

## CAPÍTULO 2

# PRODUTOS DE MADEIRA E SISTEMAS ESTRUTURAIS

### 2.1. TIPOS DE MADEIRA DE CONSTRUÇÃO

As madeiras utilizadas nas construções podem classificar-se em duas categorias:

- **madeiras maciças:**
  - madeira bruta ou roliça
  - madeira falquejada
  - madeira serrada
- **madeiras industrializadas:**
  - madeira compensada
  - madeira laminada (ou microlaminada) e colada
  - madeira recomposta.

A madeira bruta ou roliça é empregada em forma de tronco, servindo para estacas, escoramentos, postes, colunas etc.

A madeira falquejada tem as faces laterais aparadas a machado, formando seções maciças, quadradas ou retangulares; é utilizada em estacas, cortinas cravadas, pontes etc.

A madeira serrada é o produto estrutural de madeira mais comum entre nós. O tronco é cortado nas serrarias, em dimensões padronizadas para o comércio, passando depois por um período de secagem.

Além dos defeitos oriundos de sua fabricação (item 1.5), a madeira serrada apresenta limitações geométricas tanto

em termos de comprimento quanto de dimensões da seção transversal. Para ampliar o uso da madeira em construção, diversos produtos foram desenvolvidos na Europa e na América do Norte com o objetivo de produzir peças de grandes dimensões e painéis, com melhores propriedades mecânicas que a madeira utilizada como base de fabricação.

O produto mais antigo é a madeira compensada, formada pela colagem de lâminas finas, com as direções das fibras alternadamente ortogonais.

A madeira laminada e colada é o produto estrutural de madeira mais importante nos países da Europa e América do Norte. A madeira selecionada é cortada em lâminas, de 15 mm a 50 mm de espessura, que são coladas sob pressão, formando grandes vigas, em geral de seção retangular.

Sob a designação de madeira recomposta encontram-se produtos na forma de placas desenvolvidos a partir de resíduos de madeira em flocos, lamelas ou partículas. Foram desenvolvidos também alguns produtos fabricados à base de lâminas finas (1 a 5 mm) que são coladas e prensadas com as fibras orientadas paralelamente para formar vigas ou painéis largos e compridos.

### 2.2. MADEIRA ROLIÇA

A madeira roliça é utilizada com mais frequência em construções provisórias, como escoramento. Os roliços de uso mais frequente no Brasil são o pinho-do-paraná e os eucaliptos. As árvores devem ser abatidas de preferência na época da seca, quando o tronco tem menor teor de umidade. Após o abate, remove-se a casca, deixando-se o tronco secar em local arejado e protegido contra o sol.

As madeiras roliças, que não passaram por um período mais ou menos longo de secagem, ficam sujeitas a retrações transversais que provocam rachaduras nas extremidades. Os contraventamentos construídos com madeira verde aparafusada tornam-se, em geral, inoperantes pela fissuração das extremidades da madeira. Para evitar as rachaduras nas extremidades, recomenda-se revestir as seções de corte com alcatrão ou outro impermeabilizante.

A umidade nos troncos das árvores varia muito com as espécies e a época do ano. Na estação seca, a madeira ver-

de tem menor umidade que na estação chuvosa. Retirando-se a casca e deixando secar o tronco, evapora-se primeiramente a água contida no interior das células ocas; a madeira chama-se, então, *meio seca*, sendo seu teor de umidade cerca de 30%. Continuando-se a secagem, a madeira atinge um ponto de equilíbrio com a umidade atmosférica, chamando-se, então, *seca ao ar*. Como a evaporação da

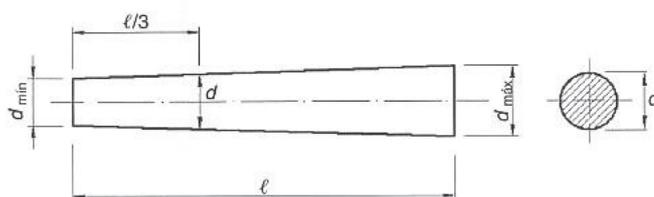


Fig. 2.1 Diâmetro nominal ( $d$ ) de madeira roliça ( $d \leq 1,5 d_{\min}$ ).

umidade é mais rápida nas extremidades (onde as fibras longitudinais estão abertas), a peça pode fendilhar-se durante a secagem. Pode-se evitar a formação de fendas pintando-se as extremidades com alcatrão ou qualquer outro meio que retarde a evaporação.

As madeiras roliças devem ser utilizadas nas condições meio seca ou seca ao ar.

As peças roliças de diâmetro variável (em forma de tronco de cone) são comparadas, para efeito de cálculo, a uma peça cilíndrica de diâmetro igual ao do terço da peça (Fig. 2.1).

