

CAPÍTULO 1

A MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

A madeira é, provavelmente, o material de construção mais antigo dada a sua disponibilidade na natureza e sua relativa facilidade de manuseio.

Comparada a outros materiais de construção convencionais utilizados atualmente, a madeira apresenta uma excelente relação resistência/peso, como mostra a Tabela 1.1. A madeira possui ainda outras características favoráveis ao uso em construção, tais como facilidade de fabricação de diversos produtos industrializados e bom isolamento térmico.

Por outro lado, a madeira está sujeita à degradação biológica por ataque de fungos, brocas etc. e também à ação do fogo. Além disso, por ser um material natural apresenta inúmeros defeitos, como nós e fendas que interferem em suas propriedades mecânicas. Entretanto, estes aspectos desfavore-

áveis são facilmente superados com o uso de produtos industriais de madeira (ver Cap. 2) convenientemente tratados, em sistemas estruturais adequados, resultando em estruturas duráveis e com características estéticas agradáveis.

TABELA 1.1 Propriedades de alguns materiais de construção

Material	ρ (t/m ³)	f(MPa)	f/ ρ
Madeira a tração	0,5–1,2	30–110	60–90
Madeira a compressão	0,5–1,2	30–60	50–60
Aço a tração	7,85	250	32
Concreto a compressão	2,5	40	16

Nota: ρ = massa específica; f = resistência característica.

1.2. CLASSIFICAÇÃO DAS MADEIRAS

As madeiras utilizadas em construção são obtidas de troncos de árvores. Distinguem-se duas categorias principais de madeiras:

- **madeiras duras** — provenientes de árvores frondosas (*dicotiledôneas*, da classe Angiosperma, com folhas achatadas e largas), de crescimento lento, como peroba, ipê, aroeira, carvalho etc.; as madeiras duras de melhor qualidade são também chamadas madeiras de lei;
- **madeiras macias** — provenientes em geral das árvores *coníferas* (da classe Gimnosperma, com folhas em forma

de agulhas ou escamas, e sementes agrupadas em forma de cones), de crescimento rápido, como pinheiro-do-paraná e pinheiro-bravo, ou pinheirinho, pinheiros europeus, norte-americanos etc.

As árvores frondosas perdem geralmente suas folhas no outono, enquanto as coníferas mantêm suas folhas verdes todo o ano.

Essas categorias distinguem-se pela estrutura celular dos troncos e não propriamente pela resistência. Algumas árvores frondosas produzem madeira menos resistentes que o pinho.

1.3. ESTRUTURA E CRESCIMENTO DAS MADEIRAS

1.3.1. CRESCIMENTO E MACROESTRUTURA DAS MADEIRAS

As árvores produtoras de madeira de construção são do tipo *exogênico*, que crescem pela adição de camadas externas, sob a casca. A seção transversal de um tronco de árvore revela as seguintes camadas, de fora para dentro (ver Fig. 1.1):

- a) *casca* — proteção externa da árvore, formada por uma camada externa morta, de espessura variável com a idade e as espécies, e uma fina camada interna, de tecido vivo e

macio, que conduz o alimento preparado nas folhas para as partes em crescimento;

- b) *alburno* ou *branco* — camada formada por células vivas que conduzem a seiva das raízes para as folhas; tem espessura variável conforme a espécie, geralmente de 3 a 5 cm;
- c) *cerne* ou *durâmen* — com o crescimento, as células vivas do alburno tornam-se inativas e constituem o cerne, de coloração mais escura, passando a ter apenas função de sustentar o tronco;

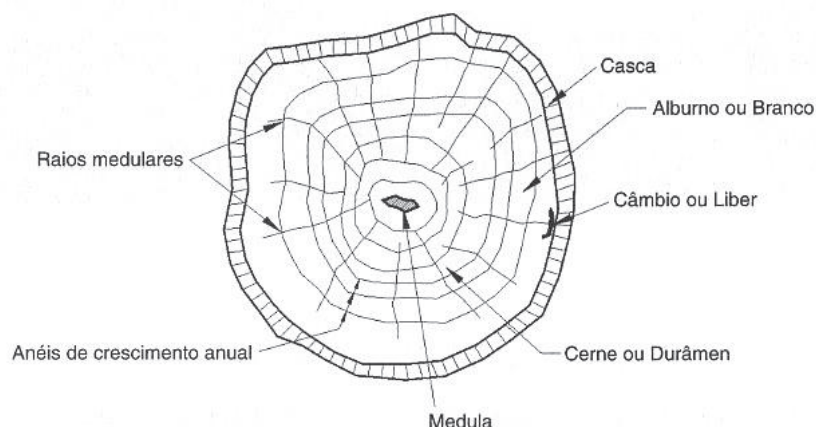


Fig. 1.1 Seção transversal de um tronco, mostrando as camadas.

d) *medula* — tecido macio, em torno do qual se verifica o primeiro crescimento da madeira, nos ramos novos.

