

### 4.2.3. As construções em painéis industrializados de madeira

As construções em painéis representam a evolução dos princípios de pré-fabricação aplicados à edificação em madeira, sinalizando para uma tendência que se intensifica nos países desenvolvidos: a industrialização da construção.

Sua viabilidade foi possível graças à evolução dos entramados de madeira, de forma que, segundo BITTENCOURT (1995), estes possuem o mesmo princípio do sistema *plattform frame*, mas diferenciando-se basicamente pela maior pré-fabricação dos componentes.

De acordo com GOETZ et al.(1983), ainda em 1931, o arquiteto Walter Gropius desenvolveu um sistema de construção pré-fabricada com grandes elementos, feitos de madeira, alumínio e chapas de cimento-amianto, sendo esta tecnologia aperfeiçoada na década de 1940 nos EUA com o nome de *Packaged House System* ou Sistema de Casa em Pacote. A repercussão foi grande, de forma que, segundo KOHANE (2006), no final da Segunda Guerra Mundial, havia cerca de 200.000 casas pré-fabricadas espalhadas pelos Estados Unidos. Este sistema pioneiro teve um papel primordial no desenvolvimento da construção em painéis, e seu princípio básico se mantém até hoje (Figura 68).



Figura 68 – Perspectiva de habitação executada nos anos 1943-1945 com o *Packaged House System*. Fonte: CRIT (2007).

Atualmente, este setor da construção oferece painéis de pequenas e grandes dimensões, totalmente pré-fabricados e prontos para montagem na obra. Segundo BITTENCOURT (1995), os painéis fabricados podem ser os “semifechados” (entramado + fechamento interior ou exterior) ou “fechados” (entramado + fechamento interior ou exterior + isolamento), sendo bastante executados na Europa, principalmente na França.

A França, de acordo com INO (1992), possui um detalhado sistema de classificação da construção em painéis, conforme a Tabela 13:

<b>TABELA 13 – Classificação da construção em painéis na França.</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
<b>Painéis estreitos</b>	- painéis pré-fabricados com largura menor que 2,40m, estruturados por montantes, recebendo amarração horizontal na base e no topo. Podem ser de altura simples ou altura dupla (edificação térrea ou sobrado)
<b>Painéis largos</b>	- com largura maior, têm fabricação específica para cada projeto. O tamanho dos painéis é normalmente limitado pelo peso e pela dificuldade de transporte.
<b>Módulos tridimensionais</b>	- unidades pré-fabricadas com pelo menos três faces ( piso, paredes e teto ou piso superior), com limitações devidas ao transporte e montagem.

*Fonte: a partir de INO (1992).*

As Figuras 69, 70 e 71 apresentam aspectos da industrialização dos painéis portantes de madeira na França, e sua aplicação em edificações.



Figura 69 – Fabricação de painéis na França. Fonte: POBI (2007).



Figura 70 – Montagem de painéis nas obras. Fonte: IDEESMAISON (2007).



Figura 71 – Edificações francesas com painéis de madeira. Fonte: POBI (2007).

Atualmente as técnicas construtivas em painéis na Europa estão valorizadas pela adoção das casas passivas ou *passivhaus*, onde as soluções construtivas sustentáveis dispensam sistemas de aquecimento e esfriamento. De olho neste mercado, os fabricantes de painéis já oferecem componentes com excelente isolamento tanto ao frio quanto ao calor (Figura 72).

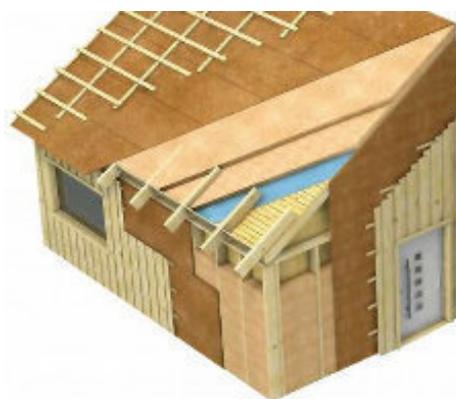
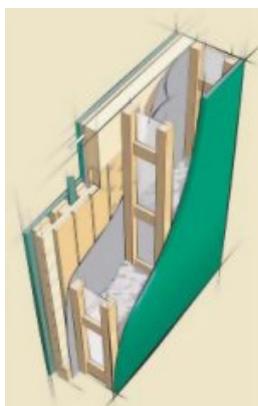


Figura 72 – Detalhe de painel especial e exemplo de *passivhaus*. Fonte: MAISON (2007).

