

CAPÍTULO III

3. As propriedades da madeira

Este capítulo aborda as propriedades físicas, mecânicas e “ambientais” da madeira, descrevendo o seu comportamento como material de origem biológica de grande variabilidade, e sua performance devida a diferentes solicitações. A questão da sustentabilidade dos materiais ou do impacto do seu uso sobre os recursos naturais e a consequência para o meio ambiente é analisada, revelando o desempenho extremamente favorável da madeira frente a esta questão tão crucial no contexto atual.

3.1. Caracterização tecnológica da madeira

Como produto de um processo orgânico, a madeira é um material heterogêneo e complexo, o que pode ser explicado pela quantidade, disposição, orientação e composição química de seus elementos anatômicos. Estes por sua vez são responsáveis pelas características da madeira, e, portanto, influenciados por vários fatores tais como condições de temperatura, aspectos de composição e umidade do solo onde a árvore está localizada, o que explica como suas propriedades físicas e mecânicas diferem entre espécies, entre árvores da mesma espécie e dentro de uma mesma árvore.

De acordo com MELO (2004), esta variabilidade pode ser medida através de um sistema de amostragem aleatória e representativa, com um erro mínimo de estimativa, realizando-se ensaios em corpos-de-prova isentos de defeitos tais como nós, fibras inclinadas, rachaduras, empenamentos, etc.

A caracterização tecnológica é o instrumento essencial para se entender o comportamento da madeira sob diferentes solicitações, determinar as suas propriedades e possíveis utilizações, inclusive para a construção civil.

Por caracterização tecnológica, compreende-se a determinação das seguintes características da madeira:

<ul style="list-style-type: none">• Caracteres gerais (cor, cheiro, grã, textura)
<ul style="list-style-type: none">• Teor de umidade
<ul style="list-style-type: none">• Densidade
<ul style="list-style-type: none">• Estabilidade dimensional
<ul style="list-style-type: none">• Comportamento térmico
<ul style="list-style-type: none">• Comportamento acústico
<ul style="list-style-type: none">• Condutibilidade elétrica
<ul style="list-style-type: none">• Comportamento mecânico
<ul style="list-style-type: none">• Comportamento à secagem
<ul style="list-style-type: none">• Durabilidade/preservação
<ul style="list-style-type: none">• Trabalhabilidade

Fonte: a partir de IBDF (1981) e Melo (2004).

A determinação de suas propriedades também é de grande importância porque estas podem influenciar significativamente no desempenho e resistência da madeira com uso estrutural.

O conhecimento das propriedades da madeira contribui para atenuar uma prática danosa e bastante difundida pelo setor madeireiro brasileiro, que é a extração seletiva. No caso da Amazônia, segundo maior produtor mundial de madeira tropical (REMADE, 2006), distribuída em cerca de 4.000 espécies arbóreas, um dos fatores limitantes para a utilização das espécies ali existentes é a falta de dados concretos sobre suas propriedades.

A determinação destas propriedades e a constatação de características desejáveis para o mercado são requisitos básicos para qualquer ação que vise a introdução de novas espécies, favorecendo a redução da exploração concentrada em poucas espécies, e contribuindo para um aumento no volume adicional de matéria prima no mercado, o que proporcionará maior sustentabilidade da exploração madeireira na Região Amazônica.

3.1.1. Propriedades físicas

As propriedades físicas da madeira englobam as características inerentes da espécie tais como: caracteres gerais (cor, cheiro, textura, grã e figura, etc), teor de umidade, densidade, estabilidade dimensional, propriedades térmicas e acústicas e condutibilidade elétrica.

De acordo com a descrição macroscópica da madeira, ela é definida como um material de natureza anisotrópica, ou seja, que apresenta reações diferentes segundo a direção considerada. Conforme ilustrado na Figura 36, as suas três direções principais são perpendiculares entre si e coincidem com o comprimento da árvore (longitudinal), em direção ao centro da árvore (radial) e tangente aos seus anéis de crescimento (tangencial).

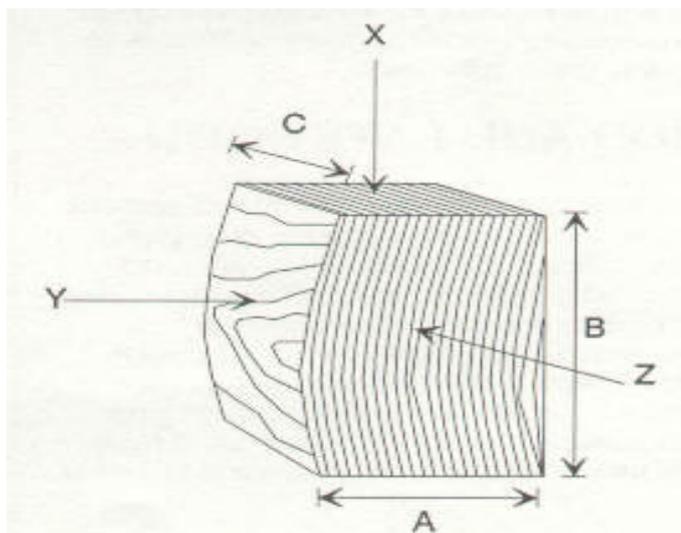


Figura 36 – Direções principais da madeira. Fonte: SHAW (2007).

As letras da figura representam:

A: eixo radial.

B: eixo tangencial.

C: eixo longitudinal.

X: superfície radial.

Y: superfície tangencial.

Z: superfície transversal ou oblíqua.

A anisotropia da madeira é determinante para se estabelecer algumas de suas propriedades físicas, como a estabilidade dimensional, propriedades térmicas e acústicas e condutibilidade térmica.

As propriedades físicas são estabelecidas através de avaliação qualitativa e quantitativa e manipulação de amostras de madeira, sendo submetidas a procedimentos de secagem, saturação e análise microscópica para sua descrição anatômica.

3.1.1.1. Caracteres gerais

A determinação dos caracteres gerais da madeira, também chamados de características sensoriais (*sensory characteristics*, BRITANNICA, 2007), tais como cor, cheiro, grã, textura, figura, brilho, camadas de crescimento, distinção cerne/alburno e resistência ao corte transversal manual, é baseada em normas de âmbito nacional e internacional, possuindo um caráter macroscópico, ou seja, são características visíveis a olho nu.

Os caracteres gerais são dados relativamente importantes, tanto no reconhecimento da madeira, como também na determinação de sua melhor utilização. O tipo de grã aliado a outras informações como textura, cor e figura, podem dar boa idéia sobre a trabalhabilidade, aplicação e resposta da madeira aos tratamentos de acabamento (IBDF, 1981 p.21).

A cor é uma característica marcante verificada especialmente em madeiras tropicais pela grande variedade, contribuindo para identificação de espécies e representando um fator determinante para usos finais em mobiliário e acabamentos. A cor na madeira está sujeita a mudanças devidas à exposição a agentes atmosféricos, como as radiações infravermelha e ultravioleta.

De acordo com MELO (2002), a descrição da cor da madeira, anteriormente feita com a tabela de cores para solos de Munsell, atualmente segue o sistema CIE (Comissão Internacional de Iluminantes), onde a

sensação de cor é baseada na sua luminosidade, tonalidade e cromaticidade (intensidade da cor predominante).

O cheiro, presente em algumas espécies, está diretamente relacionado com alto teor de umidade e a presença de substâncias, que por sua volatilidade tendem a desaparecer com o passar do tempo. A sua importância decorre da possibilidade de algumas espécies exalarem odor desagradável, o que pode ser incompatível com usos como interiores de edificações e engradados para transporte de alimentos, por exemplo.

A grã representa a direção dos elementos estruturais da madeira, como fibras, vasos e traqueídes, em relação ao eixo de crescimento da árvore, e em relação à superfície exposta da madeira serrada (MELO, 2002). Vários fatores contribuem para a sua disposição quando do crescimento da árvore, sendo classificados em grã direita (reta) e grã irregular (Figura 37).

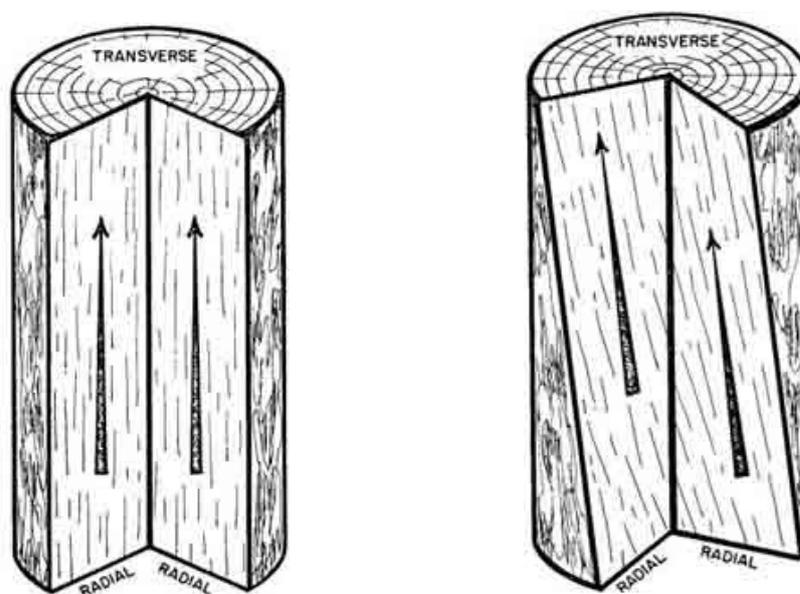


Figura 37 – Exemplos de grã direita e grã irregular (no caso, espiralada). Fonte: AUBURN (2006).

No caso da madeira serrada, de acordo com MELO (2002), a determinação da grã é essencial para a qualidade da madeira, sendo mais valorizada a peça com grã direita, pois o paralelismo dos elementos anatômicos em relação ao eixo da peça serrada resulta em peças com maior qualidade para

processamento, maior resistência estrutural e estabilidade dimensional para secagem (Figura 38).

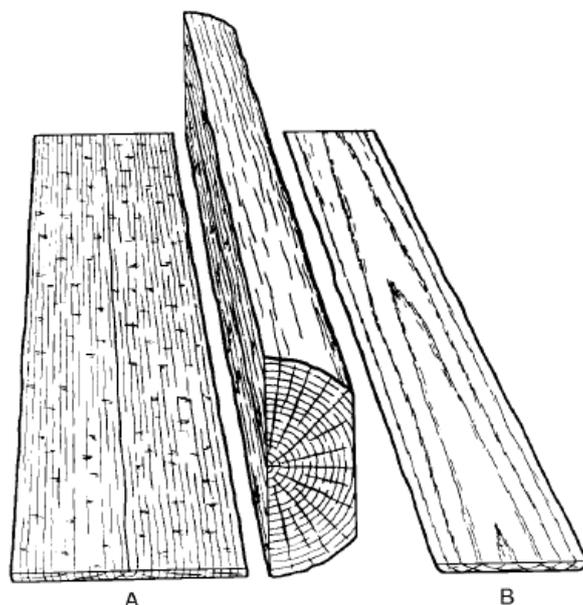


Figura 38 – Tábuas com corte radial (A) e tangencial (B) oriundas de tora com grã direita. Fonte: SHAW (2007).