## 2.3. MADEIRA FALQUEJADA

A madeira falquejada é obtida de troncos por corte com machado. Dependendo do diâmetro dos troncos, podem ser obtidas seções maciças falquejadas de grandes dimensões, como, por exemplo, 30 cm × 30 cm ou mesmo 60 cm × 60 cm. No falquejamento do tronco, as partes laterais cortadas constitu-

em a perda. A seção retangular inscrita que produz menor perda é o quadrado de lado  $b = d/\sqrt{2}$  (Fig. 2.2).

Há interesse em determinar a seção retangular ( $b \times h$ ) de maior módulo resistente  $bh^2/6$ , que se pode obter de um tronco circular de diâmetro  $d$ . A Fig. 2.3 fornece o resultado deste problema.

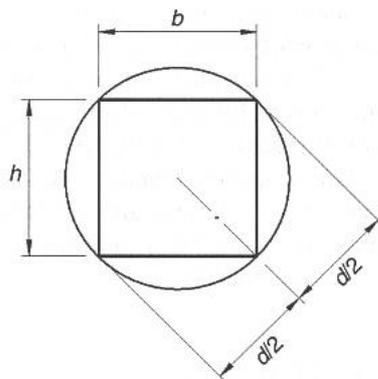
## 2.4. MADEIRA SERRADA

### 2.4.1. CORTE E DESDOBRAMENTO DAS TORAS

As árvores devem ser abatidas de preferência ao atingir a maturidade, ocasião em que o cerne ocupa a maior percentagem do tronco, resultando, então, em madeira de melhor qualidade. O tempo necessário para que a árvore atinja ma-

turidade varia conforme as espécies, podendo chegar a cem anos.

A melhor época para o abate é a estação seca, quando o tronco tem pouca umidade. O desdobramento do tronco em peças deve fazer-se o mais cedo possível após o corte da árvore, a fim de evi-



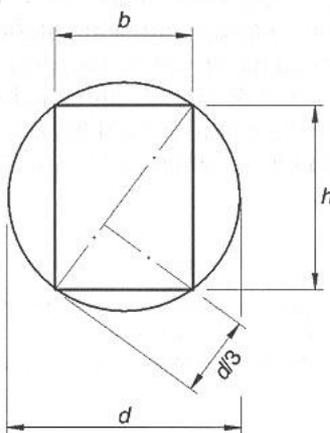
$$A = bh = \sqrt{d^2 - h^2}$$

$$\frac{dA}{dh} = 0 \text{ conduz a } b = h = \frac{d}{\sqrt{2}}$$

$$A = bh = \frac{d^2}{2} = 0,64 \left( \frac{\pi}{4} d^2 \right)$$

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{d^3}{12\sqrt{2}} = 0,059 d^3.$$

Fig. 2.2 Seção retangular de menor perda de madeira inscrita na circunferência de diâmetro  $d$ . A área inscrita vale 64% da área do círculo.



$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{bd^2 - b^3}{6}$$

$$\frac{dW}{db} = 0 \text{ conduz a } b = \frac{d}{\sqrt{3}} \quad h = \sqrt{2} b = \sqrt{\frac{2}{3}} d$$

$$A = bh = \frac{\sqrt{2}}{3} d^2 = 0,60 \left( \frac{\pi}{4} d^2 \right)$$

$$W = \frac{d^3}{9\sqrt{3}} = 0,064 d^3.$$

Fig. 2.3 Seção retangular de maior módulo resistente  $bh^2/6$ , inscrita na circunferência de diâmetro  $d$ . A área inscrita vale 60% da área do círculo.

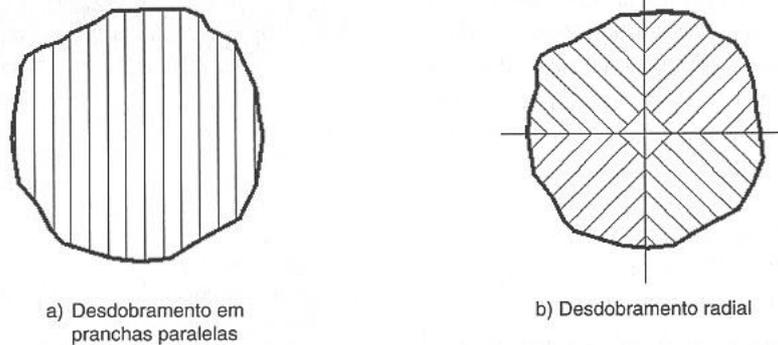


Fig. 2.4 Esquemas de corte das toras de madeira.

tar defeitos decorrentes da secagem da madeira. Se a árvore for cortada na estação chuvosa, deixam-se secar as toras durante algum tempo, para reduzir o excesso de umidade. Os troncos são cortados em serras especiais, de fita contínua, que os divide em lâminas ou pranchas paralelas, na espessura desejada (Fig. 2.4a).