#### 4.2.4. As soluções estruturais de coberturas e *halls*

A infinidade de soluções construtivas em madeira presentes na Europa, América do Norte e Japão, induzem a classificações genéricas destas soluções, de forma que os atores do projeto e da obra em madeira possam assimilar com mais facilidade as tecnologias disponíveis e fazer a sua opção. Neste sentido, GOETZ et al.(1983) propõe identificar as várias possibilidades estruturais em madeira para coberturas e *halls* a partir do seu sistema estático, podendo ser resumido conforme segue:

• Vigas simples e contínuas
• Treliças
• Tesouras articuladas
• Pórticos
• Arcos
• Vigas suspensas
• Grelhas de vigas
• Estruturas plissadas
• Cascas e superfícies curvas
• Cúpulas geodésicas
• Estruturas especiais

*Fonte: a partir de GOETZ et al.(1983).*

A estrutura em madeira, por suas particularidades como a visibilidade dos detalhes e soluções construtivas, impõe que a opção por qualquer um dos sistemas estáticos citados seja referendada pelo resultado estético que se deseja, num trabalho conjunto entre arquiteto e engenheiro calculista.

A seguir são apresentados exemplos de soluções estruturais em madeira, onde se percebe que, ao contrário, por exemplo, das estruturas em concreto armado, qualquer elemento necessário ao esquema estático pretendido estará atuando como elemento marcante da estética arquitetônica.

As soluções estruturais com vigas biapoiadas ou contínuas são consideradas simplificadas, o que não diminui a sua capacidade de resposta às intenções arquitetônicas e estruturais. Além disso, a gama de produtos da madeira permite diferentes opções de vigamentos (Figuras 73 e 74).

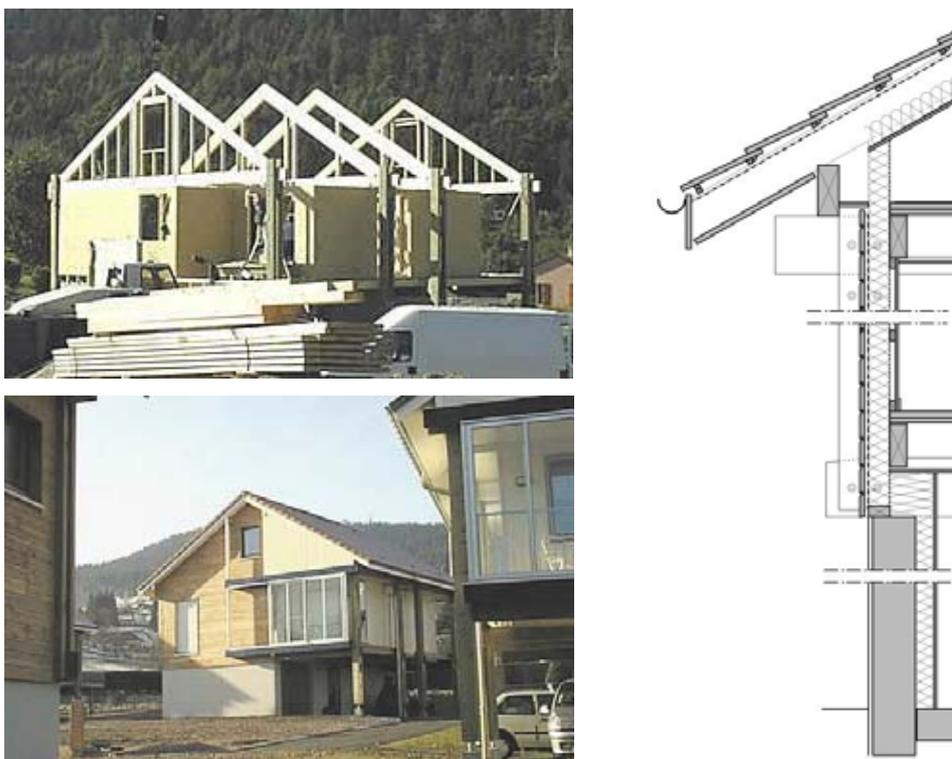


Figura 73 – Execução, obra acabada e detalhe construtivo de habitação com solução construtiva em vigas biapoiadas. Fonte: BOIS-CONSTRUCTION (2007).



Figura 74 – Vigas contínuas em MLC no novo aeroporto de Oslo, Noruega, e em escola na Finlândia. Fonte: FINNFOREST (2007).

Outra forma de utilização das vigas de madeira é a chamada viga tensionada ou estaiada, onde a sua rigidez é aumentada com o uso de cabos ou tirantes metálicos, resultando num melhor desempenho da peça. Trata-se de uma solução utilizada inclusive em obras de madeira nacionais (Figura 75).