A textura, muitas vezes confundida com a grã, descreve o grau de uniformidade da aparência de uma superfície de madeira, sendo classificada normalmente em fina, média e grossa.

Também pode ser descrita como o efeito produzido pelas dimensões, distribuição e abundância relativa dos elementos anatômicos estruturais da madeira (MELO, 2002). A textura é importante em função dos usos finais pretendidos, ou seja, para um bom acabamento e superfície mais polida, a madeira de textura fina é a mais indicada.

A figura (desenho) é uma característica bastante apreciada por escultores e artistas plásticos que trabalham com madeira, pois os desenhos formados a partir de anéis de crescimento, raios, cor, etc, podem ser explorados esteticamente com resultados inesperados e surpreendentes (Figura 39).

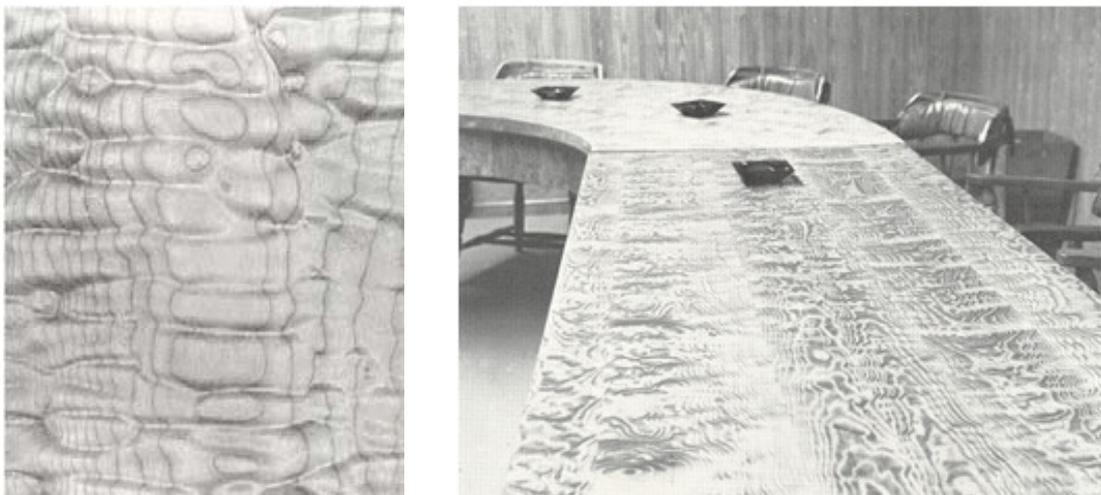


Figura 39 – Exemplos de figuras da madeira e seus usos. Fonte: AUBURN (2006).

O brilho é classificado em ausente, com brilho moderado ou com brilho acentuado. A distinção entre cerne e alburno é verificada pela diferença de cor, podendo ser distintos, indistintos e pouco distintos, sendo esta mesma classificação utilizada para observação dos anéis de crescimento (IBDF, 1997).

A resistência ao corte transversal manual é um dado subjetivo, onde após sofrer corte transversal às fibras, a madeira é classificada como dura, moderadamente dura e macia (IBDF, 1997).

3.1.1.2. Teor de umidade

A madeira é considerada um material semiporoso, e, portanto absorve umidade quando o ambiente está úmido e perde umidade quando o ambiente está seco. Seu comportamento higroscópico é uma das características mais importantes no estudo do comportamento da madeira, influenciando nas propriedades físicas e mecânicas, na secagem e preservação, na durabilidade natural, trabalhabilidade, acabamentos e produtos derivados (MELO, 2002).

A água é extremamente importante para o processo de crescimento e desenvolvimento da árvore, representando uma grande porção desta quando se encontra no estado verde. Há duas formas de água encontradas no interior da madeira, com as seguintes diferenciações:

ÁGUA LIVRE	ÁGUA DE IMPREGNAÇÃO
- contida nas cavidades das células	- encontrada nas paredes das células
- proveniente da seiva elaborada	- fixada por ligações químicas a nível molecular
- pode ser retirada com relativa facilidade por processos de secagem	- sua retirada requer grande consumo de energia e resulta em retração
- circula livremente sem afetar a madeira	- ocasiona alterações significativas nas propriedades da madeira

Fonte: MELO (2002).

De acordo com CALIL (1999), o teor de umidade correspondente ao mínimo de água livre e ao máximo de água de impregnação é denominado de Ponto de Saturação das Fibras (PSF), encontrando-se em torno de 25% para as madeiras brasileiras.

A madeira não sofre alterações até que se atinja o PSF, sendo que a partir deste ponto a perda de umidade resulta na retração, que é a redução das suas dimensões e aumento da sua resistência, alterando-se as suas propriedades e conseqüentemente o seu comportamento.

Logo após o corte e desdobro, a água da madeira começa a evaporar-se: o ar é geralmente ávido de umidade. A água livre evapora-se mais facilmente, até o ponto de saturação (25 a 30%), umidade limite, acima da qual existe água livre e abaixo somente água de impregnação. Não para aí a evaporação: prossegue mais lentamente até atingir umidade de equilíbrio com as condições do ambiente. Estas são instáveis e a umidade da madeira ao ar oscila em torno do valor 12%, sendo considerada com esta umidade como “seca ao ar” (HELLMEISTER, 1982 p.26-27).

A redução da umidade da madeira para atingir a situação de equilíbrio com as condições de temperatura e umidade relativa do ar do ambiente (como exemplo, para uma temperatura de 20 °C e umidade relativa do ar de 65%, tem-

se uma umidade de equilíbrio de 12%), pode ser acelerada em ambientes onde estes parâmetros são controlados, como as estufas de secagem.

A umidade de equilíbrio da madeira varia em função da região em que se encontra, o que representa uma variação considerável em países de dimensões continentais como o Brasil. Portanto, é muito importante o controle da umidade da madeira na região em que será utilizada, que pode ser feito por medidores portáteis, evitando-se problemas decorrentes de suas alterações dimensionais (Figura 40).



Figura 40 – Medidor de umidade portátil para madeira. Fonte: ETEC (2007).

3.1.1.3. Densidade

A densidade é considerada a propriedade física mais importante para a caracterização de madeiras destinadas à construção civil, e também para as indústrias de chapas e de móveis. De acordo com MELO (2002), a densidade é um parâmetro referencial de qualidade da madeira para determinados usos, e está diretamente relacionada a outras importantes características como resistência e teor de umidade.

Em termos do conceito físico, a densidade é definida como a quantidade de massa contida na unidade de volume, ou a relação entre peso e volume de uma amostra, sendo também chamada de peso específico.

No caso da madeira, como a massa e o volume englobam tanto a parte sólida (madeira) quanto a parte líquida (água) e vazios celulares e intercelulares, os valores de densidade variam em função das condições de umidade. Por exemplo, o volume da madeira é constante no estado verde, diminuindo quando a umidade de equilíbrio é menor que o PSF e tornando-se novamente constante no estado seco (CARTAGENA, 1982).

Em consequência destas variações, pode-se distinguir quatro densidades para uma mesma amostra de madeira, conforme segue:

TIPO	DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO
Densidade verde	Relação entre o peso verde e o volume verde	Estimativa de peso para transporte, peso próprio das estruturas e secagem
Densidade seca	Relação entre o peso seco e volume seco em estufa	Escolha de madeira para fins energéticos
Densidade básica	Relação entre o peso seco em estufa e o volume verde	Comparação entre propriedades de espécies e programas de secagem
Densidade aparente	Relação entre peso e volume a um teor de umidade	Peso próprio das estruturas e comparação entre espécies

Fonte: MELO (2002).

3.1.1.4. Estabilidade dimensional

A estabilidade dimensional é uma característica bastante peculiar da madeira, e apesar da sua grande importância para usos como mobiliário, esquadrias, pisos, forros e peças de acabamento, é muitas vezes ignorada, com consequências negativas para a qualidade dos produtos.

Resulta das variações do teor de umidade abaixo do Ponto de Saturação das Fibras, que produzem variações dimensionais na madeira, pois esta só é dimensionalmente estável quando seu teor de umidade está acima do PSF. A

estabilidade dimensional também é abordada com os termos retração e inchamento (HELLMEISTER, 1982) ou retratibilidade (CALIL, 1999).

Devido à sua natureza anisotrópica, apresenta comportamentos diferentes de acordo com a direção em relação às fibras e aos anéis de crescimento, ocorrendo em porcentagens diferentes nas direções tangencial, radial e longitudinal (CALIL, 1999) (Figura 41).

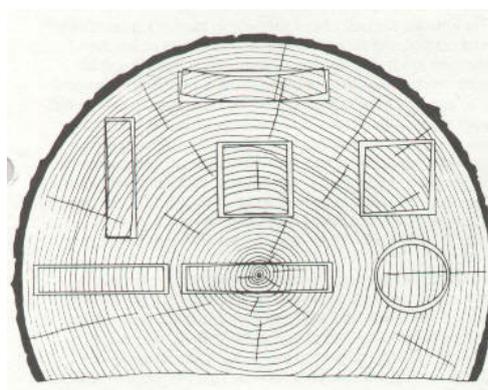


Figura 41 – Defeitos de secagem nas peças devidos à anisotropia da madeira.

Fonte: SHAW (2007).

De acordo com MELO (2002), a contração na direção tangencial (CT) é sempre maior que na direção radial (CR), sendo que na direção longitudinal (CL) ela é praticamente desprezível.

Outro parâmetro importante é a razão entre a contração tangencial e radial, também chamada de Índice de Retração Anisotrópica (IRA), sendo que quanto mais baixa esta razão, isto é, quanto mais próxima de um, melhor é a madeira em termos de estabilidade dimensional.

3.1.1.5. Comportamento térmico

As principais propriedades que determinam o comportamento térmico da madeira são a condutibilidade térmica, o coeficiente de dilatação térmica e o calor específico. De acordo com BITTENCOURT (1995), um dos principais argumentos favoráveis ao sistema construtivo em madeira, na literatura técnica, é o desempenho térmico de suas paredes.

A condutibilidade térmica é uma medida da rapidez com que flui a energia térmica ou calor através de um material submetido a um gradiente de temperatura (FERNANDEZ-VILLEGA, 1983). Vários fatores influenciam na condutibilidade térmica da madeira, como o teor de umidade, a densidade e a estrutura celular.

Desta forma, madeiras de baixa densidade e baixo teor de umidade são melhores isolantes térmicos, uma vez que nestas madeiras os vazios intercelulares são preenchidos com água e ar, que possuem menor condutibilidade térmica que o material lenhoso. A Tabela 6 apresenta os coeficientes de condutibilidade térmica de alguns materiais, onde se observa que a madeira é um dos materiais mais isolantes da construção civil.