As madeiras de construção devem ser tiradas de preferência do cerne, mais durável. A madeira do alburno é mais higroscópica que a do cerne, sendo mais sensível do que esta última à decomposição por fungos. Por outro lado, a madeira do alburno aceita melhor a penetração de agentes protetores, como alcatrão e certos sais minerais. Não existe, entretanto, uma relação consistente entre as resistências dessas duas partes do tronco nas diversas espécies vegetais.

Os troncos das árvores crescem pela adição de anéis em volta da medula; os anéis são gerados por divisão de células em uma camada microscópica situada sob a casca, denominada *câmbio*, ou *liber*, que também produz células da casca.

Nos climas frios e temperados, o crescimento do tronco depende da estação. Na primavera e no início do verão, o cres-

cimento da árvore é intenso, formando-se no tronco células grandes de paredes finas. No final do verão e no outono, o crescimento da árvore diminui, formando-se células pequenas, de paredes grossas. Como consequência, o crescimento do tronco se faz em anéis anuais, formados por duas camadas: uma clara, de tecido brando, correspondente à primavera; outra escura, de tecido mais resistente, correspondente ao verão. Contando-se os anéis, pode-se saber a idade da árvore. Nos climas equatoriais, os anéis nem sempre são perceptíveis.

Na Fig. 1.2, vê-se um tronco de sequóia (*redwood*) com mais de mil anos de idade.

1.3.2. MICROESTRUTURA DA MADEIRA

As células da madeira, denominadas fibras, são como tubos de paredes finas alinhados na direção axial do tronco e co-

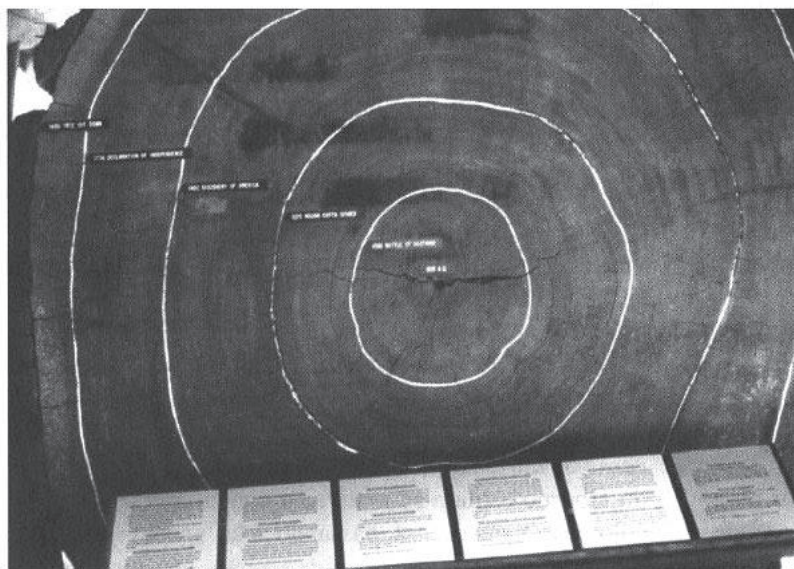


Fig. 1.2 Seção transversal de uma árvore gigante, da variedade *redwood* (Parque Nacional Muir Woods, Califórnia). Contando-se os anéis anuais de crescimento, é possível determinar a idade da árvore na época do corte da mesma. O espécime da foto tem mais de mil anos de idade. Alguns anéis são desenhados mostrando o diâmetro da madeira em datas históricas, como o descobrimento da América etc. A *redwood* é a árvore mais alta do mundo, atingindo alturas superiores a 100 m.

lados entre si (ver Fig. 1.3a). As fibras longitudinais possuem diâmetro variando entre 10 e 80 micra e comprimento de 1 a 8 mm. A espessura das paredes da célula varia de 2 a 7 micra.

