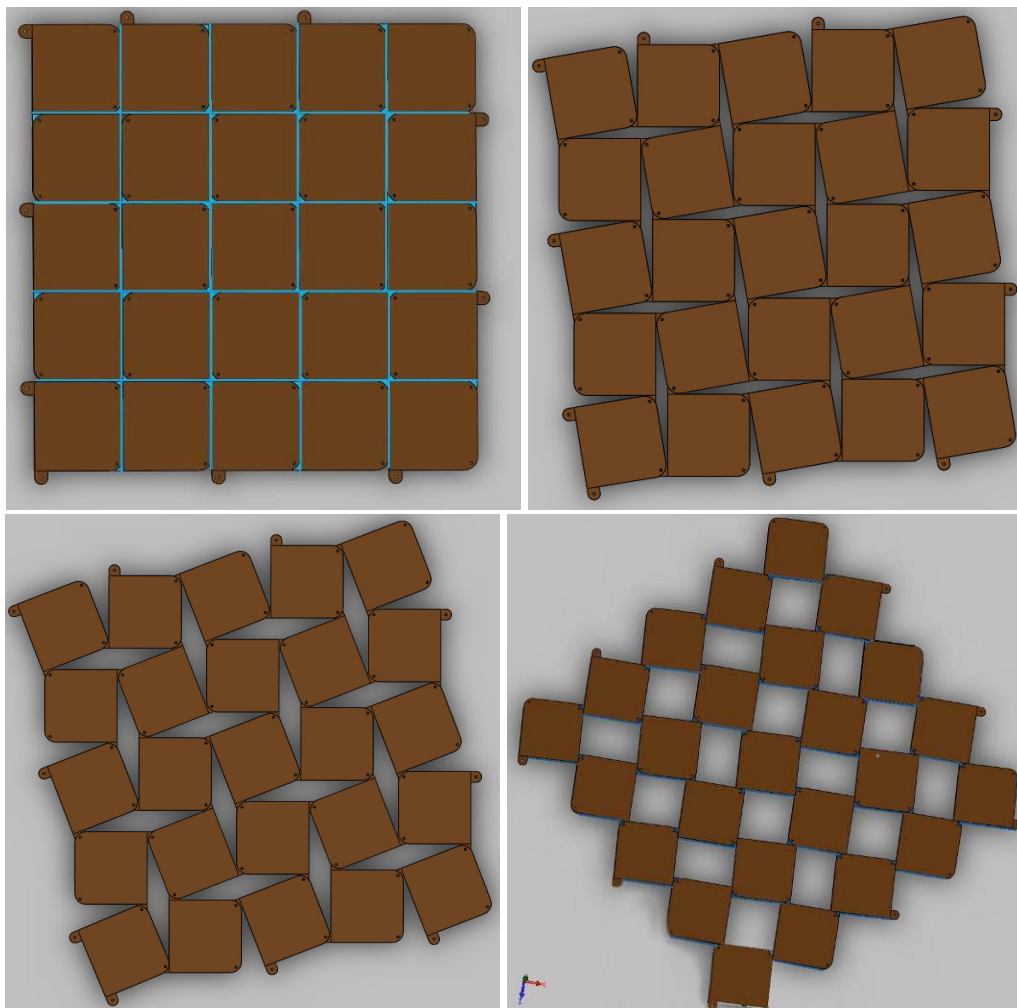


Figura 86. Etapas de movimentação do Modelo I (autor, 2010).

Na Figura 86, nota-se que as áreas em azul mostradas na configuração fechada e totalmente aberta são referentes às áreas limites de movimentação. A simulação é interrompida sempre que um componente entra em colisão com outro componente. Contudo, esta colisão já era esperada e o modelo realiza a movimentação pretendida.

Modelo II

No Modelo II as peças se movimentam através dos elementos de conexão entre as hastes. Esse componente possibilita o movimento do modelo nos três eixos (x, y e z). Esse comportamento permite que o modelo se movimente de maneira orgânica, visto que cada elemento se comporta de maneira diferente. Nota-se que os elementos de conexão permitem a movimentação da haste em uma angulação máxima de 180° . Sendo assim, a modelagem desta estrutura obteve êxito em relação à articulação dos componentes. Os resultados da movimentação são ilustrados na Figura 87.

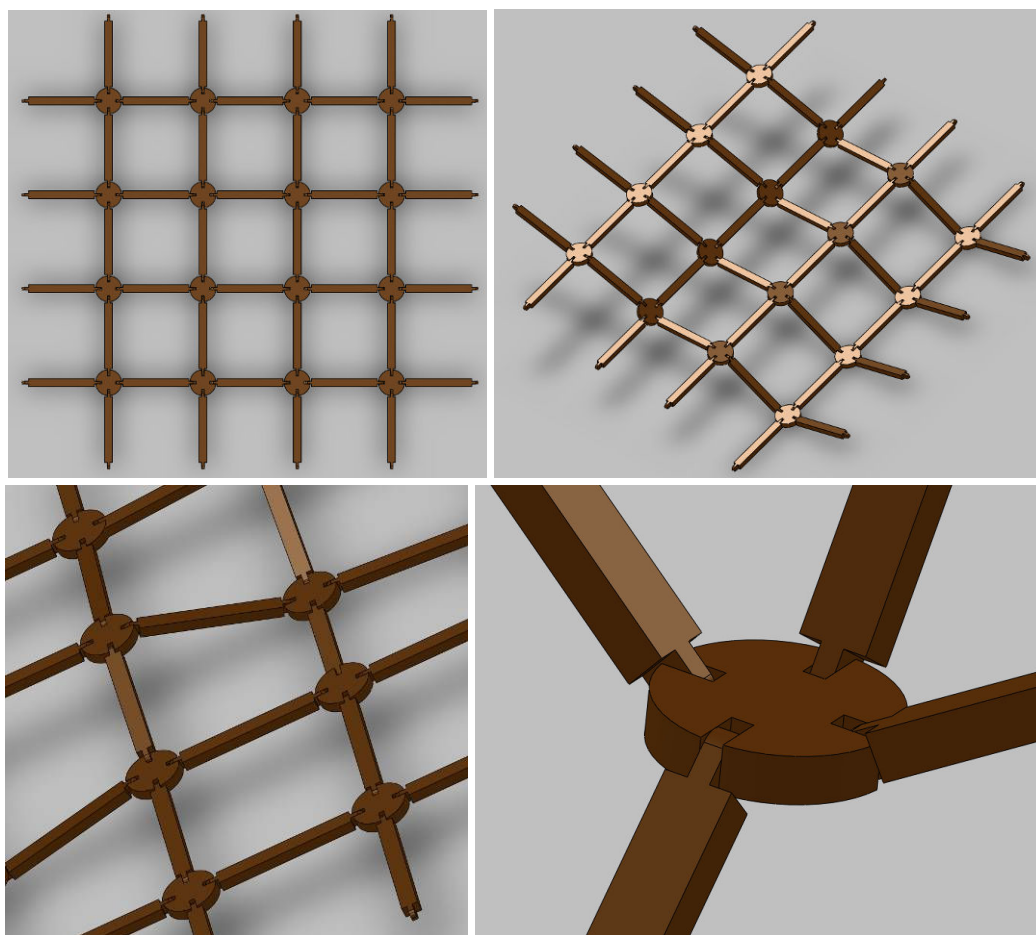


Figura 87. Detalhes da movimentação do Modelo II (autor, 2010).

Modelo III

Em uma estrutura retrátil, a geometria do elemento conectivo é um dos principais fatores para uma articulação perfeita. O Modelo III é resultado de uma pesquisa referente às estruturas retráteis desenvolvidas em projetos de engenharia, arquitetura e produtos em geral.

O sistema criado para este modelo teve como objetivo principal o desenvolvimento de um mecanismo com todos os elementos em madeira. Os únicos componentes metálicos utilizados são os parafusos para a união das peças do elemento conectivo. Na Figura 88 são exibidas imagens da movimentação do modelo com destaque para o elemento de conexão. Percebe-se que, tanto a estrutura do modelo quanto o elemento conectivo, modificam sua forma durante a articulação.

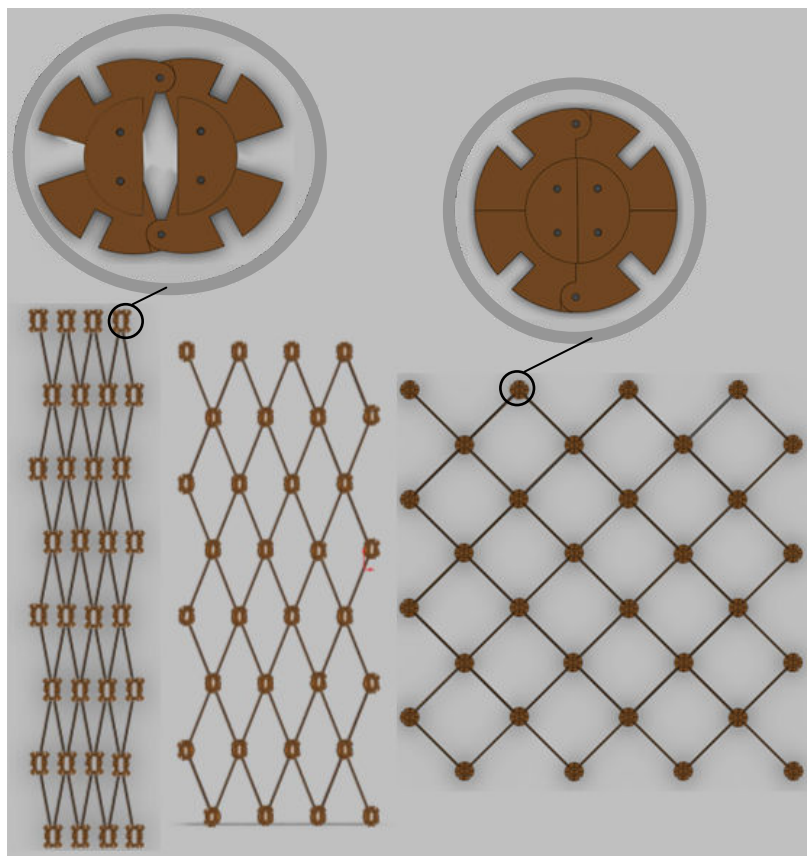


Figura 88. Articulação da Estrutura III com detalhe para a geometria do elemento de conexão (autor, 2010).

3.2.2 Simulações físicas

Novamente, com o *software* Solidworks, foram feitas simulações para avaliação do comportamento físico dos modelos, com o objetivo de identificar a carga máxima suportada por eles e, conseqüentemente, o deslocamento vertical máximo. Em todas as simulações, no carregamento máximo incluiu-se o peso próprio das estruturas.

Modelo I – configuração fechada

A primeira simulação do Modelo I, correspondente à configuração fechada, possui as seguintes características:

- área: 9m^2
- elementos de conexão: pinos
- elementos de geometria fixa: área lateral da estrutura
- carregamento: distribuído

Salienta-se que os elementos de geometria fixa são aqueles que sustentam a estrutura do modelo durante o carregamento, correspondente à área azul mostrada na Figura 90.

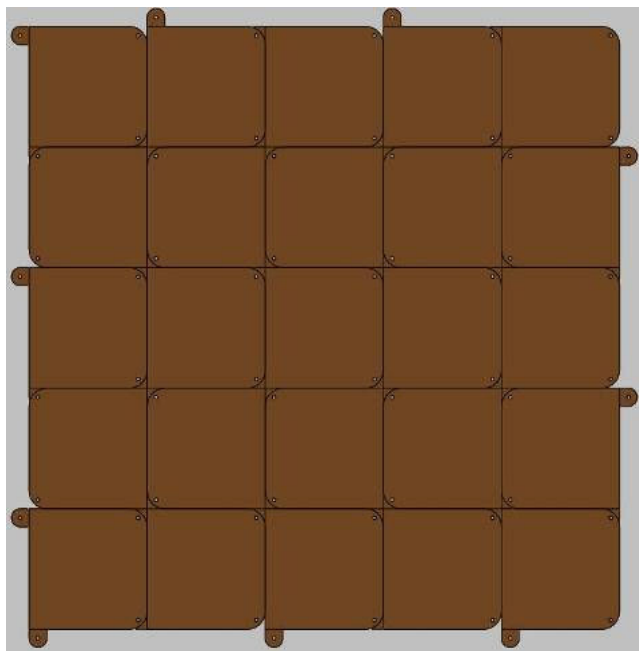


Figura 89. Modelo I fechado, modelado no Solidworks (autor, 2010).

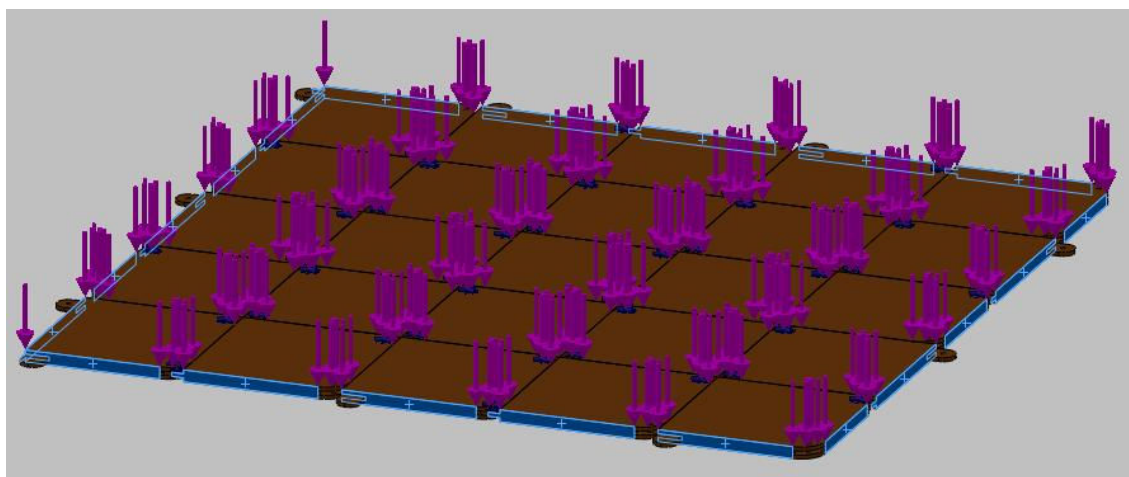


Figura 90. Direção e distribuição da força (setas roxas) e superfície fixa (área azul) (autor, 2010).

Com as características citadas e mostradas nas Figuras 89 e 90, foram encontrados os seguintes valores:

- força suportada pela estrutura: 15000 N
- tensão máxima: 18,612 MPa

- deslocamento máximo: 13,271 mm
- deformação máxima: 0,0009

Nesta simulação, foi utilizado o carregamento com escalas de 2500 N, sendo que a carga de ruptura foi aproximadamente 15000 N, como mostrado na Tabela IV.

Tabela IV. Resultados da simulação do Modelo I – configuração fechada

Força (N)	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)	Deformação
0	0	0	0
2500	3,102	2,212	0,0002
5000	6,204	4,424	0,0003
7500	9,306	6,636	0,0005
10000	12,408	8,851	0,0006
12500	15,51	11,069	0,0008
15000	18,612	13,271	0,0009

As Figuras 91, 92 e 93 apresentam, respectivamnte, a tensão, o deslocamento e a deformação do Modelo I após a simulação. De acordo com a escala de cores, as áreas em azul escuro apresentam os menores valores e as áreas vermelhas os valores mais elevados.

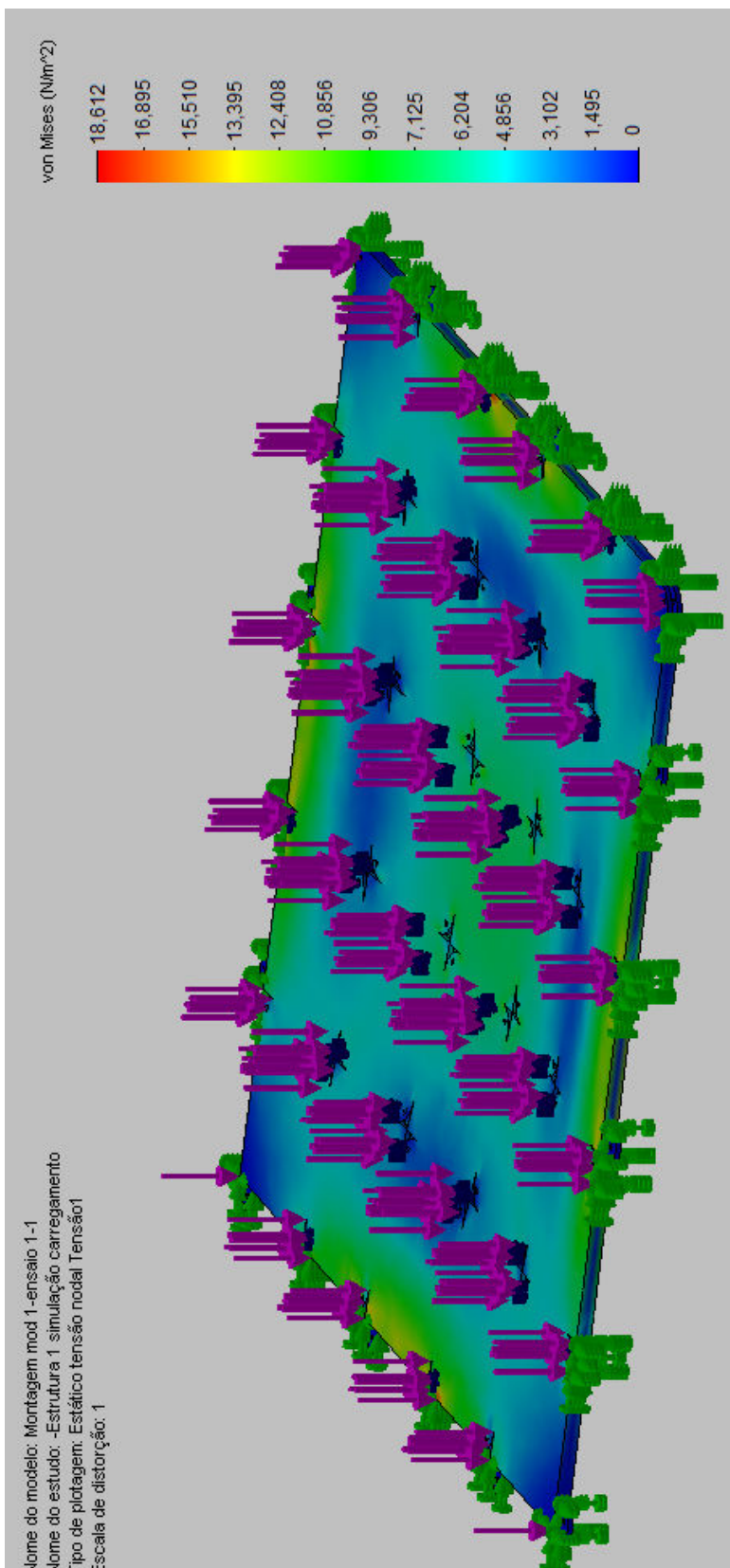


Figura 91. Tensão no Modelo I, configuração fechada, com carga de 15000 N.

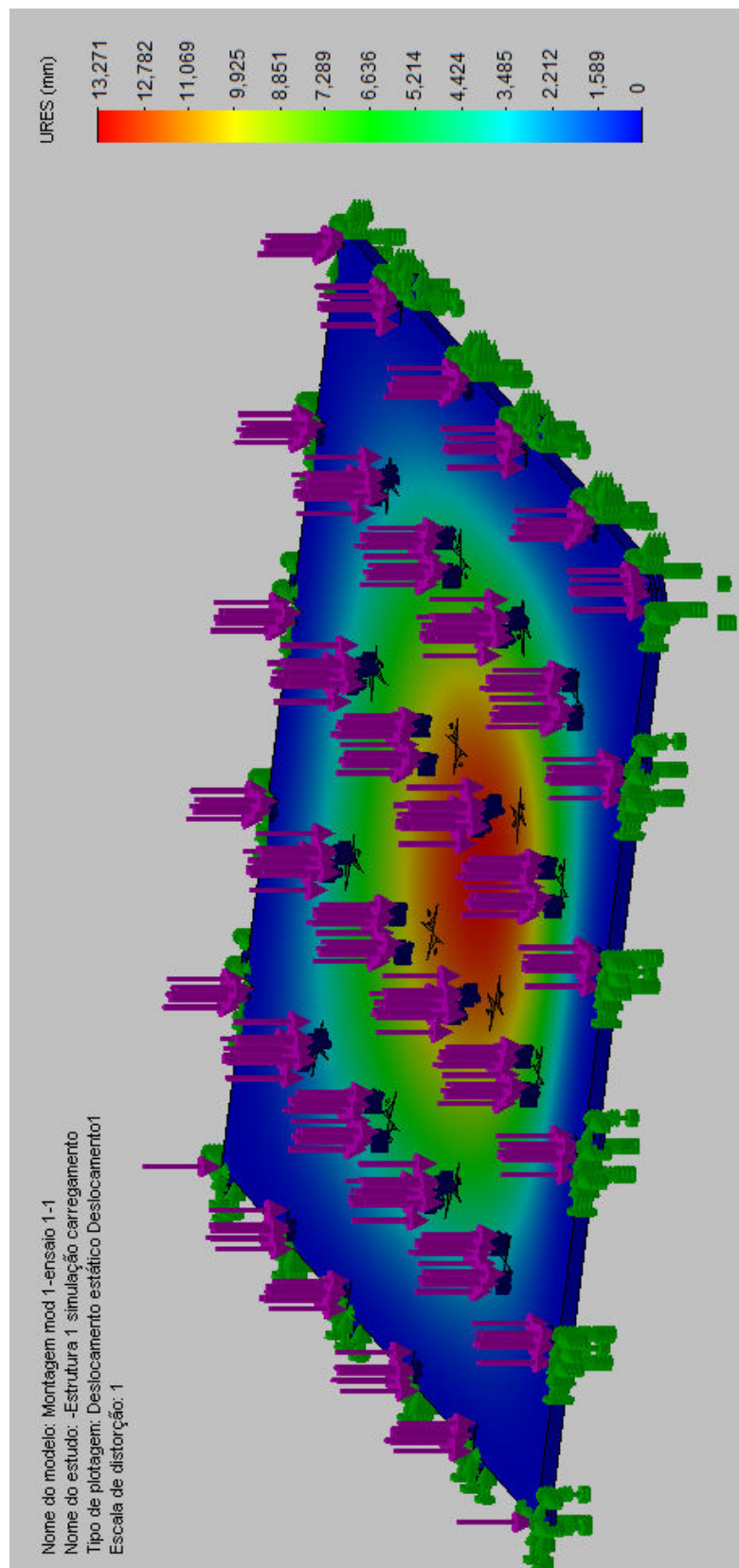


Figura 92. Deslocamento no Modelo I, configuração fechada, com carga de 15000 N.

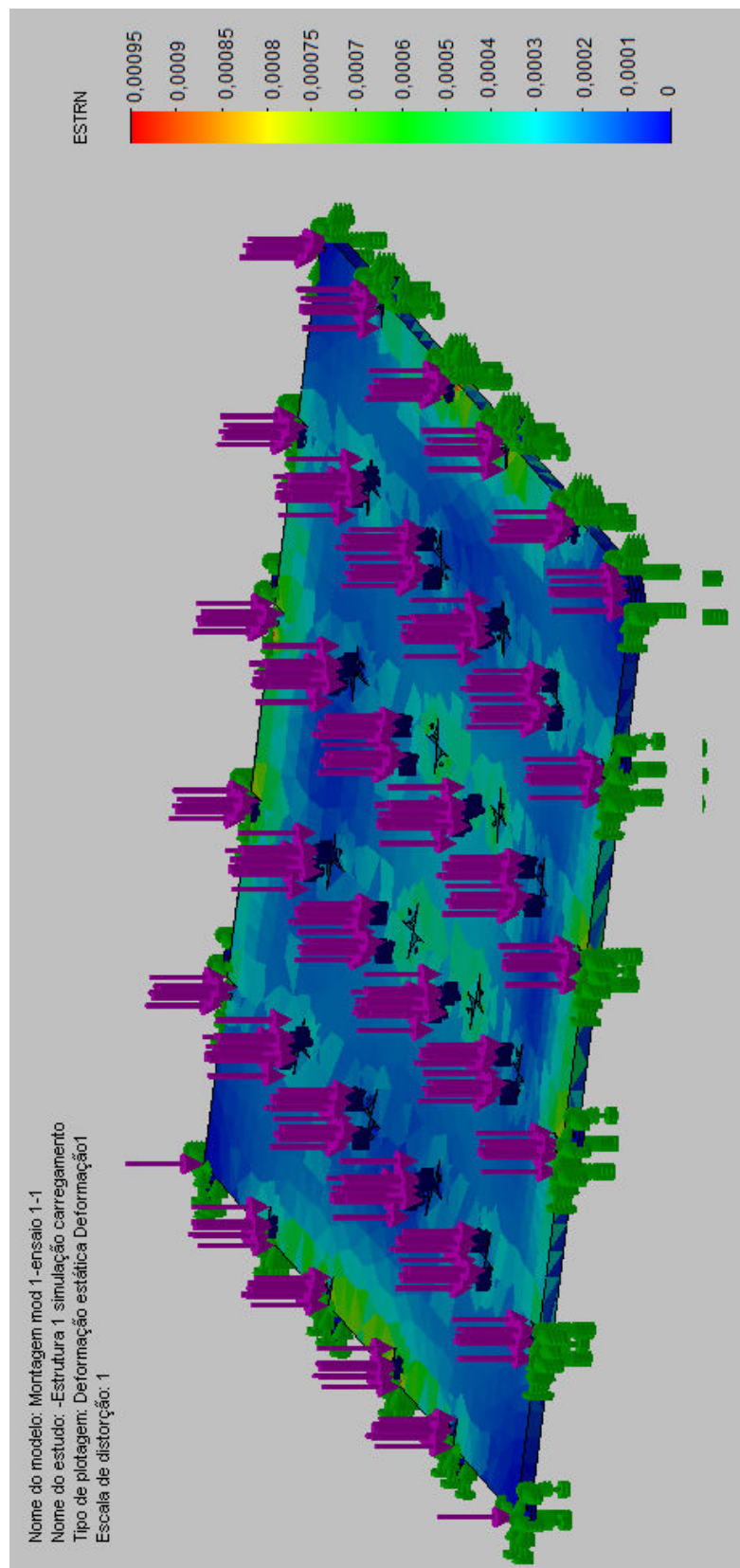


Figura 93. Deformação no Modelo I, configuração fechada, com carga de 15000 N.

Modelo I – configuração semi-aberta

A segunda simulação do Modelo I possui as mesmas características de elementos de conexão, de fixação e carregamento da simulação anterior. A área foi alterada para $12,6 \text{ m}^2$ pelo fato de o modelo começar a se movimentar e, portanto, expandir sua área. As Figuras 94 e 95 ilustram as características citadas.