TABELA 6 – Coeficientes de condutibilidade térmica de alguns materiais.	
Material	Condutibilidade λ em kcal/m.h.°C
Ar	0,0216
Água mineral	0,03
Madeira seca em estufa (densidade seca = 0,4 g/cm³)	0,03
Madeira seca em estufa (densidade seca = 0,8 g/cm³)	0,12
Gesso	0,30
Concreto	1,15 – 1,40
Aço	35,00 – 50,00
Cobre	350,00

Fonte: MELO (2002).

O coeficiente de dilatação térmica é definido como a variação nas dimensões da madeira em função da variação de temperatura. Para o dimensionamento de estruturas este coeficiente é desprezado e esta dilatação é compensada pela retração devida à perda de umidade (MELO, 2002).

O calor específico é a capacidade de um material de reter calor, dependendo, no caso da madeira, da temperatura e do teor de umidade. Trata-se de um parâmetro muito relevante para a madeira com fins energéticos.

3.1.1.6. Comportamento acústico

As propriedades acústicas mais importantes da madeira para a construção civil são o isolamento e a absorção acústica. O isolamento se refere à redução da intensidade do som quando passa através de uma barreira, e a absorção acústica significa a quantidade de som sobre uma superfície que é absorvida por ela (FERNANDEZ-VILLEGA, 1983).

A madeira é menos eficiente em bloquear a transmissão do som, mas combinando-se com outros materiais é possível se obter uma barreira acústica bastante eficiente. Isto ocorre porque a barreira acústica está diretamente relacionada ao peso do material, sendo a madeira mais leve do que os outros materiais estruturais (CARTAGENA, 1982).

Na edificação em madeira é bastante conveniente seguir recomendações de projeto que permitam aumentar o seu isolamento acústico.

Na habitação de madeira, os detalhes construtivos empregados para impedir as conseqüências da permeabilidade à água, normalmente são suficientes para garantir um bom isolamento acústico; principalmente quando esta se encontra localizada em área urbana com média intensidade sonora. Existindo necessidade de executar um sistema de proteção sonora para a habitação, deve-se ter como exigências a proteção contra ruídos aéreos, de impacto e de equipamentos (Bittencourt, 1995 p.141).

Quanto à absorção de som, ocorre o contrário, ou seja, um material com bom desempenho deve ser leve e poroso, o que explica o emprego maciço de madeira nos interiores de auditórios e salas de concerto (Figura 42).



Figura 42 – Sala de concertos do Sibellius Hall, com revestimentos de balcões, paredes, pisos e teto em madeira, em Lahti, Finlândia. Fonte: ARTEC-USA (2006).

3.1.1.7. Condutibilidade elétrica

A madeira é um excelente isolante de corrente elétrica quando está totalmente seca, sendo, portanto sua resistência elétrica muito sensível a alterações no seu teor de umidade. Quando está em estado úmido, torna-se um condutor de energia elétrica.

Esta relação direta entre resistência elétrica e teor de umidade possibilita estimar a umidade da madeira através de aparelhos elétricos que estabelecem relação entre a umidade e a quantidade de água na madeira (MELO, 2002).

A condutibilidade elétrica da madeira varia segundo suas três direções anatômicas, sendo que a condutibilidade paralela às fibras é o dobro da condutibilidade no sentido transversal (CARTAGENA, 1982).

3.1.2. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas da madeira são determinadas pelo seu comportamento quando é solicitada por forças externas, sendo divididas em propriedades de elasticidade e de resistência (CALIL, 1999).

As propriedades elásticas dizem respeito à capacidade do material de retornar à sua forma inicial uma vez retiradas as cargas aplicadas, sem apresentar deformações residuais. Apesar da madeira apresentar esta

deformação residual, é considerada como um material elástico para a maioria dos usos estruturais.

As propriedades de resistência da madeira estão diretamente relacionadas com a sua densidade, de forma que as madeiras mais densas são normalmente as mais resistentes, embora haja variações destas propriedades em madeiras com a mesma densidade (MELO, 2002).

Tanto as propriedades de elasticidade quanto as de resistência diferem de acordo com a direção das fibras em relação à direção de aplicação da força na madeira, devido ao seu caráter anisotrópico. Além disto, como suas propriedades não variam numa mesma direção, mas de uma direção para outra, a madeira possui um caráter ortotrópico.

A estrutura peculiar da madeira (...) explica sua natureza heterogênea e anisotrópica. De fato, as características físicas da madeira variam de um ponto a outro da mesma árvore, e suas características de resistência variam segundo a direção considerada. (...) a madeira pode ser idealizada como um material ortotrópico em que se distinguem três direções mecânicas ou estruturais, perpendiculares entre si, que coincidem com as direções longitudinal, radial e tangencial da árvore. (...) Portanto, com rigor, seria preciso considerar três conjuntos de propriedades mecânicas, um para cada eixo. Porém, as propriedades nos sentidos tangencial e radial não diferem significativamente, de forma que para efeito prático de concepção de estruturas de madeira, em geral basta distinguir entre as propriedades paralelas às fibras e as propriedades perpendiculares a estas (Fernandez-Villega, 1983 p.79).

Para a determinação das propriedades de resistência da madeira, são efetuados os ensaios de caracterização, sendo que devido ao alto custo para sua realização com peças em tamanho estrutural, são realizados com corpos-de-prova e os valores destes ensaios são utilizados para se determinar as tensões de cálculo de estruturas (MELO, 2002).

A tensão é definida como a força por unidade de área, sendo que na madeira existem três tipos de tensões a que pode estar submetida: tensão de compressão, tensão de tração, de flexão e cisalhamento (CARTAGENA, 1982).

A alteração dimensional resultante da atuação de esforços é chamada de deformação, e a relação entre esforço e deformação é proporcional dentro do chamado regime elástico; ou esta relação perde esta proporcionalidade, dentro do chamado regime plástico.

A Figura 43 apresenta o gráfico Tensão x Deformação, onde se visualiza o trecho onde a madeira se comporta como um material elástico, e o limite de proporcionalidade, após o qual a madeira caminha para a ruptura.

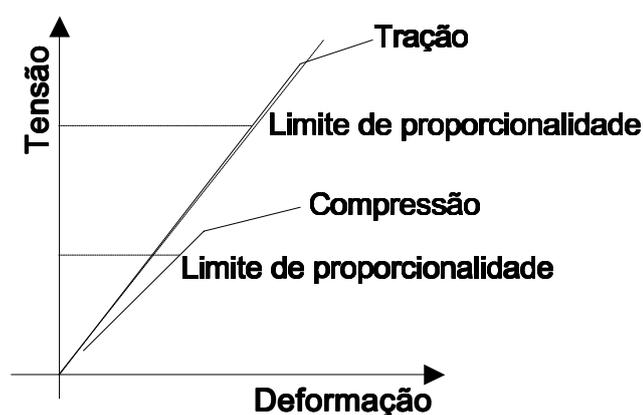


Figura 43 – Gráfico esquemático da resistência da madeira à tração e compressão paralela às fibras. Fonte: MELO (2002).

3.1.2.1. Comportamento da madeira à compressão

O comportamento da madeira submetida a esforços de compressão apresenta variações consideráveis que decorrem da direção da força aplicada em relação à direção das fibras. Ela pode ser submetida à compressão de acordo com três solicitações: perpendicular, paralela ou inclinada em relação às fibras (CALIL, 1999), conforme apresentado na Figura 44.

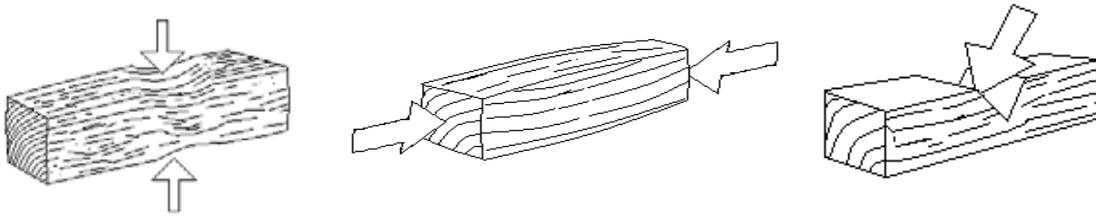


Figura 44 – A madeira pode ser submetida a três tipos de compressão: perpendicular, paralela ou inclinada. Fonte: a partir de CALIL (1999).

Na compressão paralela às fibras, como as forças agem na mesma direção do comprimento das fibras da madeira, esta apresenta uma grande resistência, sendo esta propriedade utilizada principalmente para se dimensionar pilares.

Na compressão perpendicular às fibras, ocorre a compactação das fibras e eliminação dos vazios, resultando no aumento de capacidade de carga da peça de madeira (MELO, 2002). No entanto, devido às altas deformações originadas, para efeito prático considera-se a resistência até o limite de proporcionalidade, sendo esta propriedade usada para dimensionamento de treliças, dormentes, etc.

A compressão inclinada age tanto paralelamente como perpendicularmente às fibras, sendo uma propriedade considerada para fins de dimensionamento.

3.1.2.2. Comportamento da madeira à tração

A madeira pode sofrer duas solicitações diferentes à tração: tração paralela e tração perpendicular às fibras, sendo que suas propriedades diferem consideravelmente em função destas solicitações (CALIL, 1999). A Figura 45 ilustra o comportamento da madeira à tração.

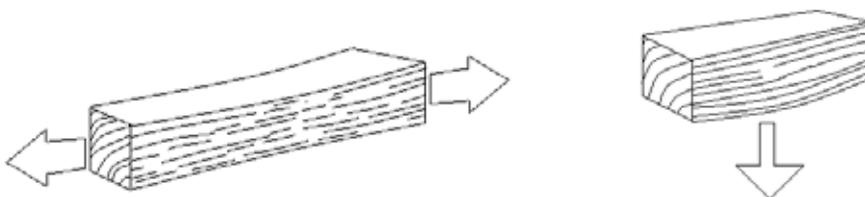


Figura 45 – A solicitação por tração pode se dar nas direções paralela e perpendicular às fibras da madeira. Fonte: a partir de CALIL (1999).

A máxima resistência à tração se manifesta quando o esforço é paralelo às fibras, no entanto os ensaios são de difícil execução e pouco confiáveis devido à possibilidade de esmagamento das fibras do corpo-de-prova pelas garras do equipamento (MELO, 2002). Esta propriedade é utilizada para dimensionamento de treliças e comparação entre espécies.

Quanto à tração perpendicular às fibras, a madeira apresenta baixos valores de resistência, e como os esforços agem tendendo a separar as fibras e afetando a integridade estrutural da peça, os resultados de ensaios apresentam grandes variações. Esta propriedade, que chega a apresentar valores quarenta vezes menores que os da tração paralela, é utilizada em estruturas em arco (FERNANDEZ-VILLEGA, 1983).

3.1.2.3. Comportamento da madeira ao cisalhamento

São considerados três tipos de cisalhamento, também chamado de esforço cortante, que agem em peças de madeira: a) quando o esforço se dá no sentido perpendicular às fibras, b) paralelo às fibras no plano radial ou tangencial, e c) o cisalhamento “rolling” (CALIL, 1999), conforme a Figura 46.