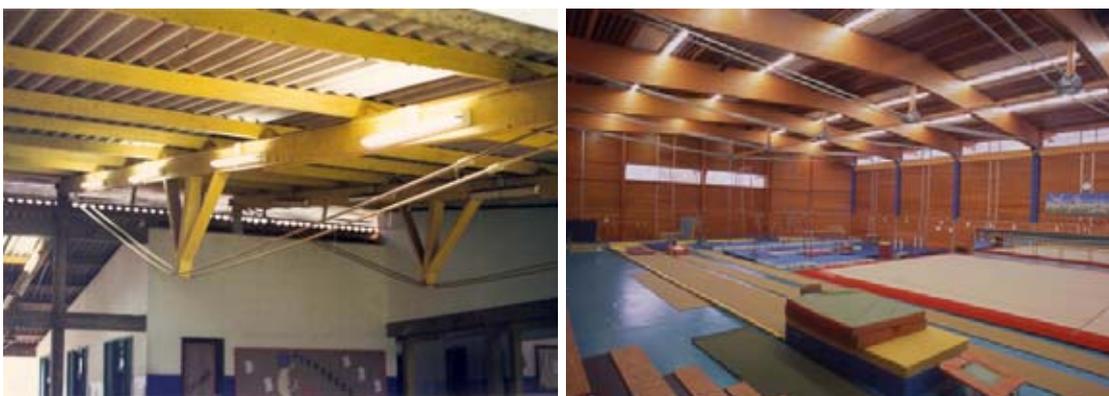
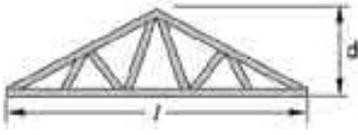


Figura 75 – Vigas tensionadas em escola de Rondônia (de mineradora francesa) e em ginásio na França. Fontes: MELLO (2001) e BOIS-CONSTRUCTION (2007).

Quanto às estruturas treliçadas, de acordo com FERNANDEZ-VILLEGA (1983), são consideradas formas estruturais onde as propriedades da madeira podem ser aproveitadas com mais vantagens, pois seus membros estão sujeitos essencialmente a esforços axiais, e em alguns casos a momentos fletores, onde a madeira resiste com eficiência.

Além disto, são consideradas de modo geral bastante econômicas, de forma que mesmo em países com abundância de recursos florestais, como Eua, Canadá e Rússia, são utilizadas com frequência. A competitividade deste sistema construtivo foi intensificada com o desenvolvimento das conexões metálicas, de forma que são estruturas relativamente fáceis de se fabricar e montar, além de possuírem uma grande variedade de configurações em função de requisitos técnicos e funcionais (FERNANDEZ-VILLEGA, 1983).

De acordo com sua forma, que é resultado da busca de eficiência estrutural além de atender a exigências funcionais e construtivas, a maior parte das treliças de madeira pode ser classificada genericamente conforme a Tabela 14:

TABELA 14 - Classificação das treliças de madeira.	
Tipo	Descrição
<p><b>Triangular (tesoura)</b></p> 	<p>- forma de treliça tradicionalmente utilizada no Brasil, de modo geral vence vãos de 6 a 30m e pode ser executada com peças de madeira simples, duplas ou triplas.</p>
<p><b>Plana (banzos paralelos)</b></p> 	<p>- considerada estruturalmente a menos eficiente, pode ser vantajosa para suporte de pisos e grandes vãos; indicada para vãos entre 6 e 30m, substitui as vigas maciças.</p>
<p><b>Bowstring (banzo superior arqueado)</b></p> 	<p>- para cargas distribuídas é mais eficiente, devido ao banzo superior com mesmo desenho da linha de pressão correspondente (parábola); pode vencer vãos entre 20 e 50m.</p>

Fonte: a partir de FERNANDEZ-VILLEGA (1983) e CWTA (2007).

As treliças de madeira, especialmente as triangulares, estão disponíveis no mercado embasadas por um alto grau de industrialização, que as torna competitivas em relação a outras soluções estruturais (Figura 76).

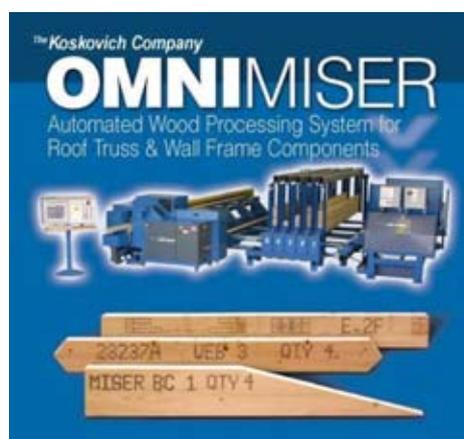


Figura 76 – Treliça pré-fabricada e máquina para produção de componentes com capacidade para 250 a 300 peças por hora. Fonte: WOODTRUSSSYSTEMS (2007).

A Figura 77 apresenta de forma sintética o processo de fabricação de uma treliça de madeira na América do Norte, onde o uso de madeira de baixa e média densidade permite um menor desgaste do maquinário.