As serras de fita possuem comandos mecânicos para o avanço do tronco, que garantem a espessura uniforme das lâminas. As espessuras obedecem, em geral, a padrões comerciais.

Um outro processo de desdobramento é o indicado na Fig. 2.4b, no qual o tronco é dividido inicialmente em quatro partes, e o desdobramento se faz na direção radial. O desdobramento radial produz material mais homogêneo, porém é mais oneroso, razão pela qual é utilizado com menor frequência que o desdobramento paralelo.

O comprimento das toras é limitado por problemas de transporte e manejo, ficando geralmente na faixa de 4 m a 6 m.

2.4.2. SECAGEM DA MADEIRA SERRADA

Antes de ser utilizada nas construções, a madeira serrada deve passar por um período de secagem para reduzir a umidade. A secagem pode produzir deformações transversais diferenciais nas peças serradas, dependendo da posição original da peça no tronco (Fig. 2.5). Por isso a madeira deve ser utilizada já seca (grau de umidade em equilíbrio com a umidade relativa do ar – ver item 1.4.2), evitando-se, assim, danos na estrutura tais como empenamentos e rachas oriundas da secagem.

O melhor método de secagem consiste em empilhar as peças, colocando separadores para permitir circulação livre do ar em todas as faces. Protegem-se as pilhas da chuva, colocando-as em galpões abertos e bem ventilados. O tempo necessário para secagem natural é de um a dois anos para madeiras macias e de dois a três anos para madeiras de lei.

Como a secagem natural é lenta, desenvolveram-se processos artificiais de secagem. Fazendo circular ar quente entre as peças de madeira serrada, empilhadas como indicado, obtém-se secagem mais rápida. A temperatura e a umidade do ar insuflado devem ser controladas para evitar evaporação demasiadamente rápida da madeira, o que pode prejudicar a durabilidade da mesma.

Outro processo artificial de secagem consiste em deslocar a madeira lentamente através de um túnel alongado, no qual a temperatura do ar circulante aumenta à proporção que a madeira avança, de modo a manter uma velocidade de evaporação mais ou menos constante. O tempo necessário para a secagem artificial da madeira verde é de dez dias a um mês, por polegada (1 polegada = 2,54 cm) de espessura da peça.

2.4.3. DIMENSÕES COMERCIAIS DE MADEIRAS SERRADAS

As madeiras serradas são vendidas em seções padronizadas, com bitolas nominais em centímetros ou em polegadas. Uma

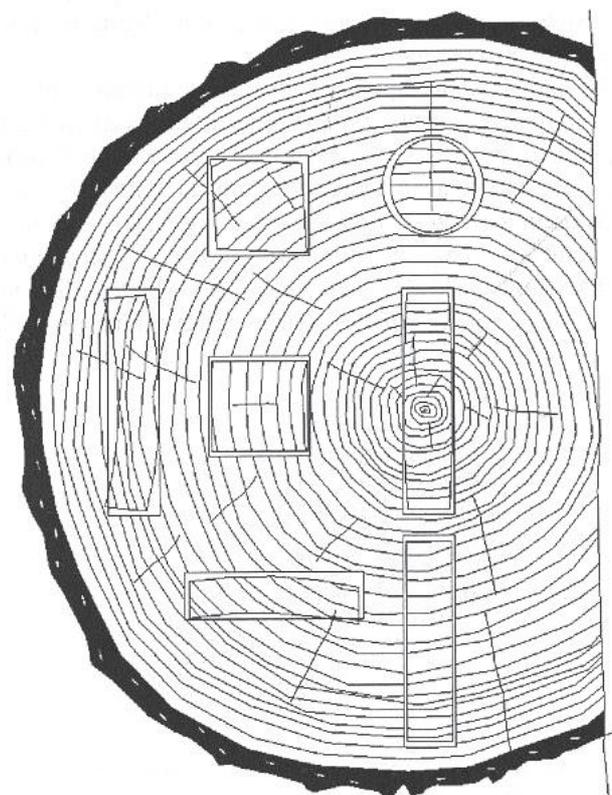


Fig. 2.5 Distorção por retração de peças de madeira de diversas formas, conforme a posição relativa dos anéis anuais.

pesquisa entre fornecedores de madeira da cidade de São Paulo (Zenid) em 1996 revelou uma grande quantidade de dimensões disponíveis e também uma grande diversidade de nomenclaturas. A Tabela A.2.1 (Anexo A) apresenta os principais perfis, obedecendo à nomenclatura da ABNT (Padronização PB-5) em dimensões comerciais.

#### 2.4.4. DIMENSÕES MÍNIMAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE PEÇAS DE MADEIRA SERRADA USADAS EM ESTRUTURAS

As seções transversais de peças utilizadas em estruturas devem ter certas dimensões mínimas, para evitar fendilhamentos ou flexibilidade exagerada.