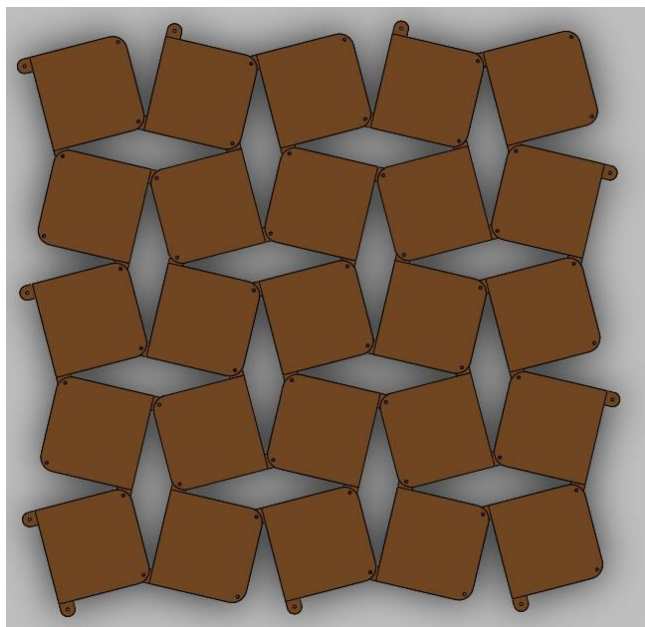


Figura 94. Modelo I semi-aberto, modelado no Solidworks (autor, 2010).

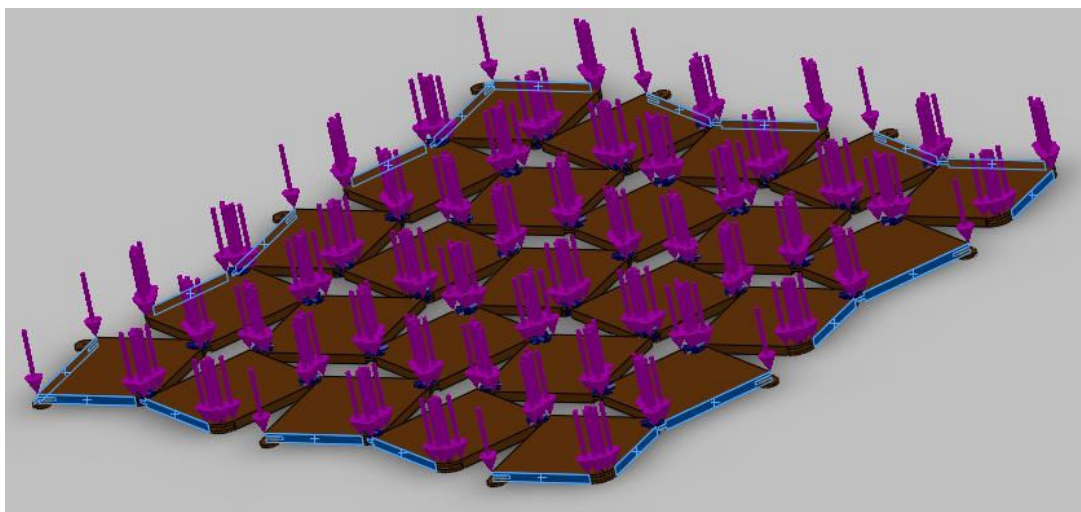


Figura 95. Direção e distribuição da força (setas roxas) e superfície fixa (área azul) (autor, 2010).

Deste modo, foram encontrados os seguintes valores:

- força suportada pela estrutura: 1200 N
- tensão máxima: 65,412 MPa
- deslocamento máximo: 12,072 mm
- deformação máxima: 0,0017

A escala de carregamento, nesta simulação, foi alterada para de 200 N, para que fosse possível encontrar maior quantidade de valores, visto que o valor da carga de ruptura, 1200 N, foi muito inferior ao da simulação anterior. Os valores de tensão, deslocamento e deformação são mostrados na Tabela V.

Tabela V. Resultados da simulação do Modelo I – configuração semi-aberta

Força (N)	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)	Deformação
0	0	0	0
200	10,902	2,012	0,0003
400	21,804	4,024	0,0006
600	32,706	6,036	0,0009
800	43,608	8,048	0,0012
1000	54,51	10,061	0,0015
1200	65,412	12,072	0,0017

Com os valores obtidos nesta simulação e com as Figuras 96, 97 e 98, pode-se perceber que o valor do carregamento foi muito inferior ao do primeiro teste. Contudo, os valores de tensão, deslocamento e deformação foram bem mais expressivos. Nota-se que o deslocamento se mostrou mais concentrado no centro da estrutura nesta simulação, enquanto que na simulação anterior houve uma distribuição mais homogênea da carga.

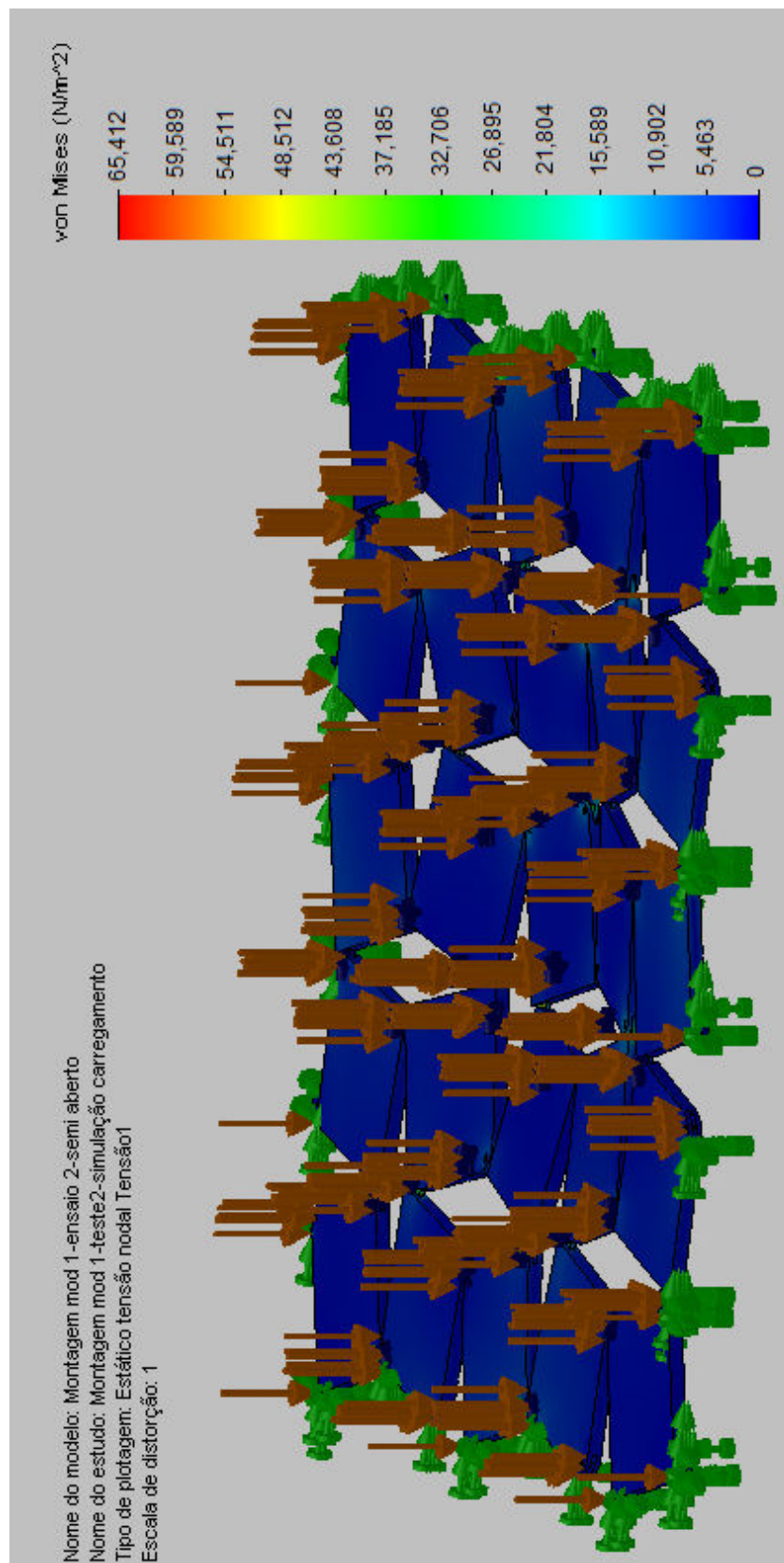


Figura 96. Tensão no Modelo I, configuração semi-aberta, com carga de 1200 N.

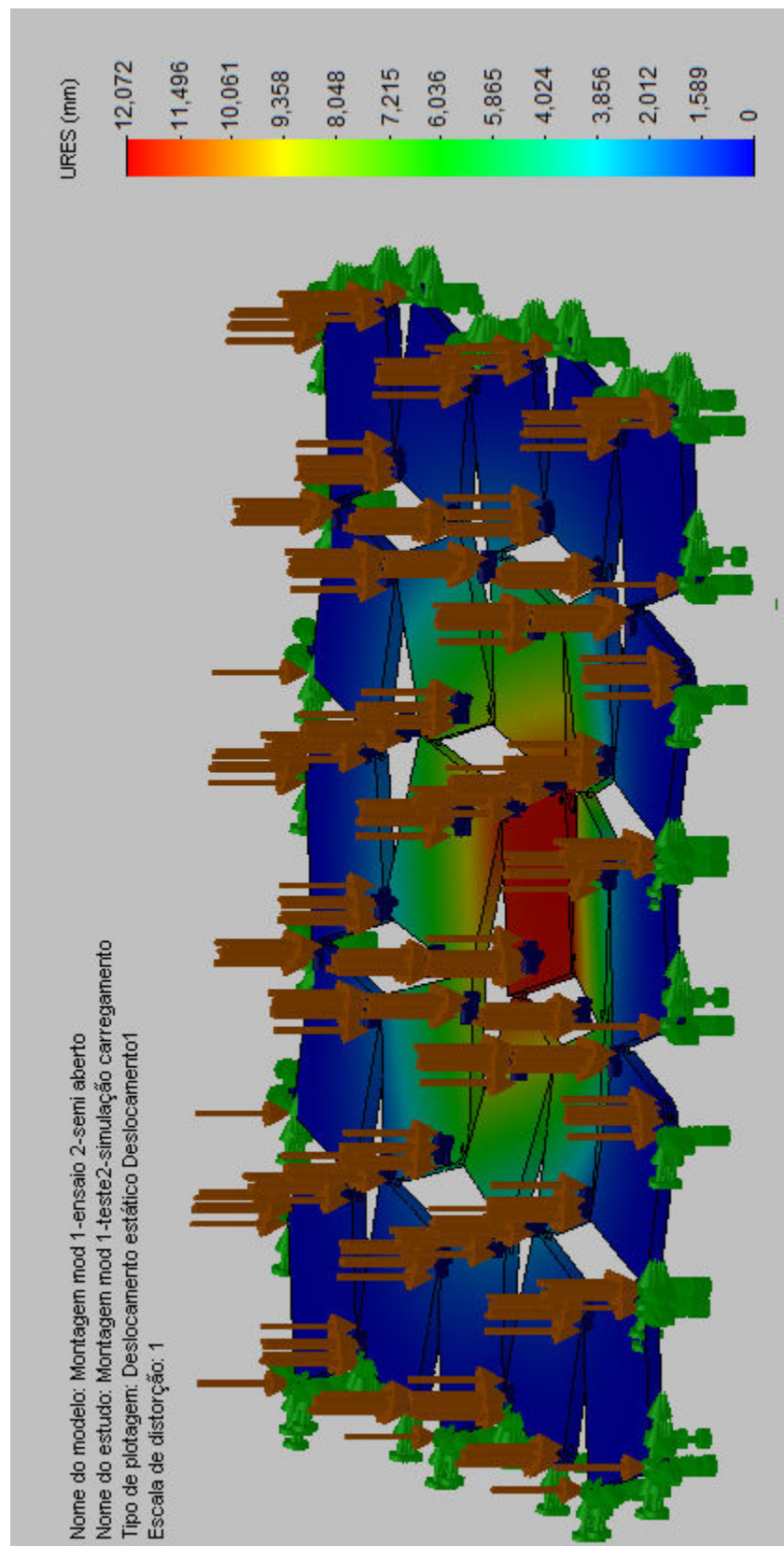


Figura 97. Deslocamento no Modelo I, configuração semi-aberta, com carga de 1200 N.

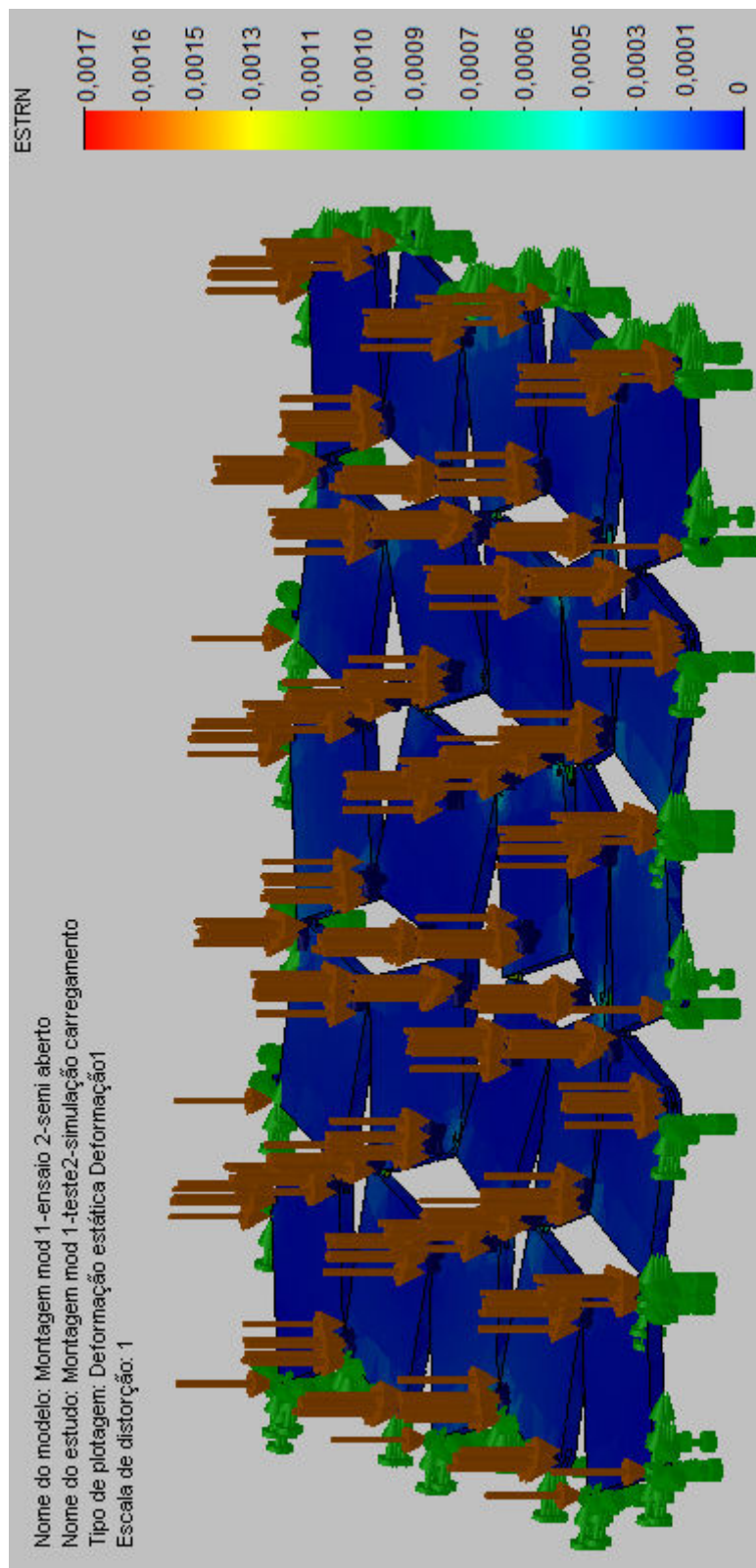


Figura 98. Deformação no Modelo I, configuração semi-aberta, com carga de 1200 N.

Modelo I – configuração aberta

A terceira simulação do Modelo I continua com as mesmas características de elementos de conexão, de fixação e carregamento da simulação anterior. Com a estrutura totalmente aberta, a área se altera para 16,4 m². Nas Figuras 99 e 100, são mostradas as imagens do modelo totalmente aberto, assim como a direção e distribuição da força.

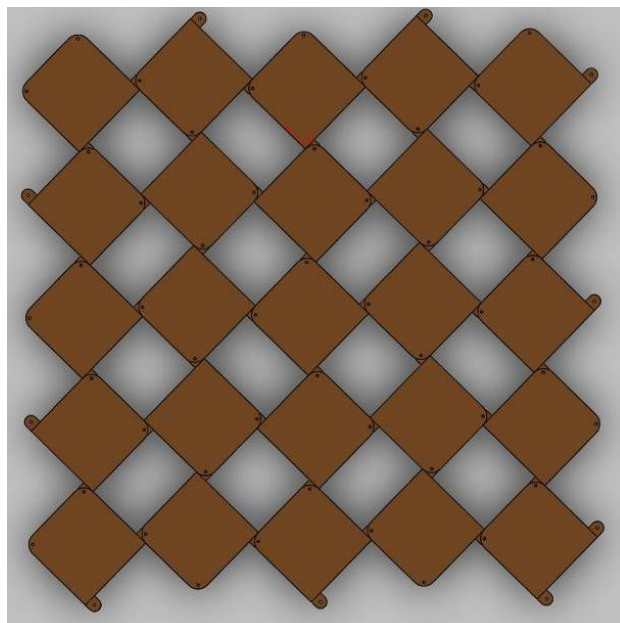


Figura 99. Modelo I aberto, modelado no Solidworks (autor, 2010).

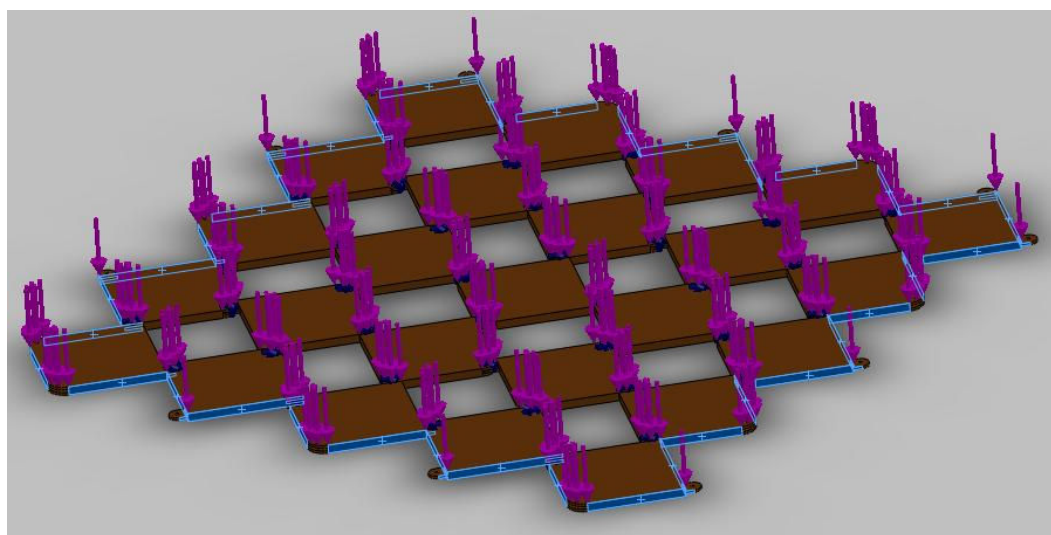


Figura 100. Direção e distribuição da força (setas roxas) e superfície fixa (área azul) (autor, 2010).

Os valores encontrados para a simulação totalmente aberta foram:

- força suportada pela estrutura: 3000 N
- tensão máxima: 43,134 MPa
- deslocamento máximo: 17,482 mm
- deformação máxima: 0,00138

A escala de carregamento foi alterada para 500 N e os valores de tensão, deslocamento e deformação são ilustrados na Tabela VI.

Tabela VI. Resultados da simulação do Modelo I – configuração aberta

Força (N)	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)	Deformação
0	0	0	0
500	7,189	2,497	0,00023
1000	14,378	4,994	0,00046
1500	21,567	7,491	0,00069
2000	28,756	9,998	0,00092
2500	35,945	13,684	0,00115
3000	43,134	17,482	0,00138

Nesta última simulação do Modelo I, o valor da carga de ruptura se mostrou mais elevado que na simulação semi-aberta e inferior ao da simulação fechada. Os valores de tensão e deformação se apresentaram inferiores aos da simulação semi-aberta; porém, o deslocamento foi o mais elevado dentre as três simulações. Nas Figuras 101, 102 e 103 são apresentadas, respectivamente, a tensão, o deslocamento e a deformação da estrutura após a simulação.

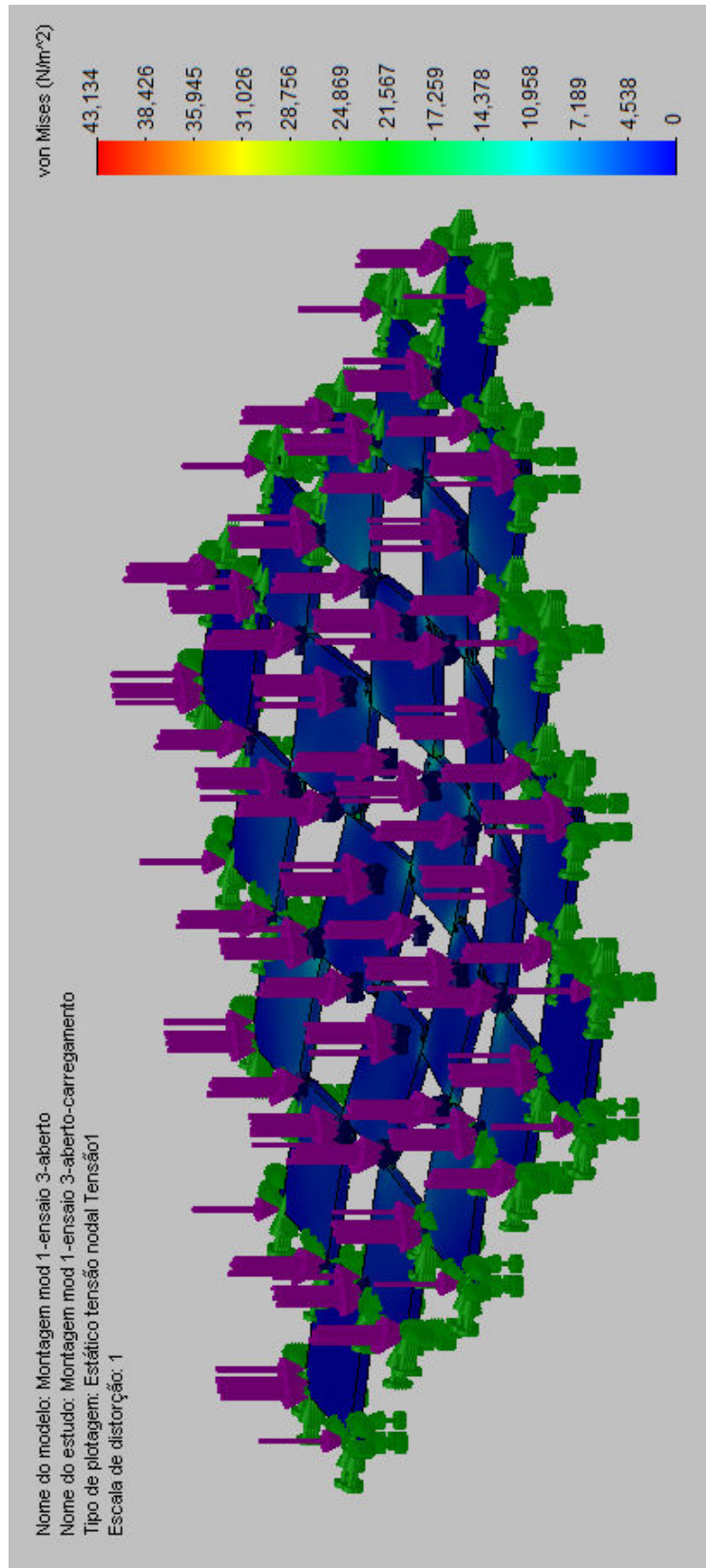


Figura 101. Tensão no Modelo I, configuração aberta com carga de 1200 N.

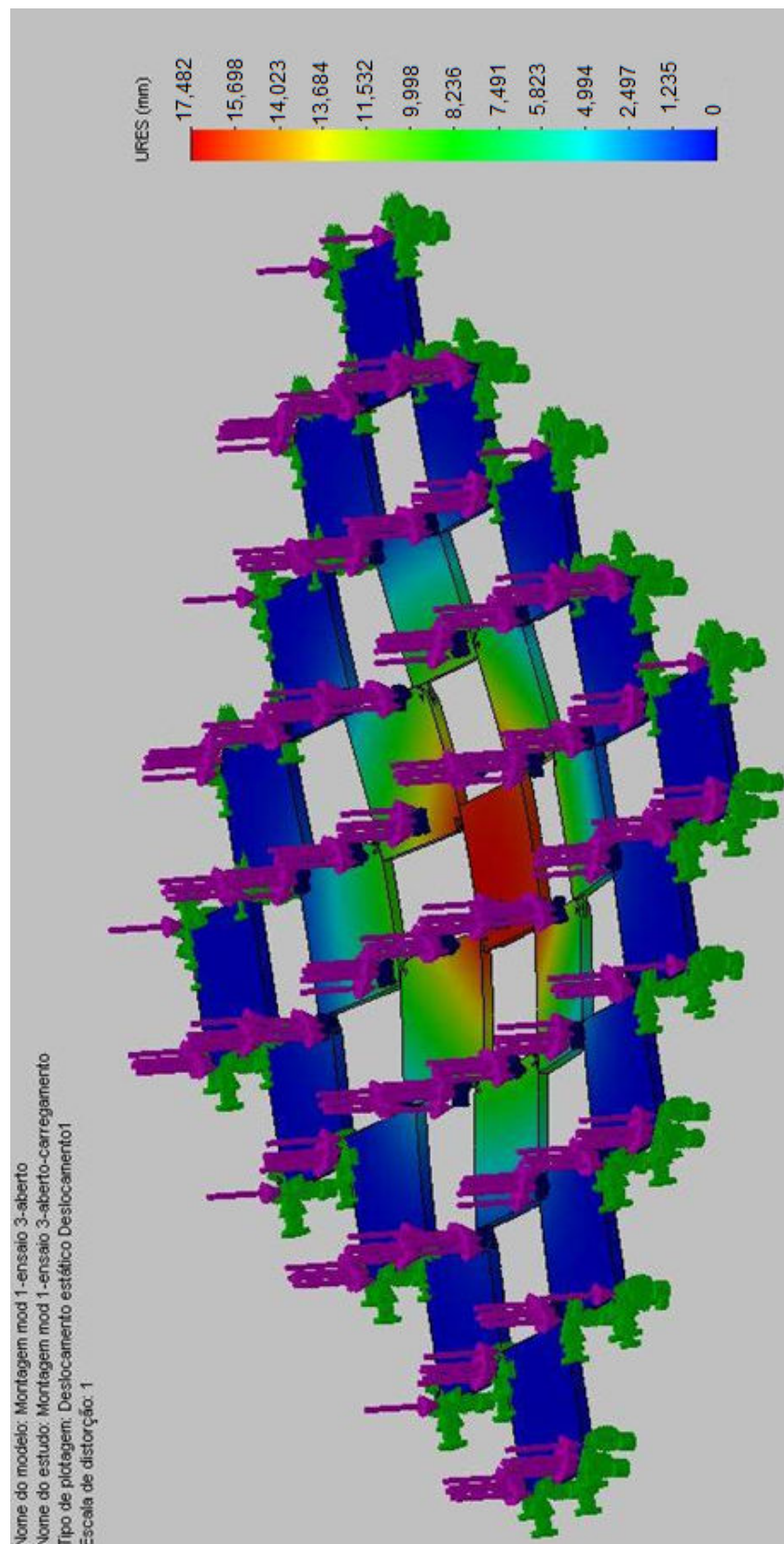


Figura 102. Deslocamento no Modelo I, configuração aberta, com carga de 1200 N.