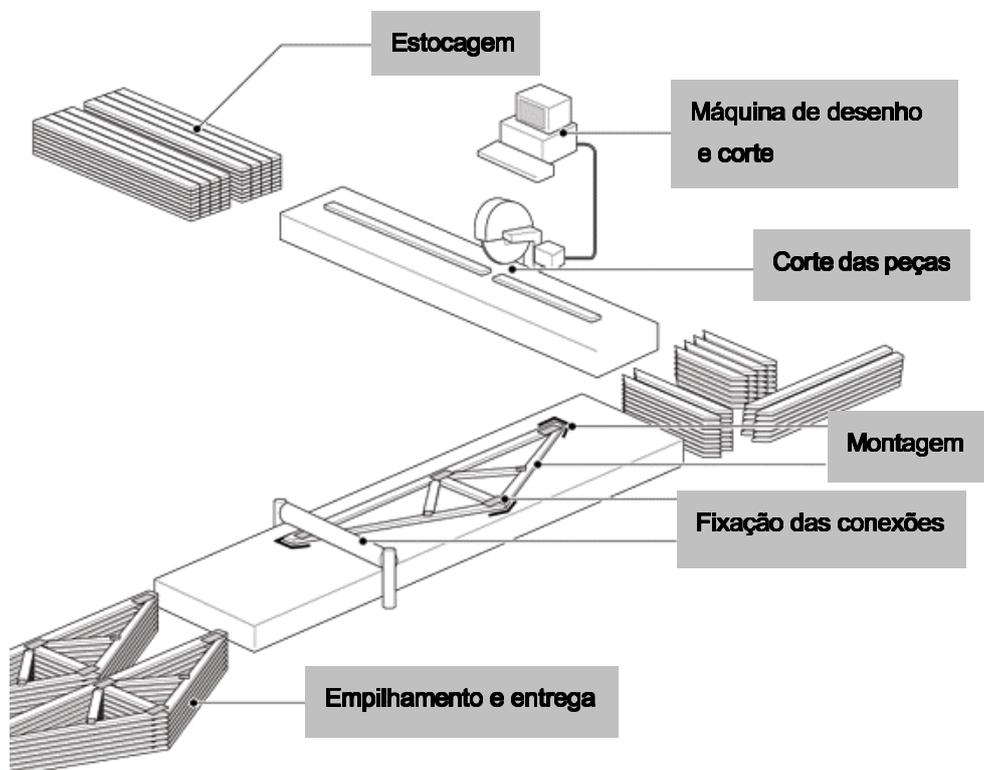


Figura 77 – Esquema de fabricação de treliças de madeira na América do Norte. Fonte: CWTA (2007).

Não obstante a sua aparente simplicidade, as estruturas treliçadas de madeira podem contribuir de forma bastante satisfatória para o resultado estético das edificações, sejam residenciais, comerciais, etc (Figuras 78 e 79).



Figura 78 – Treliças triangulares em edificações comercial e industrial. Fonte: CWTA (2007).



Figura 79 – Treliças planas de madeira em edificação do INCRA no Pará, e com diagonais metálicas no museu de Ballenberg, Suíça. Fonte: MELLO (1998-2002).

As treliças planas são excelentes opções estruturais para fixação de pisos e elementos horizontais, podendo vencer grandes vãos e sendo bastante competitivas em estruturas de pontes (Figura 80).



Figura 80 – Ponte estruturada em treliça plana de madeira com vão central de 54m e comprimento total de 108m, nos Alpes suíços. Fonte: MELLO (1998).

As tesouras articuladas apresentam como vantagem a execução rápida de grandes vãos com componentes menores, que se fixam nas articulações (Figura 81). De acordo com GOETZ et al.(1983), a forma de montagem e sua flexibilidade são essenciais para o seu dimensionamento, sendo também imprescindível considerar com atenção a ação dos ventos.



Figura 81 – Exemplo de tesoura com três articulações em edifício agrícola, com passarela fixada na articulação central. Fonte: UNALAM (2006).

As estruturas em pórticos são intensamente empregadas em grandes edificações na Europa e na América do Norte, sendo predominantemente utilizadas peças de madeira laminada colada na sua confecção, embora também possam ser observadas soluções treliçadas. Trata-se de uma solução estrutural de grande impacto visual sobre a concepção arquitetônica (Figuras 82 e 83).



Figura 82 – Exemplos de estruturas em pórticos. Fonte: TIMBERWELD (2006).