As dimensões mínimas especificadas pela Norma brasileira NBR 7190 encontram-se na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 Espessuras e áreas mínimas construtivas de seções retangulares (NBR 7190)

	Espessura mínima (cm)	Área mínima (cm <sup>2</sup> )	Seção mínima de menor espessura (cm × cm)
Peças principais			
Seções simples	5	50	5 × 10
Peças componentes de seções múltiplas	2,5	35	2,5 × 14
Peças secundárias			
Seções simples	2,5	18	2,5 × 7,5
Peças componentes de seções múltiplas	1,8	18	1,8 × 10

## 2.5. MADEIRA COMPENSADA

A madeira compensada (Fig. 2.6) é formada pela colagem de três ou mais lâminas, alternando-se as direções das fibras em ângulo reto. Os compensados podem ter três, cinco ou mais lâminas, sempre em número ímpar.

Com as camadas em direções ortogonais alternadas, obtém-se um produto mais aproximadamente isotrópico que a madeira maciça. A madeira compensada apresenta vantagens sobre a maciça em estados de tensões biaxiais, que aparecem, por exemplo, nas almas das vigas, nas estruturas de placas dobradas ou nas cascas.

As lâminas, cujas espessuras geralmente variam entre 1 mm e 5 mm, podem ser obtidas das toras ou de peças retangulares, utilizando-se facas especiais para corte. Em geral utiliza-se o corte com rotação do tronco de madeira em torno de seu eixo contra uma faca, como mostra a Fig. 2.7. A seguir, são submetidas à secagem, natural ou artificial. Na secagem natural, as lâminas são abrigadas em galpões cobertos e bem ventilados. A secagem artificial se faz a temperaturas de 80°C a

100°C, impedindo-se os empenamentos com auxílio de prensas. A secagem artificial é muito rápida, variando de 10 a 15 minutos para lâminas de 1 mm até quase uma hora para lâminas mais espessas.

A colagem é feita sob pressão, podendo ser utilizadas prensas a frio ou a quente. As colas sintéticas são prensadas a quente.

Os compensados destinados à utilização em seco, como portas, armários, divisórias etc., podem ser colados com cola de caseína. Os compensados estruturais, sujeitos a variações de umidade ou expostos ao tempo, devem ser fabricados com colas sintéticas.

As chapas de compensado são fabricadas com dimensões padronizadas, 2,50 × 1,25 m, e espessuras variando entre 4 e 30 mm.

A madeira compensada apresenta uma série de vantagens sobre a madeira maciça:

- a) pode ser fabricada em folhas grandes, com defeitos limitados;

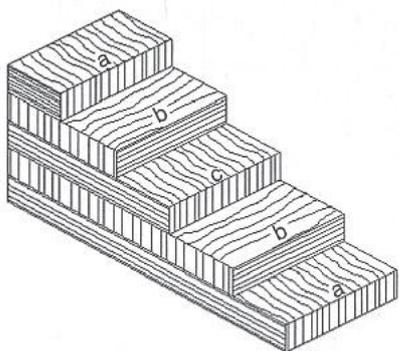


Fig. 2.6 Seção de uma peça de madeira compensada, destacando-se as camadas de madeira. As camadas externas (a) e a camada central (c) têm as fibras na direção longitudinal. As camadas intermediárias (b) têm as fibras na direção transversal.

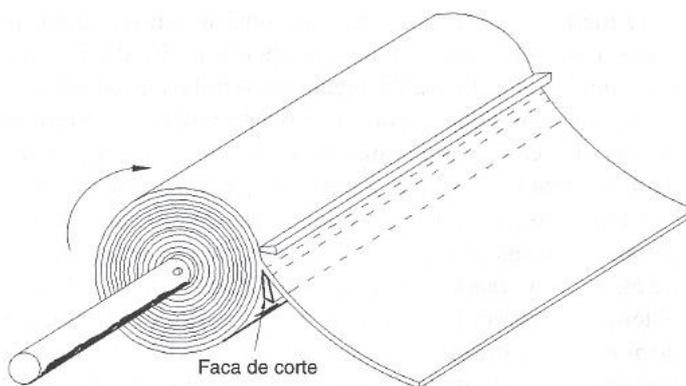


Fig. 2.7 Corte rotatório de lâminas de madeira.

- b) reduz retração e inchamento, graças à ortogonalidade de direção das fibras nas camadas adjacentes;
  - c) é mais resistente na direção normal às fibras;
  - d) reduz trincas na cravação de pregos;
  - e) permite o emprego de madeira mais resistente nas capas externas e menos resistente nas camadas interiores, o que é vantajoso em algumas aplicações.
- A desvantagem mais importante está no preço mais elevado.