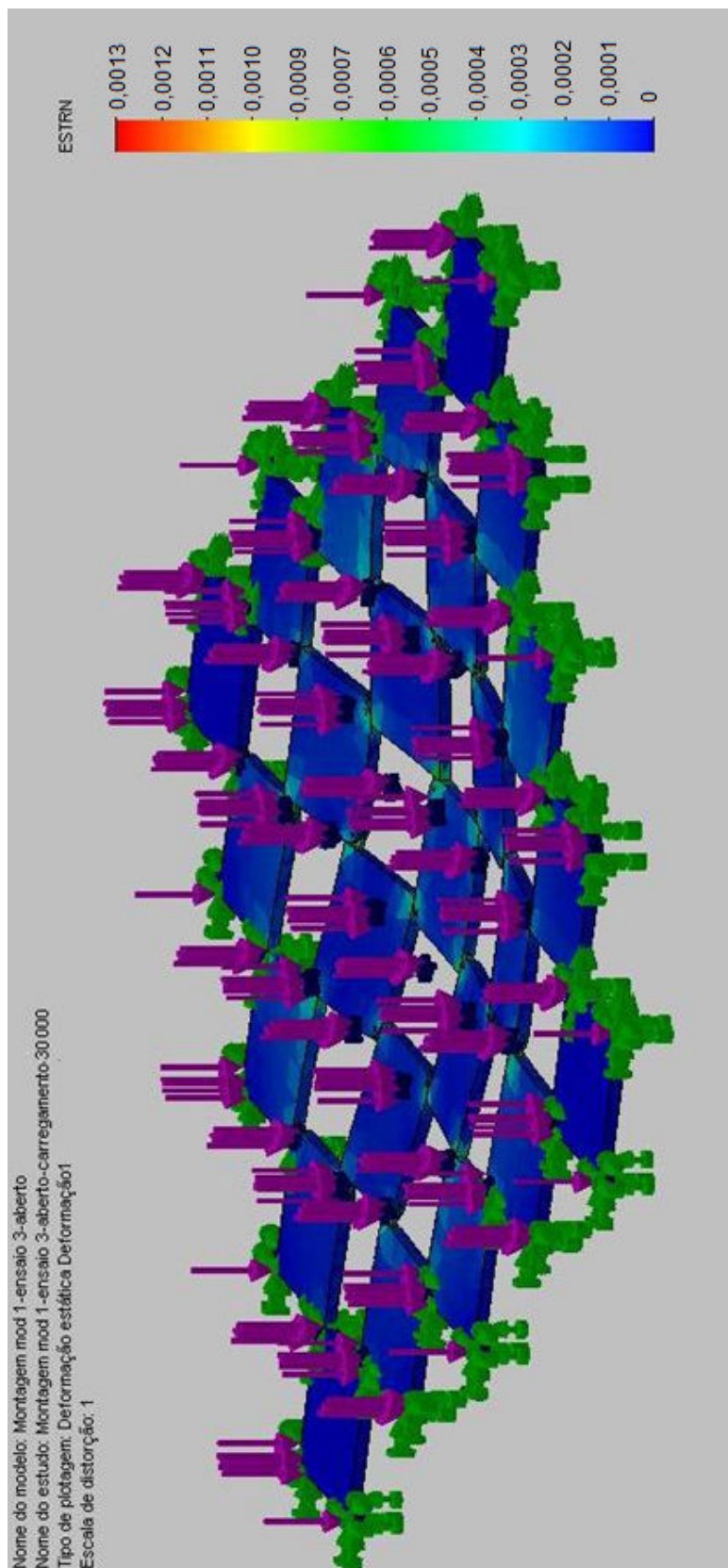


Figura 103. Deformação no Modelo I, configuração aberta, com carga de 1200 N.

Análise dos resultados das simulações do Modelo I

Com os dados gerados nas simulações do Modelo I nas configurações fechada, semi-aberta e aberta, foi possível verificar e comparar as configurações com o intuito de verificar o ponto crítico de deslocamento no qual a estrutura se rompe.

Foi gerado um gráfico carga *versus* deslocamento, conforme ilustrado na Figura 104. A figura mostra as curvas de aproximação linear relacionando a carga aplicada na superfície da estrutura e o deslocamento resultante da aplicação da força. As três configurações da estrutura foram consideradas, isto é, fechada, semi-aberta e aberta.

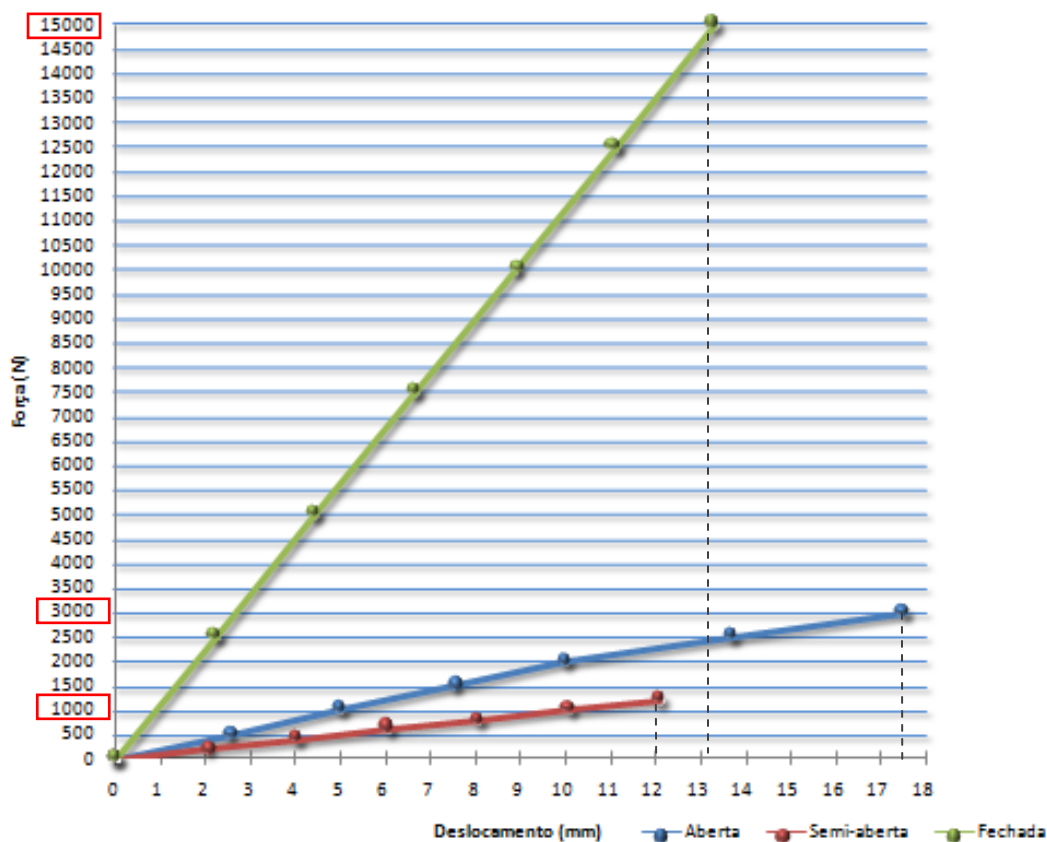


Figura 104. Deslocamento vertical do Modelo I em três diferentes configurações (autor, 2010).

As diferenças entre as três configurações da estrutura, conforme observado na figura são: i) a configuração fechada suporta maior carga, 15000 N. Além disso, esta configuração sofre relativamente um menor deslocamento para uma carga fixa aplicada, por exemplo, 1500 N; ii) a

configuração aberta suporta menos carga referente à configuração fechada no ponto de ruptura, 3000 N. Esta configuração tem o maior deslocamento, 17,482 mm; iii) a configuração semi-aberta é a que suporta a menor carga entre as demais. Ela suporta 1200 N e se rompe ao deslocar 12,072 mm.

A partir destas observações, verifica-se que a configuração fechada é mais estável do que as demais, visto que suporta maior carga e se desloca menos. Seu comportamento é linear na relação carga-deslocamento. O comportamento observado é explicado pelo fato de a estrutura na configuração fechada ter uma área mais compacta. As superfícies laterais de cada elemento da estrutura entram em contato e dificultam o deslocamento vertical provocado pela força. A Figura 105 detalha o observado.

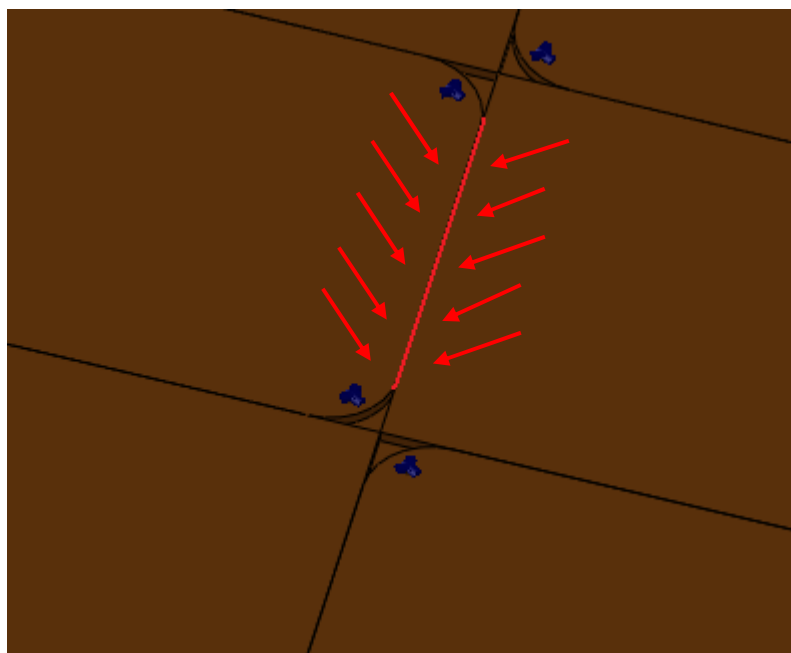


Figura 105. Área de contato entre elementos da estrutura na configuração fechada (autor, 2010).

Na Figura 105, as setas indicativas representam a resultante da força vertical aplicada em que os componentes da estrutura se apóiam uns nos outros e dificultam o deslocamento da estrutura como uma reação à força original aplicada.

Avaliou-se a deformação do Modelo I com relação à tensão aplicada. Considerou-se as três configurações: fechada, semi-aberta e aberta. O gráfico da Figura 106 ilustra as

curvas de aproximação linear relacionando a tensão do modelo e a deformação resultante.

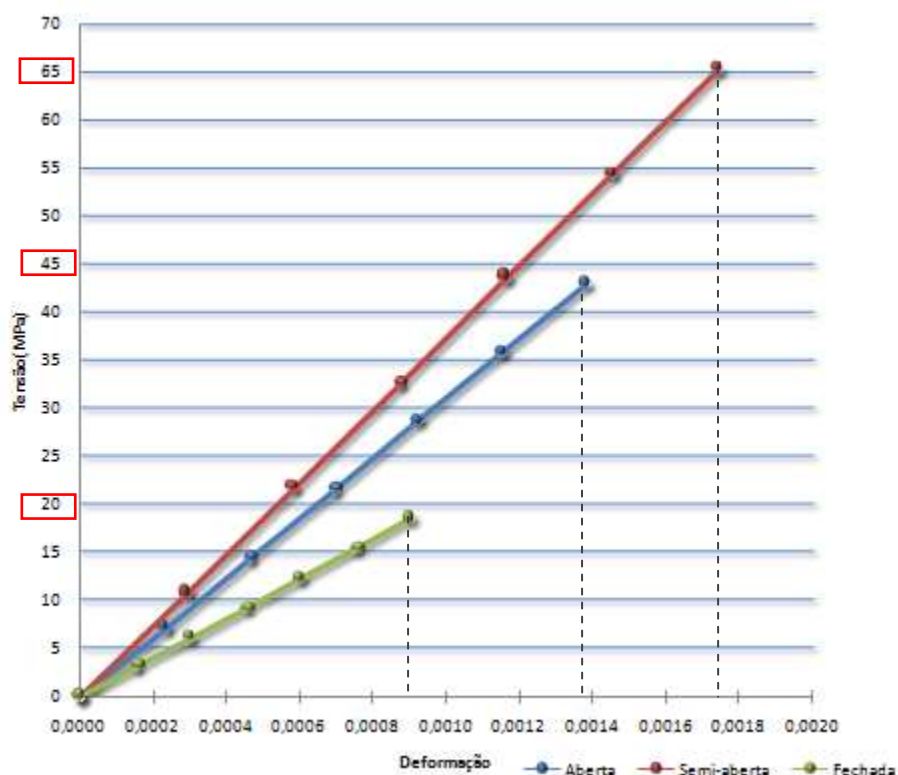


Figura 106. Deformação dos modelos sob diferentes tensões (autor, 2010).

Deformações foram observadas no modelo em ambas as configurações avaliadas. Da Figura 106 constatou-se que: i) a configuração fechada se rompe à menores tensões, 18,612 MPa; ii) a configuração semi-aberta é a que suporta tensão mais elevada. Ela se rompeu a uma tensão de 65,412 MPa, valor relativamente superior às demais configurações; iii) a configuração aberta se situa em uma condição intermediária e se rompe a uma tensão de 43,134 MPa. É interessante notar que a deformação aumenta proporcionalmente à carga necessária para o rompimento, isto é, 0,0009, 0,0013 e 0,0017 para as configurações fechada, aberta e semi-aberta, respectivamente.

A deformação do modelo em configuração fechada é menor pelo fato de o modelo ser mais compacto e ter menor área total. Apesar de o modelo semi-aberto apresentar maior deformação com relação ao modelo aberto, a condição semi-aberta é transitória e dependendo da aplicação o período de transição é irrelevante. Predominantemente estruturas articuláveis se

encontram em posições fechadas ou abertas e pode-se dizer neste caso que a deformação limite é correspondente à tensão de 43,134 MPa.

Modelo II

O Modelo II, ilustrada nas Figuras 107 e 108, possui as seguintes características:

- área: 4,4 m²
- elementos de conexão: pinos
- elementos de geometria fixa: furos das hastes externas
- carregamento: distribuído sobre os elementos de união

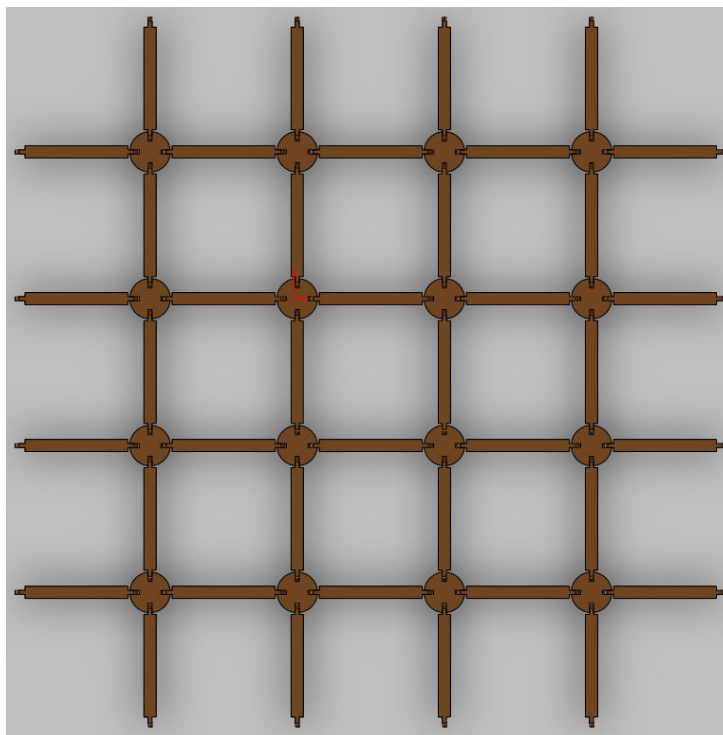


Figura 107. Modelo II, modelado no Solidworks (autor, 2010).

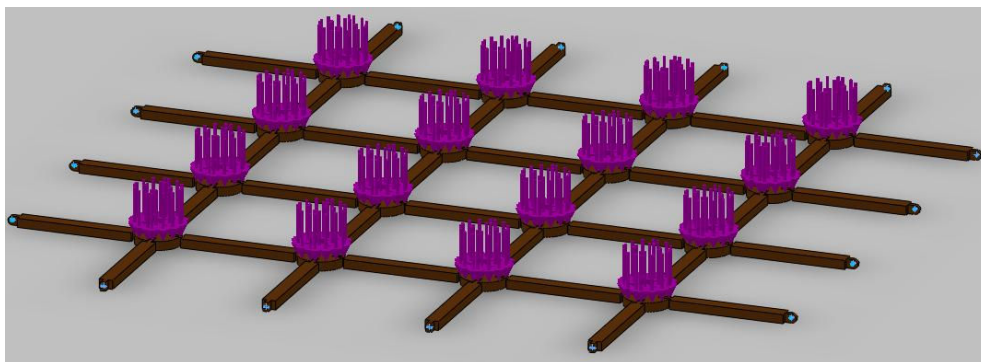


Figura 108. Direção e distribuição da força (setas roxas) e superfície fixa (área azul) (autor, 2010).

Neste modelo, não houve necessidade de realização de mais de uma simulação, visto que o modelo não possui estágios de movimentação. Desta forma, a avaliação do Modelo II resultou nos seguintes valores:

- força suportada pela estrutura: 45 N
- tensão máxima: 68,067MPa
- deslocamento máximo: 13,707 mm
- deformação máxima: 0,0009 mm

Nesta simulação, foi empregado o carregamento com escalas de 5 N, sendo que a carga de ruptura foi aproximadamente 45 N, como mostrado na Tabela VII.

Tabela VII. Resultados da simulação do Modelo I

Carga (N)	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)	Deformação
0	0	0	0
5	7,563	1,523	0,0001
10	15,126	3,046	0,0002
15	22,689	4,569	0,0003
20	30,252	6,092	0,0004
25	37,815	7,615	0,0005
30	45,378	9,138	0,0006
35	52,941	10,661	0,0007
40	60,504	12,184	0,0008
45	68,067	13,707	0,0009

As Figuras 109, 110 e 111 apresentam, respectivamente, a tensão, deslocamento e deformação da estrutura após a simulação. Foi adotada a mesma escala de cores no qual as áreas em azul apresentam os menores valores e as áreas vermelhas os valores mais altos.

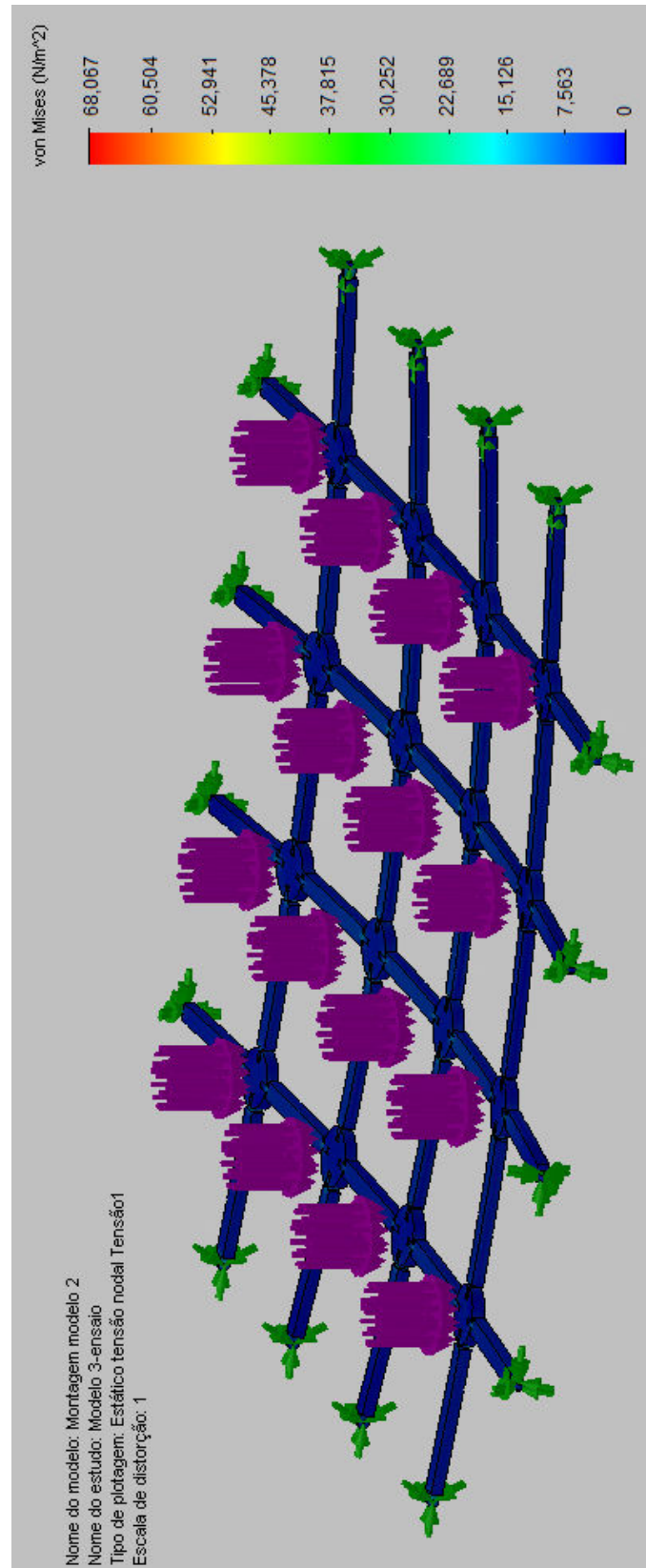


Figura 109. Tensão no Modelo II, com carga de 45 N.

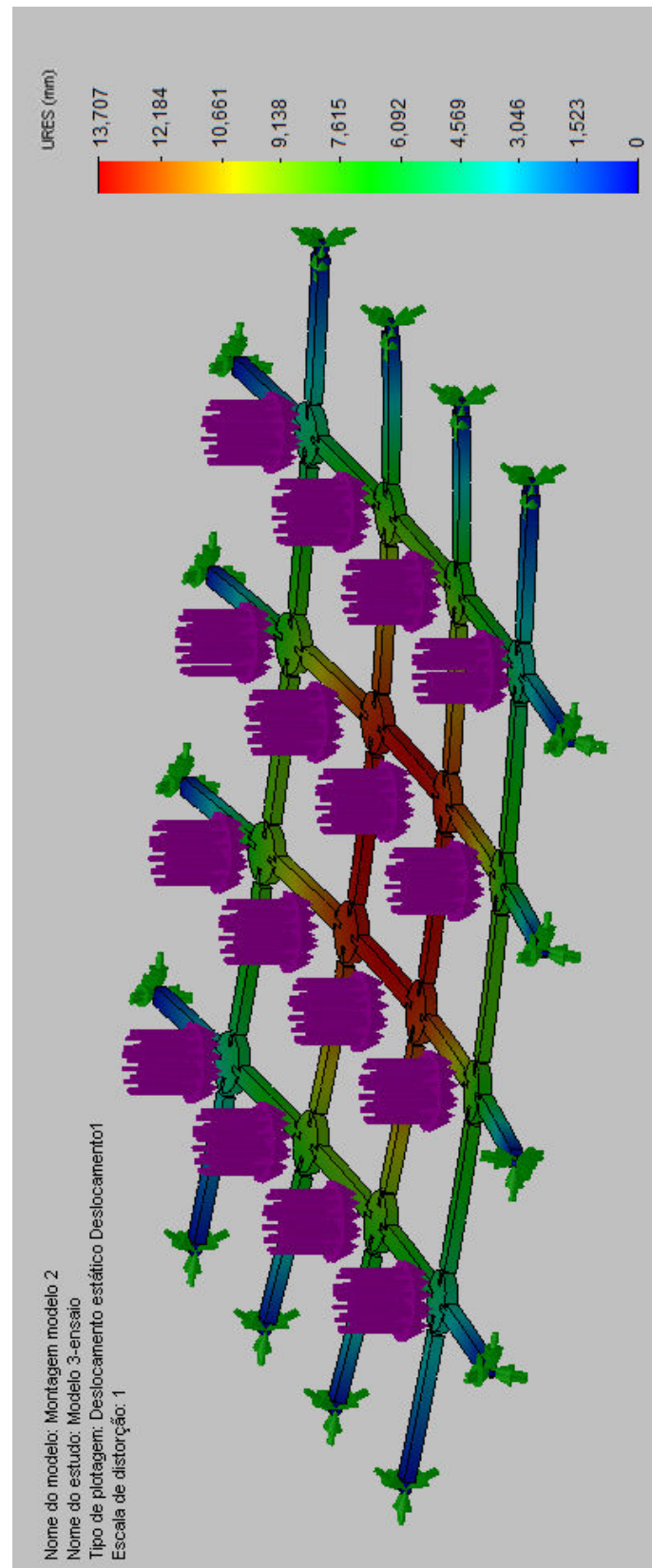


Figura 110. Deslocamento no Modelo II, com carga de 45 N.