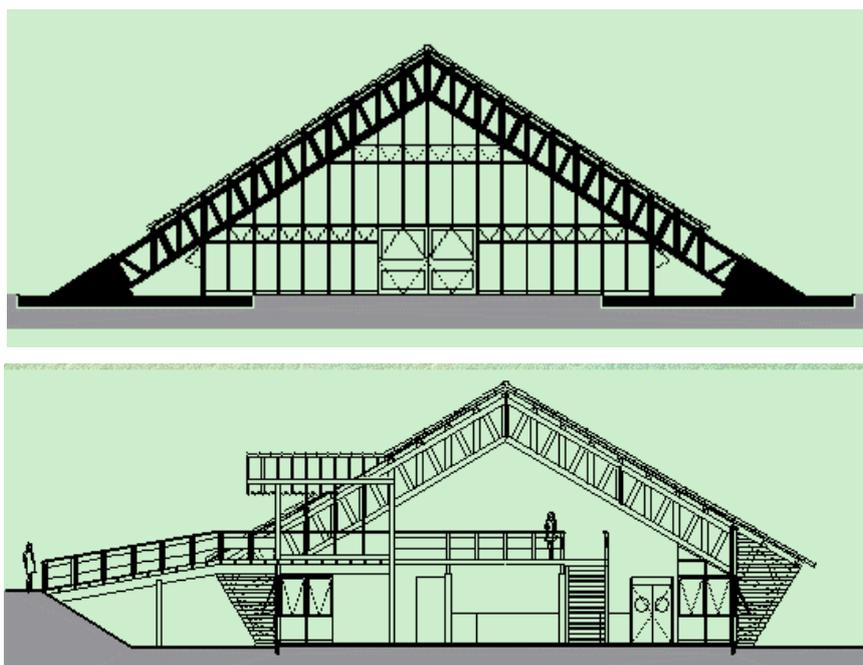


Figura 83 – Pórticos treliçados concebidos para o projeto da nova sede do Jardim Botânico de Brasília (DF). Fonte: MELLO (2003).

Segundo GOETZ et al.(1983), os pórticos podem ter duas ou três articulações, sendo que quando têm duas são estruturas hiperestáticas, e quando têm três são estruturas isostáticas. Construtivamente, os pórticos com duas articulações têm peça central única, o que, em função do vão a ser vencido pode significar uma peça de grandes dimensões e peso. Isto explica porque os pórticos com três articulações são mais utilizados (Figura 84).



Figura 84 – Estruturas em pórticos com três articulações em obras em Portugal. Fonte: JULAR (2004).

Os arcos em madeira, assim como os pórticos, podem ter duas ou três articulações, também sendo considerados hiperestáticos para o primeiro caso e isostáticos para o segundo. A sua forma assemelhada à parábola lhe confere excelente desempenho particularmente para grandes vãos (Figura 85).



Figura 85 – Ponte para pedestre com estrutura em arcos de madeira laminada colada na Suíça. Fonte: HSB (2006).

Nos países com grande tradição na construção em madeira, as estruturas em arco feito de madeira laminada colada são bastante empregadas, com resultado estético de grande impacto (Figura 86).



Figura 86 – Capela com arcos em madeira laminada colada, na Finlândia. Fonte: FINNFOREST (2006).

As estruturas em arcos também podem ser confeccionadas com madeira maciça, aproveitando a grande aptidão do material, pois a sua composição de fibras lhe confere aumento da rigidez no arqueamento (Figura 87).



Figura 87 – Pontes em arco (acima) e arco treliçado (abaixo) executadas com peças de madeira maciça, em Goiânia (GO) e Brasília (DF). Fonte: MELLO (1998).

Os arcos treliçados são estruturas economicamente bastante competitivas e com aptidão para vencer grandes vãos (Figura 88).



Figura 88 – Cobertura em arco treliçado para Hall de esportes. Fonte: CWC (2007).

As vigas suspensas, de acordo com GOETZ et al.(1983), trabalham como arcos invertidos, ou seja, respondendo a solicitações de tração. A verificação de estabilidade, que é determinante para os arcos comprimidos, aqui não é essencial, devendo-se, no entanto observar cuidadosamente a ação do vento no sistema estrutural (Figura 89).

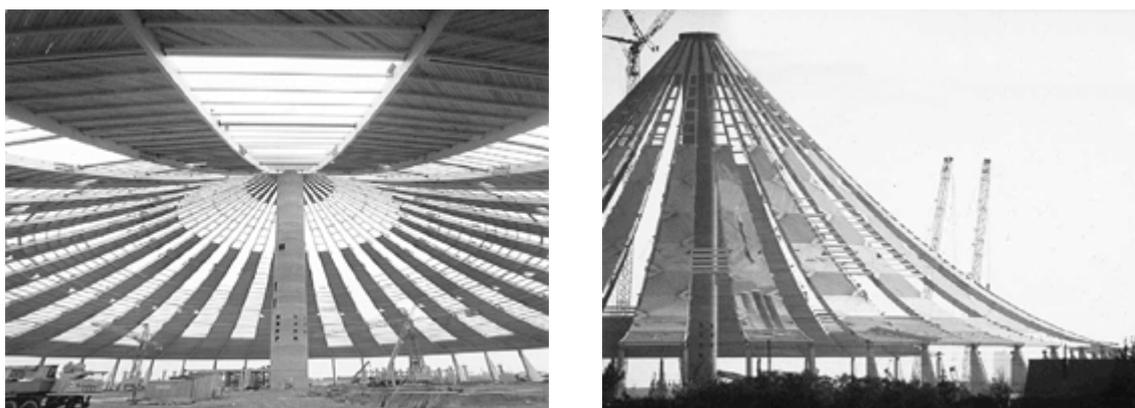


Figura 89 – Edificação com cobertura em vigas suspensas com diâmetro de 170m em Viena, Áustria. Fonte: NATTERER-BCN (2007).