Nas madeiras macias (coníferas) cerca de 90% do volume é composto de fibras longitudinais, que são o elemento portante da árvore. Além disso, elas têm a função de conduzir a seiva por tensão superficial e capilaridade através dos canais formados pelas cadeias de células. As fibras das árvores coníferas têm extremidades permeáveis e perfurações laterais que permitem a passagem de líquidos, como mostra a Fig. 1.3b. Algumas coníferas apresentam ainda canais longitudinais, ovalizados, onde são armazenadas resinas.

Nas árvores frondosas, as células longitudinais são fechadas nas extremidades; a seiva, então, circula em outras células de grande diâmetro, com extremidades abertas, justapostas, denominadas vasos ou canais. As fibras têm apenas a função de elemento portante.

A excelente relação resistência/peso da madeira (Tabela 1.1) pode ser explicada pela eficiência estrutural das células fibrosas ocas, com seção arredondada ou retangular (Fig. 1.3).

As fibras longitudinais distribuem-se em anéis, correspondentes aos ciclos anuais de crescimento.

Além das fibras longitudinais, as árvores têm em sua composição o parênquima, tecido pouco resistente, formado por grupos de células espalhadas na massa lenhosa e cuja função consiste em armazenar e distribuir matérias alimentícias. Nas árvores coníferas as células do parênquima são orientadas transversalmente do centro do tronco (medula) para a periferia formando as fibras radiais, denominadas *raios medulares*.

Nas árvores frondosas o parênquima se distribui transversal e longitudinalmente.

Na Fig. 1.4 são mostradas seções transversais típicas de madeira de árvore conífera e de árvore dicotiledônea.

A estrutura celular da madeira constitui a base da identificação micrográfica das espécies. Preparam-se lâminas com espessuras da ordem de 30 micra, contendo seções transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial. A distribuição celular nessas lâminas, observada com auxílio de microscópio, permite uma perfeita identificação da espécie vegetal. Muito útil na identificação é a distribuição do *parênquima*, que constitui uma verdadeira impressão digital da madeira.

1.3.3. ESTRUTURA MOLECULAR DA MADEIRA

A madeira é constituída principalmente por substâncias orgânicas. Os principais elementos constituintes apresentam-se nas seguintes porcentagens aproximadas, independentemente da espécie vegetal considerada (Young et al., 1998):

carbono	50%
oxigênio	44%
hidrogênio	6%

O composto orgânico predominante é a *celulose*, que constitui cerca de 50% da madeira, formando os filamentos que reforçam as paredes das fibras longitudinais. Outros dois componentes importantes são as hemiceluloses (constituindo 20 a 25% da madeira) e a lignina (20 a 30%) que envolvem as macromoléculas de celulose ligando-as (Wangaard, 1979). A lignina provê rigidez e resistência à compressão às paredes das fibras.