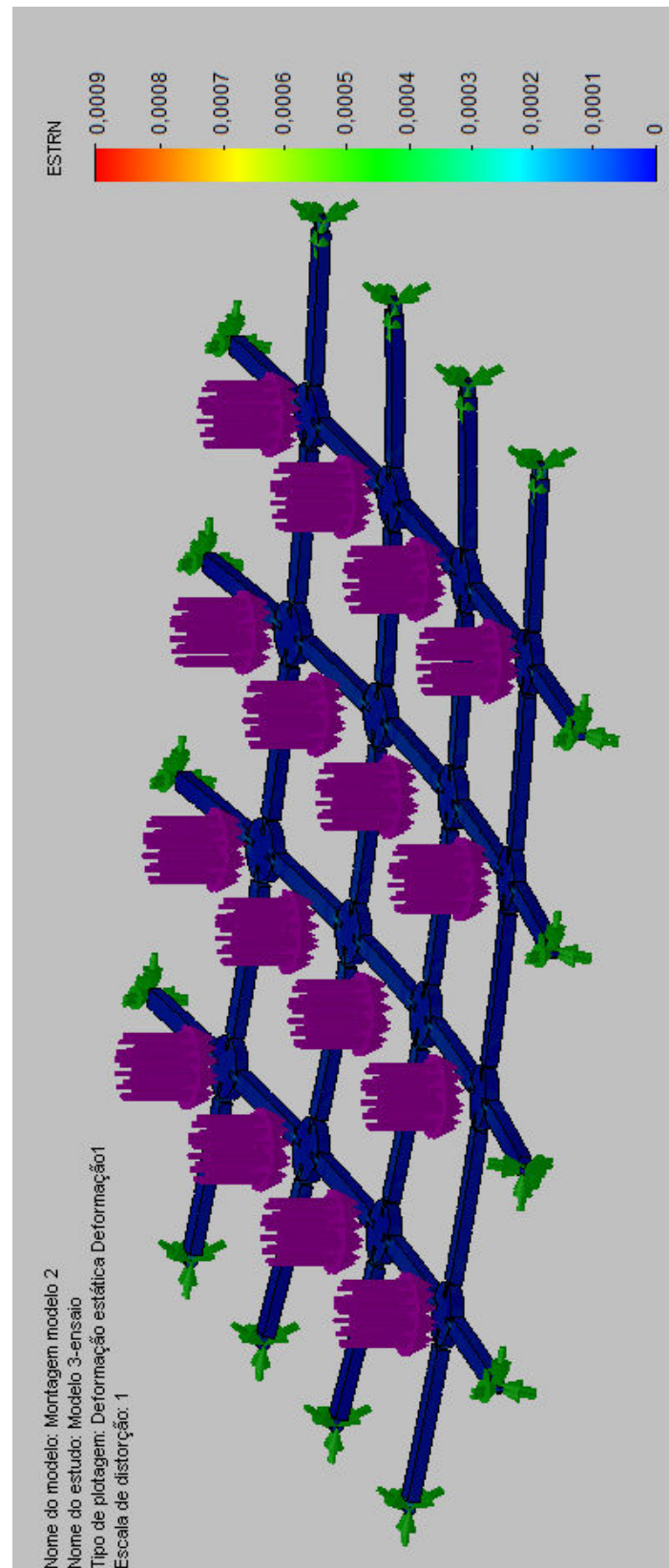


Figura 111. Deformação no Modelo II, com carga de 45 N.

Análise dos resultados da simulação no Modelo II

Com os dados gerados nas simulações do Modelo II foi possível analisar e comparar o modelo com a finalidade de verificar o carregamento máximo no qual ele se rompe.

Foi gerado um gráfico de carga *versus* deslocamento, conforme ilustrado na Figura 112. A figura mostra a curva de aproximação linear relacionando a carga aplicada nos elementos de união do modelo e o deslocamento resultante da aplicação da força.

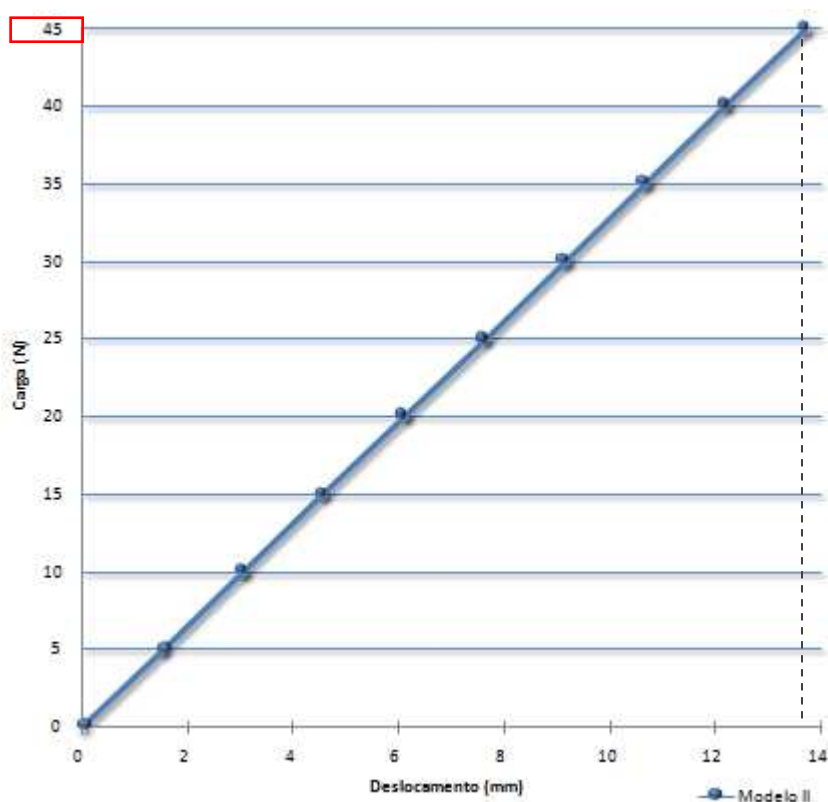


Figura 112. Deslocamento vertical do Modelo II (autor, 2010).

Pode-se observar nesta figura que o Modelo II apresenta um comportamento praticamente linear na relação carga x deslocamento. A carga de ruptura do Modelo II, de 45 N, é consideravelmente menor quando comparada à do Modelo I. Consequentemente, o deslocamento vertical máximo do Modelo II, 13,707 mm, é menor que o mesmo no Modelo I. Este comportamento é explicado pelo fato de o Modelo II ter uma área total menor.

Avaliou-se também a deformação do Modelo II com relação à tensão aplicada. O gráfico da Figura 113 ilustra as curvas de aproximação linear relacionando a tensão da estrutura e a deformação resultante.

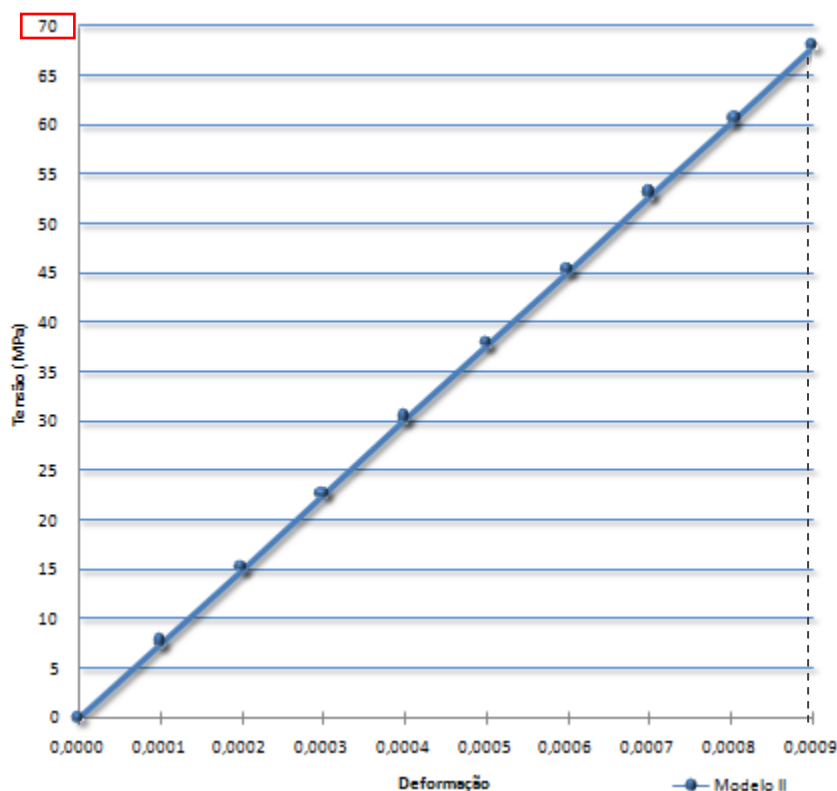


Figura 113. Deformação do modelo sob diferentes tensões (autor, 2010).

A partir dos dados da Figura 113, constatou-se um comportamento tendendo a linear também na relação tensão-deformação. O aumento proporcional da deformação em relação à tensão é explicado pelo fato de o modelo apresentar peças com dimensões padronizadas, o que distribui os efeitos da deformação no modelo como um todo.

Uma questão interessante a ser notada é o fato de os valores mais elevados da tensão e da deformação estarem localizados nos furos das hastes externas onde a estrutura foi engastada para a simulação do carregamento, e também nas áreas entre os elementos de conexão e as hastes, como mostra a Figura 114.

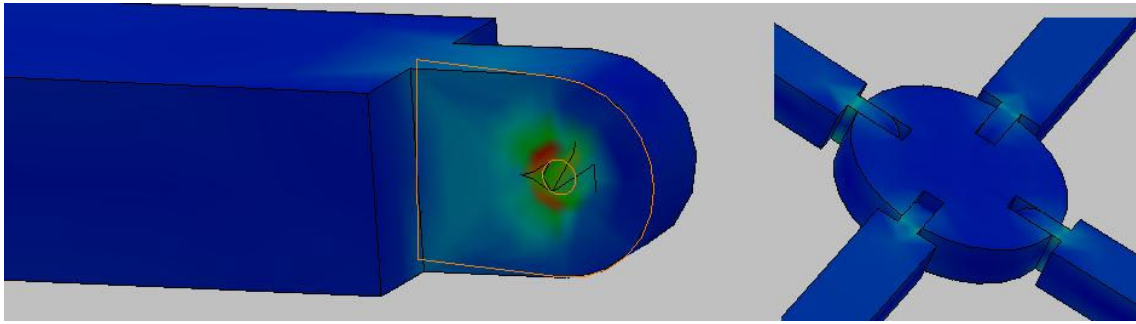


Figura 114. Áreas de maior tensão (autor, 2010).

Na Figura 114, as áreas na cor verde e vermelha demonstram os pontos mais sensíveis do modelo. Um reforço na geometria destas áreas é um fator a ser considerado futuramente, a fim de gerar um melhoramento nestas áreas críticas fazendo com que a estrutura se torne mais estável e suporte carga mais elevada.

Modelo III – Simulação estrutura fechada

A simulação do Modelo III no Solidworks sofreu certas limitações. O formato do elemento de conexão das peças não foi permitido para análise do comportamento físico da estrutura. Sendo assim, a geometria desta peça foi simplificada para se permitir a realização dos testes, como mostrado nas Figuras 115.

O Modelo III, por ser uma estrutura retrátil, tem suas dimensões modificadas sempre que se movimenta. A primeira simulação correspondente à configuração fechada possui as seguintes características:

- área: $3,5\text{m}^2$ (0,86 x 4,1m)
- elementos de conexão: as peças foram consideradas como coladas
- elementos de geometria fixa: área lateral da estrutura

- carregamento: distribuído

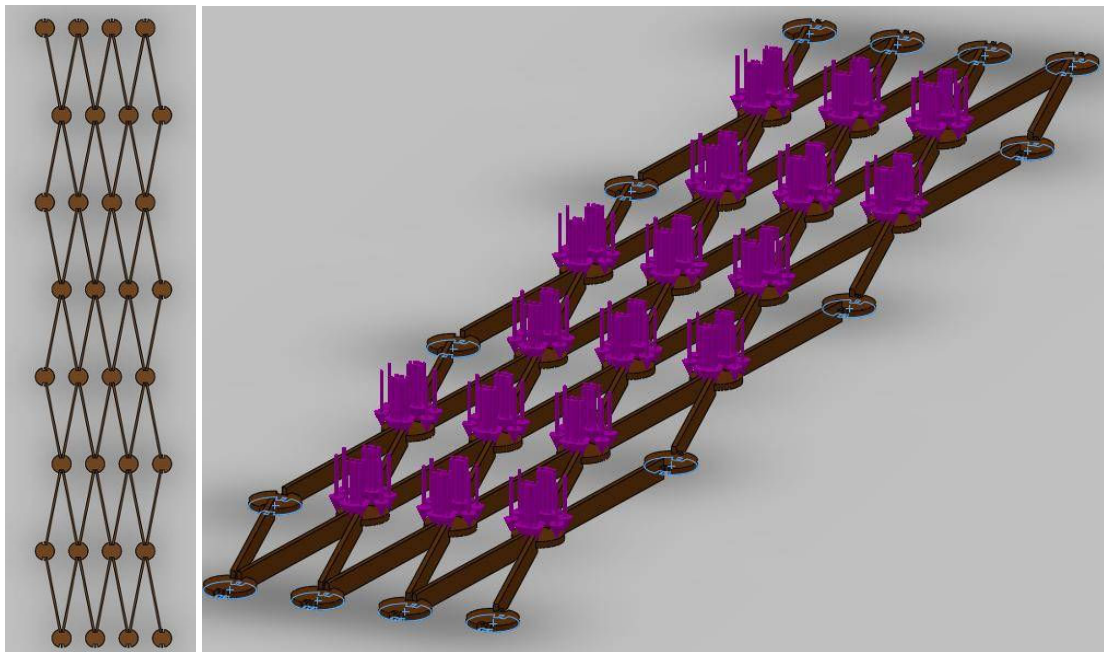


Figura 115. Modelo III fechado, modelado no Solidworks (autor, 2010).

Com as características citadas foram encontrados os seguintes valores:

- força suportada pela estrutura: 700 N
- tensão máxima: 69,958 MPa
- deslocamento máximo: 60,564 mm
- deformação máxima: 0,0056

Para esta primeira simulação, foi utilizado o carregamento com escalas de 50 N, sendo que a carga de ruptura foi de aproximadamente 700 N, como mostrado na Tabela VIII.

Tabela VIII. Resultados da simulação do Modelo III – configuração fechada

Força (N)	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)	Deformação
0	0	0	0
50	4,997	4,326	0,0004
100	9,994	8,652	0,0008
150	14,991	12,978	0,0012
200	19,988	17,304	0,0016
250	24,985	21,630	0,0020
300	29,982	25,956	0,0024
350	34,979	30,282	0,0028
400	39,976	34,608	0,0032
450	44,973	38,934	0,0036
500	49,97	43,260	0,0040
550	54,967	47,586	0,0044
600	59,964	51,912	0,0048
650	64,961	56,238	0,0052
700	69,958	60,564	0,0056

As Figuras 116, 117 e 118 apresentam, respectivamente, a tensão, deslocamento e deformação da Estrutura III na configuração fechada. A escala de cores continua sendo representada por áreas em azul, menores valores, e áreas vermelhas, valores mais altos.

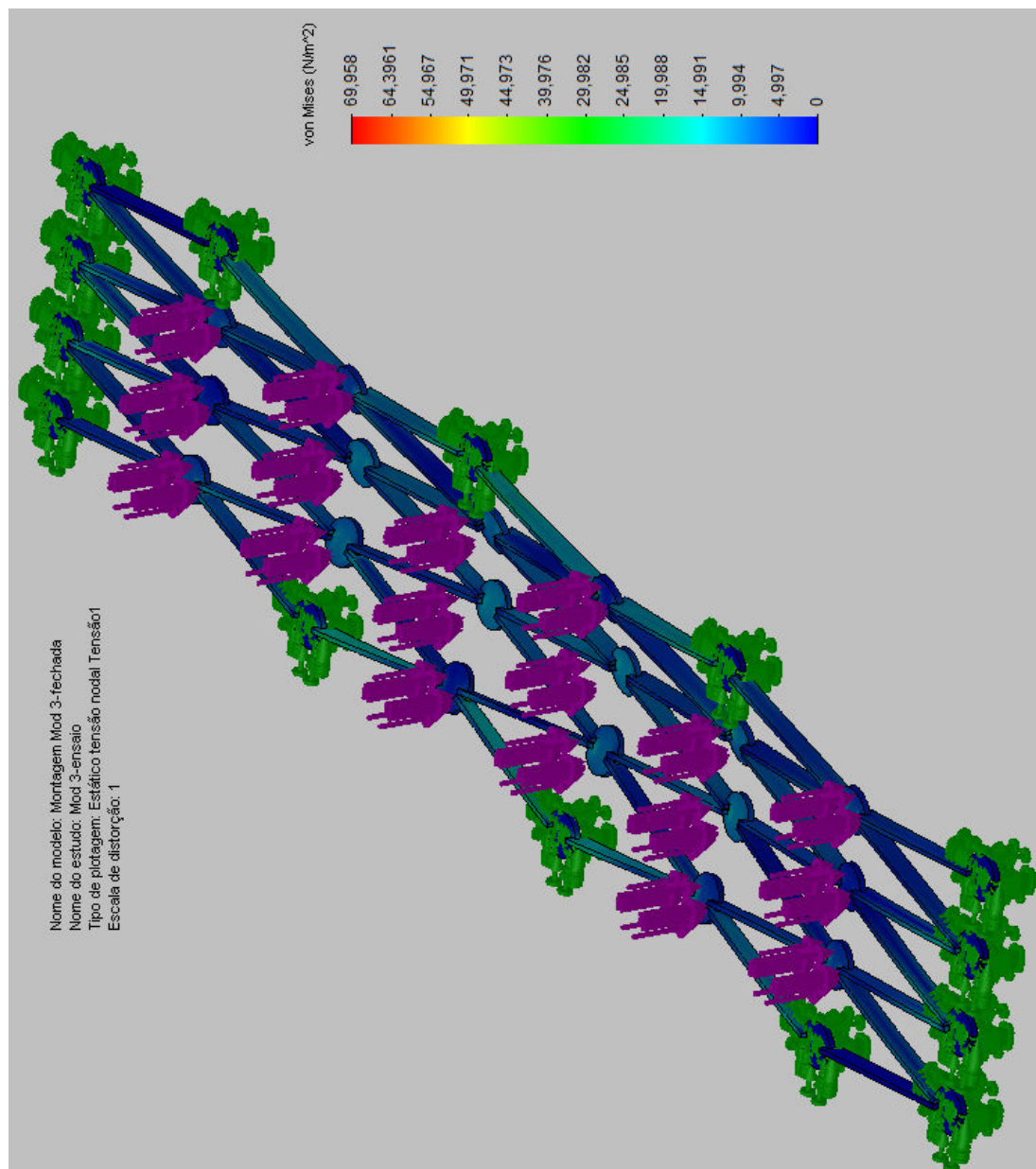


Figura 115. Tensão no Modelo III, configuração fechada, com carga de 700 N.

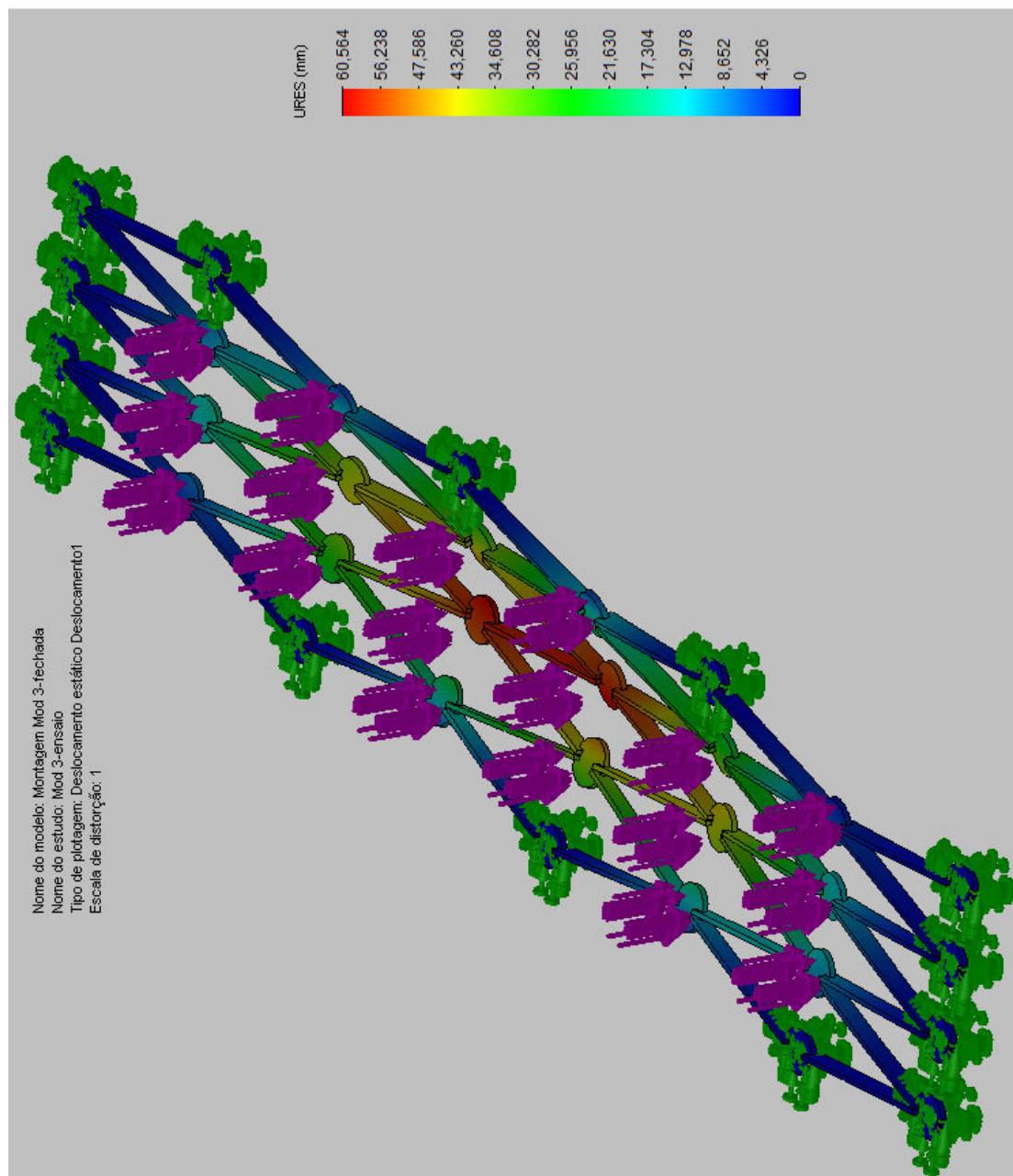


Figura 117. Deslocamento no Modelo III, configuração fechada, com carga de 700 N.

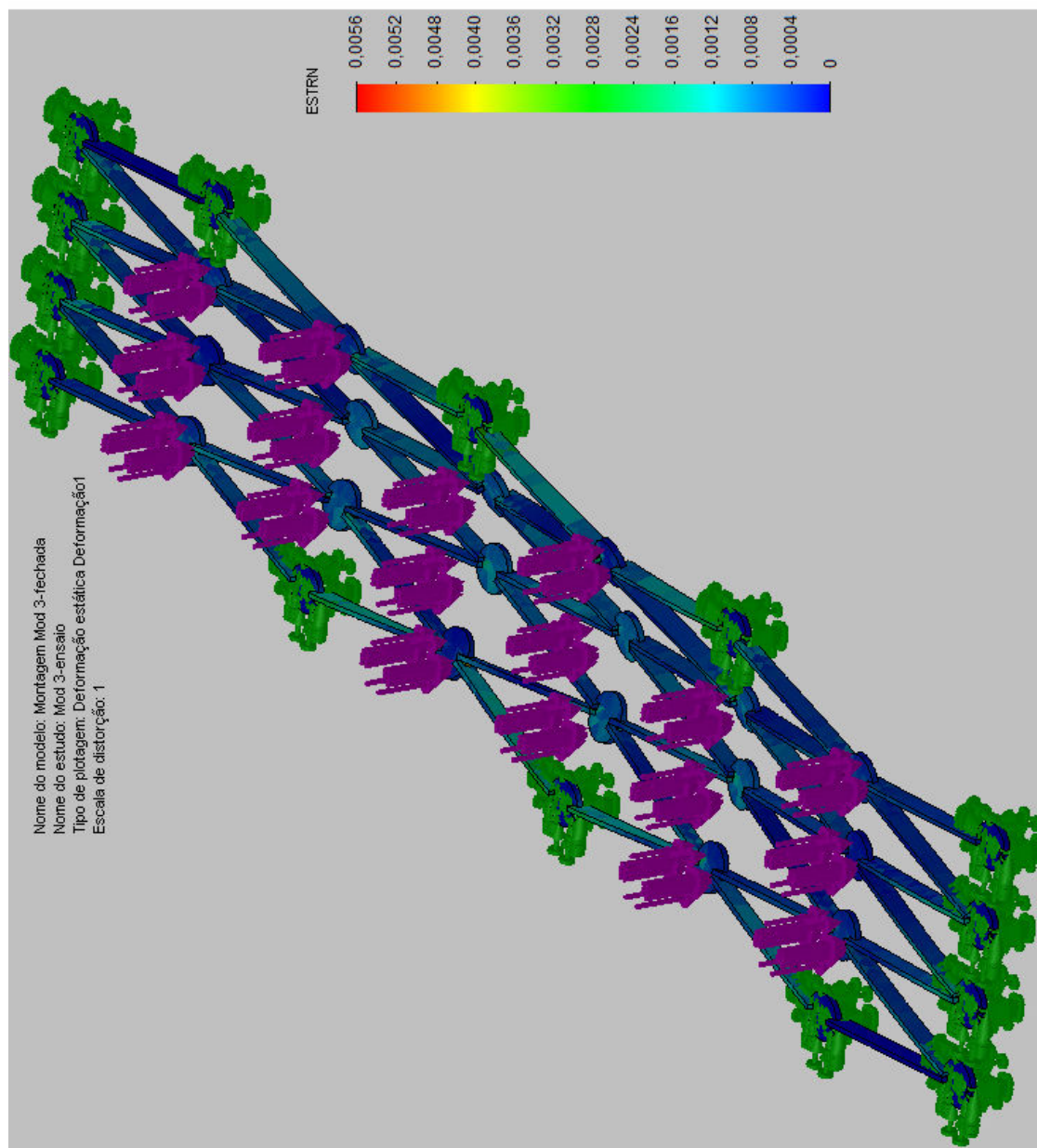


Figura 118. Deformação no Modelo III, configuração fechada, com carga de 700 N.

Modelo III – configuração semi-aberta

O Modelo III, configuração semi-aberta exibida nas Figuras 119 e 120, possui as mesmas características da configuração fechada, salvo a modificação da área. Nesta etapa, a área tem $6,3 \text{ m}^2$ ($1,61 \text{ m} \times 3,9$).

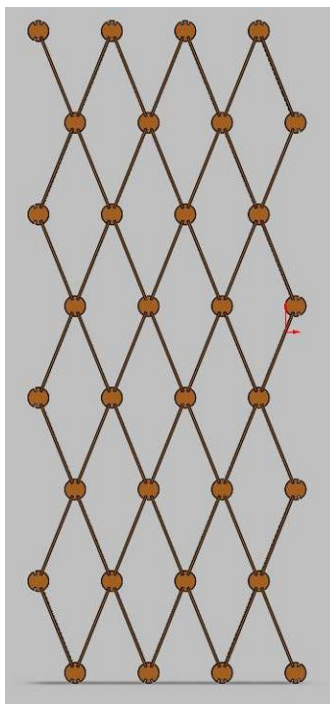


Figura 119. Modelo III semi-aberto, modelado no Solidworks (autor, 2010).