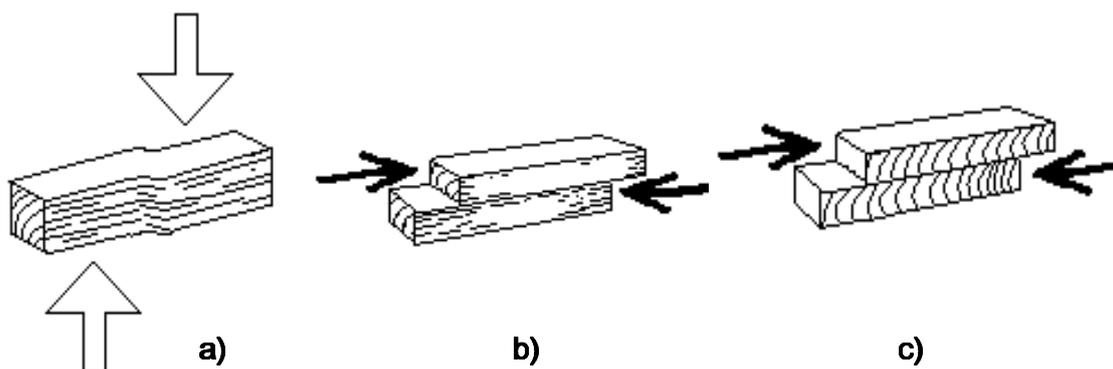


Figura 46 – Tipos de cisalhamento na madeira: esta apresenta menor resistência no cisalhamento horizontal. Fonte: a partir de CALIL (1999).

O cisalhamento perpendicular às fibras não é considerado, pois devido à alta resistência de corte das fibras, outras falhas ocorrerão antes. O

cisalhamento “rolling” produz uma tendência das células rolarem umas sobre as outras.

O cisalhamento horizontal é o mais crítico, pois a separação e o escorregamento entre as células de madeira podem levar à ruptura da peça. O comportamento da madeira ao cisalhamento é importante no dimensionamento de vigas, ligações e comparação entre espécies.

3.1.2.4 Comportamento da madeira à flexão

Quando a madeira é solicitada à flexão, chamada de flexão simples, ocorrem quatro tipos de esforços: compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento horizontal e compressão perpendicular às fibras (ocorre nos apoios), conforme apresentado na Figura 47.

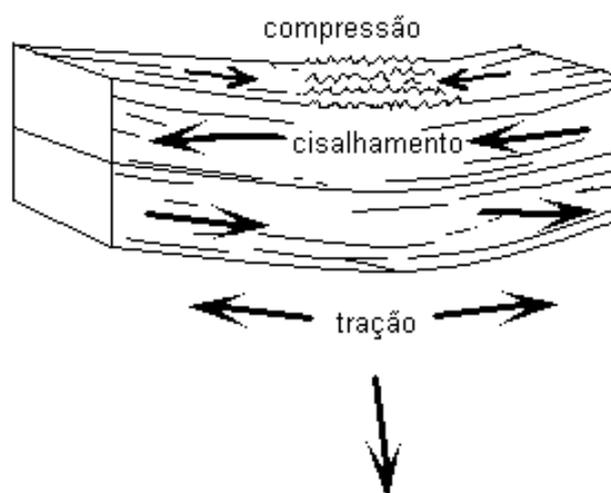


Figura 47- Comportamento da madeira quando solicitada à flexão simples.

Fonte: a partir de CALIL (1999).

De acordo com CARTAGENA (1982), a diferença entre a resistência a tração e a compressão paralela resultam em um comportamento peculiar das peças de madeira sujeitas à flexão, que falham primeiro por compressão gerando o aumento da área comprimida e a redução da área tracionada, resultando no rompimento da peça por tração.

Segundo MELO (2002) as propriedades referentes ao comportamento da madeira à flexão são utilizadas para dimensionamento de peças fletidas tais como vigas, além da comparação entre espécies, arqueamento, etc.

3.1.2.5. Comportamentos à torção, dureza, fendilhamento e resistência ao impacto

As propriedades da madeira relativas ao comportamento à torção são muito pouco conhecidas, sendo que a norma brasileira recomenda evitar a torção de equilíbrio devido ao risco de ruptura por tração paralela às fibras que resulta do chamado estado múltiplo de tensões atuante (CALIL, 1999).

Quanto à determinação da dureza, obtida pela introdução de uma semi-esfera nas direções paralela e perpendicular às fibras da madeira, trata-se de uma propriedade importante para comparação entre espécies e também para a definição de alguns usos finais como pisos, onde é fundamental que a peça de madeira não seja suscetível a marcas provenientes de móveis e outros.

O fendilhamento é uma característica importante, pois mede a resistência da madeira em relação a possíveis rachaduras no sentido longitudinal, determinando o seu comportamento à extração de pregos, entalhes em apoios de vigas e rachaduras (MELO, 2002).

A resistência ao impacto é a capacidade do material de absorver rapidamente energia pela deformação, sendo a madeira considerada um excelente material para esta característica. A sua determinação é feita através de dois tipos de ensaios: ensaio de flexão dinâmica, com aplicações em equipamentos esportivos, máquinas, aeronaves, carrocerias em geral, dormentes, etc., e ensaio de tenacidade, que fornece dados mais confiáveis.

De acordo com MELO (2002), é sabido que o comportamento da madeira sob impacto é diferente em relação ao seu comportamento ao suportar um carregamento estático, no entanto a norma brasileira prevê o ensaio de flexão dinâmica para quantificar esta resistência ao choque.

3.1.3. Fatores que afetam a resistência da madeira

Assim como ocorre com qualquer material de origem biológica, a madeira apresenta variações na sua composição e estrutura orgânica e está sujeita a fatores externos tais como umidade relativa e temperatura do meio ambiente, bem como a secagem e sentido de aplicação de esforços, alterando as suas propriedades físicas e de resistência.

Esta variabilidade tende a ser maior para algumas propriedades do que para outras, sendo medida através de um coeficiente de variação. A Tabela 7 apresenta os coeficientes médios de variação de algumas propriedades da madeira, obtidos em ensaios normalizados com corpos-de-prova sem defeitos de 150 espécies caracterizadas pelo LPF/IBAMA. Segundo MELO (2002), para efeito de caracterização, é muito importante que o sistema de amostragem considere esta variação, o que resultará numa maior representatividade em relação ao comportamento de uma determinada espécie de madeira.

TABELA 7 – Coeficiente de variação médio de espécies da Amazônia.		
Propriedade	Coeficiente de variação (%)	
	verde	seco
Módulo de elasticidade – flexão	14	12
Tensão de ruptura – compressão paralela às fibras	15	13
Tensão de ruptura – compressão perpendicular às fibras	23	18
Tensão de ruptura – flexão estática	15	14
Tensão de ruptura – cisalhamento paralelo às fibras	17	18
Densidade básica	9	

Fonte: MELO (2002).

São três os tipos de fatores, anatômico, ambiental e de utilização, que resultam em alterações nas propriedades da madeira, conforme segue:

	FATOR	INFLUÊNCIA
ANATÔMICO	- densidade	- quanto maior, maior a quantidade de madeira, com aumento da resistência
	- grã (direção longitudinal dos elementos anatômicos estruturais da madeira)	- a grã direita representa uma menor variabilidade de resistência - a grã inclinada afeta bastante o comportamento estrutural da madeira
	- nós (soltos e firmes, com diferenças de tamanho, localização, forma, firmeza, e do tipo de tensão considerada)	- reduzem a sua resistência por interromperem a continuidade e direção das fibras da madeira - podem causar efeitos de tensão localizada
	- falhas naturais (encurvamento do tronco, presença de alborno, medula e faixas de parênquima)	- alteração do alinhamento das fibras pode influir na resistência - redução da resistência da madeira
AMBIENTAL	- defeitos por ataques biológicos (perfurações, podridão, manchas)	- afetam as propriedades físicas e mecânicas da madeira
	- temperatura (exposição a altas temperaturas por longo período)	- diminuem as propriedades mecânicas - aumentam as propriedades com diminuição da temperatura
UTILIZAÇÃO	- defeitos oriundos da secagem (encanoamento, arqueamento, encurvamento, torcimento e rachadura)	- originados pela deficiência dos sistemas de secagem, influenciam na sua resistência e qualidade
	- defeitos de processamento da madeira (arestas quebradas e variação da seção transversal)	- resultam em perda de resistência e qualidade da madeira
	- influência do tempo de carregamento	- carregamentos de longa duração ocasionam deformações adicionais (fluência da madeira)

Fontes: CALIL (1999) e MELO (2002).

3.2. A madeira e a sustentabilidade dos materiais

A construção civil, assim como as demais atividades econômicas desenvolvidas pelo homem, exercem algum tipo de impacto sobre o meio ambiente. De acordo com ATHENA (2006), cerca de 40% dos materiais e da energia produzidos no mundo são consumidos pela indústria da construção, gerando milhões de toneladas de gases do efeito estufa, emissões de ar tóxicas, poluentes da água e resíduos sólidos. Assim, nenhuma outra atividade econômica exerce maior impacto sobre o meio ambiente no planeta.

O impacto ambiental decorrente do uso dos materiais na construção pode ser reduzido pela adoção de critérios que considerem o real impacto de cada material desde a sua obtenção até a utilização nas edificações. Para tanto, alguns questionamentos se fazem necessários:

• **Como o meio ambiente é afetado em cada estágio do ciclo de vida dos materiais de construção, desde a extração até o beneficiamento, transporte, utilização e eventual disposição de resíduos?**

• **O meio ambiente ganha ou perde quando o desenho de uma edificação ou o material construtivo é selecionado em detrimento de outra opção?**

• **Qual o impacto cumulativo dos sistemas de aquecimento e resfriamento sobre o ciclo de vida de uma edificação?**

Fonte: ATHENA (2006).

Atualmente há inúmeras instituições, especialmente na América do Norte, que se debruçam sobre este tema na busca de soluções ambientalmente mais apropriadas para a construção civil. Com o crescente interesse na concepção e construção de edificações “sustentáveis” ou “edifícios verdes” (*green buildings*), foram desenvolvidos programas de análises do impacto do uso dos materiais nas edificações, que determinam e medem aspectos como o consumo de energia, produção de resíduos e outros.