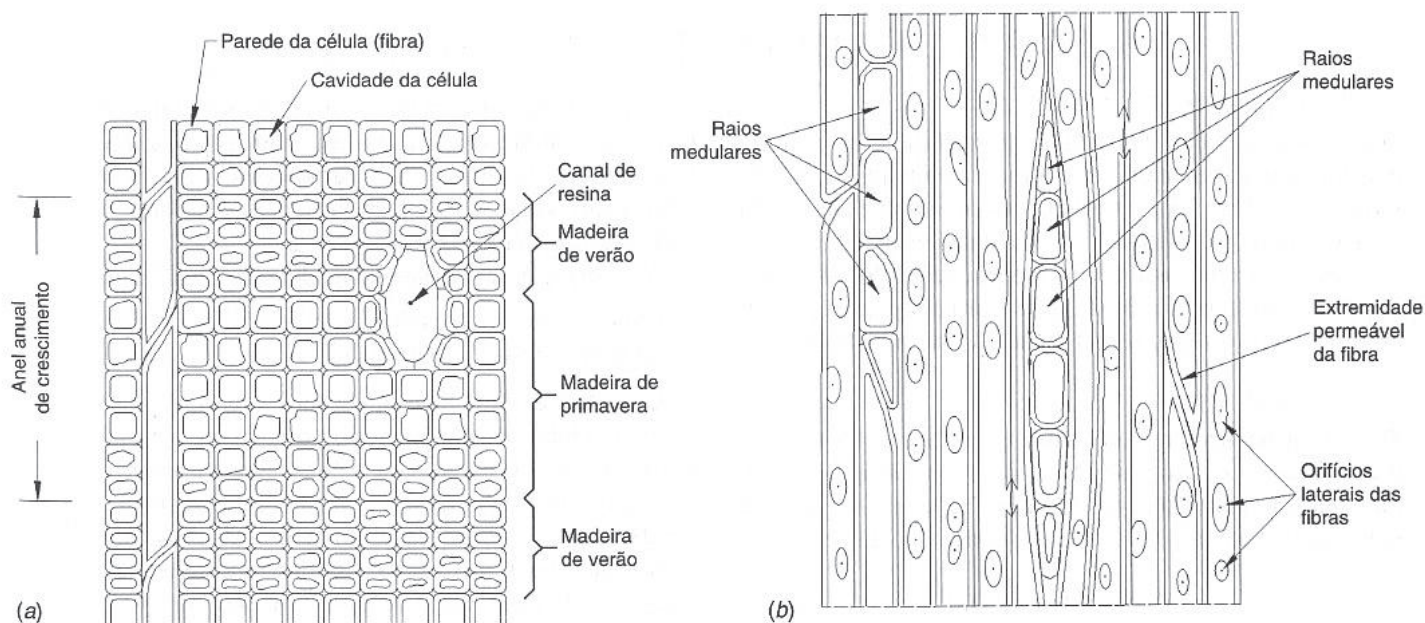


Fig. 1.3 Seções muito ampliadas do tecido celular de árvore conífera: (a) seção transversal; (b) seção tangencial.

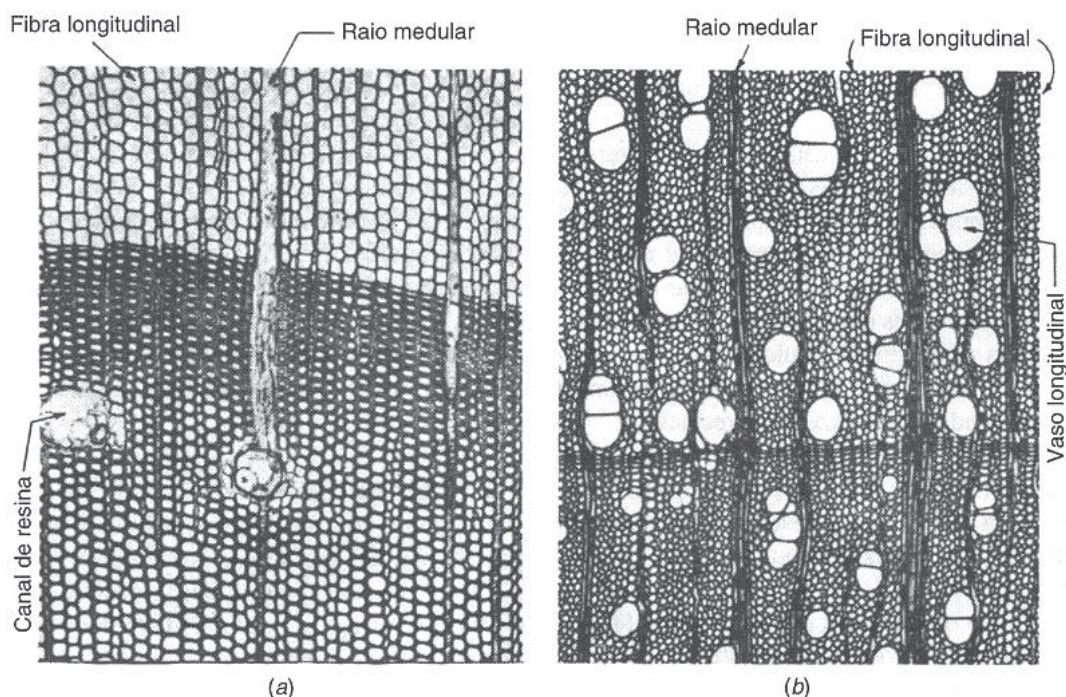


Fig. 1.4 Seções transversais ampliadas típicas de madeira: (a) de conífera; (b) de árvore frondosa.

A estrutura da madeira apresenta ainda pequenas quantidades (0,2 a 1%) de sais minerais, que constituem os alimentos dos tecidos vivos. Esses minerais produzem as cinzas quando a madeira é queimada.

As espécies vegetais apresentam ainda materiais, como resinas, óleos, ceras etc., que são depositados nas cavidades das células, produzindo coloração e cheiro característicos da espécie.