## 2.6. MADEIRA LAMINADA E COLADA

A madeira laminada e colada é um produto estrutural, formado por associação de lâminas de madeira selecionada, coladas com adesivos e sob pressão (ver Fig. 2.8). As fibras das lâminas têm direções paralelas. A espessura das lâminas varia em geral de 1,5 cm a 3,0 cm, podendo excepcionalmente atingir até 5 cm. As lâminas podem ser emendadas com cola nas extremidades, formando peças de grande comprimento. As estruturas de madeira laminada e colada foram idealizadas em 1905 na Alemanha, tendo grande aceitação na Europa (Callia, 1958). Posteriormente se popularizaram nos Estados Unidos juntamente com a industrialização das madeiras e das colas.

As etapas de fabricação de peças de madeira laminada e colada consistem em (Callia, 1958):

- secagem das lâminas
- preparo das lâminas
- execução de juntas de emendas
- colagem sob pressão
- acabamento e tratamento preservativo.

Antes da colagem as lâminas sofrem um processo de secagem em estufa, que demora de um a vários dias, conforme

o grau de umidade inicial. A madeira sai da estufa com uma umidade máxima de 15%. As especificações limitam a variação do grau de umidade das lâminas entre si, não devendo ultrapassar 5% na ocasião da colagem, a fim de controlar tensões internas devidas à retração diferencial.

O preparo das lâminas que vão compor a peça consiste em aplainá-las e serrá-las nas dimensões necessárias.

De particular importância são as emendas das lâminas, que podem ser executadas com um dos detalhes ilustrados na Fig. 2.9. As emendas são geralmente distribuídas ao longo da peça de forma desordenada (Fig. 2.9a). A eficiência da junta em chanfro depende da inclinação do corte: quanto mais inclinada, mais resistente, conforme mostra a Tabela 2.2. As emendas denteadas são mais eficientes do que

TABELA 2.2 Eficiência de juntas inclinadas (Garfinkel, 1973)

Inclinação t/l (ver Fig. 2.9)	1/12	1/10	1/8	1/5
Eficiência	0,85	0,80	0,75	0,60

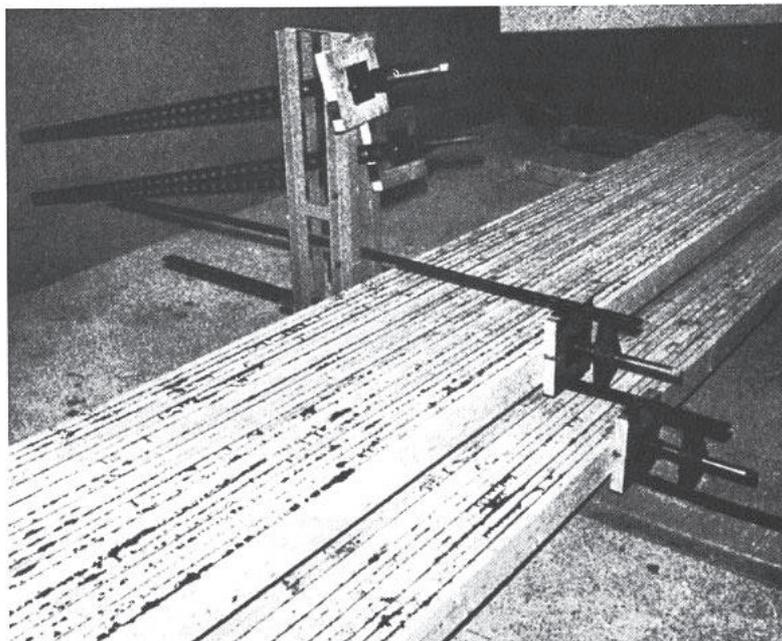


Fig. 2.8 Prensagem de lâminas de madeira com interposição de cola, para duas vigas retangulares de madeira laminada colada (Holzbau Taschembuch, 1974).

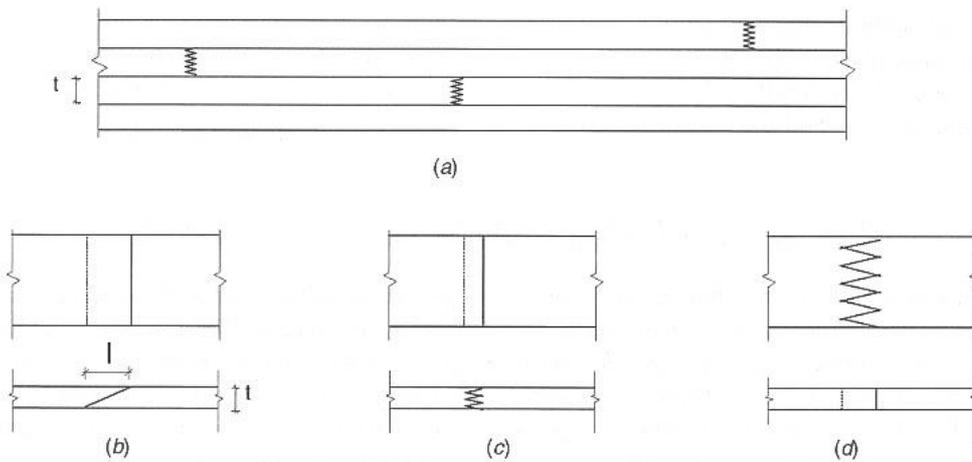


Fig. 2.9 Detalhes de emendas de lâminas; (a) distribuição das emendas na direção longitudinal; (b) junta por corte em chanfro; (c) emenda denteada vertical; (d) emenda denteada horizontal.