As grelhas de vigas são sistemas planos compostos de vigas, normalmente maciças, que se cruzam em ângulos de 45°,60° ou 90°, e são rigidamente fixadas, o que torna o sistema hiperestático. Também podem ser treliçadas e são empregadas em residências e edificações diversas (Figura 90).



Figura 90 – Grelhas em atelier de carpintaria na França e como apoio de caixa d'água em escritório do IBAMA em Santa Catarina. Fontes: CRIT (2005) e MELLO (1999).

As estruturas plissadas são definidas a partir do princípio onde um módulo inicial é repetido ou transformado por rotação, translação, superposição ou duplicação, gerando estruturas paralelas com trava de estabilização, estruturas radiais ou em forma de arcos ou pórticos (Figura 91).



Figura 91 – Estruturas plissadas radiais, em arcos e pórticos. Fonte: CRIT (2005).

A orientação das estruturas plissadas e sua geometria permitem construir formas espaciais abstratas e figurativas, seguindo a mesma técnica do origami, conforme ilustrado nas Figuras 92 e 93.

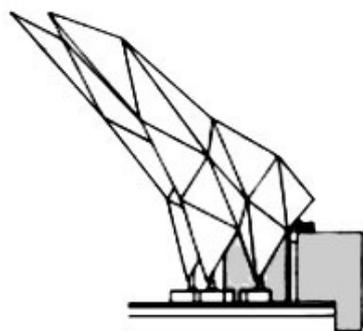


Figura 92 – Estruturas plissadas em granja francesa e no Pavilhão de Música de Montreal, Canadá. Fonte: CRIT (2005).



Figura 93 – Aduana na Áustria com estruturas plissadas. Fonte: CRIT (2005).

As superfícies curvas podem ser executadas com soluções de chapas armadas sobre vigas, estruturas treliçadas, pórticos e estruturas reticuladas em arcos, sendo de simples curvatura ou dupla curvatura (Figuras 94 e 95).



Figura 94 – Superfície à simples curvatura em galpão para estaleiro em Morges, Suíça. Fonte: MELLO (1998).



Figura 95 – Superfícies à dupla curvatura em creche em Liechtenstein e na Escola Politécnica Federal de Lausanne, Suíça (à direita). Fonte: MELLO (1998).

As cascas de madeira podem ser executadas com nervuras, em curvaturas invertidas, e com formas diversas como ovóides, elípticas, cúpulas regulares, etc, num variado repertório de soluções (Figuras 96, 97 e 98).



Figura 96 – Casca de cobertura de uma piscina, que se apóia sobre três pontos no solo, com vãos de 58m entre os pontos, na França. Fonte: CRIT (2005).



Figura 97 – Casca em forma ovóide com estrutura em arcos compostos fixados em radier de concreto armado, na Bélgica. Fonte: CRIT (2005).



Figura 98 – Cúpula em auditório e casca invertida em anfiteatro, executadas em universidades na França e Alemanha. Fonte: CRIT (2005).

As estruturas de cúpulas geodésicas são dimensionadas a partir das forças de compressão e tração que atuam nas suas barras, sendo que a transmissão das cargas provoca esforços tangenciais e radiais (GOETZ et al., 1983).

São composições estruturais diferenciadas, e a aptidão da madeira para estes sistemas é responsável por um movimentado setor de construção de casas com cúpulas geodésicas, especialmente nos EUA (Figura 99).



Figura 99 – Seqüência de fabricação de casa com cúpula geodésica nos EUA, com execução de embasamento em concreto armado, armação em montantes de madeira, enrijecimento com chapas de compensado, execução de complementos, com vista interna mostrando mezanino, e a obra acabada. Fonte: HORTONDOME (2004).

As estruturas especiais de madeira são aqui apresentadas de forma livre, ou seja, sem nenhuma classificação quanto ao sistema estrutural proposto, pretendendo-se desta forma ilustrar as inesgotáveis possibilidades construtivas do material e de seus derivados.

A sua concepção e realização são resultado de grande investimento em desenvolvimento tecnológico na área de construção em madeira nos países do Hemisfério Norte, e servem de exemplo da posição estratégica que pode ocupar a madeira em nosso setor da construção civil.

Do ponto de vista da concepção arquitetônica, são exemplos de perfeita integração entre a proposição estética e tecnológica, que caracterizam as obras referenciais em madeira (Figuras 100, 101, 102, 103 e 104).



Figura 100 – Edificações em madeira na Finlândia (igreja), Suíça (edifício público) e França (habitação coletiva). Fontes: ARCHIMAGAZINE (2004), HSB (2006) e BOIS-CONSTRUCTION (2007).