1.3.4. MATERIAL COMPÓSITO

As paredes das células longitudinais da madeira (fibras) podem ser descritas como um material compósito: os filamentos compostos de celulose constituem o reforço das fibras, e a matriz de polímeros (hemiceluloses e lignina) tem a função de manter unidos os filamentos e prover rigidez à compressão das fibras (Wangaard, 1979).

1.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DAS MADEIRAS

1.4.1. ANISOTROPIA DA MADEIRA

Devido à orientação das células, a madeira é um material anisotrópico, apresentando três direções principais conforme mostram as Figs. 1.5 e 1.6: longitudinal, radial e tangencial. A diferença de propriedades entre as direções radial e tangencial raramente tem importância prática, bastando diferenciar as propriedades na direção das fibras principais (direção longitudinal) e na direção perpendicular às mesmas fibras.

1.4.2. UMIDADE

A umidade da madeira tem grande importância sobre as suas propriedades. O grau de umidade U é o peso de água contido na madeira expresso como uma porcentagem do peso da madeira seca em estufa P_s (até a estabilização do peso):

$$U(\%) = \frac{P_i - P_s}{P_s} 100 \quad (1.1)$$

onde P_i é o peso inicial da madeira.

A quantidade de água das *madeiras verdes* ou recém-cortadas varia muito com as espécies e com a estação do ano. A faixa de variação da umidade das madeiras verdes tem como limites aproximados 30% para as madeiras mais resistentes e 130% para as madeiras mais macias.

A umidade está presente na madeira de duas formas:

- água no interior da cavidade das células ocas (fibras) e
- água absorvida nas paredes das fibras.

Quando a madeira é posta a secar, evapora-se a água contida nas células ocas, atingindo-se o *ponto de saturação das fibras*, no qual as paredes das células ainda estão saturadas, porém a água no seu interior se evaporou. Este ponto corresponde ao grau de umidade de cerca de 30%. A madeira é denominada, então, *meio seca*. Continuando-se a secagem, a madeira atinge um ponto de equilíbrio com o ar, sendo, então, denominada *seca ao ar*. O grau de umidade desse ponto depende da umidade atmosférica, variando geralmente entre

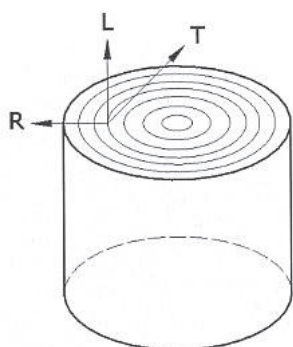


Fig. 1.5 Anisotropia da madeira. São indicadas as direções longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T).

10 e 20% para a umidade relativa do ar entre 60% e 90% e a 20°C de temperatura (Karlsen et al., 1967).

Em face do efeito da umidade nas outras propriedades da madeira, é comum referirem-se estas propriedades a um grau de umidade-padrão. No Brasil e nos Estados Unidos, adotam-se 12% como umidade-padrão de referência.

Devido à natureza higroscópica da madeira, o grau de umidade de uma peça em serviço varia continuamente, podendo haver variações diárias ou de estação.

1.4.3. RETRAÇÃO DA MADEIRA

As madeiras sofrem *retração* ou *inchamento* com a variação da umidade entre 0% e o ponto de saturação das fibras (30%), sendo a variação dimensional aproximadamente linear. O fenômeno é mais importante na direção tangencial; para redução da umidade de 30% até 0%, a retração tangencial varia de 5% a 10% da dimensão verde, conforme as espécies. A retração na direção radial é cerca da metade da dire-