as emendas com chanfro, além de serem mais compactas. A Fig. 2.10 mostra uma emenda denteada horizontal de lâmina com 35 mm de espessura. O corte em cunhas denteadas se faz com máquinas especiais de grande eficiência. O comprimento das cunhas varia de 10 a 60 mm em sua inclinação de 1/7 a 1/10.

Os tipos de cola e a técnica de colagem são essenciais à durabilidade do produto. Para utilização em seco, pode ser empregada cola de caseína, que é um produto obtido do leite. Para vigas sujeitas à variação de umidade ou expostas ao tempo, usam-se colas sintéticas, de fenol-formaldeído (baquelita) ou resorcinol-formaldeído. Os produtos estruturais industrializados são fabricados com colas sintéticas. A colagem é feita sob pressão variável de 0,7 a 1,5 MPa, sendo as pressões mais baixas utilizadas em madeiras macias e as mais altas, em madeiras duras. A quantidade de cola utilizada é de cerca de 250 g por metro quadrado de superfície colada. As especificações estipulam resistências a cisalhamento para as colas, variando os valores, conforme as espécies vegetais e a umidade da madeira na ocasião da colagem.

Os produtos estruturais industrializados de madeira laminada e colada são fabricados sob rígidos padrões de controle de qualidade, que lhes garantem as características de resistência e durabilidade. Em função do processo de fabricação resulta um material mais homogêneo que a madeira serrada, pois os nós da madeira são partidos e distribuídos mais aleatoriamente ao longo da peça fabricada.

A madeira laminada e colada apresenta, ainda, em relação à madeira maciça, as seguintes vantagens:

- permite a confecção de peças de grandes dimensões (as dimensões comerciais de madeira serrada são limitadas);
- permite melhor controle de umidade das lâminas, reduzindo defeitos provenientes de secagem irregular;
- permite a seleção da qualidade das lâminas situadas nas posições de maiores tensões;
- permite a construção de peças de eixo curvo, muito convenientes para arcos, tribunas, cascas etc.

A desvantagem mais importante das madeiras laminadas é o seu preço, mais elevado que o da madeira serrada.

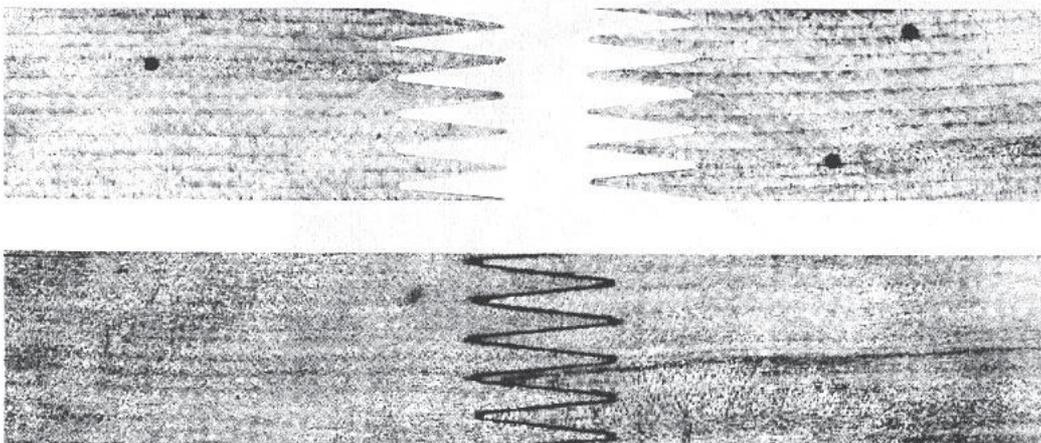


Fig. 2.10 Emenda de lâmina com cunha denteada.