Estes programas são ferramentas para se estimular a eficiência energética e encorajar a adoção de escolhas ambientalmente responsáveis desde a concepção até a execução das edificações. A Tabela 8 apresenta alguns destes programas:

TABELA 8 – Programas de avaliação do desempenho dos materiais e das edificações por critérios de sustentabilidade, na América do Norte.		
	Programa	Descrição
USO GERAL	LCA (<i>Life Cycle Assessment or Analysis</i>)	- mensura quanto um material ou sistema construtivo afeta o meio ambiente durante cada fase de seu ciclo de vida: extração, produção, instalação uso e disposição de resíduos (ou reuso);
EDIFÍCIOS COMERCIAIS	GREEN GLOBES	- identifica impactos relativos às soluções adotadas, indica procedimentos para um desenho “ sustentável” e informa <i>links</i> de empresas de engenharia, design e fornecimento de materiais credenciadas para as soluções propostas;
	LEED (<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>)	- possui diversos subprogramas para novas edificações, reformas, interiores e de vizinhança, abordando os aspectos ambientais das soluções adotadas para estes itens;
RESIDÊNCIAS	NAHB (<i>National Association of Home Builders</i>)	- proporciona um roteiro para associações de construtores de casas, para que possam conceber os seus programas para “ edifícios verdes” (<i>green buildings</i>), de acordo com as diretrizes do país (EUA);
	LEED – H (<i>Leadership in Energy and Environmental Design – Home</i>)	- versão do programa LEED para aplicação em edificações residenciais.

Fonte: a partir de AF&PA (2002).

Neste novo contexto de abordagem de critérios de sustentabilidade para a construção civil, a madeira ressurge como o material ambientalmente correto, com desempenho superior ao de qualquer outro material construtivo. Em linhas gerais, as características do material que sustentam esta posição são:

- **É o único material construtivo/estrutural renovável da construção civil**
- **Requer menos energia no beneficiamento: o concreto requer 2,2 vezes mais e o aço 1,5 vezes mais energia que a madeira**
- **Produz menos gases do efeito estufa: o concreto produz 1,5 vezes mais e o aço 1,22 vezes mais gases que a madeira**
- **Produz menos poluição do ar: o concreto produz 2,15 vezes mais e o aço produz 1,7 vezes mais poluição do ar que a madeira**
- **Produz menos poluição da água: o concreto produz 2,15 vezes mais e o aço produz 3,47 vezes mais poluição da água que a madeira**
- **Produz menos resíduos sólidos: o concreto e o aço produzem 1,57 vezes mais resíduos sólidos que a madeira**

Fonte: a partir de CWC (2002).

A definição do conceito de “edifício verde” (*green building*), de acordo com critérios cada vez mais difundidos nos Estados Unidos e no Canadá, parte de quatro princípios básicos, descritos na Tabela 9, onde o desempenho da madeira é considerado superior ao dos outros materiais da construção:

TABELA 9 – Princípios básicos dos “ edifícios verdes” (*green buildings*) na América do Norte.

PRINCÍPIO 1 – Reduzir consumo de energia durante a vida útil do edifício

PRINCÍPIO 2 – Minimizar a poluição externa e danos ambientais da obra

PRINCÍPIO 3 – Reduzir consumo de energia e desperdício de recursos naturais na extração, beneficiamento, instalação e uso da edificação

PRINCÍPIO 4 – Minimizar a poluição interna e danos à saúde do usuário

Fonte: a partir de CWC (2002).

A Figura 48 apresenta uma análise comparativa de materiais empregados na construção de um edifício comercial de 03 pavimentos na Canadá, com fundação convencional, analisando-se os aspectos de sua sustentabilidade.

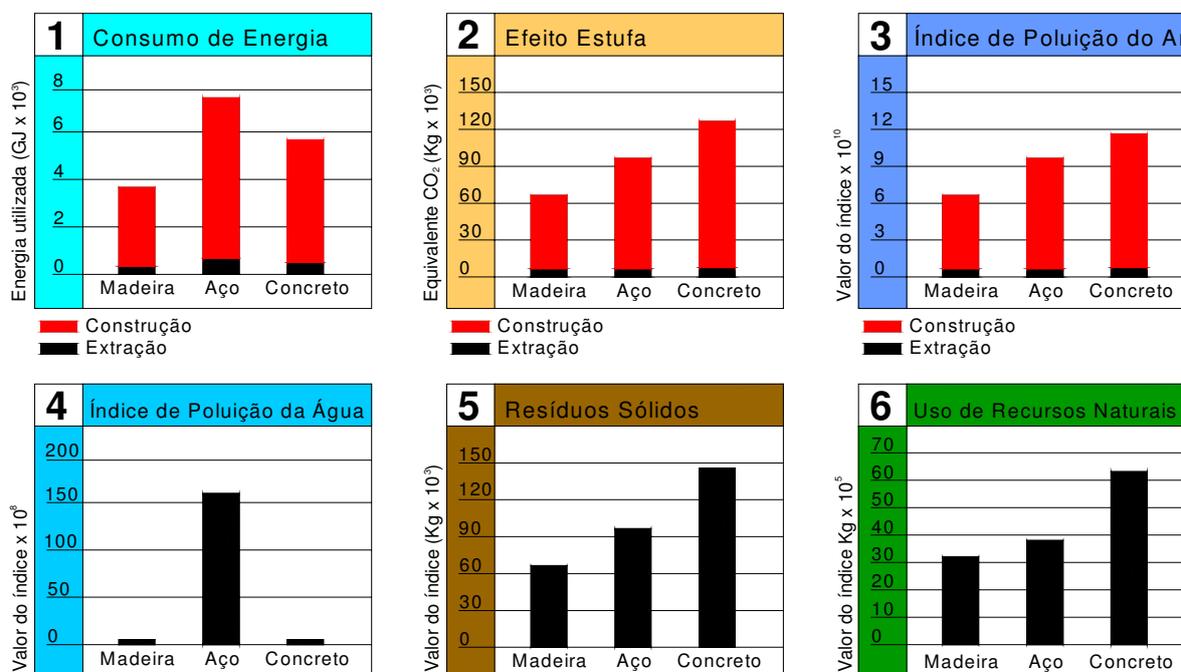


Figura 48 – Gráficos comparativos do desempenho de materiais em uma edificação comercial canadense. Fonte: CWC (2000).

Um dos aspectos de maior peso na questão da sustentabilidade das edificações é a renovabilidade dos materiais, e a madeira possui desempenho incomparável neste quesito. A partir de práticas como o manejo florestal, é possível se obter madeira sem necessariamente se eliminar a floresta.

Para tanto se lança mão de procedimentos que permitem a renovação das áreas de produção florestal indefinidamente, sendo possível aumentar a produtividade sem necessidade de se avançar sobre novas áreas de produção.

Isto explica porque países com grande participação no mercado madeireiro mundial, como o Canadá e a Finlândia, estão entre os que mais possuem florestas originais, ou seja, a exploração madeireira de 150 ou 200 anos não foi capaz de eliminar a sua cobertura florestal, e a sua renovabilidade permitiu a preservação da maior parte dos seus recursos florestais (Figura 49).

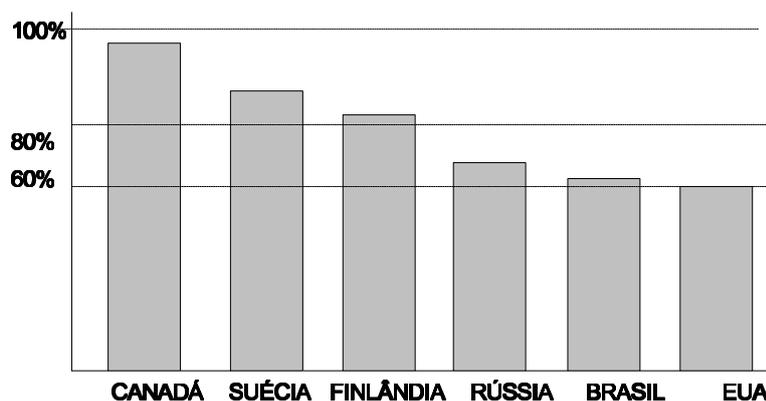


Figura 49 – Quadro comparativo de porcentagens de florestas naturais nos países. Fonte: CWC (2000).

Outro aspecto que adquire cada vez mais importância no contexto mundial é o mecanismo de mudanças climáticas, onde o acúmulo de gases do efeito estufa tem contribuído dramaticamente para o aquecimento global.

O comportamento da madeira neste aspecto pode levar o material à categoria de “material do futuro”, na condição de produto derivado da celulose que é obtida pelo seqüestro de dióxido de carbono da atmosfera: atualmente uma das principais estratégias frente ao aquecimento global tem sido o estímulo ao plantio de árvores, o que resultará em grande valorização da madeira como material ecologicamente estratégico para a humanidade.

A madeira e os produtos da madeira têm um importante papel na luta contra as mudanças climáticas, influenciando através de diferentes mecanismos. A floresta em crescimento absorve dióxido de carbono do ar, e junto com os produtos da madeira, agem como reservatórios de carbono durante a sua vida (...) o dióxido de carbono só é liberado quando a madeira apodrece ou queima (...) o uso de produtos da madeira também estimula o investimento de recursos na atividade florestal e promove a renovação da floresta (...) Quando a árvore é derrubada, o dióxido de carbono permanece no produto feito a partir dela (...) Os principais produtos feitos a partir da madeira, como componentes construtivos e de acabamento, têm ciclo de vida variando de alguns anos a séculos. Quanto maior o ciclo de vida do produto, mais tempo o carbono estará fixado, longe da atmosfera onde poderia estar produzindo o efeito estufa (Woodfocus, 2004 p.34).

CAPÍTULO IV

4. Os sistemas construtivos em madeira

Aqui são apresentados os principais processos e sistemas construtivos em madeira, sendo que há uma diversidade de critérios para se classificar os padrões construtivos em madeira que varia de acordo com os países. De modo geral, seguiu-se uma classificação básica que divide as técnicas construtivas em madeira em tradicionais e contemporâneas, e a partir daí de acordo com a solução estrutural e/ou construtiva predominante.

4.1. As técnicas tradicionais

A madeira é provavelmente o material de construção mais antigo utilizado pelo homem, sendo que os povos primitivos lançavam mão de choças com cobertura de palha quando não havia cavernas disponíveis. Daí se evoluiu para estruturas amarradas com cipós nas regiões de clima quente e empilhadas com troncos cobertos com terra nas regiões de clima frio.

Segundo FERNANDEZ-VILLEGA (1983), ainda no período Neolítico se encontravam definidos os dois sistemas básicos utilizados nas estruturas de madeira até praticamente a época moderna: as edificações com paredes formadas por troncos colocados horizontalmente ou verticalmente, e as edificações de armações com pilares e vigas de madeira reforçada com elementos diagonais e horizontais.

Também de acordo com BITTENCOURT (1995), duas técnicas são consideradas tradicionais: as construções de madeira maciça empilhada e as que possuem entramado estrutural, com vedações em materiais variados, ressaltando-se que em ambas há um grande domínio dos processos construtivos, não obstante o alto consumo de material e falta de racionalização destes processos.

4.1.1. As construções de madeira maciça empilhadas

Os sistemas construtivos baseados no empilhamento de peças de madeira maciça, na forma roliça ou serrada, predominaram inicialmente no norte da Europa, em regiões com grande abundância de madeira e frio intenso. Sua principal característica é a de se comportar com um sistema portante, ou seja, estrutura e vedação se transformam em um mesmo elemento, o que resulta em edificações extremamente rígidas e com grande isolamento térmico, porém com alto consumo de madeira (Figura 50).