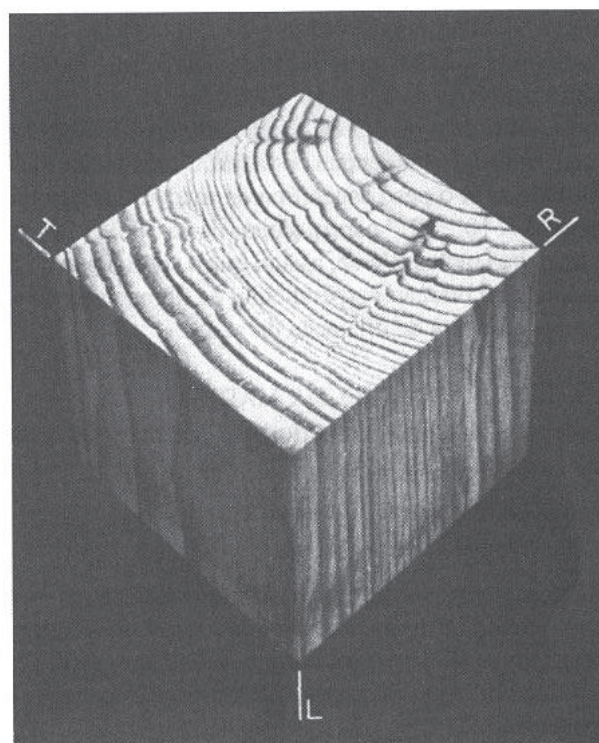


Fig. 1.6 Vista de uma peça serrada de madeira, mostrando as direções longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T). Observem-se os anéis de crescimento.

ção tangencial. Na direção longitudinal, a retração é menos pronunciada, valendo apenas 0,1% a 0,3% da dimensão verde, para secagem de 30% a 0%. A retração volumétrica é aproximadamente igual à soma das três retrações lineares ortogonais.

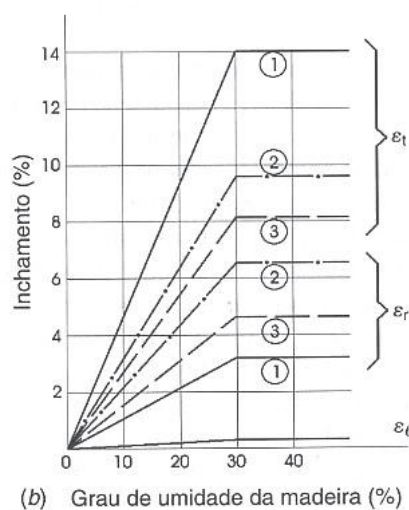
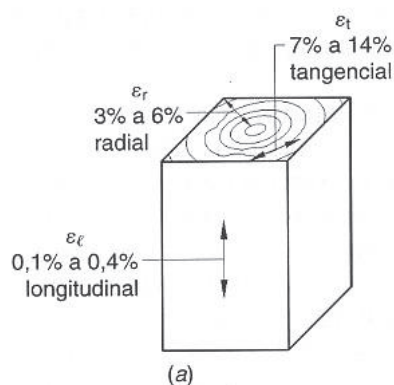


Fig. 1.7 Diagramas de retração ou inchamento de três espécies vegetais, em função do grau de umidade. A variação entre 0 e 30% de umidade é aproximadamente linear: (a) vista isométrica da madeira, mostrando as três direções principais; (b) diagrama de retração ou inchamento linear (ϵ_{li} , medido em %), em função do teor de umidade da madeira: ① carvalho brasileiro; ② eucalipto; ③ pinho brasileiro.

1.4.4. DILATAÇÃO LINEAR

O coeficiente de dilatação linear das madeiras, na direção longitudinal, varia de $0,3 \times 10^{-5}$ a $0,45 \times 10^{-5}$ por $^{\circ}\text{C}$, sendo, pois, da ordem de 1/3 do coeficiente de dilatação linear do aço. Na direção tangencial ou radial, o coeficiente de dilatação varia com o peso específico da madeira, sendo da ordem de $4,5 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$ para madeiras duras e $8,0 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$ para madeiras moles. Vê-se, assim, que o coeficiente de dilatação linear na direção perpendicular às fibras varia de 4 a 7 vezes o coeficiente de dilatação do aço.

1.4.5. DETERIORAÇÃO DA MADEIRA

A madeira está sujeita à deterioração por diversas origens, dentre as quais se destacam

- ataque biológico e
- ação do fogo.

Fungos, cupins, moluscos e crustáceos marinhos (ver Fig. 1.8) são exemplos de agentes biológicos que se instalam na madeira para se alimentar de seus produtos (Wangaard, 1979).

A vulnerabilidade da madeira de construção ao ataque biológico depende

- da camada do tronco de onde foi extraída a madeira (o alburno é mais sensível à biodegradação do que o cerne),
- da espécie da madeira (algumas espécies são mais resistentes à biodeterioração) e
- das condições ambientais, caracterizadas pelos ciclos de reumidificação, pelo contato com o solo, com água doce ou salgada.