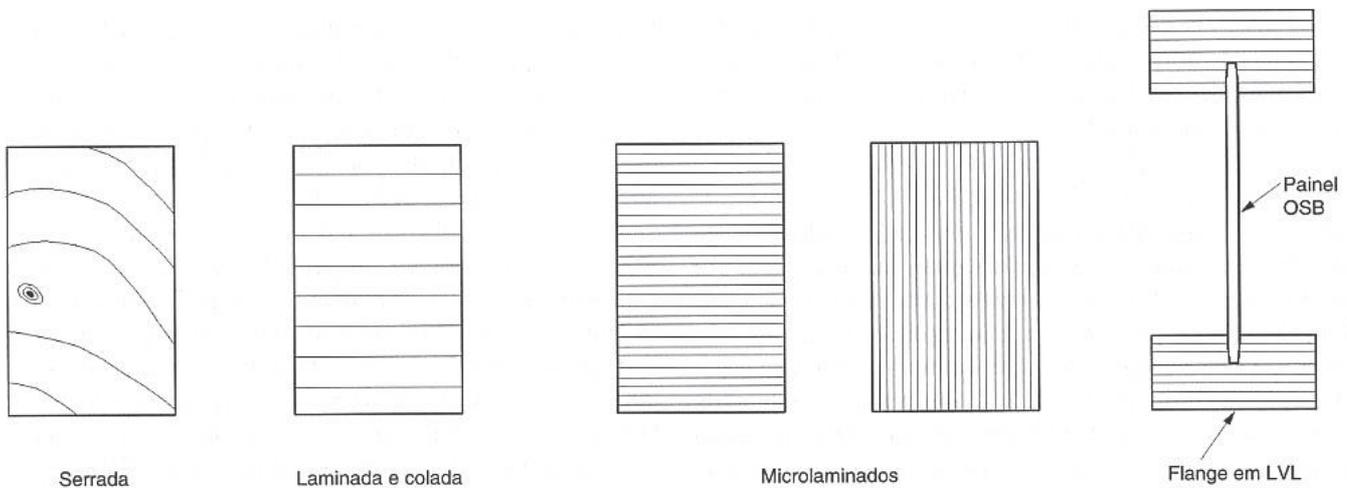


Fig. 2.11 Peças de seção retangular e I de madeira serrada e laminada e colada.

## 2.7. MADEIRA MICROLAMINADA E COLADA

Os produtos à base de finas lâminas de madeira (de 1 a 5 mm de espessura), os quais podem ser denominados microlaminados, foram introduzidos na construção civil na década de 1970 (Lam, 2001). As lâminas são obtidas por corte rotatório do tronco, da mesma forma que as de madeira compensada (item 2.5), mas são posteriormente utilizadas na fabricação de vigas e painéis com as fibras orientadas paralelamente.

O LVL (*Laminated Veneer Lumber*) é produzido a partir de lâminas que, após a secagem, são empilhadas com as fibras orientadas na direção do comprimento e coladas com as juntas defasadas. A colagem é feita sob pressão a uma temperatura de 150°. Com esta técnica podem ser fa-

bricados diversos produtos com até 20 m de comprimento, na forma de vigas ou chapas, com espessuras variando entre 20 e 200 mm.

Na Fig. 2.11 estão ilustradas peças de seção retangular de madeira serrada, madeira laminada e colada, e madeira microlaminada. Em função da redistribuição e minimização dos defeitos, os produtos microlaminados apresentam uma estrutura mais homogênea e tendem a ser mais resistentes que a madeira serrada e a madeira laminada colada tradicional. Além disso, como as lâminas são obtidas por corte rotatório do tronco, árvores de pequeno diâmetro podem ser utilizadas na fabricação.

## 2.8. PRODUTOS DE MADEIRA RECOMPOSTA NA FORMA DE PLACAS

Produtos na forma de placas foram desenvolvidos a partir de resíduos da madeira serrada e compensada convertidos em flocos e partículas e colados sob pressão. Em geral, estas placas de madeira prensada não são consideradas materiais estruturais devido à baixa resistência e durabilidade, sendo muito utilizadas na indústria de móveis. As características mecânicas destas placas dependem das dimensões das partículas e do adesivo usado.

Já o produto denominado OSB (*Oriented Strand Board*) é muito popular na América do Norte e na Europa em aplica-

ções estruturais, tais como painéis diafragma, almas de vigas I compostas (ver Fig. 2.11), além de revestimentos de piso e cobertura. Os painéis de OSB são fabricados com finas lascas de madeira coladas sob pressão e alta temperatura, sendo que nas duas camadas superficiais as lascas são alinhadas com a direção longitudinal dos painéis, enquanto nas camadas internas são dispostas aleatoriamente ou na direção transversal. Dessa forma busca-se assemelhá-las às placas de madeira compensada mas com reduzido peso específico (entre 550 e 750 kg/m<sup>3</sup>) e significativa vantagem econômica.

## 2.9. SISTEMAS ESTRUTURAIS EM MADEIRA

Sendo a madeira um material utilizado para construção há muitos séculos, uma grande variedade de sistemas estruturais em madeira pode ser observada, os quais vêm evoluin-

do em função dos diversos produtos industrializados. Talvez o sistema estrutural mais tradicional seja o sistema treliçado utilizado em coberturas tanto residenciais quanto

industriais e em pontes. Pórticos de um andar para galpões e pórticos de vários andares para edificações, além de arcos e abóbadas são exemplos de sistemas estruturais adotados para estruturas em madeira.