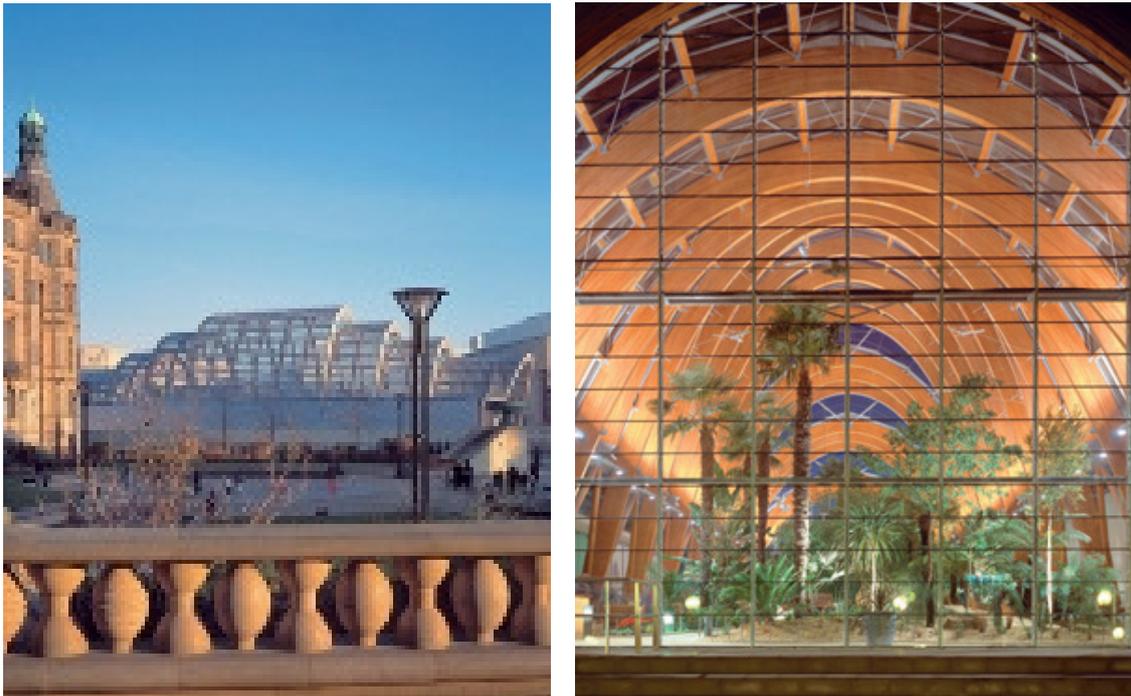


Figura 101 – Jardim botânico em Sheffield, Inglaterra. Fonte: FINNFOREST (2002).

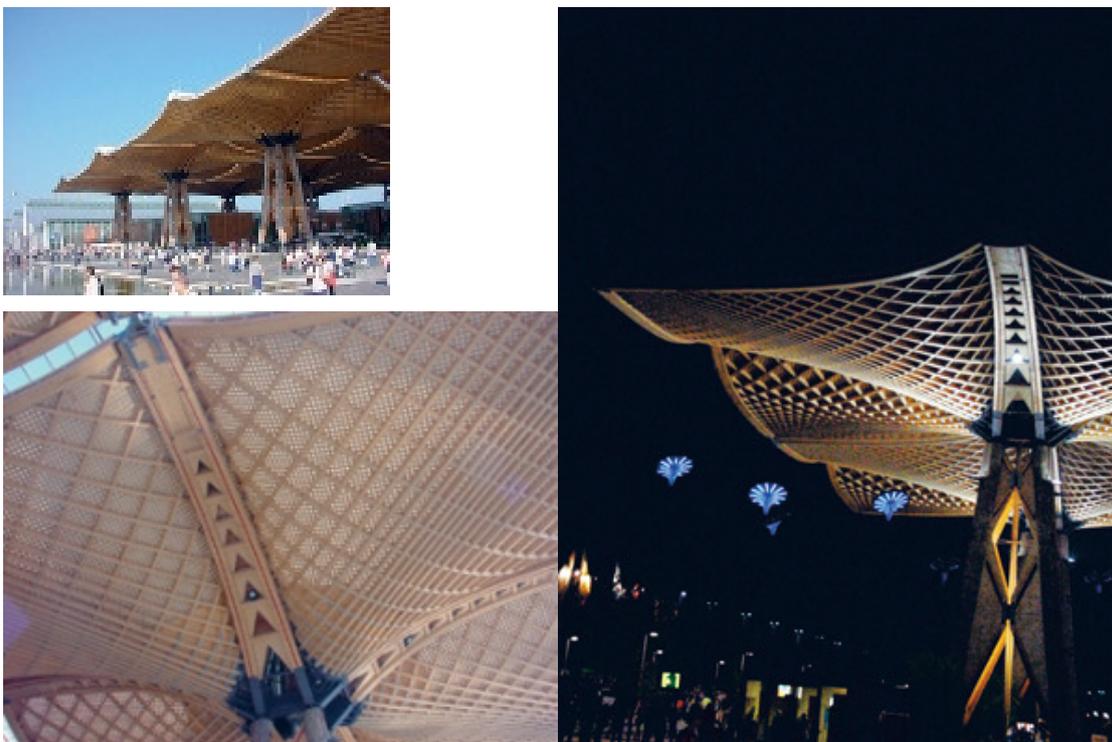


Figura 102 – Pavilhão de Exposições de Hannover, Alemanha. Fonte: FINNFOREST (2002).