Figura 50 – Habitações em peças serradas dos imigrantes no Paraná, à esquerda, e em peças roliças, do séc. 17 em Ballenberg, Suíça. Fonte: MELLO (1998).

A partir deste sistema construtivo, surgiu a técnica “lafte”, onde foram desenvolvidos encaixes para os encontros de paredes, exatamente os pontos mais vulneráveis deste tipo de construção (Figuras 51 e 52). De acordo com BITTENCOURT (1995), estes encaixes diminuíram os problemas de vedação, mas não eliminaram as questões decorrentes das variações dimensionais das seções das peças de madeira.

A popularização do sistema “lafte” nos países do norte da Europa resultou na introdução deste sistema construtivo nos Estados Unidos por colonizadores escandinavos que se estabeleceram na região do rio Delaware no século XVII. Este sistema foi adaptado pelos pioneiros que colonizaram a costa oeste, resultando nas *log-cabins*, até chegar às *log homes* atuais.



Figura 51 – Feltro desenvolvido para vedação entre peças do sistema “lafte” e habitação concebida na Noruega. Fonte: HYTTELIV (2006).

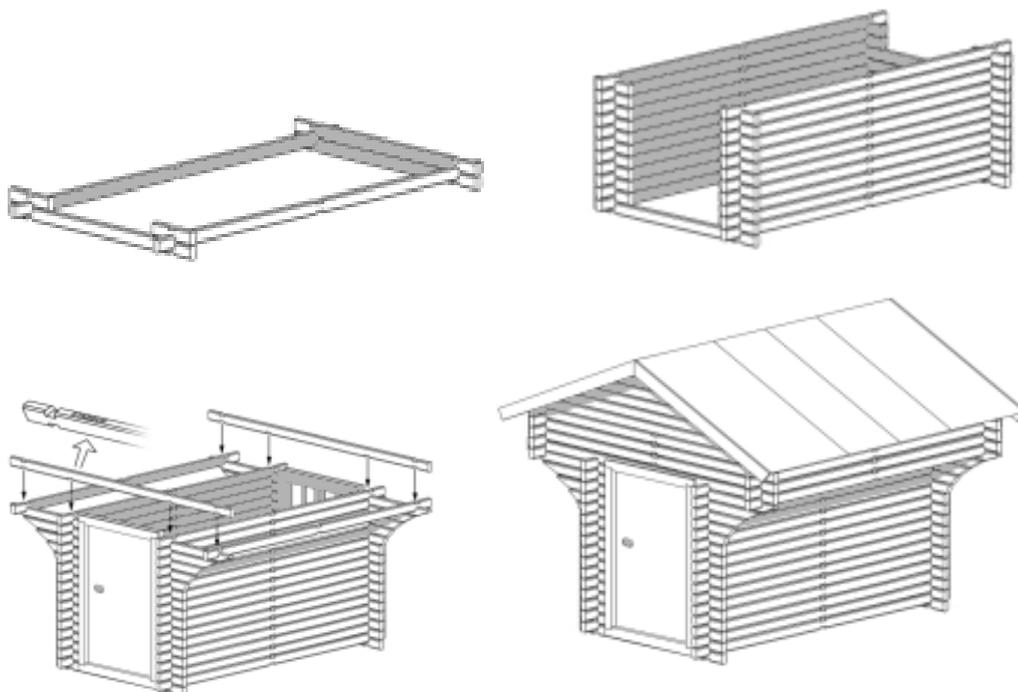


Figura 52 – Seqüência de fabricação de habitação pelo sistema “lafte”. Fonte: SMAATOM (2007).

Atualmente o mercado de *log homes* é bastante diversificado na América do Norte, principalmente nos Estados da região norte dos EUA e no Canadá, sendo este tipo de construção em madeira, com variados sistemas de encaixe, utilizado principalmente em habitações de alto luxo (Figuras 53 e 54).

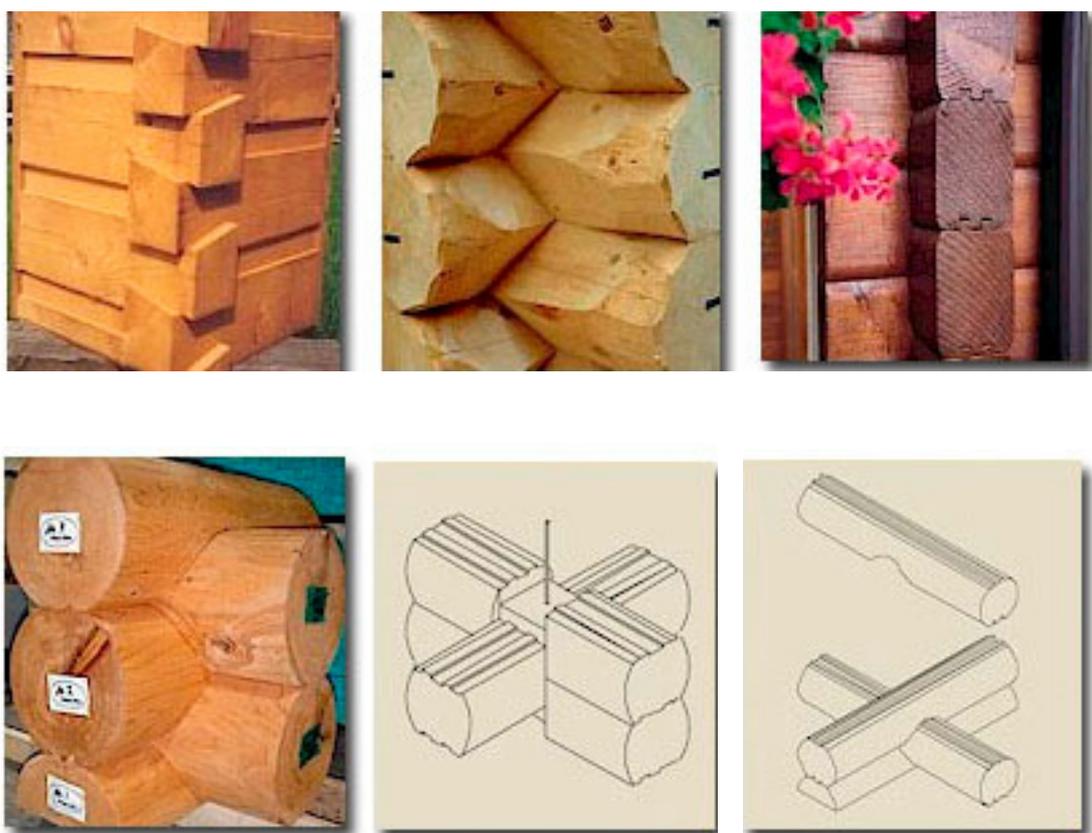


Figura 53 – Tipos de encaixes de peças nos cantos (*corner style*) utilizados nas *log homes* norte-americanas. Fonte: CEDARMILLLOGHOMES (2004).



Figura 54 – Habitação de alto luxo do tipo *log home* construída no Canadá. Fonte: CEDARMILLLOGHOMES (2004).

4.1.2. As construções com entramado estrutural

Ao contrário das construções de madeira empilhada, as construções que possuem entramado estrutural de madeira surgiram a partir da necessidade de se otimizar o uso dos recursos florestais, sendo bastante comuns em regiões com menor disponibilidade de madeira. Sua principal característica foi a de se fixar diretamente os pilares no solo, sendo os espaços entre os pilares vedados com terra, pedra, tijolo, etc.

De acordo com BITTENCOURT (1995), na literatura européia estas construções são chamadas de *colombage*, que é proveniente do latim *columna*, referindo-se aos pilares de madeira, sendo que na literatura nacional, são conhecidas como “construções em enxaimel”, sendo bastante comuns na região sul do Brasil, em colônias de imigrantes italianos e alemães.

O termo enxaimel ou *fachwerk* (em alemão) significa enchimento, explicando o sistema construtivo onde primeiro se executa o esqueleto com peças robustas de madeira, depois são fixadas peças horizontais e verticais e por último é feito o enchimento com barro amassado, pedra e tijolo (Figura 55). Segundo DEUTSCH WELLE (2005), este sistema pode ser considerado o precursor da planta livre da arquitetura moderna, onde as paredes são independentes da estrutura de madeira autoportante.

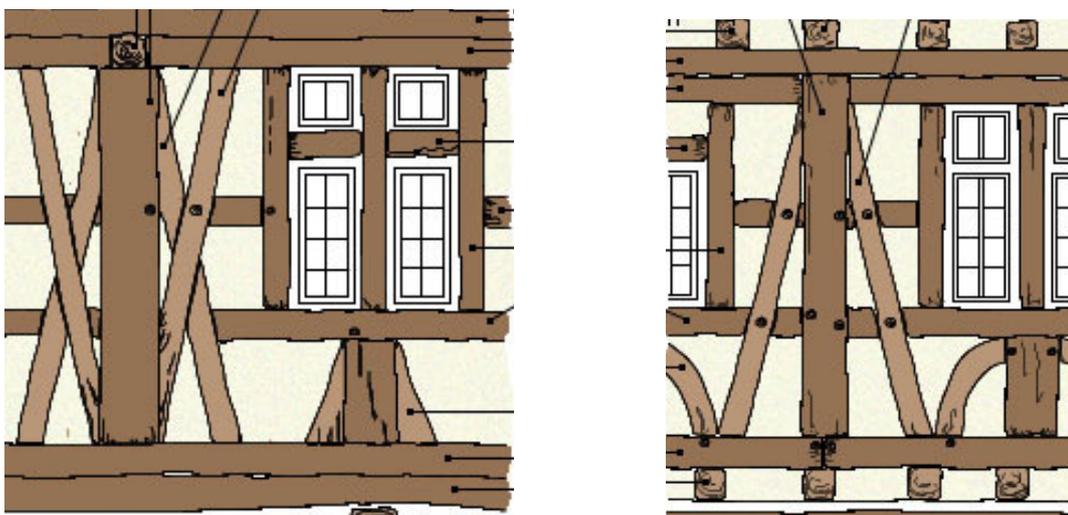


Figura 55 – Fachadas em enxaimel. Fonte: FACHWERKHAUS (2004).

A definição do enxaimel também pode ser aplicada às nossas construções de taipa de pilão ou pau-a-pique, pois da mesma forma o entramado estrutural é preparado para receber o material das vedações. No entanto, esta denominação é mais utilizada para designar as edificações dos imigrantes europeus (Figura 56).



Figura 56 – Casa em enxaimel em Blumenau (SC). Fonte: BLUMENAU (2005).

BITTENCOURT (1995) apresenta dois princípios básicos segundo os quais uma construção em enxaimel pode ser executada: utilizando-se peças longas de madeira, onde os pilares são contínuos do solo ao telhado, sendo as construções mais antigas e que necessitam de peças de grandes seções; e utilizando-se peças curtas de madeira, quando os pilares não ultrapassam a altura de um pavimento, finalizando em vigas de amarração que servem de suporte para o pavimento superior (Figura 57).