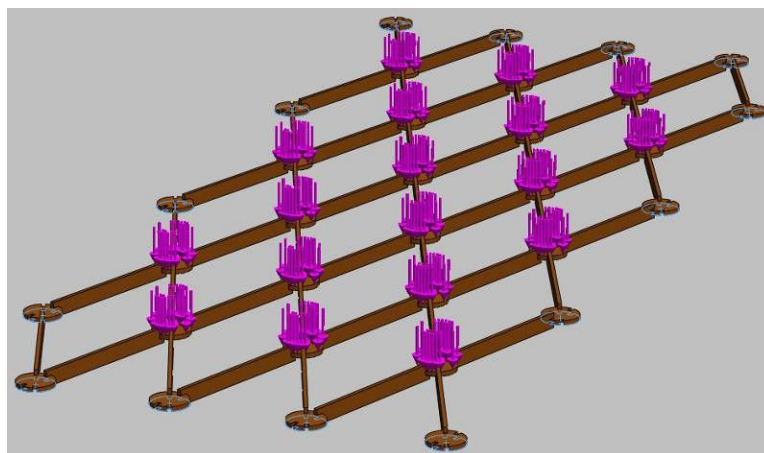


Figura 120. Direção e distribuição da força (setas roxas) e superfície fixa (área azul correspondente à base dos elementos conectores externos da estrutura) (autor, 2010).

Com as características citadas foram encontrados os seguintes valores:

- força suportada pela estrutura: 550 N
- tensão máxima: 49,896 MPa
- deslocamento máximo: 65,846 mm
- deformação máxima: 0,0033mm

Nesta segunda simulação, foi mantido o carregamento com escalas de 50 N, com carga de ruptura de aproximadamente 550 N, como mostrado na Tabela IX.

Tabela IX. Resultados da simulação do Modelo III – configuração semi-aberta

Carga (N)	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)	Deformação
0	0	0,000	0
50	4,536	5,986	0,0003
100	9,072	11,972	0,0006
150	13,608	17,958	0,0009
200	18,144	23,944	0,0012
250	22,68	29,930	0,0015
300	27,216	35,916	0,0018
350	31,752	41,902	0,0021
400	36,288	47,888	0,0024
450	40,824	53,874	0,0027
500	45,36	59,860	0,0031
550	49,896	65,846	0,0033

As imagens referentes à tensão, ao deslocamento e à deformação são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 121, 122 e 123.

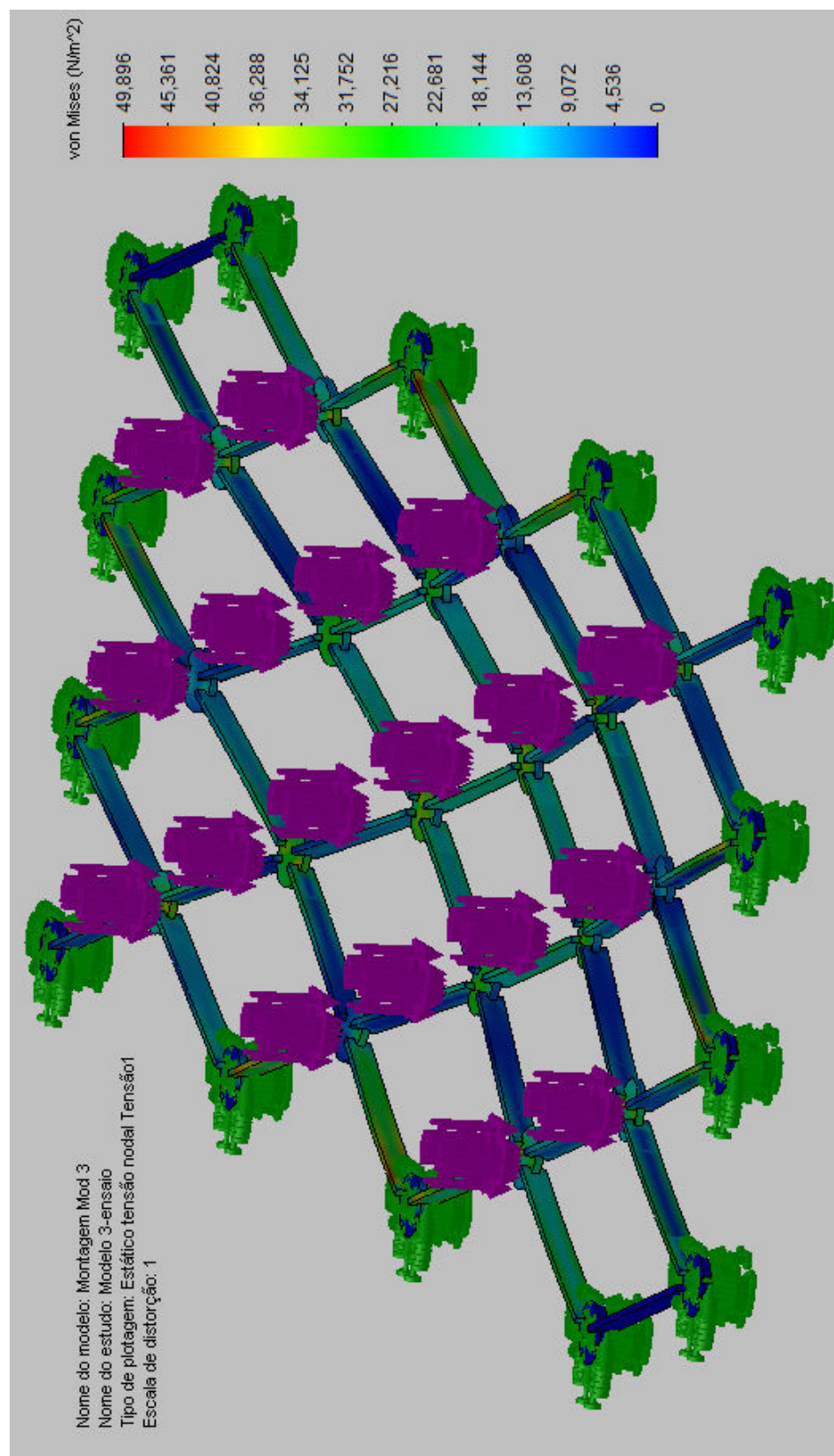


Figura 121. Tensão no Modelo III, configuração semi-aberta, com carga 550 N.

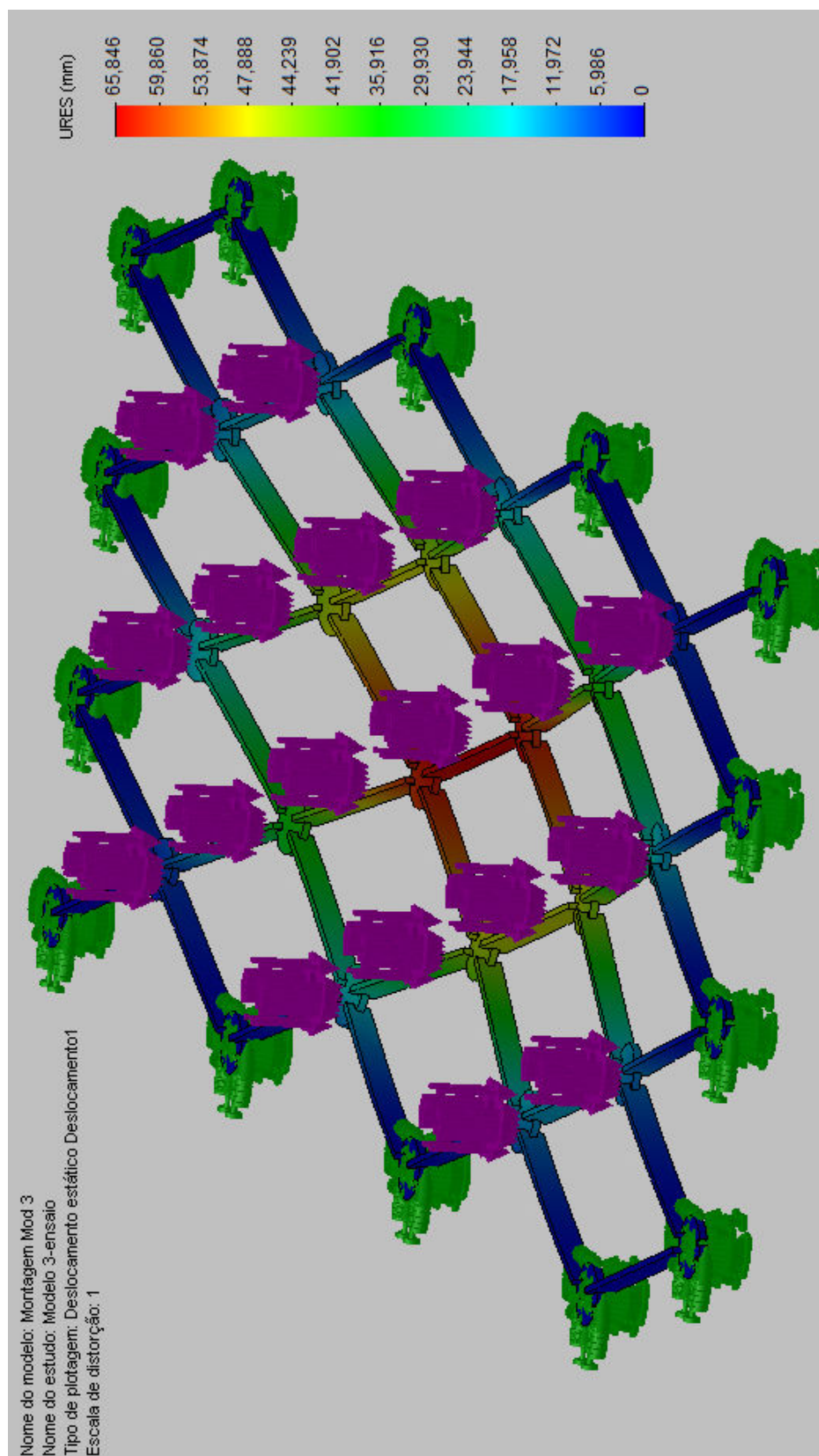


Figura 122. Deslocamento no Modelo III, configuração semi-aberta, com carga 550 N.

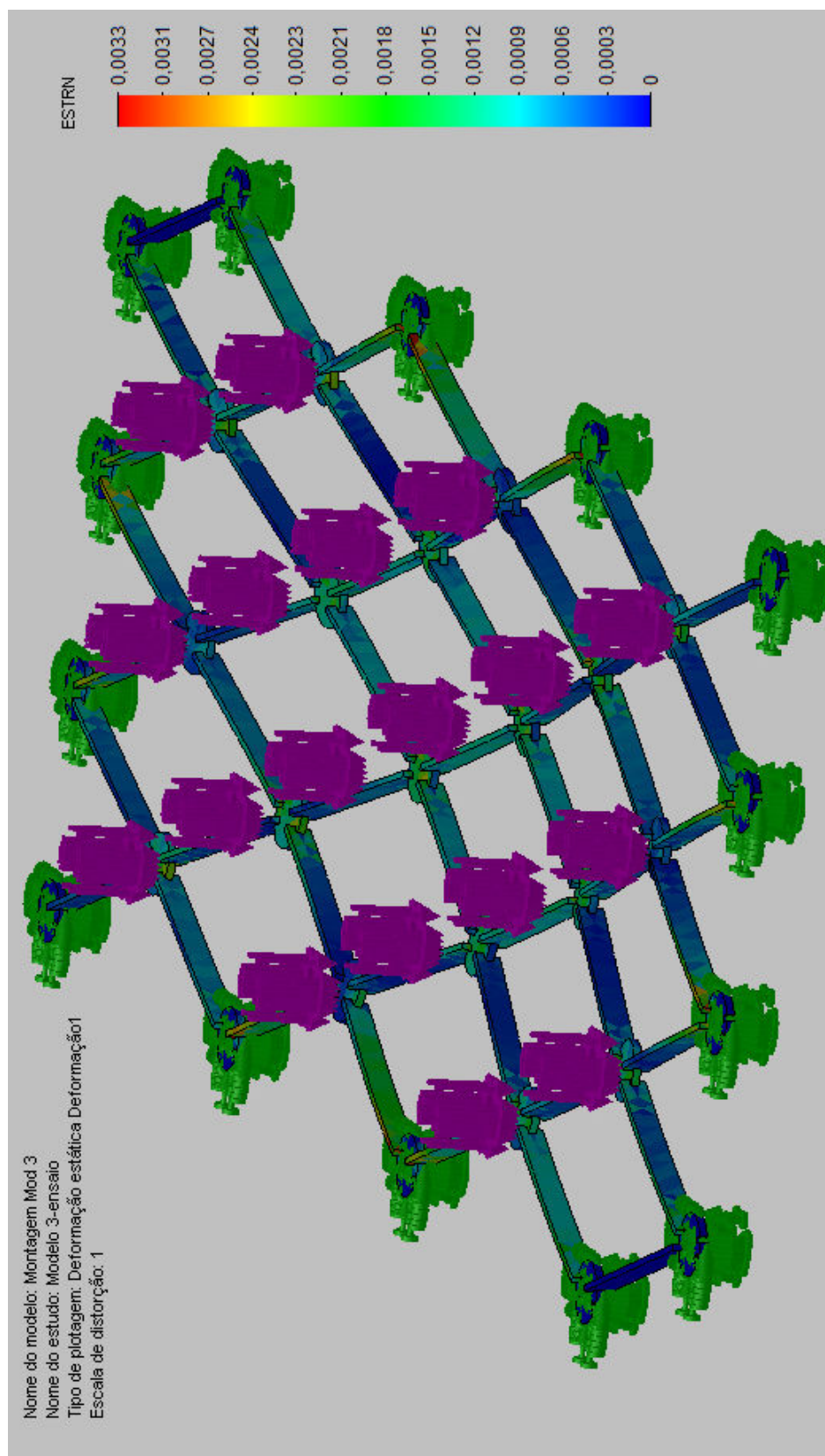


Figura 123. Deformação no Modelo III, configuração semi-aberta, com carga 550 N.

Modelo III – configuração aberta

A configuração aberta do Modelo III, ilustrada na Figura 124, possui as mesmas características das configurações anteriores, com exceção da área com $6,3\text{m}^2$ ($1,61 \times 3,9\text{m}$). As características relacionadas à direção da força e geometria fixa, também se mantiveram, como mostra a Figura 125.

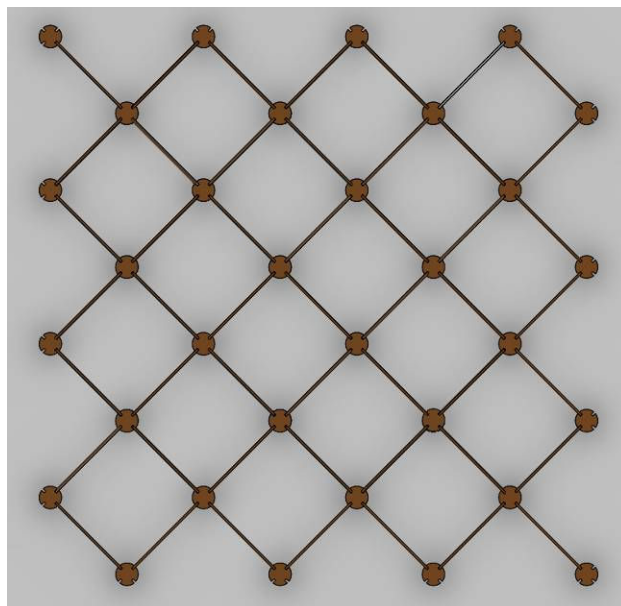


Figura 124. Modelo III aberto, modelado no Solidworks (autor, 2010).

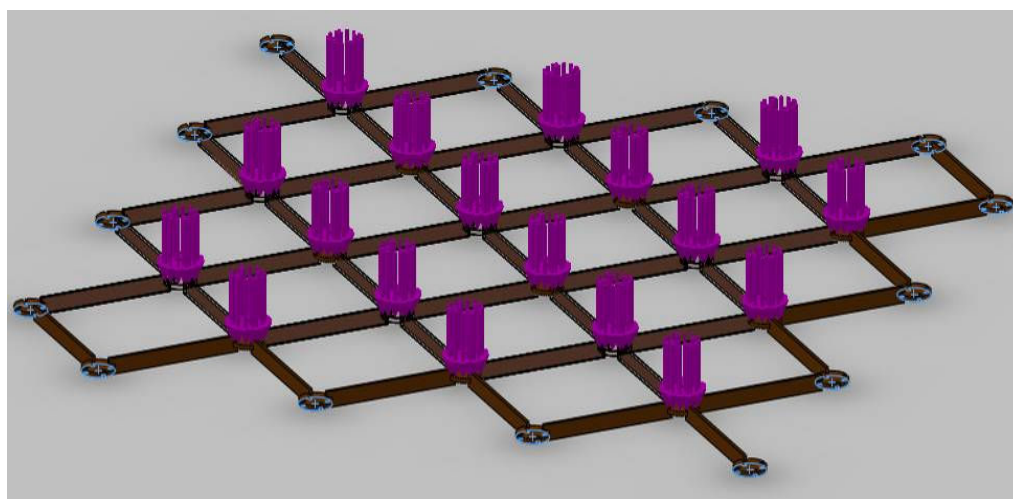


Figura 125. Direção e distribuição da força (setas roxas) e superfície fixa (área azul correspondente à base dos elementos conectores externos da estrutura) (autor, 2010).

Nesta última simulação do Modelo III foram encontrados os seguintes valores:

- força suportada pela estrutura: 700 N
- tensão máxima: 69,958 MPa
- deslocamento máximo: 60,564 mm
- deformação máxima: 0,0056

Novamente foi mantido o carregamento com escalas de 50N, com carga de ruptura de aproximadamente 700N, como mostrado na Tabela X.

Tabela X. Resultados da simulação do Modelo III – configuração aberta

Carga (N)	Tensão (MPa)	Deslocamento (mm)	Deformação (mm)
0	0	0,000	0,0000
50	4,997	4,326	0,0004
100	9,994	8,652	0,0008
150	14,991	12,978	0,0012
200	19,988	17,304	0,0016
250	24,985	21,630	0,0020
300	29,982	25,956	0,0024
350	34,979	30,282	0,0028
400	39,976	34,608	0,0032
450	44,973	38,934	0,0036
500	49,97	43,260	0,0040
550	54,967	47,586	0,0044
600	59,964	51,912	0,0048
650	64,961	56,238	0,0052
700	69,958	60,564	0,0056

A tensão, o deslocamento e a deformação máxima desta terceira simulação são mostradas nas Figuras 126, 127 e 128.

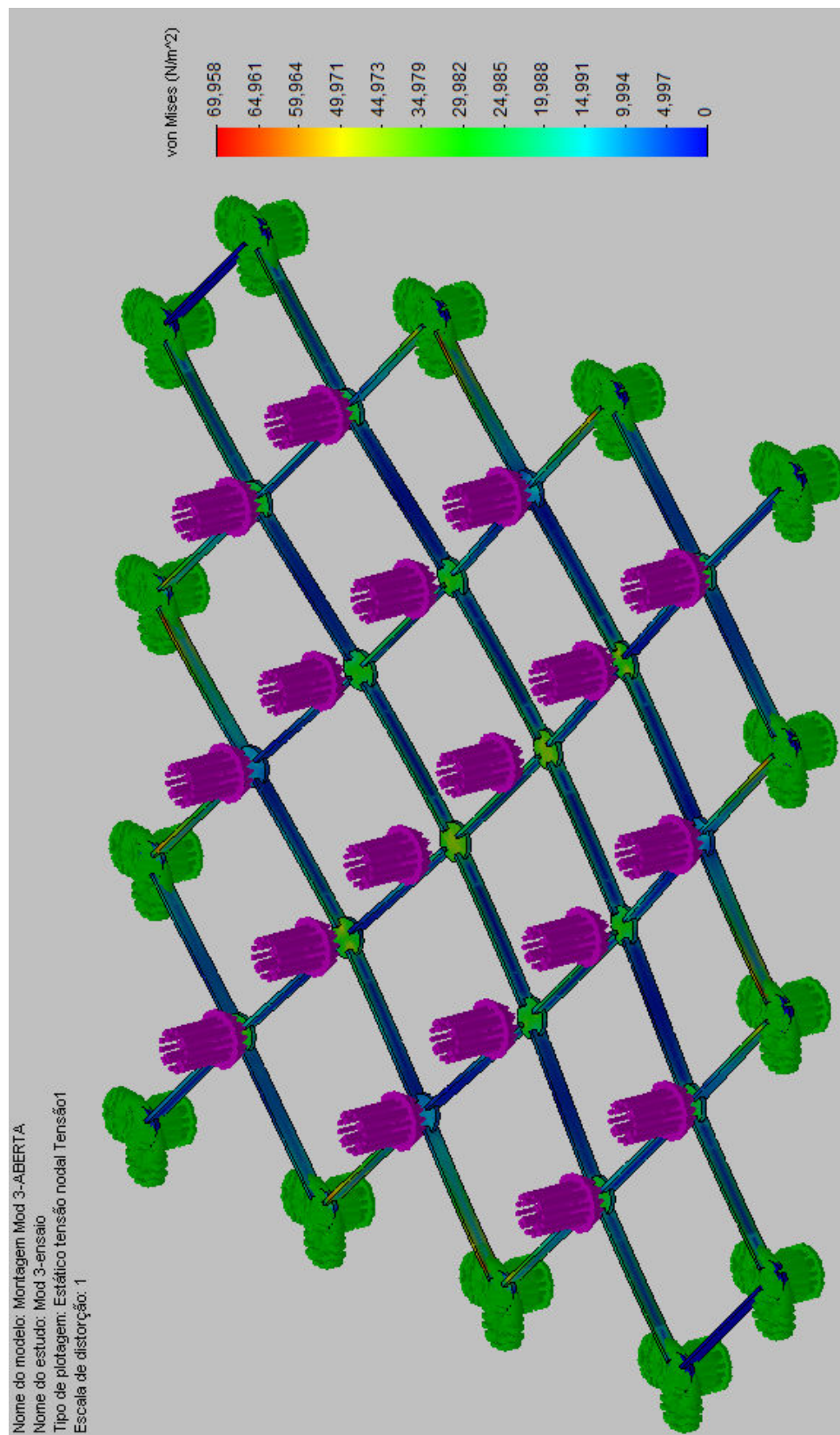


Figura 126 . Tensão no Modelo III, configuração aberta, com carga de 700 N.

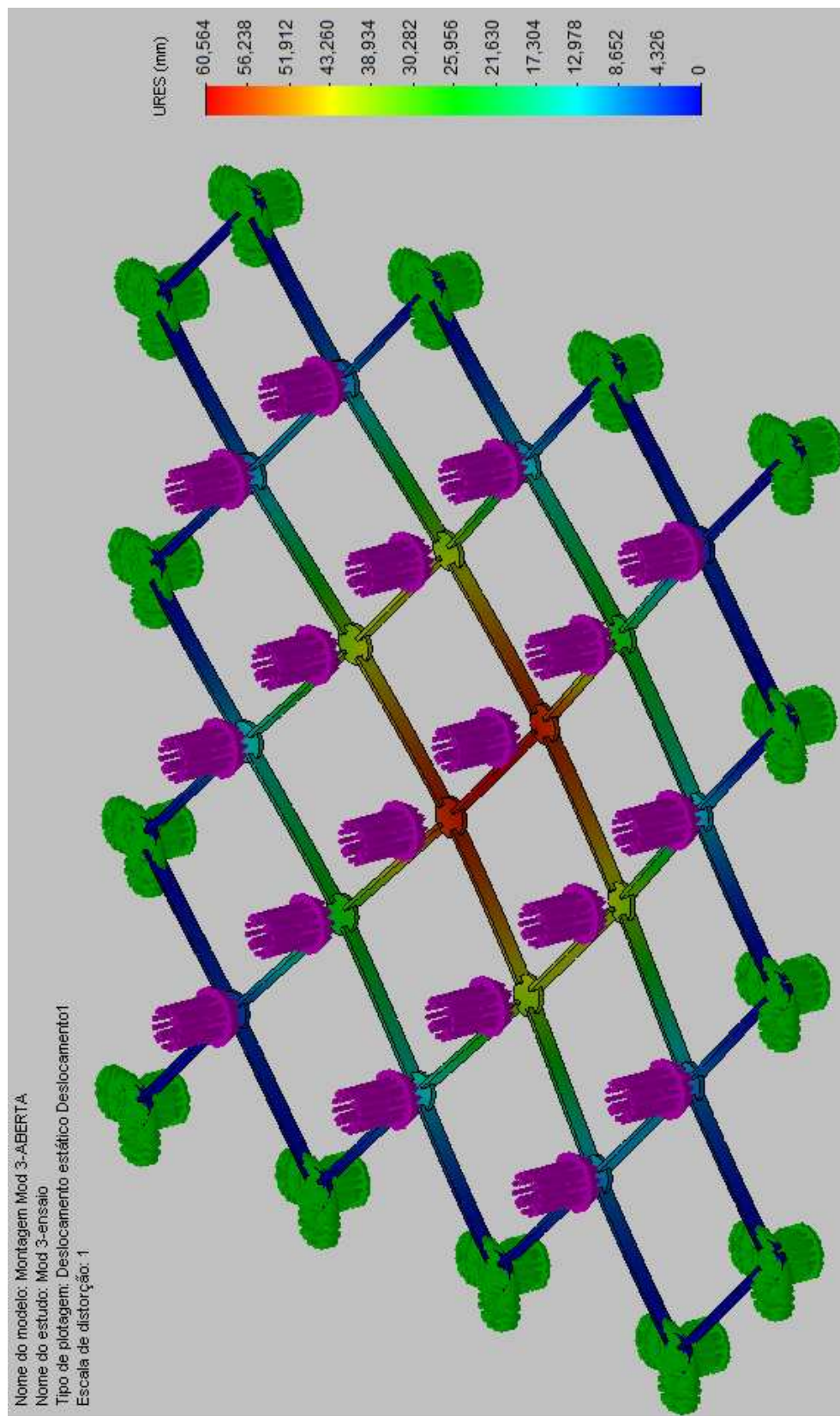


Figura 127. Deslocamento no Modelo III, configuração aberta, com carga de 700 N.