Figura 103 – Igreja na Itália, projeto do arquiteto Renzo Piano. Fonte: FINNFOREST (2002).



Figura 104 – Museu em Copenhagen, Dinamarca, projeto do arquiteto Daniel Libeskind, e edifício comercial na Alemanha. Fonte: FINNFOREST (2002).

#### 4.2.5. As cidades de madeira (*wooden towns*)

Uma forma bastante particular de manifestação da tecnologia construtiva contemporânea em madeira é a das cidades de madeira ou *wooden towns*, que se caracteriza por pequenas cidades planejadas onde todas as edificações são feitas com o material (Figura 105).



Figura 105 – Cidade de madeira em Oulu, na Finlândia. Fonte: PUUINFO (2007).

A concepção de cidades de madeira remete a tempos antigos, onde o material estava disponível e não havia outras opções construtivas, como no caso dos burgos na Europa e das cidades criadas com a colonização da região oeste dos Estados Unidos (Figura 106).



Figura 106 – Cidade de madeira do final do século 18 no Estado de Washington, EUA. Fonte: WSULIBS (2007).

No Brasil houve experiências pioneiras, como a cidade de madeira construída pelo americano Henry Ford na Amazônia, com o intuito de estabelecer uma base na floresta para a exploração da borracha.

Esta cidade, chamada de Fordlândia, foi transferida para a localidade de Belterra, no oeste do Pará, onde se encontra até hoje. A presença da concepção americana das construções em madeira pode ser observada nos seus principais edifícios e residências (Figura 107).



Figura 107 – Igreja, prefeitura e escola da cidade de madeira de Belterra (antiga Fordlândia), construída às margens do rio Tapajós, no oeste do Estado do Pará, pelo magnata Henry Ford, para instalação de uma base de exploração de borracha. Fonte: MELLO (2003).

Outras experiências de construção de pequenas cidades de madeira no sul do Brasil e para instalação de operários de grandes empreendimentos como hidrelétricas se sucederam pelo país. Um marco histórico é a Cidade Livre, hoje Núcleo Bandeirante, que foi criada para abrigar os operários que vieram construir a nova capital do Brasil, Brasília.

Nos primórdios da cidade, todas as suas edificações eram de tábuas e possuíam até dois pavimentos (Figura 108). Com o propósito de prestigiar os construtores da nova capital, o então presidente da república Juscelino Kubitschek mandou erguer a residência oficial com a mesma tecnologia empregada nas habitações da Cidade Livre (Figura 109).



Figura 108 – A Cidade Livre, hoje Núcleo Bandeirante, era totalmente construída em madeira, que foi substituída por alvenaria. Fonte: BANDEIRANTE (2007).

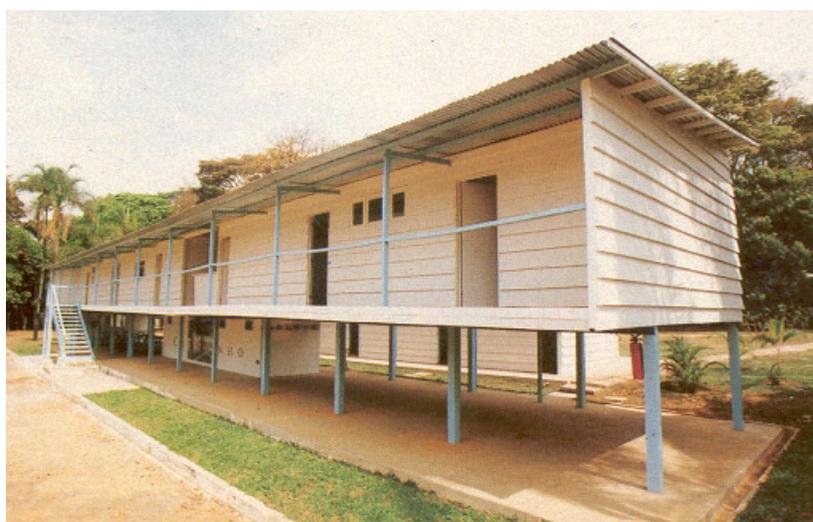


Figura 109 – Palácio do Catetinho, residência oficial do presidente da República no início da construção de Brasília. Fonte: BANDEIRANTE (2007).