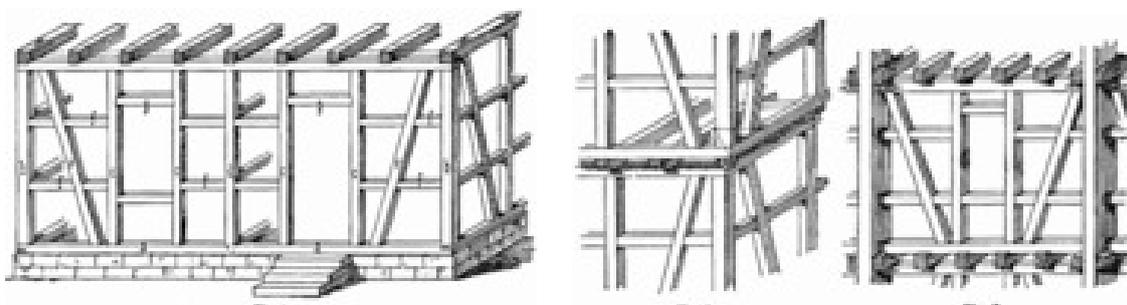


Figura 57 – Sistema enxaimel onde os pavimentos se apóiam um sobre o outro com vigas de amarração. Fonte: WIKIPEDIA (2007).

O caráter estético da construção em enxaimel foi bastante explorado especialmente no continente europeu, em países como a Alemanha, a França e a Inglaterra. São edificações que expressam muita robustez, se destacando também a grande inclinação dos telhados (Figuras 58 e 59).



Figura 58 – Edificações em enxaimel na França e Alemanha. Fonte: FACHWERK (2007).



Figura 59 – Monumento nacional *Little Moreton Hall*, datado de 1550, no interior da Inglaterra. Fonte: GREATBUILDINGS (2007).

Este sistema construtivo, que é considerado o precursor das técnicas construtivas em madeira contemporâneas, ainda é bastante demandado na Europa para casas de campo, além de estar sendo estudado devido ao seu excelente comportamento a terremotos, devido às suas fundações não engastadas e ao grande número de emendas que absorvem os impactos.

4.2. As técnicas contemporâneas

No panorama de intenso desenvolvimento tecnológico que se verifica na área de construção em madeira, com uma profusão de técnicas e materiais derivados, há diferentes proposições de classificação dos sistemas construtivos. Seguindo a abordagem sugerida por GOTZ et al.(1983) e BITTENCOURT (1995), os sistemas construtivos em madeira podem ser classificados de acordo com a Tabela 10:

TABELA 10 - Sistemas construtivos contemporâneos em madeira.	
Sistema	Descrição
Estruturas hierarquizadas	- sistema estrutural com elementos portantes em grandes vãos, com poucos pontos de apoio e independência entre trama estrutural e fechamentos; bastante empregado na Europa.
Estruturas nervuradas	- sistema estrutural derivado do entramado de madeira, devido à evolução das ligações metálicas e industrialização dos componentes de madeira, é o mais empregado em habitações na América do Norte e Europa.
Estruturas de painéis	- evolução dos sistemas nervurados, pois as vedações são pré-fabricadas na forma de painéis, largos ou estreitos, permitindo a confecção do entramado para posterior transporte para o canteiro de obras.
Estruturas tridimensionais	- com mesmo princípio construtivo dos painéis, trata-se de módulos tridimensionais com piso, teto e paredes externas executado industrialmente; limitados pelos custos de transporte e de montagem no canteiro.

Fonte: a partir de GOTZ et al. (1983) e BITTENCOURT (1995).

CARTAGENA (1982) propõe duas classificações das edificações de madeira: quanto ao sistema estrutural e quanto ao sistema construtivo. A primeira classificação identifica três tipos básicos de soluções estruturais em madeira: os entramados, os sistemas poste-viga e os sistemas treliçados. Quanto ao sistema construtivo, é proposta uma abordagem a partir dos processos de fabricação da obra em madeira, conforme a tabela 11:

TABELA 11 – Classificação dos sistemas construtivos em madeira a partir dos processos de fabricação.	
Sistema	Descrição
Não industrializado	<p>1. Vernacular – material com pouca ou nenhuma transformação e disponível nas proximidades da obra; métodos tradicionais com pouca tecnologia.</p> <p>2. Semi pré-cortado – utiliza peças de madeira bruta provenientes de serrarias, para serem finalizadas na obra com equipamentos simples de carpintaria.</p>
Semi-industrializado	<p>3. Pré-cortado – as peças chegam prontas na obra em fardos, devidamente bitoladas e numeradas de acordo com a colocação na edificação; trata-se de um dos métodos mais antigos de pré-fabricação e um dos mais econômicos pela redução de perdas na madeira.</p>
Industrializado	<p>4. Pré-fabricação parcial – os componentes tais como tesouras de cobertura, painéis internos e externos, chegam prontos, efetuando-se a montagem da casa.</p> <p>5. Pré-fabricação total – a casa chega pronta sobre caminhões e é fixada nas fundações com guindastes.</p>

Fonte: CARTAGENA (1982).

De acordo com INO (1992), a diversidade de critérios existentes para se classificar os sistemas construtivos em madeira está presente principalmente na literatura internacional, envolvendo o grau de industrialização, o material utilizado nas paredes, a tipologia da estrutura resistente e a definição da construção em pesada, semileve e leve, e os tipos de pré-fabricação.

A Tabela 12 apresenta a descrição de INO (1992) sobre a classificação dos sistemas construtivos em madeira presente na literatura internacional:

TABELA 12 – Classificação dos sistemas construtivos em madeira (literatura internacional).	
País	Classificação
EUA	- Predominam os sistemas entramados, constituídos de peças serradas de dimensões padronizadas fixadas com pregos; apresentam-se em duas versões: <i>balloon frame</i> e <i>plattform frame</i> .
Japão	- Divididos em três grupos: sistema convencional (<i>Zaira Koho</i>), sistema 2" x 4" (sistema americano), e sistemas pré-fabricados de madeira (entramados, painéis, painéis modulares, paredes em madeira maciça e outros).
Alemanha	- Classificação em dois grandes grupos: Ossatura de Madeira e Construção em Painéis. O primeiro grupo apresenta divisão minuciosa, com enfoque dado aos nós, detalhando os encontros das peças; o segundo é dividido de acordo com medidas de painéis e usos.
França	- Classificação em cinco famílias tecnológicas, de acordo com grau de industrialização e método de montagem, sendo os sistemas pilar-viga, ossatura, painéis estreitos (altura simples e altura dupla), painéis largos e módulos tridimensionais.

Fonte: a partir de INO (1992).

A seguir são apresentadas e ilustradas diversas soluções construtivas em madeira, considerando-se principalmente as proposições estruturais que as determinam e salientando-se o desejável enfoque da obra em madeira como resultado da interação entre sua concepção arquitetônica e estrutural, bem como das técnicas construtivas utilizadas. As técnicas construtivas em madeira no Brasil serão apresentadas no item 4.3.

4.2.1. O sistema poste-viga ou pilar-viga

Este sistema é constituído por pilares e vigas de madeira que funcionam como pórticos, ou seja, estas peças são armadas em uma direção e travadas na outra direção através de estruturas secundárias de pisos e coberturas. Sua execução é facilitada porque em geral são poucos elementos necessários à sua montagem, além de ser um sistema bastante flexível e que permite vedações executadas com diferentes materiais (Figura 60).



Figura 60 – Edificação com sistema pilar-viga e vedações em alvenaria, destinada ao centro de plantas medicinais do IBAMA/DF. Fonte: MELLO (2004).

Alguns inconvenientes do sistema construtivo dizem respeito às instalações complementares, que embora possam ser embutidas nas vedações, têm como barreiras à sua passagem as peças de madeira. Nestes casos, soluções de projeto podem ser adotadas evitando-se estas situações.

No entanto, são inegáveis as vantagens que decorrem principalmente da independência entre a estrutura e as vedações, que permitem inúmeras composições arquitetônicas com diferentes materiais, inclusive adequando-se estes materiais com o isolamento térmico e acústico requeridos.

Trata-se de um sistema construtivo bastante empregado em países com pouco desenvolvimento tecnológico no setor da construção em madeira, como é o caso do Brasil. No entanto, está presente especialmente na América do Norte, sendo bastante conhecidas e demandadas as *post beam houses*, por sua versatilidade de construção e estética arquitetônica (Figura 61).



Figura 61 – Habitações com sistema pilar-viga nos EUA. Fonte: PIONEERLOGSYSTEM (2006).

As vantagens do sistema têm contribuído para que tradicionais empresas de *log homes* norte americanas venham desenvolvendo soluções em pilar-viga como opção às onerosas casas de toras, confirmando que este sistema construtivo em madeira é um dos mais bem sucedidos (Figura 62).



Figura 62 – Sistema pilar-viga com madeira roliça no Canadá. Fonte: CANADIANLOGHOUSE (2006).

4.2.2. Os entramados modernos: sistemas *balloon* e *platform*

Como resultado do desenvolvimento tecnológico que se processou sobre as técnicas construtivas tradicionais, os entramados de madeira atuais estão entre as mais avançadas soluções construtivas existentes, representados principalmente pelos sistemas construtivos *balloon* e *platform*.

Historicamente, a partir do Renascimento, as construções em madeira tornam-se mais escassas na Europa, devido à redução dos recursos florestais e ao surgimento de outros materiais construtivos. No entanto, na América do Norte ocorre o inverso, onde a grande disponibilidade de florestas aliada à tradição construtiva que se inicia com as edificações de toras, resultam nos entramados modernos, sendo o sistema *balloon* pioneiro neste ramo.

O sistema *balloon* começa ser experimentado e implantado em meados do século 19, na região de Chicago (EUA), sendo as peças robustas das habitações substituídas por peças leves de dimensões padronizadas fixadas com pregos e espaçadas por pequenas distâncias. Outra característica importante foi a utilização de peças longas em obras com mais de um pavimento, que transmitiam os esforços diretamente para o solo (Figura 63).

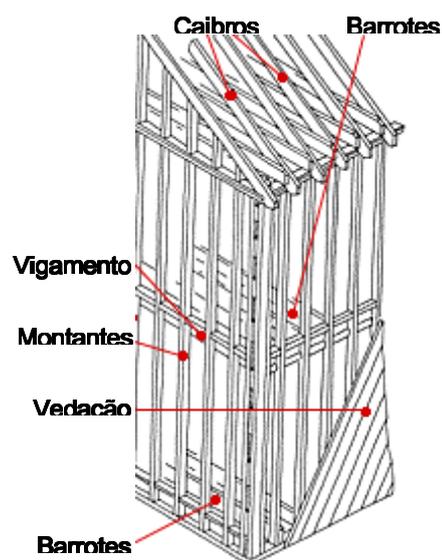
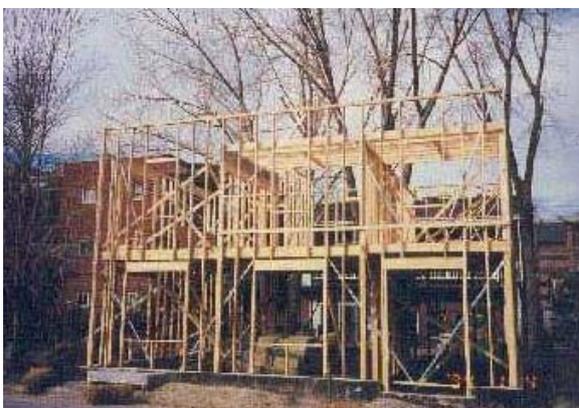


Figura 63 – Obra no Canadá e detalhe do sistema *balloon*. Fonte: HOMETIPS (2007).