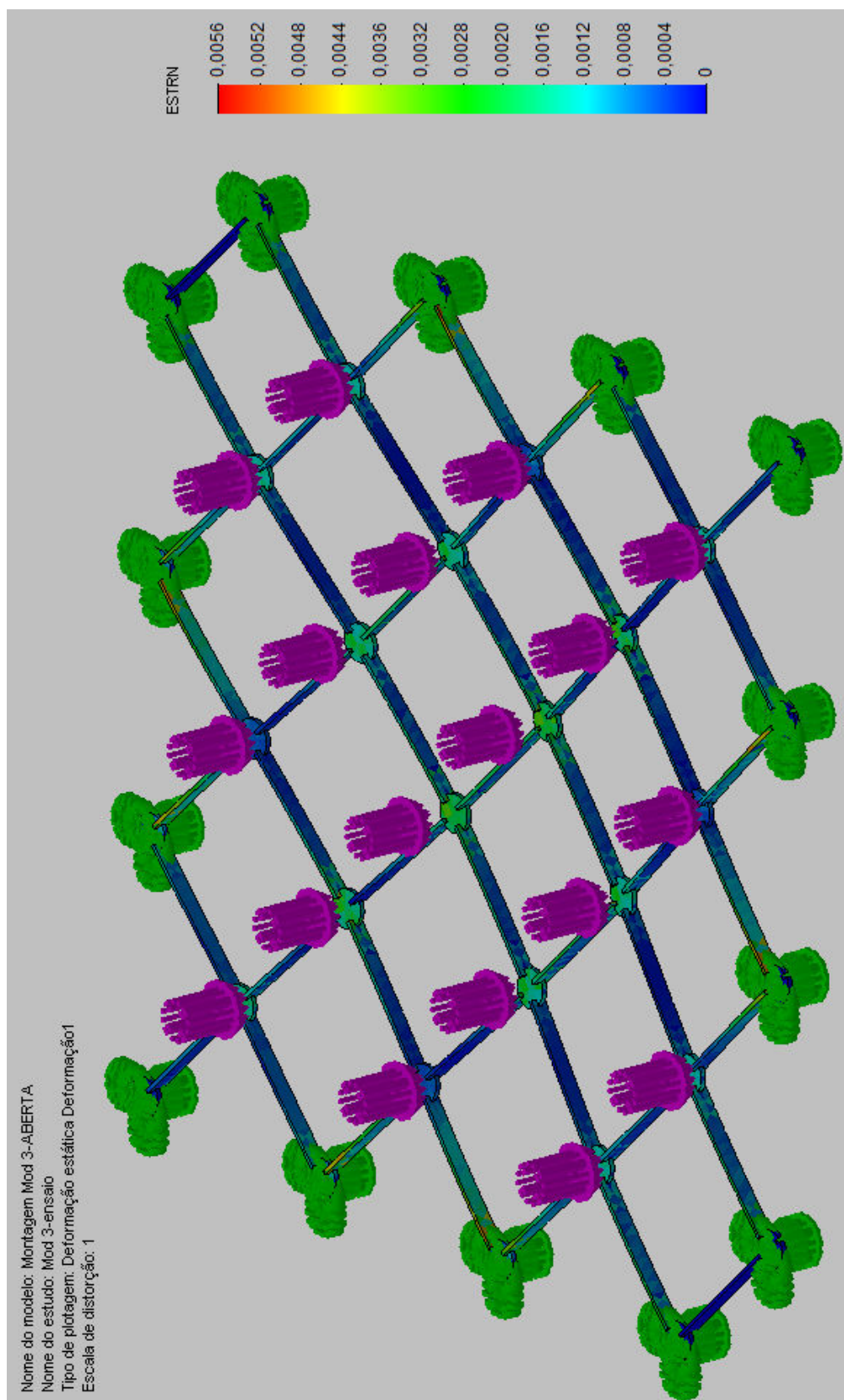


Figura 128. Deformação no Modelo III, configuração aberta, com carga de 700 N.

Análise dos resultados das simulações do Modelo III

Os dados gerados nas simulações do Modelo III nas configurações fechada, semi-aberta e aberta, foram analisados e os valores das cargas de ruptura foram comparados para verificação o ponto crítico de deslocamento vertical.

O gráfico carga *versus* deslocamento, ilustrado na Figura 129, apresenta as curvas de aproximação linear relacionando as cargas aplicadas na estrutura e os deslocamentos resultantes.

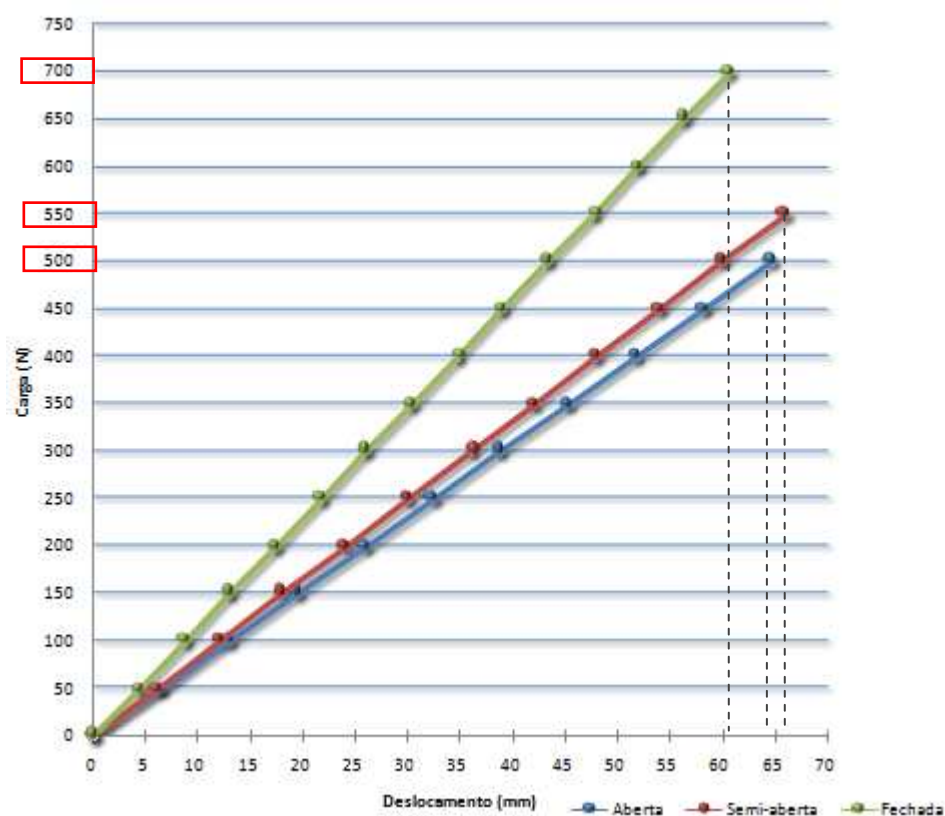


Figura 129. Deslocamento vertical do Modelo III em três diferentes configurações (autor, 2010).

Conforme observado na Figura 128, as diferenças entre as três configurações do modelo são: i) a configuração fechada suporta maior carga no ponto de rompimento, 700 N. Além disso, esta configuração sofre relativamente um menor deslocamento para uma carga fixa aplicada, por exemplo, 300 N; ii) a configuração aberta suporta a menor carga referente às três configurações, se rompendo com 500 N. O deslocamento final desta configuração, 64,546 mm, é intermediário

dentre as três configurações, contudo, se comparado o valor do deslocamento em cada situação de carga, percebe-se que esta configuração mostra os maiores valores de deslocamento; iii) a configuração semi-aberta tem o comportamento similar à estrutura aberta, porém suporta 10% a mais e tem cerca de 1mm a mais em relação ao deslocamento.

A partir destas observações, verifica-se que, de forma semelhante ao comportamento do Modelo I, o Modelo III na configuração fechada é mais estável do que as demais, visto que suporta maior carga e se desloca menos. Seu comportamento é considerado o mais linear de todas as simulações, na relação carga x deslocamento. Esta observação está relacionada à compactação da estrutura fechada, sendo que com esta geometria sua área de superfície se torna mais resistente.

A deformação do modelo com relação à tensão aplicada foi investigada. Foram consideradas as três configurações do modelo: fechada, semi-aberta e aberta e foi elaborado o gráfico da Figura 130.

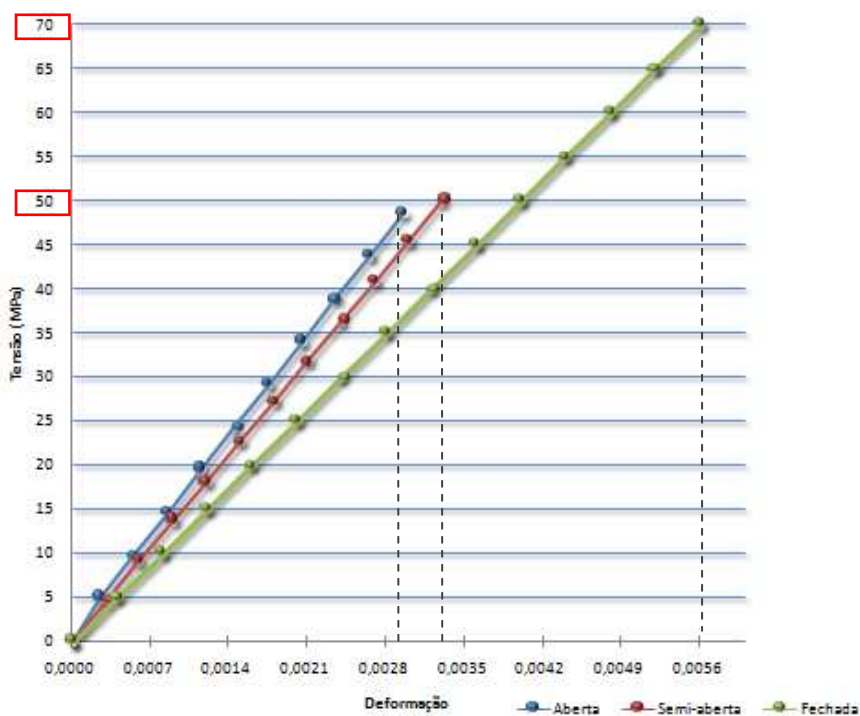


Figura 130. Deformação dos modelos sob diferentes tensões (autor, 2010).

Considerando as informações contidas no gráfico da figura 129, foram feitas as seguintes observações: i) a configuração fechada tem comportamento diferenciado das demais configurações. Considerando que ela suporta maior carga, seus valores finais de tensão, 69,958 MPa, e deslocamento, 60,564 mm, seguem as mesmas tendências; ii) as configurações semi-aberta e aberta têm comportamento idêntico durante toda a simulação, se diferenciando apenas nos valores finais. O modelo na configuração semi-aberta se rompeu a uma tensão de 49,896 MPa e se deslocou 0,058mm. A configuração aberta se rompeu com 134MPa e seu deslocamento foi de 65,846 mm; iii) o comportamento linear nas três configurações é relativo à geometria de cada estado e ao carregamento suportado pelas estruturas.

A deformação do modelo em configuração fechada é mais elevada pelo fato de o modelo suportar maior carga até seu rompimento. Este comportamento faz com que o modelo se deforme de maneira uniforme. O mesmo não acontece na configuração aberta, visto que a tensão se concentra mais sobre os elementos de união, como mostra a Figura 131.

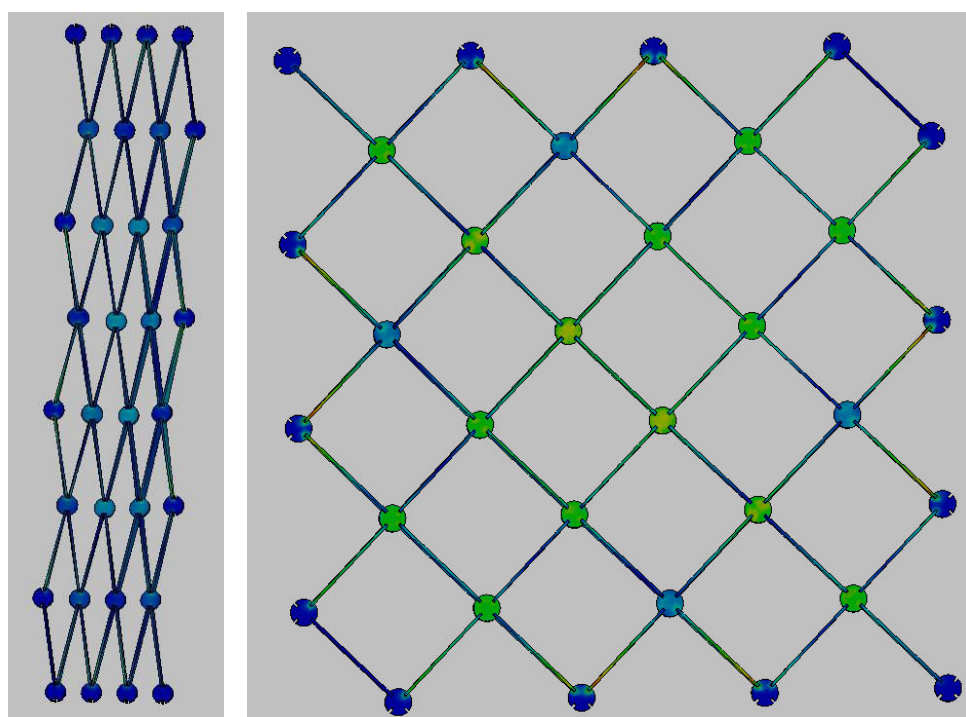


Figura 131. Diferença de tensão no Modelo III, nas configurações fechada e aberta (autor, 2010).

Na Figura 131, é possível distinguir a diferença entre as duas configurações através das cores referentes aos valores de tensão. A cor azul escuro representa as áreas de menor tensão,

passando pelas cores verde, amarelo e finalmente vermelho para representar as áreas de maior tensão. Na configuração fechada a tensão é distribuída sobre as hastes e os elementos de conexão. As hastes possuem maior espessura do que as conexões, portanto o conjunto suporta maiores níveis de carga. Na configuração aberta a tensão é mais acentuada nos elementos de conexão internos, representados pelas cores verde e amarelo

Como descrito anteriormente, o estado semi-aberto das estruturas articuláveis é uma etapa transitória e, dependendo da aplicação e do tempo durante esta etapa, ela pode ser considerada irrelevante. Apesar disso, percebe-se que o Modelo III na configuração semi-aberta se comporta de maneira similar à configuração aberta. Sendo assim, esta fase transitória do modelo pode ser considerada fisicamente estável.

3.2.3 Simulações de iluminação

Para esta etapa foi utilizado o *software* DIALux. Programas como este estão sendo cada vez mais utilizados por empresas que desenvolvem projetos de iluminação. Este *software* é distribuído gratuitamente e se mostra competitivo frente a outros programas comercializados no Brasil.

O DIALux utiliza bases de dados contendo curvas fotométricas digitalizadas em padrões internacionais de produtos (lâmpadas e luminárias) de diversos fabricantes (BURIOL, 2006). Também permite calcular o nível de luz natural nos ambientes externos e internos, baseado no cálculo da DIN 5054 e na publicação 110 da CIE. Nesta fase da pesquisa, este *software* foi utilizado para a realização de demonstrações visuais e estéticas do Modelo I.

O uso das sombras em simulações permite uma observação mais efetiva da movimentação da estrutura do modelo bem como de seu efeito luminoso. A ausência de luz ou a luz em excesso interferem diretamente na qualidade do projeto. Assim sendo, utilizou-se o DIALux para simular a movimentação da sombra em um ambiente cuja cobertura é composta parcialmente pelo Modelo I. Foi escolhido apenas o Modelo I para ser analisado por este

apresentar uma movimentação gradual interessante para se avaliar a passagem de luz quando o modelo está parcialmente aberto, por exemplo.

Para aproveitar ao máximo a iluminação natural no ambiente foram utilizadas, nesta simulação, aberturas envidraçadas nas quatro paredes, auxiliando assim a iluminação proporcionada pelo Modelo I. Observa-se que as laterais foram envidraçadas apenas para fins desta análise virtual. As imagens da sombra proporcionada pela movimentação da estrutura do modelo, assim como a visualização da estrutura em si, são exibidas na Figura 132.

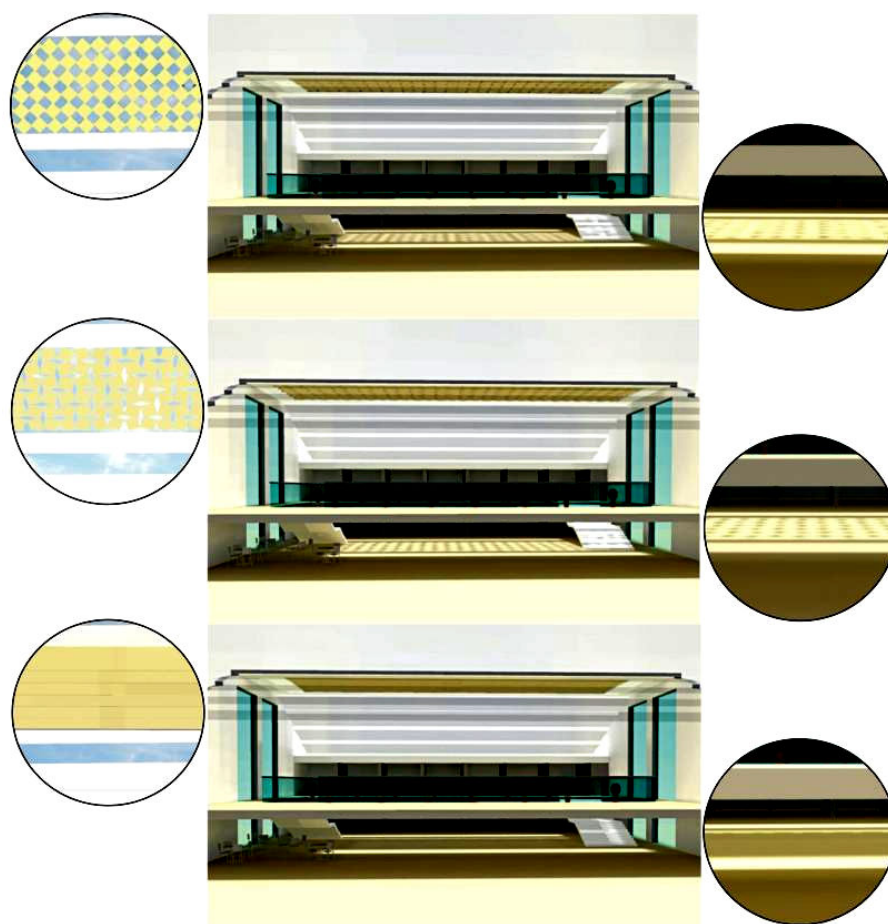


Figura 132. Simulação da sombra no DIALux, mostrando nos detalhes o Modelo I totalmente aberto, parcialmente aberto e fechado, respectivamente (autor, 2010).

Ainda com o auxílio do *software* DIALux, foi possível analisar a variação da entrada de luz no ambiente durante a movimentação do Modelo I. Os resultados são mostrados por meio de cores que simulam a quantidade de luz distribuída no ambiente. A escala foi inserida no *software*

de modo a possibilitar a visualização da modificação da sombra. Na Figura 133 são mostradas as imagens do modelo aberto, semi-aberto e fechado, respectivamente.

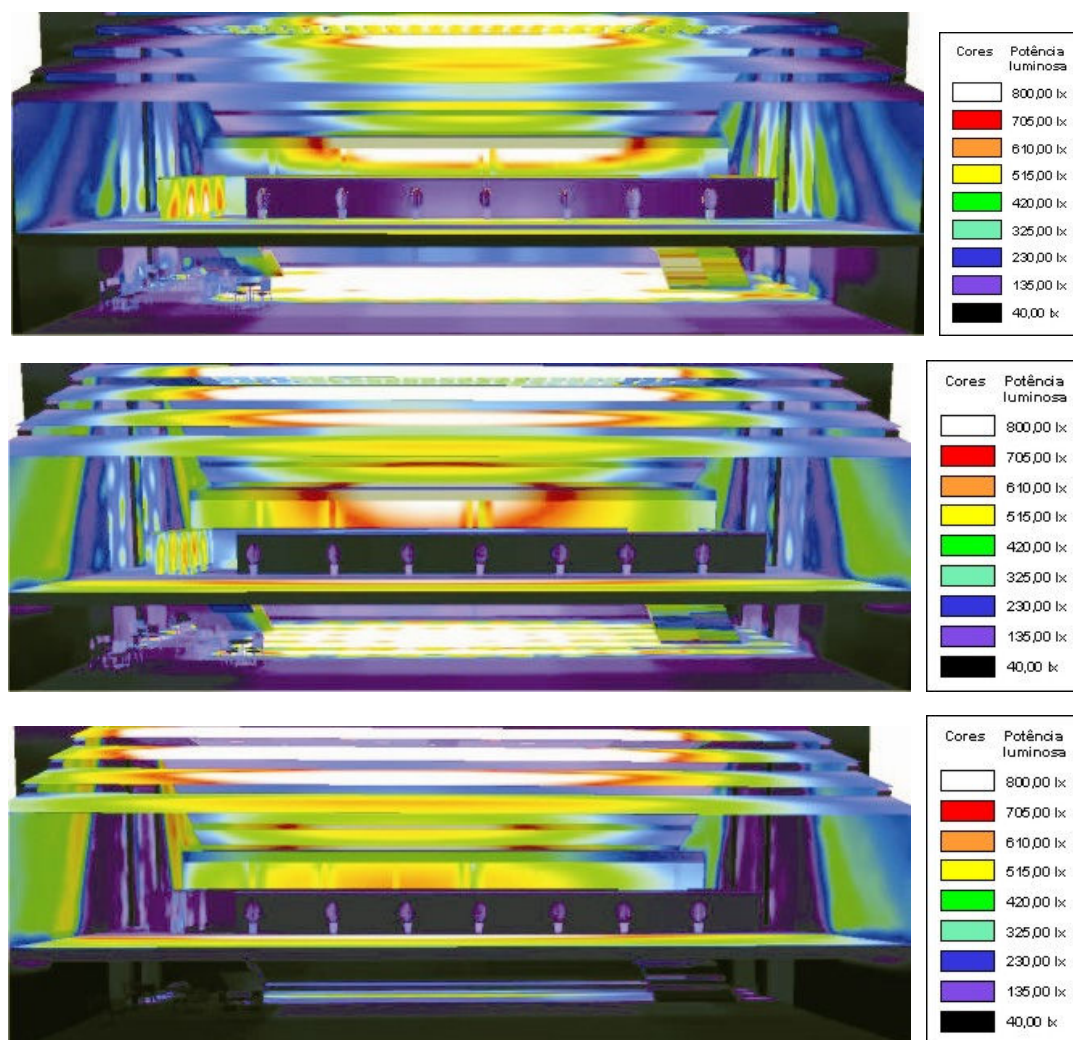


Figura 133. Quantificação da luz por meio de cores no *software* DIALux (autor, 2010).

Apesar deste tipo de simulação ter sido usado nesta pesquisa apenas para a visualização do efeito da movimentação do modelo, pode-se observar que, com este tipo de estrutura, é possível gerar soluções para controle da luz que satisfaçam às necessidades de luz apresentadas na norma *NBR 5413 (1992)* para ambientes altos e com grandes vãos livres.

Tendo em vista que esta pesquisa não tem como objetivo avaliar o conforto térmico/luminoso desta estrutura, não foram realizados cálculos para avaliar a necessidade de alteração do tamanho das aberturas e/ou adequação da iluminação elétrica.

3.2.4 Simulações de aplicações arquitetônicas

Novamente utilizou-se o *software* Rhinoceros, desta vez para simular possíveis formas de utilização arquitetônica das estruturas articuláveis desenvolvidas nesta pesquisa.

Além do ambiente projetado no *software* DIALux utilizando o Modelo I, foram feitas outras simulações deste modelo no Rhinoceros com o objetivo de mostrar a versatilidade que as estruturas articuláveis podem proporcionar. Sendo assim, foram desenhados dois ambientes que contemplam, de forma diferente, o Modelo I.

Na primeira simulação, o Modelo I é utilizado como elemento articulável para uma cobertura horizontal (Figura 134). A segunda simulação apresenta o Modelo I de forma inclinada, utilizado parcialmente como parede e como cobertura (Figura 135).

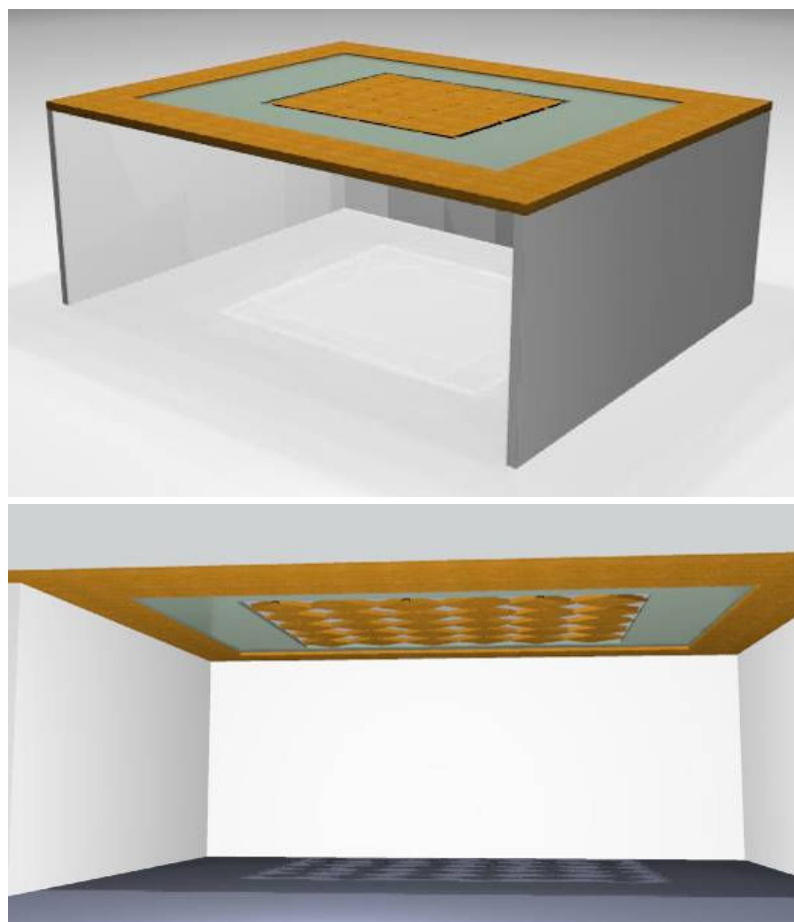


Figura 134. Simulação de uma cobertura horizontal com o Modelo I (autor, 2010).

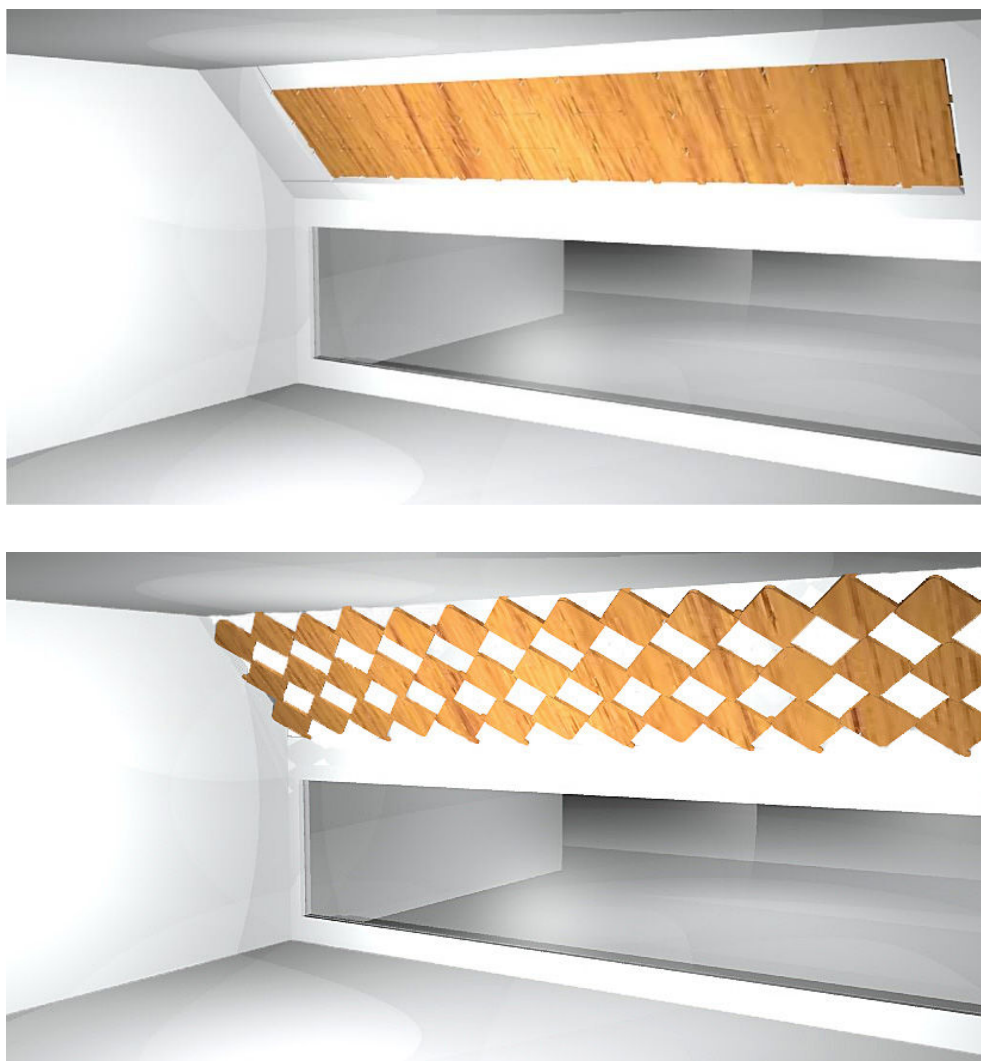


Figura 135. Simulação do Modelo I em posição inclinada (autor, 2010).