Por ser combustível a madeira é freqüentemente considerada um material de pequena resistência ao fogo. Mas, ao contrário, as estruturas de madeira, quando adequadamente

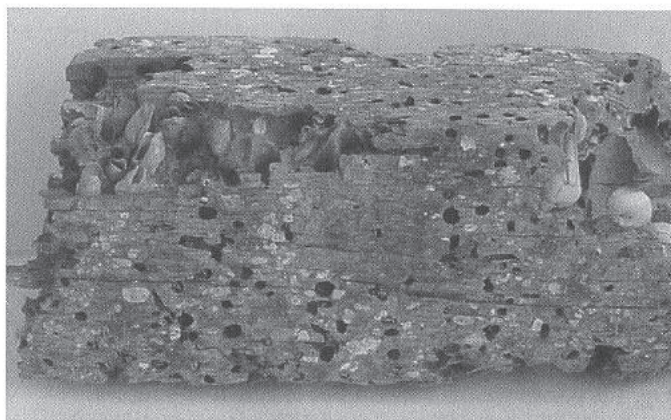


Fig. 1.8 Peça de madeira que sofreu ataque de moluscos marinhos.

projetadas e construídas, apresentam ótimo desempenho sob ação do fogo. As peças robustas de madeira possuem excelente resistência ao fogo, pois se oxidam lentamente devido à baixa condutividade de calor, guardando um núcleo de material íntegro (com propriedades mecânicas inalteradas) por longo período de tempo. Já as peças esbeltas de madeira e as peças metálicas das ligações requerem proteção contra ação de fogo.

Por meio de tratamento químico pode-se aumentar a resistência da madeira aos ataques de agentes biológicos e do fogo. Este tratamento, em geral, consiste em impregnar a madeira com preservativos químicos (por exemplo creosoto) e retardadores de fogo.

A escolha da espécie de madeira, a aplicação de tratamento químico adequado e a adoção de detalhes construtivos que favoreçam as condições ambientais resultam em estruturas de madeira de grande durabilidade.

1.5. DEFEITOS DAS MADEIRAS

As peças de madeira utilizadas nas construções apresentam uma série de defeitos que prejudicam a resistência, o aspecto ou a durabilidade. Os defeitos podem provir da constituição do tronco ou do processo de preparação das peças. A seguir, descrevem-se os principais defeitos da madeira.

Nós. Imperfeição da madeira nos pontos dos troncos onde existiam galhos. Os galhos ainda vivos na época do abate da árvore produzem nós firmes, enquanto os galhos mortos originam nós soltos. Os nós soltos podem cair durante o corte com a serra, produzindo orifícios na madeira. Nos nós, as fibras longitudinais sofrem desvio de direção, ocasionando redução na resistência à tração.

Fendas. Aberturas nas extremidades das peças, produzidas pela secagem mais rápida da superfície; ficam situadas em planos longitudinais radiais, atravessando os anéis de crescimento. O aparecimento de fendas pode ser evitado mediante a secagem lenta e uniforme da madeira.

Gretas ou ventas. Separação entre os anéis anuais, provocada por tensões internas devidas ao crescimento lateral da árvore, ou por ações externas, como flexão devida ao vento.

Abaulamento. Encurvamento na direção da largura da peça.

Arqueadura. Encurvamento na direção longitudinal, isto é, do comprimento da peça.

Fibras reversas. Fibras não paralelas ao eixo da peça. As fibras reversas podem ser provocadas por causas naturais ou por serragem. As causas naturais devem-se à proximidade de nós ou ao crescimento das fibras em forma de espiral. A serragem da peça em plano inadequado pode produzir peças com fibras inclinadas em relação ao eixo. As fibras reversas reduzem a resistência da madeira (ver item 3.3.3).

Esmoada ou quina morta. Canto arredondado, formado pela curvatura natural do tronco. A quina morta significa elevada proporção de madeira branca (alburno).