O uso de peças longas, característica que dá nome ao sistema por assemelha-lo à armação de um balão, foi responsável pela sua decadência, devido à necessidade de peças com dimensões especiais para edificações com vários pavimentos, das dificuldades de obtenção de rigidez no sistema, problemas de montagem nas obras e comportamento ao fogo, uma vez que as peças contínuas não permitiam barreiras eficientes contra a sua propagação.

A despeito de sua superação, este sistema foi responsável por desencadear o desenvolvimento da indústria de casas pré-fabricadas de madeira na América do Norte, culminando com o sistema *platform*, que resultou na habitação que é considerada a de melhor qualidade do planeta.

O sistema *platform* possui como principal característica a execução do piso como uma plataforma, sobre a qual são edificados os entramados das paredes, que por sua vez receberão a plataforma do piso superior. A plataforma inicial ou *basement* é feita em concreto ou pedra, assentada diretamente sobre o solo.

Conforme ilustrado na Figura 64, todo o sistema é constituído de peças leves, cujas paredes levam montantes de seções pequenas (2" x 4"), todos ligados por pregos ou elementos metálicos.

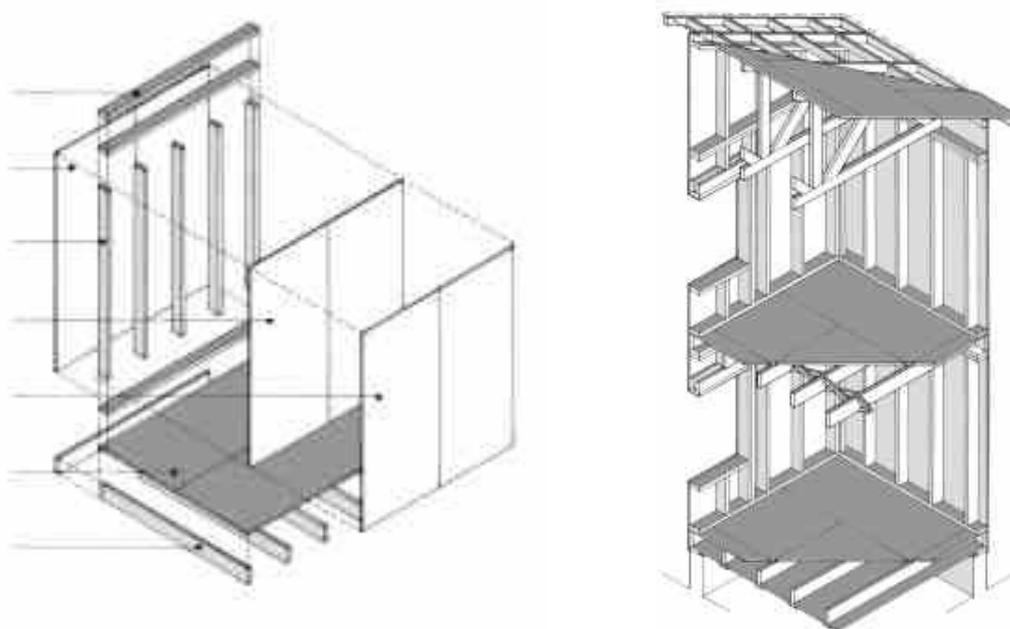


Figura 64 – Montagem das paredes e detalhe genérico do sistema *platform*. Fonte: PUUINFO (2007).

A versatilidade do sistema *plattform* pode ser observada sob o ponto de vista do grau de industrialização, podendo ser fabricado em painéis portantes e até em módulos volumétricos, as chamadas *mobile homes* ou casas móveis. Estas são produzidas dentro de grandes indústrias diretamente sobre chassis estendidos de caminhões e transportadas até os locais de implantação, chamados de *mobile home parks* (Figuras 65 e 66).



Figura 65 – Montagem de *mobile homes* em indústrias dos EUA. Fonte: SKYLINEHOMES (2007).



Figura 66 – Transporte com embalagem e entrega da *mobile home* nos EUA. Fonte: BROOKSWOODHOMES (2006).

O sistema construtivo também permite a execução de edificações com vários pavimentos, que podem chegar a cinco ou seis dependendo da região de instalação. No entanto, o produto de maior qualidade é inegavelmente a edificação residencial norte-americana, conforme apresentado a seguir.

4.2.2.1. Considerações sobre a casa de madeira norte-americana

A despeito da experiência nem sempre bem sucedida de se morar em uma casa de madeira no Brasil, cuja qualidade muitas vezes é motivo de reclamação por parte dos usuários, pode-se afirmar que nenhum outro material oferece a possibilidade de conforto ambiental como a madeira.

O exemplo bem sucedido é o da habitação norte americana, considerada a de melhor qualidade em termos de conforto e segurança de todo o mundo, baseada em sistemas construtivos em madeira resultantes da industrialização da construção.

A construção em madeira é resistente, durável, fácil de proteger, fácil de renovar e agrega valor. Isto é baseado em 200 anos de performance comprovada e um padrão de pesquisa e desenvolvimento de novos produtos para fazer-la cada vez melhor (...) em outras partes do mundo, há um grande interesse na casa norte americana. Isto explica porque nossas equipes especializadas percorrem o mundo apresentando, para quem procura soluções habitacionais econômicas, duráveis e seguras, o sistema construtivo em madeira que delega à América do Norte a melhor habitação do planeta (CWC, 2002 p.2).

Um dos fatores deste sucesso é a normatização, de forma que os códigos de edificações norte-americanos são pautados pela premissa de prover altos níveis de segurança e saúde para os usuários. Segundo o CWC (2002), nenhum outro material possui tantos anos de performance e desenvolvimento de critérios técnicos, subsidiados por institutos de pesquisa liderados pelo Laboratório de Produtos Florestais (FPL), localizado no Estado de Madison (EUA), que desde o ano de 1910 desenvolve trabalhos sobre o tema com universidades, indústrias e instituições estaduais e federais.

O grande isolamento térmico característico do material madeira também representa um diferencial a favor da casa norte-americana. Sendo cerca de 400 vezes mais isolante que o aço, por exemplo, e considerando o custo

significativo do isolamento térmico destas habitações, o emprego do sistema construtivo em madeira resulta num melhor desempenho global da moradia.

A fácil renovação da habitação, que inclui o aumento do seu tamanho ou o rearranjo dos espaços também contribui para o sucesso da casa americana. De acordo com a Associação Nacional dos Construtores de Casas, em 2001, os proprietários de residências gastaram cerca de 160 bilhões de dólares na reforma de suas casas, sendo que nos EUA as moradias em madeira representam cerca de 74% do total, chegando a 94% no Canadá (CARUANA, 2002).

A facilidade de se modificar a residência é um grande atrativo, pois o sistema construtivo baseado em peças leves fixadas com pregos (“studs”, montantes de madeira nas dimensões de 2x4 polegadas) e uso de chapas de madeira e gesso acartonado, sendo todo este material manipulado por máquinas manuais, permite que o próprio dono possa efetuar estas modificações. Trata-se de uma grande vantagem comparativa, pois nas construções convencionais de alvenaria e concreto armado, as alterações da moradia têm de ser feitas por equipes de pedreiros e produzem muita poluição decorrente da demolição.

Outra questão que afeta particularmente a América do Norte em relação à habitação é a ocorrência de terremotos. Neste campo, as construções em madeira se mostram como um dos sistemas construtivos mais seguros por causa de algumas vantagens comparativas:

- 1. A madeira é resistente e leve – menos massa é uma vantagem porque significa que menos forças atuarão no edifício.*
- 2. O sistema construtivo em madeira tem vários componentes e várias ligações pregadas – há inúmeros componentes das cargas atuantes em várias direções para absorver as forças.*
- 3. As conexões pregadas típicas dos sistemas construtivos em madeira são eficientes para dissipar a energia dos terremotos (CWC, 2002 p.5).*

A questão da durabilidade da moradia norte-americana é abordada de diversas formas, desde o uso intensivo de barreiras químicas no solo para afastar a presença dos cupins (item obrigatório na maioria dos Estados americanos) até tratamentos de última geração com produtos químicos em painéis de vedação e peças estruturais.

Desenvolvida pelos primeiros colonizadores, a construção em madeira desde então tem sido objeto da mais intensa pesquisa e evolução de que qualquer outro sistema construtivo, resultando em uma tecnologia construtiva que pode suportar as mudanças de inverno no Alasca, as chuvas em Seattle, os verões no Texas e em qualquer outra situação (CWC, 2002 p.7).

Os aspectos relativos à sustentabilidade da habitação em madeira são abordados no item 3.2., mas algumas considerações aqui colocadas estarão diretamente reforçando as vantagens da casa norte-americana, como, por exemplo, a origem florestal dos principais componentes, que demandam cada vez mais recursos florestais.

A oferta de longo prazo de madeira e florestas, também para outros usos como recreação, é suportada por técnicas de manejo florestal e programas de certificação florestal que garantem esta performance. Hoje os EUA têm a mesma área de florestas que tinham em 1920, mesmo com um aumento de 143% em sua população. Na América do Norte, cerca de 2,15 bilhões de árvores são plantadas todos os anos. No Canadá, 90% das florestas originais foram mantidas – mais do que qualquer outro país – apesar do crescimento de uma população de 30 milhões de habitantes (CWC, 2002 p.7).

Os questionamentos que normalmente se colocam sobre a proteção das florestas brasileiras como um indicador do fracasso dos países desenvolvidos na proteção de seus recursos florestais, não procedem no caso norte-

americano, e a prova disto é a altíssima aceitação da casa de madeira por parte da população como um produto proveniente de práticas sustentáveis.

Na atual condição de alteração climática que vive o planeta, e considerando a grande contribuição que especialmente os EUA têm para a emissão de gases que provocam o efeito estufa, a casa de madeira representa um contraponto à imagem negativa do país perante a comunidade internacional.

A casa que produz menos impacto em aspectos como o uso de energia, a produção de gases do efeito estufa, a poluição da água e do ar, além de ser a casa mais fácil de construir e reformar, também é a casa com padrão estético satisfatório, conforme apresentado na Figura 67, e que garante o título de melhor habitação do mundo em conforto, segurança e qualidade.



Figura 67 – Habitação de classe média com sistema construtivo em madeira do tipo *platform*, no Estado do Oregon, EUA. Fonte: MELLO (2006).