Tomando como vantagem a articulação total do Modelo II, foram desenvolvidos projetos que utilizam esta característica para a geração de formas orgânicas. Acredita-se que a articulação seja melhor utilizada durante o processo de concepção da forma da estrutura. Posteriormente, ela deve ser total ou parcialmente fixada por meio de elementos de união como pinos e cavilhas, e/ou materiais de revestimento. Na Figura 136, são mostrados dois exemplos que contemplam o Modelo II.

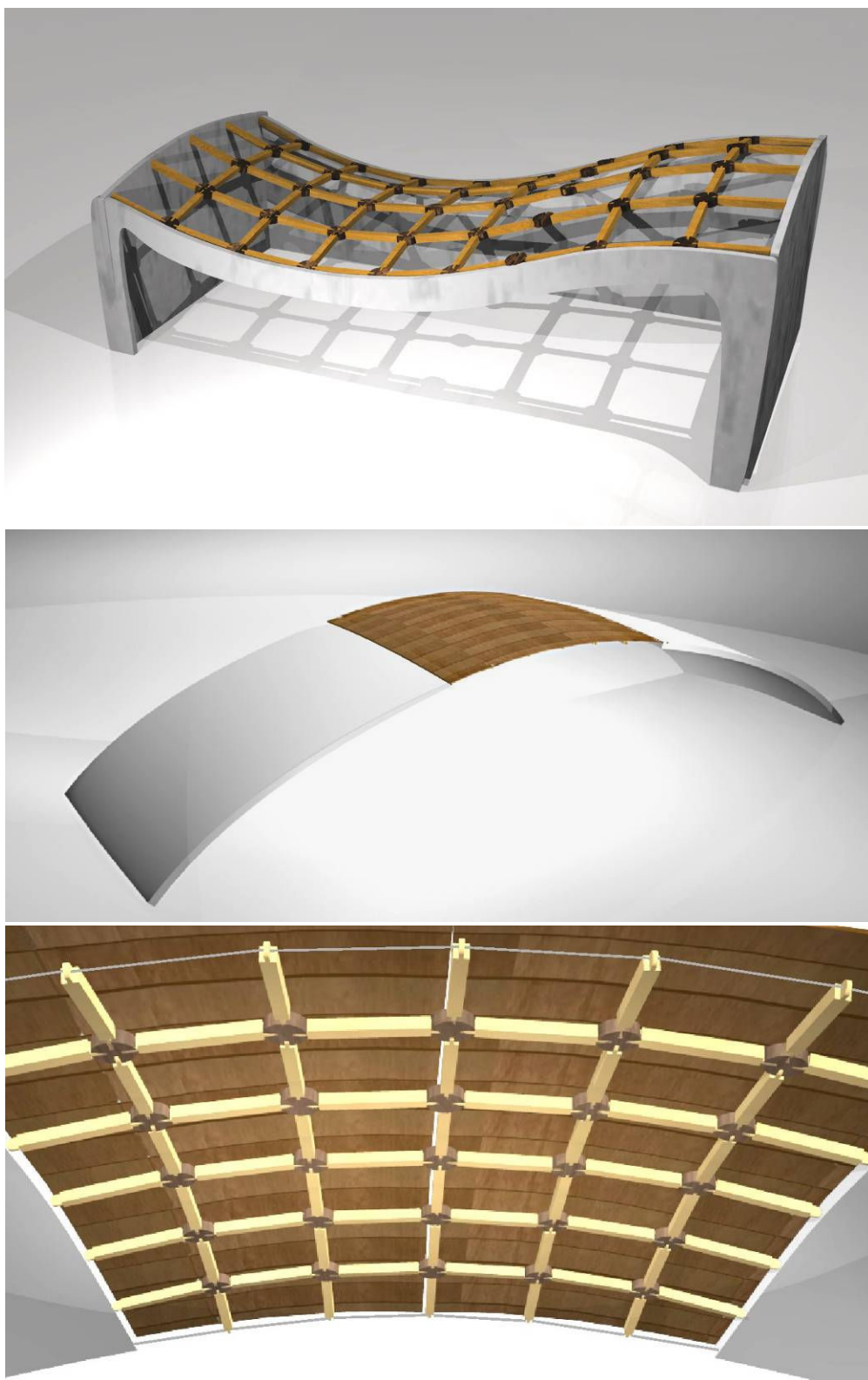


Figura 136. Utilização do Modelo II como estrutura de cobertura (autor, 2010).

Com o Modelo III foram feitas simulações de uma cobertura retrátil, uma estrutura curva e uma em forma de cúpula, como mostra a Figura 136. Acredita-se que a principal característica incorporada nesta estrutura é a expansão de ambientes, caracterizada pela retratibilidade; entretanto, outras possibilidades também podem ser abordadas nesta estrutura de modo a torná-la uma construção mais dinâmica.

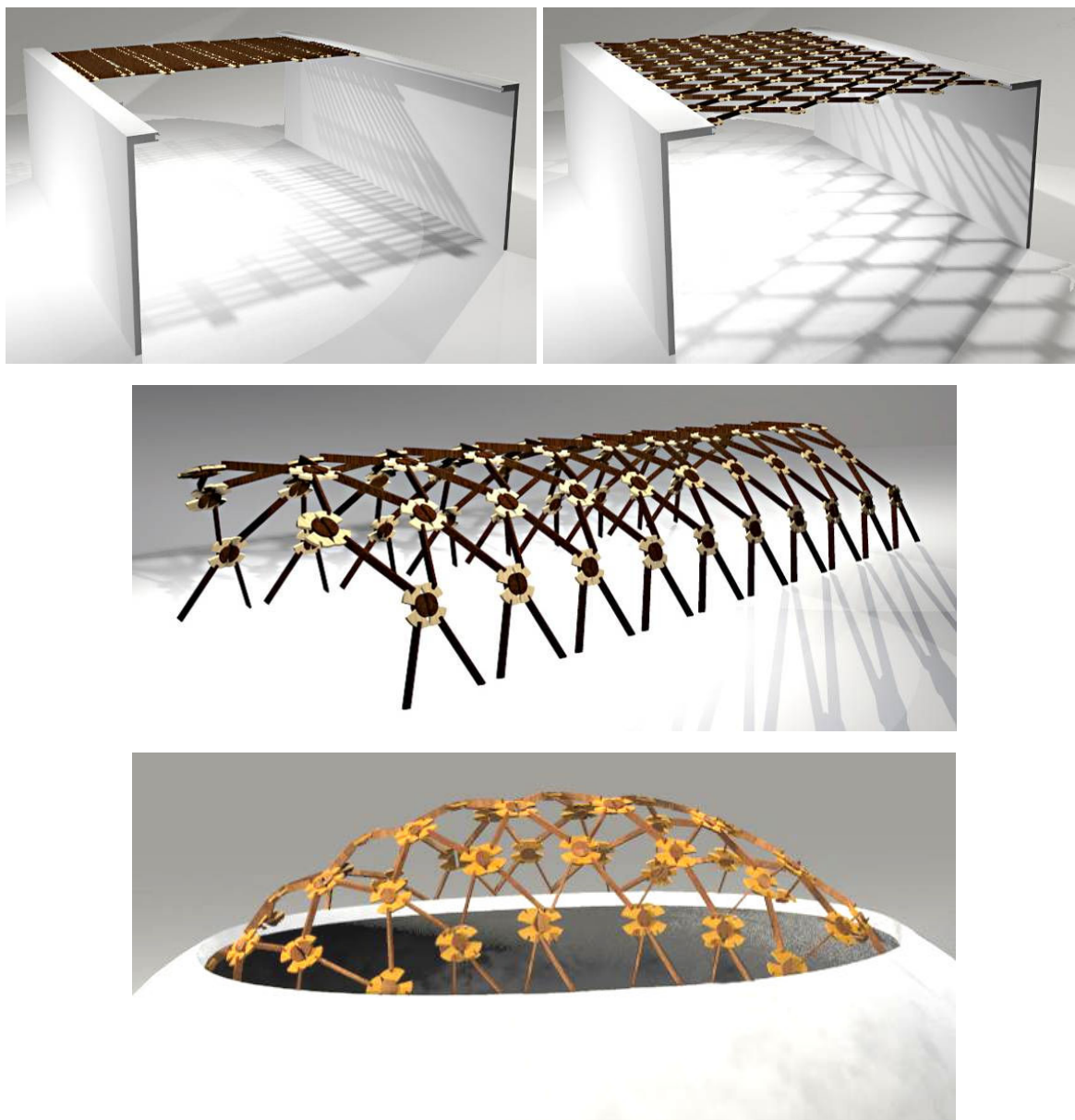


Figura 137. Simulações planas e curvas com o Modelo III (autor, 2010).

Os projetos mostrados nestas simulações ilustram as várias possibilidades de utilização das estruturas articuláveis. Nesta pesquisa, pode-se ter uma primeira noção das potencialidades

estruturais dos três modelos desenvolvidos. Uma etapa consequente seria a realização do aperfeiçoamento destes modelos com o objetivo de maximizar suas potencialidades, tanto de carga quanto estéticas.

3.3 Considerações sobre o ferramental utilizado

Com relação à utilização dos *softwares* Rhinoceros 4.0 e Solidworks 2010 para a modelagem tridimensional dos modelos desenvolvidos, observou-se que eles permitiram a criação de formas variadas de maneira rápida e efetiva.

A principal qualidade do Rhinoceros é sua interface simples e objetiva com recursos de fácil acesso. A renderização que o programa oferece é outra vantagem que facilita a visualização dos materiais aplicados nos modelos.

O Solidworks é um *software* com recursos mais avançados; consequentemente, seu ambiente de trabalho é mais complexo. Neste *software*, as peças de uma estrutura devem ser desenhadas separadamente e, em seguida, inseridas em uma montagem. Como trabalha num sistema parametrizado, é possível modificar as peças, que estão em outro arquivo, e as alterações são inseridas automaticamente na montagem.

A prototipagem física também se mostrou uma ferramenta eficiente para análise da geometria e da movimentação dos componentes dos modelos. Ela possibilitou a visualização de falhas não percebidas durante o processo de criação e modelagem virtual, portanto foi fundamental para o desenvolvimento das estruturas.

Após a modelagem virtual e prototipagem, partiu-se para as avaliações físicas virtuais dos modelos desenvolvidos. A primeira análise realizada foi a de movimento com o auxílio do aplicativo ‘*Solidworks Motion* TM’, disponível no ambiente Solidworks. Nesta análise foram

inseridas características como grau de liberdade e limitações de movimento das peças para que as estruturas dos modelos realizassem os movimentos pretendidos. Este estudo de movimento foi avaliado para detecção de possíveis interferências que poderiam comprometer a estrutura física das montagens. Os resultados se mostraram satisfatórios visto que a estrutura se comportou de acordo com o que se pretendia.

A análise do comportamento físico dos modelos se mostrou eficiente e possibilitou uma avaliação precisa das informações que, até então, eram baseadas na visualização teórica proporcionada pelos modelos prototipados. Outra vantagem de se utilizar o Solidworks para análises de comportamento físico é a capacidade de inserção das propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Isto faz com que a simulação tenha resultados parecidos com aqueles encontrados em ensaios mecânicos reais. Nesta avaliação, a característica mais relevante foi a possibilidade de se visualizar os efeitos da deformação da estrutura mediante uma determinada carga. Esta avaliação é fundamental para se determinar as aplicações onde as estruturas terão melhor comportamento e decidir qual a melhor espécie de madeira a ser utilizada.

O *software* DIALux 4.7 foi utilizado nesta pesquisa apenas com o intuito de se analisar o efeito luminoso promovido pela movimentação do Modelo I. Este *software* apresenta uma boa potencialidade quanto às análises luminosas, porém, foi subutilizado nesta pesquisa, pois o foco principal era a geometria estrutural. Para esta avaliação desenhou-se um ambiente que contemplava parcialmente a estrutura proposta. Utilizou-se como fonte luminosa a luz do sol para efeito de uma visualização mais próxima de uma situação real. Foi necessário inserir aberturas extras no ambiente visto que, o Modelo I em sua configuração fechada não permite a passagem de iluminação. Como resultado, foram obtidos níveis satisfatórios de iluminação para o ambiente projetado. Além disso, foi possível visualizar os efeitos da sombra proporcionados pela articulação da estrutura.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

Desde as primeiras edificações construídas até os dias atuais, a arquitetura brasileira em madeira se apresenta, na maioria das vezes, rígida, estática e imutável. Estas características dificultam possíveis transformações relativas a formas geométricas e ao espaço de ocupação da edificação. Uma arquitetura dinâmica pode se adaptar mais adequadamente às necessidades humanas e ambientais do que uma estática. Adaptabilidade e transformação são necessidades da sociedade atual que devem ser cada vez mais consideradas em projetos arquitetônicos, levando-se em conta as requisições da sociedade moderna.

A adaptação dos mecanismos que proporcionam uma movimentação estrutural depende da tipologia da articulação e dos esforços aplicados na estrutura. Em se tratando do material madeira, devem-se considerar, além das diferentes características por espécie, as peculiaridades referentes à anatomia do material como, por exemplo, a posição das fibras em relação ao carregamento.

Nesta dissertação, com o objetivo de se experimentar diferentes geometrias, que permitissem o uso articulado de estruturas de madeira para diferentes situações arquitetônicas, foram propostos modelos de estruturas articuláveis de madeira abordando três tipos de articulações, cada qual focando em determinados parâmetros para possibilidades no uso arquitetônico.

Após seu desenvolvimento, estas estruturas foram sujeitas a simulações virtuais, tanto sob o enfoque da geometria, quanto sob o enfoque funcional, considerando os efeitos de luz e sombra.

Após as simulações pode-se concluir que estas estruturas articuláveis apresentam um alto potencial de aplicações arquitetônicas. Entende-se que, para aplicações reais, os sistemas e mecanismos desenvolvidos nesta dissertação necessitam ser aperfeiçoados para que possam ser inseridos no mercado da construção. Porém, se pode afirmar que é possível desenvolver estruturas versáteis, economicamente viáveis e promissoras arquitetonicamente com o uso de peças articuladas pré-fabricadas em madeira.

A aplicação da geometria dinâmica em estruturas de madeira, se utilizada de maneira adequada, poderá influenciar no aumento da escolha deste material como elemento construtivo. Esta proposição associada à melhor qualificação de mão-de-obra, ao desenvolvimento de peças de conexão específicas para madeira e à melhor divulgação de pesquisas relacionadas ao tema, poderia ajudar a diminuir o preconceito referente ao uso da madeira na arquitetura.

Espera-se com esta pesquisa, contribuir para a criação de novas propostas no campo da arquitetura brasileira, que possam responder às mudanças de uso e forma, que envolvem a dinâmica do mundo contemporâneo. Espera-se, também, contribuir para a divulgação dos benefícios da madeira e para a efetiva inserção do tema ‘arquitetura cinética’ no cenário de pesquisa brasileiro.

Para trabalhos futuros, pretende-se dar continuidade a esta pesquisa, aprofundando o estudo das aplicações das estruturas articuláveis no contexto arquitetônico e aperfeiçoando as estruturas desenvolvidas neste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- 4D ARQUITETURA. **Casa Mozart**. Disponível em <<http://www.qdarquitetos.com.br/#/Projetos/1/331>> Acesso em Set/2010.
- AITC - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **Laminated Timber Architecture**. Quality Inspected, A190.1-2002. Disponível em <http://www.aitc-glulam.org/shopcart/Pdf/aitc_lam_timber_arch_us_final.pdf>. Acesso em Jan/2009.
- AKGÜN, Y. **Transformations from planar geometries to hypersurfaces: a proposal for a new scissor structure**. PhD. Proposal. Izmir Institute of Technology, Turkey, 2004.
- ALBERN, F.; LANGBECKER, T. **Kinematic and nonlinear analysis of foldable lattice structure**. In: WANG, C. M. et al. (Ed.). *Second International Conference on Structural Stability and Dynamics*. Singapore, 2002. p. 653-659.
- ANDREW. **Calatrava's design process for the Kuwait Pavillion**. Publicado em 2008. Disponível em <<http://andrew1390.blogspot.com/2008/09/webpage.html>> Acesso em Ago/2010.
- ANTENNA DESIGN. **Power Flower**. Construction in 2002. Disponível em <<http://antennadesign.com/Installation/20-power-flower?scrollbar=670.7949790794979>> Acesso em Abril/2010.
- ARANDAS, E. M. C. A. **Funil-Lar**. Ohun. Ano 3, n. 3, p. 72-91. Set/ 2007.
- ARCHINSPIRE. **Arab World Institute Architecture Building**. Disponível em <<http://archinspire.com/home-design/arab-world-institute-architecturebuilding.htm>>. Acesso em Dez/2010.
- ARCHISEEK. **L'Hemisfèric, Valencia, Spain**. Disponível em <<http://two.archiseek.com/2010/199-8-lhemisferic-valencia-spain/>> Acesso em Jun/2010.
- ARCHTRACKER. **Aldar Central Market**. Disponível em <<http://archtracker.com/wp-content/uploads/2009/09/AldarCentralMarket-2.JPG>> Acesso em Jun/2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5413: Iluminância de interiores**. 1992.
- _____. **NBR 7190: projeto de estruturas de madeira**. 1997.
- ASEF, M.; KRONENBURG, R. **An Architectural Evaluation of Transformable Roof Structures**. Adaptables 2006 - International Conference on Adaptable Building Structures. Eindhoven, Holanda, 2006.
- ASTUDILLO R.; MADRID A. J. **Shells and Spatial Structures: from recent past to the next millennium**. IASS Congress. Madrid, 1999.
- AUSTRALIAN GREENHOUSE OFFICE. **Australian residential building sector greenhouse gas emissions 1990–2010: final report**. Canberra, ACT: Australian Greenhouse Office, 2006.
- AWC - AMERICAN WOOD COUNCIL. **Details for conventional wood frame construction**. Washington, 2002. 52 p.
- BARONI, E. **Banco Dança**. Disponível em <<http://www.eduardobaroni.com/blog/?cat=6>>. Acesso em Set/2010.
- BARRETO, R. **Estrutura de madeira: materiais e métodos**. Disciplina: construção do edifício III. FAU-USP. São Paulo, 2010. Disponível em <http://www.usp.br/fau/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0186>. Acesso em Dez/2010.
- BEESELEY, P.; HIROSUE, S.; RUXTON, J.; TRANKLE, M. **Responsive Architecture: subtle technologies**. Riverside Architectural Press, 2006.
- BIDAUD, Ph.; GRAND, Ch.; JARRASSÉ, N. **Design of an innovative unfoldable wheel with contact surface adaptation mechanism for planetary rovers**. Proceedings of ASTRA'06. 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation. 2006.
- BLOCK, PH. **Interactive kinetic structure: Architecture with an organic trait**. Joint SMArchS Colloquium / BT Seminar Series. 2003.
- BODIG, G. J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. Van Nostrand Reinhold. New York, 1982.

BUCHANAN; LEVINE. **Wood-based buildings materials and atmospheric carbon emissions.** Environmental Science and Policy 2, 1999. 427-37p.

BUHL, T.; JENSEN, F. V.; PELLEGRINO, S. **Shape optimization of cover plates for retractable roof structures.** Computers & Structures 82 (2004), pp. 1227–1236.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira.** Sao Paulo: Nobel, 1991.

BURIOL, T. M. **Processo e visualização de campos em ambientes virtuais e sistemas CAD 3D aplicados a projetos de iluminação em subestações.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharias, setor de Tecnologia e setor de Ciências Exatas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

CABRAL, C. P. T.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; PIMENTA, A. S.; SOARES, C.P. B.; CARVALHO, A. M. M. L. **Propriedades de chapas tipo OSB, fabricadas com partículas acetiladas de madeiras de Eucalyptus grandis, Eucalyptus urophylla, Eucalyptus cloeziana e Pinus elliottii.** Revista Árvore. Vol. 30, nº4, p. 659-668. Viçosa-MG, 2006.

CALATRAVA, S. **Projects.** Disponível em <<http://calatrava.com>> Acesso em Jan/2010.

CALIL JÚNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira.** São Paulo: Manole, 2003.

CAMPOS, C. I.; ROCCO LAHR, F. A. **Utilização de resíduos de processamento da madeira na fabricação de MDF (Medium Density Fiberboard).** VIII Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM. Uberlândia, MG, 2002.

CANAL VALENCIA. **El Hemisférico de la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia.** Disponível em <http://www.canal-valencia.es/hemisferico_de_valencia/hemisferic_01.htm> Acesso em Jul/2010.

CARRASCO, E. V. M. **Estruturas usuais em madeira: propriedades físicas e mecânicas.** Belo Horizonte: EEFUMG, 2004.

CASA. **Design tipo exportação: os premiados do Idea/Brasil.** Disponível em <<http://casa.abril.com.br/materias/design/design-tipo-exportacao-premiados-idea-brasil-490487.shtml#13>>. Acesso em Set/2010.

CASTLE, H. **Interactive Architecture.** 4dspace. London: Academy Editions. Editorial. In Bullivant. 2005

CHILTON, J. **Space Grid Structure.** Oxford: Architectural Press, 2000.

CHURTICHAGA, J. **La arquitectura veloz: trayectorias estructurales a propósito de la obra de Emilio Perez Piñero y Felix Candela.** Arquitecturas Ausentes. N°3. Ministerio de Vivienda, 2005.

CITY OF ARTS AND SCIENCE. **Descubre la Ciudad de las Artes y las Ciencias.** Disponível em <<http://www.cac.es/home/>> Acesso em Ago/2010.

CLUZEL, J. S. **Preserve/Restore/Rebuild/Renovate: The archipelagos of mystical thought in Japan and Europe.** Disponível em <<http://www.reseau-asie.com/edito-en/reseau-asie-s-editorial/prserve-restore-rebuild-renovate-the-archipelagos-of-mystical-thought-in-japan-and-europe-by-jean-s/>> Publicado em Ago/2007.

COSTA, A.F.; VALE, A.T.; GONÇALEZ, J.C. **Eficiência de um resíduo de origem petrolífera sobre a estabilidade dimensional da madeira de Pinus sp. (pinus) e Mimosa scabrella Benthham (bracatinga).** Ciência Florestal. Vol. 11, nº. 2. Santa Maria, RS, 2001.

CRUZ, C. R.; LIMA, J. T.; MUNIZ, G. I. B. **Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de Eucalyptus.** Scientia Forestalis, n.64, p.33-37, 2003.

DANDA. **Rehab Basel.** Disponível em <http://www.danda.be/gallery/rehab_basel> Acesso em Jan/2010.

DIAS, F. M.; ROCCO LAHR, F. A. **Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente.** Scientia Forestalis. N.65. Junho de 2004. 102-113p.

DONLEY, S. J. **Initial Identification and Investigation of Parameters for Choosing the Most Appropriate Rapidly Assembled or Deployable Structure.** Master Thesis. Department of Construction Engineering, University of Texas. Austin, 2001.

DRUM, H. **Adaptation of the Built Environment to its Surrounding Context**. Arc 403, 2007. Disponível em <[http://www.houstondrum.com/documents/Context ualAdaptation.pdf](http://www.houstondrum.com/documents/Context%20Adaptation.pdf)>. Acesso em Jan/2010.

EISENLOHR, A. **Casa para um Casal. Disponibilizado em agosto de 2007**. Disponível em <<http://andreeisenlohr.blogspot.com/2006/10/casa-para-um-casal.html>>. Acesso em Jul/2010.

ENCONTRAMA. **Alexander Calder**. Goldfish Bowl. Disponível em abril de 2008 em <<http://encontrama-do.blogspot.com/2008/04/alexander-calder.html>>. Acesso em Dez/ 2010.

JIRICNA, E. **Orangery Prague Castle**. Czech Republic. Disponível em <<http://www.ejal.com>>. Acesso em Dez, 2008.

ELECTROLAND. **Interactive at 11th & Flower**. Disponível em <<http://electroland.net>> Acesso em Ago/2010.

CANALS, M. B. **El socialista, el arquitecto i la Turning Torso**. Disponível em <<http://elisavaee.wordpress.com/category/turning-torso/page/2/>>. Acesso em Dez/2010.

COSTA, D.; APSAN, D.; MEDEIROS, E. G.; CAPELLO, G.; BARACUHY, J. L.; TOURRUCÔO, J. **Painéis de madeira de reflorestamento**. Planeta Sustentável, 08-2009. Disponível em <<http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/casa/paineis-madeira-certificada-reflorestamento-construcao-561866.shtml>>. Acesso em Jul/2010.

ESCRIG, F.; BREBBIA, C.A. **Mobile and Rapidly**. Assembled Structures Conference II. MARAS, 1996.

ESCRIG F.; SÁNCHEZ J. **New designs and geometries of deployable scissor structures**. International Conference On Adaptable Building Structures. Holanda, 2006.

ESCRIG, F. E. A. **Mobile and rapidly assembled structures II**. Southampton, UK: Computer Mechanics Publications, 1996.

ESTUQUI FILHO, Carlos A. **A Durabilidade da madeira na arquitetura sob a ação dos fatores naturais: estudo de casos em Brasília**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Dissertação (Mestrado). Brasília, 2006.

FACCHIN, F. **Casas Pré-fabricadas de Madeira: Análise e Dimensionamento de uma Parede**. 10º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira - EBRAMEM. São Paulo, 2006.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global forest resources assessment 2000: main report**. Roma, 2001. Disponível em <<http://www.fao.org/forestry/fra/2620/em>>. Acesso em Dez/2010.

FLICKR. **Porta de elevador antiga**. Disponível em <<http://www.flickr.com>>. Acesso em Jan/2009.

FLICKR. **Kuwait Pavillion**. Disponível em <http://www.flickr.com/photos/jmhd_ezhdez/3236166912/in/photostream> Imagens postadas em 2004. Acesso em Jan/2010.

FOOTBALLTRACK. **Top Five football stadiums**. Disponível em <<http://footballtrack.com/top-five-football-stadiums>>. Acesso em Abril/2009.