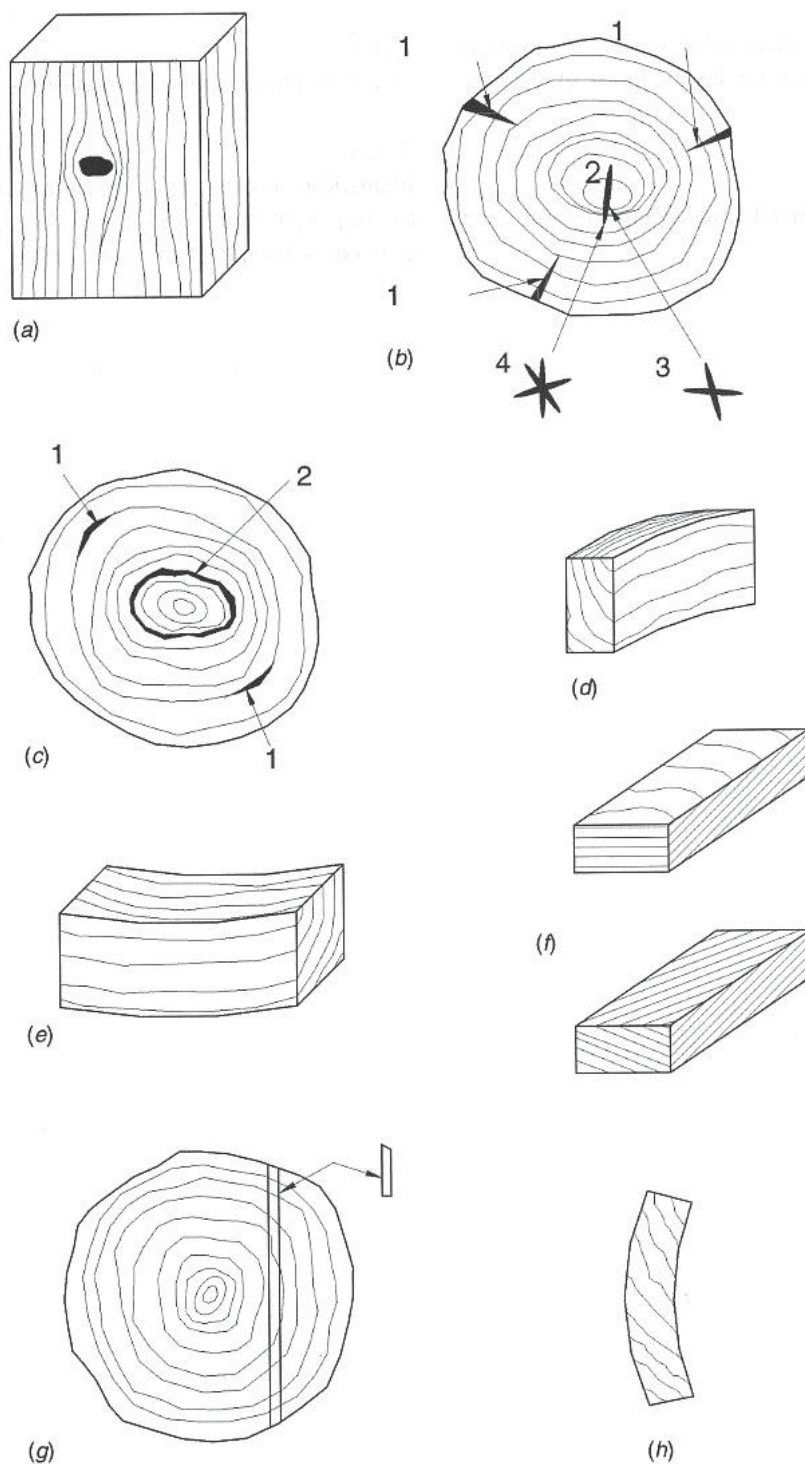


Fig. 1.9 Defeitos nas madeiras: (a) nó, provocando inclinação das fibras; (b) fendas: 1 — fendas periféricas (*split*); 2 a 4 — fendas no cerne (*shake*). Em peças de pequeno diâmetro, as fendas podem atravessar a seção, separando-a em duas partes: (c) gretas (*cup shake*): 1 — greta parcial; 2 — greta completa; (d) abaulamento (*sweep*); (e) arqueamento (*camber*); (f) fibras reversas (*slope of grain, cross grain*); (g) esmoado (*wane*); (h) empenamento (*warping*).

1.6. PROBLEMAS PROPOSTOS

1.6.1.

O que são anéis anuais de crescimento?

1.6.2.

Quais são as principais diferenças entre a microestrutura das madeiras duras (dicotiledôneas) e das madeiras macias (coníferas)?

1.6.3.

Qual a característica anatômica da madeira que conduz a sua anisotropia?

1.6.4.

Desenhe um cubo de madeira e ilustre os anéis anuais de crescimento e as três direções principais da madeira.

1.6.5.

Defina ponto de saturação das fibras.

1.6.6.

Identifique as causas dos defeitos da madeira citados no texto (item 1.5) dentre as seguintes: constituição do tronco; processo de secagem da madeira; processo de serragem.