FOTIADOU, A. **Analysis of Design Support for Kinetic Structures**. Dissertação (Mestrado) Department of Building Physics and Building Ecology. Vienna University of Technology. Vienna, 2007.

FOX, M.A.; YEH, B. P. **Intelligent Kinetic Systems in Architecture**. Managing Interactions in Smart Environments (MANSE). Springer-Verlag, London, 1999.

FOX, M. A. **Sustainable Applications of Intelligent Kinetic Systems: Responsive Skylights**. Research Proposal. Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 2000.

FOX, M. A. **Ephemerization, Oz: Special Issue for Kinetic Architecture**. Kansas State University Press. Kansas, 2001.

FOX, M. A. **Kinetic Architectural Systems Design**. Transportable Environments 2. Ed. Robert Kronenburg, Joseph Lim and Wong Yunn Chii. London and New York: Spon Press, 2003. pg. 113-128.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. Ed.Nobel. São Paulo, 1985.

GANTES, C.J. **An improved analytical model for the prediction of the nonlinear behavior of flat and curved deployable space frames**. Journal of Constructional Steel Research. 1997.

GANTES C. J.; KONITOPOULOU E. **Geometric design of arbitrarily curved bi-stable deployable arches with discrete joint size**. International Journal of Solids and Structures. 2004. 5517–5540p.

GANTES, C. J. **Deployable Structures: Analysis and Design**. WIT Press, Boston, 2001.

GARCIA, F. S.; GUERNIERI, M. S.; PEREIRA, G. F.; WEIHERMANN, S. **Arquitetura em madeira: uma tradição paranaense**. Scientia et Labor. Curitiba, 1987.

GESUALDO, F. A. R. **Estruturas de Madeira**. Notas de aula, Faculdade de Engenharia civil, Universidade Federal de Uberlândia. 2003. Disponível em <http://usuarios.upf.br/~zacarias/Notas_d_e_Aula_Madeiras.pdf>. Acesso em Jul/2008.

GONÇALVES, R.; SORIANO, J. **Madeira e água: como o teor de umidade da madeira afeta sua resistência mecânica**. Material de aula. Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp. Março, 2008.

HALLGREN, L. **Santiago Calatrava**. Disponível em <<http://archgraphics.pbworks.com/Straight+to+Curves>>. Acesso em Set/2009.

HANAOR, A.; LEVY, R. **Evaluation of deployable structures for space enclosures**. International Journal of Space Structures. 2001. p.211–229.

HARRIS, A. L. N. C. **A arquitetura de cúpulas e coberturas curvas em madeira**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1993. 119p.

HARRISON, C.; WOOD, P. J. N. **An Anthology of Changing Ideas**. Wiley-Blackwell. Londres, 1992.

HARRY, S. C. **Responsive Kinetic Systems**. Dissertation (Master) School of Architecture and Interior Design of the College of Design, Architecture, Art & Planning. University of Cincinnati. 2006.

HOBERMAN, C. **Portifolio**. Disponível em <<http://www.hoberman.com>> Acesso em maio /2009.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. **Technologies, Policies and Measures for Mitigating Climate Change**. Disponível em <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_technical_papers.htm> Publicado em Nov/1996.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo: IPT, 2003. 57p.

ISHII, K. **The Pusan Dome, Structural Design of Retractable Roof Structure**. WIT Press. Southampton, 2000.

ITA Construtora. **Casa Hélio Olga**. Construída em 1990. Disponível em <<http://www.itaconstrutora.com.br/page3/page12/page12.html>> Acesso em Set/ 2010.

JACOB, L. **Brücken und Brückenbau – Theatrum Pontificale, oder Schauplatz der Brückenbaues**. In Th Schäfer GmbH Hannover, 1982.

JODIDIO, P. **Architecture Now**. Taschen, 2002.

KILIAN, A.; BLOCK, Ph.; SCHMITT, P.; SNAVELY, J. **An evolving language for actuated structures**. Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology. Publicado em 2006. Disponível em <<http://b-cu.be/ph/mini-blog/MIT-tower2006.pdf>>.

KORKMAZ, K. **An Analytical Study of the Design Potentials in Kinetic Architecture**. PhD Thesis, Izmir Institute of Technology, Turkey, 2004.

KORKMAZ, K. **Generation of a New Type of Architectural Umbrella**. International Journal of Space Structures Vol. 20 No. 1, 2005.

KRONENBURG, R. **Houses in Motion**. Academy Editions, 1995.

KRONENBURG, R. **Portable Architecture**. Second ed. Butterworth-Heinemann, 1999.

KUHN, D. **Liao Architecture: Qidan Innovations and Han-Chinese Traditions?** Second Series. Vol. 86, 2000. Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/4528851>.

KUKLIK, P. **Development of timber framed houses in Central Europe**. Proceedings of COST E5 Workshop, Timber Frame Building Systems. Ed. A. Cecotti, S. Thelandersson, Venice, Italy, 2000.

LADESIGNTECH. **Cúpula Hoberman**. Disponível em <http://www.ladesigntech.org/images/hoberman_domepana.jpg> Acesso em Abril/2010.

LATORROCA, J. V.; ALBUQUERQUE, C. E. C. **Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira**. Floresta e Ambiente, v.7, n.1, p.279-291, 2000.

LEPAGE, E. S. **Manual de preservação de madeiras**. IPT – Divisão de Madeiras, Vol. 1. São Paulo, 1986.

LEVY, M.; LUEBKEMAN. **Typology of Mobile and Rapidly Assembled Structures. Shells and Spatial Structures: From Recent Past to the Next Millennium.** Proc. IASS 40th Anniversary Congress, Madrid, 1999.

LIEW, J. Y. R.; VU, K. K.; KRISHNAPILLAI, A. **Recent Development of Deployable Tension-Strut Structures.** Advances in Structural Engineering, Vol 11. 2008.

LONGUI, E. L.; LIMA, I. L.; SILVA JÚNIOR, F. G.; BUFOL, A.; SUCKOW, I. M. S.; FLORSHEIM, S. M. B. **Variação radial das características anatômicas, densidade aparente, teores de extrativos, lignina e holocelulose na madeira de Piptadenia gonoacantha (Mart.) Macbr.** Sciencia Forestalis. Volume 38, nº 87, p. 341-353. Piracicaba, 2010.

MAO, D.; LUO, Y. **Analysis and design of a type of retractable roof structure.** Advances in Structural Engineering Vol. 11 No. 4, 2008.

MASCIA, N. T. **Considerações a respeito da anisotropia da madeira.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1993.

MELLO, R. L. **Projetar em madeira: uma nova abordagem.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, 2007.

MEINHOLD, B. **M-Velope Transformer House For Sale at Neiman Marcus.** Disponível em <<http://www.inhabitat.com/2008/10/27/transformable-mvelope-by-michael-jantzen>> Publicado em 10/27/08.

MIURA, K. **Concepts of Deployable Space Structures.** Int. Journal Space Structures, Special Issue on Deployable Space Structures, V8 N1&2, 1993.

MORITZ, K. **The Cover of the Allianz Arena.** Disponível em <http://www.apoli.fi/instancedata/p_rime_product_julkaisu/apoli/embeds/11358_moritz.pdf> Acesso em Dez/2009.

NASHER SCULPTURE CENTER. **Nasher Sculpture Center celebrates contemporary artist Alexander Calder with new exhibit.** Disponível em <<http://www.pegasusnews.com/news/2010/oct/29/nasher-sculpture-alexander-calder-contemporary>>. Acesso em Dez/2010.

NORTON, R. L. **Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines.** McGraw-Hill. USA, 1999.

NPOINTERCOS. **Energia Museum: 50th Anniversary of Sputnik-1.** Disponível em <<http://www.npointercos.jp/Energiamuseum.html>> Acesso em Set/2010.

NUMAZAWA, C. T. D. **Arquitetura japonesa no Pará: estudo de caso em edificações de técnica construtiva que favoreceu uma maior durabilidade da arquitetura em madeira no município de Tomé-açu.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

OLIVEIRA, A. L. C. **Contribuição para a análise de vigas mistas de madeira laminada colada e concreto (MLC/concreto).** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2002.

OLIVEIRA JR, J. A. **Arquitetura ribeirinha sobre as águas da Amazônia: o habitat em ambientes complexos.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. **Variação radial da retratibilidade e densidade básica da Madeira de Eucalyptus saligna Sm.** Revista Árvore. Vol.27, nº.3, p.381-385. Viçosa, MG, 2003

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. **Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto.** Revista Árvore. Vol.29, nº.1. Viçosa, MG, 2005.

OUNO DESIGN. **Aalto's Villa Mairea in Finland.** Disponível em <<http://blog.ounodesign.com/tag/alvar-aalto>> Publicado em Junho de 2009. Acesso em Abril/2010.

PARANÁ ONLINE. **Casas polonesas voltam ao Bosque do Papa.** Disponível em <<http://parana-online.com.br/editoria/pais/news/350065>> Acesso em Dez/2009.

PELLEGRINO, S.; KEBADZE, E.; LEFORT, T.; WATT, A. M. **Low-Cost Hinge for Deployable Structures.** CUED/D-STRUCT/TR202, Astrium Contract No. 24070108, July 2002.

PELLEGRINO, S. **Large Retractable Appendages in Spacecraft**. Journal of Spacecraft and Rockets, 32(6), 1006-1014. 1995.

PELLEGRINO, S. **Deployable structures**. Ed. Springer: New York. USA, 2001.

PETRUCCI, E.G. R. **Materiais de construção**. 4ª edição. Editora Globo. Porto Alegre, 1979.

PFEIL, W. **Estruturas de Madeira**. 5ª Edição. Livros técnicos e científicos. Rio de Janeiro, 1994.

PIÑERO, E. P. **Teatros Desmontables**. Informes de la Construcción, nº231. I.E.T.c.c. Junio, 1971.

PIÑERO, E. P. **Deployable Structures**. Disponível em <<http://emilioperezpinero.com>> Acesso em Fev/2010.

PINTO, E. M. **A madeira: um material construtivo resistente ao fogo**. Revista eletrônica de ciências. Junho/julho/agosto, nº. 27. São Carlos, SP, 2004.

POPPENSIEKER-DERIX. **Glue laminated timber structures - Selection of first-class references**. Disponível em <http://www.poppensieker-derix.de/files/derix_referenzbroschuere_en_online.pdf>. Acesso em Jan/2009.

REULEAUX, F. **The kinematics of machinery**. Dover Pubs, 1963.

SABIN, J.; JONES, P. **Nonlinear Systems Biology and Design: Surface Design**. Acadia 2008: Silicon + Skin, Biological Processes and Computation. ed. Kudless, A., Oct. 16-19, pp. 54-65, 2008.

SHIGLEY, J. E. **Standard Handbook of Machine Design**. Mcgraw-Hill.1996.

SIAP. **Allianz Arena**. Disponível em <<http://siap.org/goftman/2008/07/allianz-arena-munich-germany.html>> Acesso em Abril/2009.

SILVA, A. **Comportamento Diafragma de Paredes de Madeira no Sistema Leve Plataforma**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. 2004

SORGUÇ, A. G.; HAGIWARA, I.; SELÇUK, S. A. **Origami in architecture: a médium of inquiry for design in architecture**. METU JFA, Vol. 2-2009, Nº 26, pp. 235-247. 2009.

STAMATO, G. C.; GOÊS, J. L. N. **Elementos estruturais derivados de madeira**. Apostila. Faculdade de Engenharia de Estruturas, Centro de Pós-Graduação UniLins. Disponível em <ftp://ftp.unilins.edu.br/cursos/Pos_Engenharia_de_Estruturas_T7/Modulo_Estruturas_Madeira/Aula_030710/3%20-%20Elementos%20Estruturais%20derivados%20da%20madeira.pdf>. Acesso em Out/2010.

STEFFEN, M. **Moisture and Wood-Frame Buildings**. Building Performance Bulletin. Canadian Wood Council. Ottawa, Canadá, 2000.

STEINHARDT, N. S. **Liao Architecture**. Honolulu: University of Hawaii Press, 1997.

SZÜCS, C. A.; SANTOS, A. C. dos; DIAS, G. L. **Utilização do pinus nas edificações em madeira**. Revista da Madeira, Curitiba/PR/Brasil, 2004. p. 160-164.

SZÜCS, C. A.; TEREZO, R. F.; VALLE, A. MORAES, P. D. **Estruturas de madeira**. Apostila. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006. Disponível em <http://www.ec.v.ufsc.br/secdepto/graduacao/Plano_ensino_20062/Apostila_Estrutura_Madeiras.pdf>. Acesso em Jul/2008.

TAYLOR, G. **La Madera**. Editora Blume. Barcelona, 1978.

TEMMERMAN, N. D. **Design and Analysis of Deployable Bar Structures for Mobile Architectural Application**. Vrije Universiteit Brussel, Faculty of engineering, 2007.

THEDECIBELTOLLS. **Happy birthday Sputnik**. Disponível em <<http://th edecibeltolls.com/happy-birthday-sputnik>> Acesso em Jun/2010.

TIBERT, G. **Deployable Tensegrity Structures for Space Applications**. (Doctor Thesis) – Department of Mechanics, Royal Institute of Technology. Stockholm, 2002.

TRUGILHO, F. P.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. **Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de Eucalyptus saligna**. Cerne, v.2, n.1, p.94-111, 1996.

TZONIS, A. **Santiago Calatrava's Creative Process Part 1: Fundamentals**. Birkhauser Publishers. Basel, Switzerland: 2001.

ULRICH, R. B. **Roman Woodworking**. Yale University Press. Connecticut, U.S.A, 2007.

VALCÁRCEL, P.; ESCRIG F. **La obra arquitectónica de Emilio Pérez Piñero**. Boletín num. 16 de la Escuela T. S. de Arquitectura A Coruña. Marzo 1993. pp 3-12. -X

VITAL, B. R.; PEREIRA, A. R.; DELLA-LUCIA, R. M.; ANDRADE, D. C. **Efeito da idade da árvore na densidade da madeira de Eucalyptus grandis cultivado na região do cerrado de Minas Gerais.** Revista Brasil Florestal, Brasília, n. 8, p. 49-52, 1984.

VU K. K.; TRAN T. C.; LIEW J. Y. R.; KRISHNAPILLAI, A. **Deployable Tension-Strut Structures: Design Guidelines.** International Conference On Adaptable Building Structures. Holanda, 2006.

WALTER, V. V. M. **Convertible Roofs.** Ferienakademie 2006. Sarntal, 2006.

WAPEDIA. **Architecture of Norway.** Disponível em <[http://wapedia.mobi/en/ Architecture_of_Norway](http://wapedia.mobi/en/Architecture_of_Norway)> Acesso em Jun/2010.

WARAGAYA, M. E. T. **Domo de Izumo: estudos integrados sobre arquitetura, estrutura e construção.** Revista do Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAU/USP. v. 23. FAU/USP, 2008. p. 34-51.

WBCSD. World Business Council for Sustainable Development. **Conferência Carbono e Alterações Climáticas - A Indústria Sustentável dos Produtos Florestais.** Lisboa, 2006. Texto disponível em <[http://www.bcsdportugal.org/ files/654.pdf](http://www.bcsdportugal.org/files/654.pdf)> Acesso em Jul/2009.

WEINFURTER, D. V. **Customização para acrescentar atributos em sólidos do Solidworks.** Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Ciência da Computação. Universidade Regional de Blumenau. Blumenau, RJ, 2003.

WIERZBICKI, N. M. **The development of dynamic environments.** Proceedings of Association of Collegiate Schools of Architecture, Northeast Regional Conference 2006: Imag(in)ing Worlds to Come, University Laval, Quebec, October, 2006.

WIKIARQUITECTURA. **Kuwait Pavilion.** Disponível em <http://en.wikiarquitectura.com/index.php?title=Kuwait_Pavilion_Expo'92>. Acesso em Maio/2010.

YOU, Z. **Motion structures extend their reach.** Materials Today. V10, n12. 2007.

YOUNG, D.; YOUNG, M. **The art of Japanese architecture.** Tuttle Publishing. Japan, 2007.

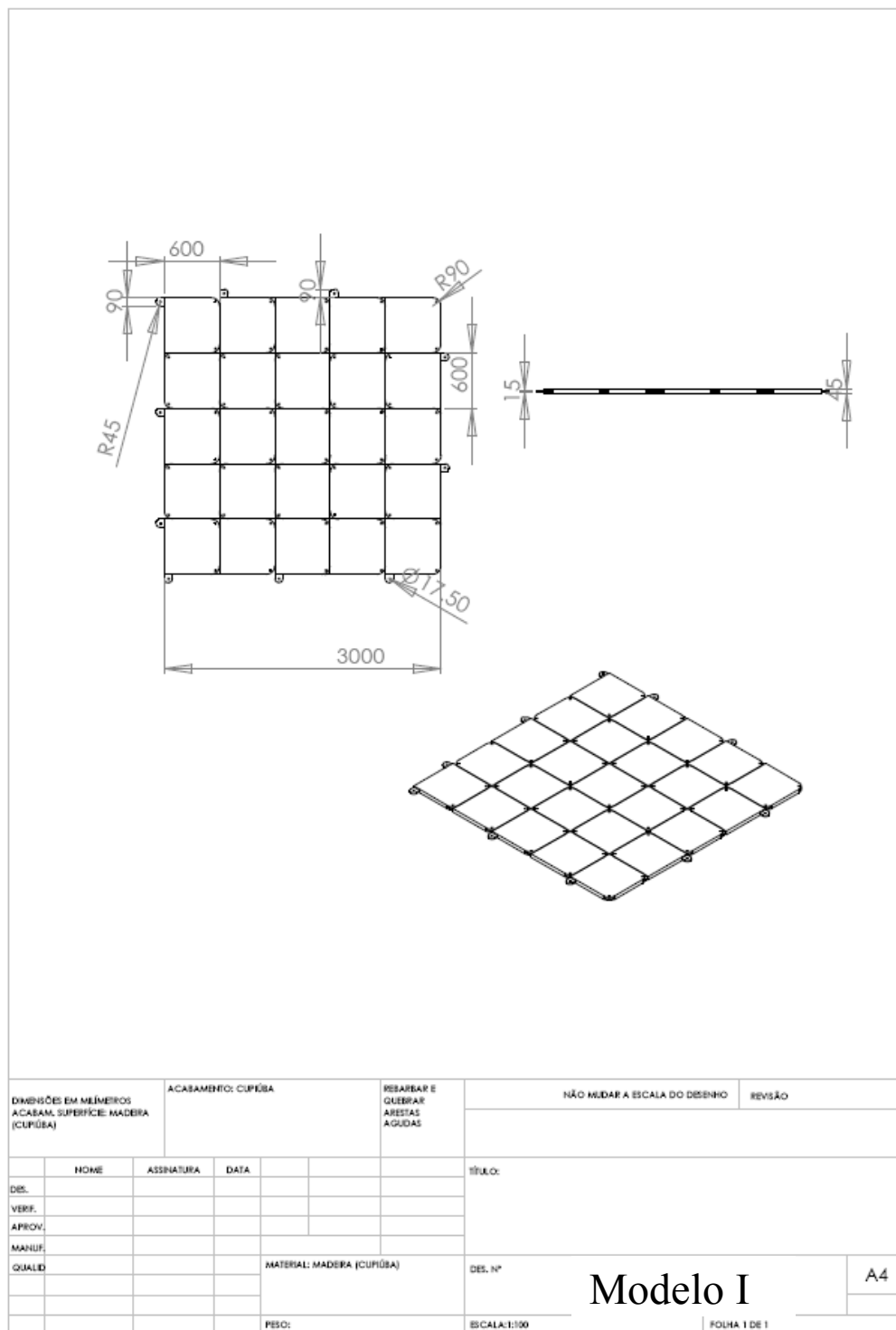
ZHAO, M. L.; GUAN, F. L.; HOU, G. Y. **Deployment analysis of deployable truss structures with flexible deformation.** Space Structures Research Center, Department of Civil Engineering, Zhejiang University. China, 2008.

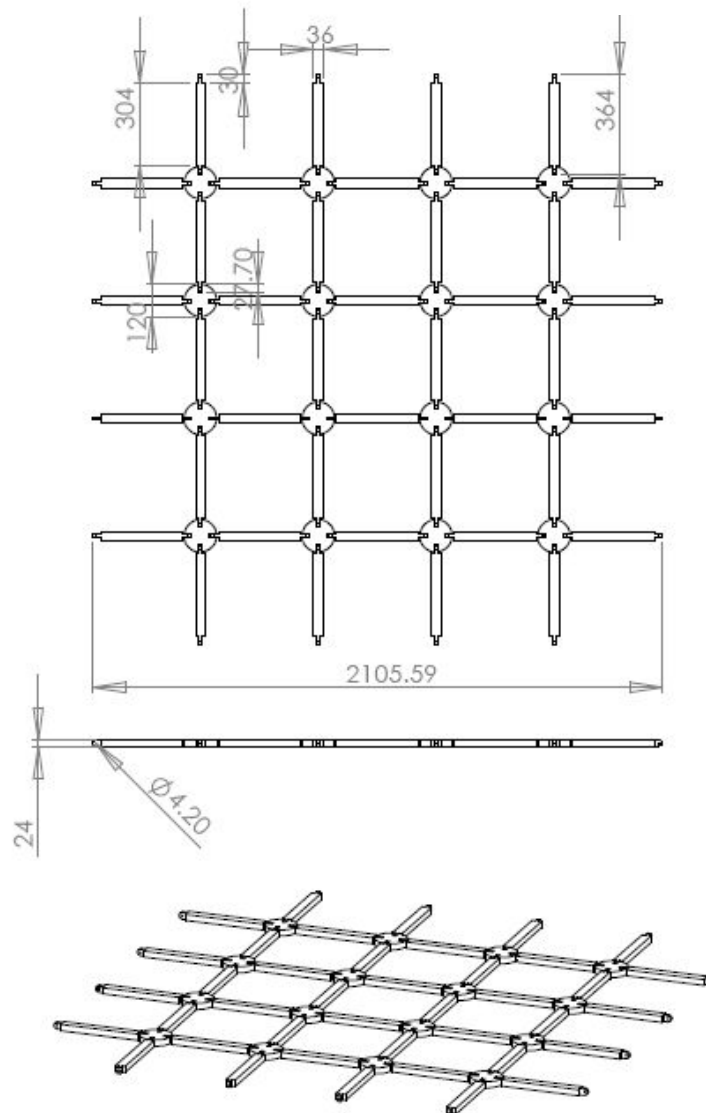
ZUK, W.; CLARK, R. **Kinetic Architecture.** Van Nostrand Reinhold Press. New York, 1970.

ZUK, W. **New Technologies: New Architecture.** Van Nostrand Reinhold Press. New York, 1995.

Apêndice

Apêndice A – Dimensões dos Modelos





DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: MADEIRA CUPIÓBA		ACABAMENTO: MADEIRA (CUPIÓBA)		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
						TÍTULO:			
						DES. Nº			
						Modelo II			
						A4			
						FOLHA 1 DE 1			

Anexo I

Características da madeira de Cupiúba

Fonte: IPT, 2003

Cupiúba

Goupia glabra Aubl., Goupiaceae

Outros Nomes Populares: cachaceiro, copiúba, copiúva, cupiúba-rosa, peniqueiro, peroba-do-norte, peroba-fedida, vinagreiro.

Ocorrência

Brasil: Amazônia. **Outros países:** Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Suriname, Venezuela

Características Gerais

Sensoriais: cerne e alburno indistintos pela cor, castanho-avermelhado; superfície sem brilho; cheiro perceptível, desagradável, gosto imperceptível; densidade alta; grã irregular; textura média.

Descrição Anatômica Macroscópica: Parênquima Axial: visível apenas sob lente, apotraqueal difuso em agregados. Raios: visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial, finos, poucos a numerosos. Vasos: visíveis a olho nu, médios, poucos, porosidade difusa; solitários; obstruídos por óleo-resina. Camadas de Crescimento: indistintas.

Durabilidade Natural e Tratabilidade Química

Durabilidade Natural: a madeira de cedrorana apresenta durabilidade moderada ao ataque de fungos apodrecedores e cupins. Estudo realizado pela SUDAM/IPT(1981) verificou que a durabilidade desta madeira é inferior a 12 anos de serviço em contato com o solo.

Tratabilidade: o cerne e o alburno apresentam moderada permeabilidade às soluções preservativas tanto oleossolúvel (creosoto) como hidrossolúvel (CCA). A retenção de preservativo oleossolúvel é de 200 kg/m³ a 300 kg/m³. Já Brito Neto et al. (1984) reconheceram o cerne de cupiúba como de baixa permeabilidade ao tratamento com óleo creosoto.

Características de Processamento

Trabalhabilidade: a madeira de cupiúba é fácil de trabalhar com ferramentas manuais ou com máquinas. É fácil de serrar, aplainar, torneiar, colar e parafusar. O uso de pregos sem furação pode provocar rachaduras. Recebe bom acabamento. Aceita, bem a colagem mas não é adequada para a fabricação de compensados, por apresentar rachaduras na tora. Boa aceitação de tinta, verniz, emassamento e polimento. **Secagem:** a secagem ao ar é lenta, sem a ocorrência de sérios defeitos como rachaduras ou empenamentos. Na secagem em estufa apresenta ligeira incidência de defeitos. Programas de secagem são sugeridos por IBAMA (1997a) e Jankowsky (1990).

PROPRIEDADES FÍSICAS*

Densidade de massa (p):

aparente a 15% de umidade (p_{15}): 870kg/m³*

madeira verde (p_{verde}): 1 130kg/m³**

básica ($p_{básica}$): 710kg/m³**

Contração*: radial: 4,8%; tangencial: 9,1%; volumétrica: 16,1%

PROPRIEDADES MECÂNICAS*

Flexão - Resistência (fM)

Madeira verde (MPa): 96,7

Madeira a 12 % de umidade (MPa): 122,1

Módulo de Elasticidade - madeira verde (MPa): 13 690

Limite de Proporcionalidade - madeira verde (MPa): 46,5

Compressão Paralela às Fibras - Resistência (fc0)

Madeira Verde (MPa): 50,8

Madeira a 12% de umidade (MPa): 67,2

Limite de Proporcionalidade - madeira verde (MPa): 32,4

Módulo de Elasticidade - madeira verde (Mpa): 17 142

Coefficiente de Influência de Umidade (%): 3,8

OUTRAS PROPRIEDADES MECÂNICAS*

Resistência ao Impacto na Flexão - madeira a 15% (choque)

Trabalho Absorvido (J): 29,5

Dureza Janka - madeira verde (N): 6 266

Tração Normal às Fibras - madeira verde (MPa): 6,8

Fendilhamento - madeira verde (MPa): 0,9

USOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Pesada externa: postes, estruturas de pontes, postes, mourões, cruzetas, esteios, pranchas de contenção de valas. Pesada interna: vigas e caibros.

OUTROS USOS

Cabos de ferramentas, carrocerias e vagões de trem, construção naval, embalagens pesadas.

OBSERVAÇÕES

Madeira com forte cheiro desagradável que tende a desaparecer com o tempo, voltando quando umedecida.

(*) Resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).
Fonte, IPT, 1989a.

(**) Resultados obtidos de acordo com a Norma COPANT Fonte, IBAMA, 1997a.