## Estutura telhado

### 2.9.1. TRELIÇAS DE COBERTURA

A Fig. 2.12 ilustra alguns sistemas treliçados utilizados em coberturas de madeira — alguns dos quais são designados por nomes próprios —, bem como a nomenclatura adotada para seus elementos. A treliça Howe é a mais tradicional para uso em madeira, e seus componentes recebem uma designação especial, conforme ilustrado na Fig. 2.12, em função da geometria e dos esforços atuantes para cargas de gravidade: tração no montante e no banzo inferior e compressão na diagonal e no banzo superior. Nas treliças Pratt e belga, os esforços nos montantes e diagonais se invertem em relação aos da treliça Howe.

As treliças de cobertura — também chamadas de tesouras — sustentam o telhamento e seu vigamento de apoio. No caso de telhas cerâmicas, mais usadas em coberturas de edificações residenciais, o vigamento de apoio é composto dos seguintes elementos, conforme ilustra a Fig. 2.13a:

- terças — vigas vencendo o vão entre treliças e apoiando-se, em geral, em seus nós;
- caibros — apóiam-se nas terças e são espaçados de 40 a 60 cm;
- ripas — peças nas quais se apóiam as telhas cerâmicas e cujo espaçamento (da ordem de 35 cm) é função do comprimento da telha.

Podem também ser utilizadas telhas metálicas formadas por chapas corrugadas, as quais se apóiam diretamente nas terças.

A inclinação do telhado é função do tipo de telha adotada. Os valores mínimos do ângulo entre o plano do telhamento e o plano horizontal são da ordem 25° para telhas cerâmicas e 2° para telhas metálicas.

As treliças de cobertura estão sujeitas às cargas de gravidade (pesos próprio e das telhas e seu vigamento de apoio) e às cargas de vento. Os pesos do telhamento e seu vigamento de apoio, assim como as ações devidas ao vento, são cargas distribuídas na superfície do telhado que se transmitem como forças concentradas aos nós das treliças por meio das terças (ver Fig. 2.13b).

No caso de telhas cerâmicas dispostas sem fixação sobre o vigamento, somente as ações de sobrepressão de vento são transmitidas às treliças (a ação de sucção externa produz o levantamento das telhas). Com as telhas fixadas à estrutura (como no caso das telhas metálicas parafusadas às terças), as ações de vento de sucção e de sobrepressão são transmitidas à treliça de cobertura.

A Fig. 2.13c ilustra detalhes típicos de ligações entre as peças de uma treliça Howe, as quais não apresentam inversão de esforços sob ação de carga permanente mais vento. As peças comprimidas (banzo superior e diagonal) podem ter suas

ligações executadas por entalhe (os parafusos representados têm finalidade construtiva). A ligação do montante tracionado com o banzo inferior pode ser feita por meio de talas metálicas parafusadas (detalhe C). Encontra-se também ilustrado nesta figura o vigamento de apoio de telhas cerâmicas composto de terças, caibros e ripas.

As treliças de cobertura são dispostas em planos verticais, sendo a estabilidade do conjunto de treliças promovida pelos sistemas de contraventamento. A Fig. 2.14 apresenta um sistema estrutural de cobertura com treliças de banzo superior pouco inclinado, em geral adotadas para telhamento metálico em edificações industriais, e seus contraventamentos. Destacam-se o contraventamento no plano do telhamento, formado por uma treliça composta de diagonais neste plano ligadas às terças e banzos superiores de duas tesouras adjacentes, e o contraventamento vertical em X ou em mão-francesa. Em conjunto com as treliças, esses contraventamentos formam um sistema estrutural tridimensional capaz de resistir às ações de vento proveniente de qualquer direção horizontal. Além disso, esses contraventamentos servem para apoiar lateralmente os elementos comprimidos das treliças, reduzindo assim seus comprimentos de flambagem fora dos planos verticais das treliças.

Para cargas de gravidade o banzo superior fica comprimido, e seus pontos de apoio na direção perpendicular ao plano da treliça, para definição de seu comprimento de flambagem, são dados pelo contraventamento no plano do telhado (ver os modos de flambagem do banzo superior fora do plano da treliça na Fig. 2.14b). Em coberturas com telhas metálicas, bastante leves, a ação de sucção de vento pode compensar a ação das cargas de gravidade e até mesmo inverter os esforços nos elementos da treliça. Nestes casos, o banzo inferior fica comprimido e seus pontos de apoio lateral são fornecidos pelo contraventamento vertical.

As descrições de sistemas de cobertura aqui apresentadas se restringiram a telhados de duas águas. Descrições mais abrangentes podem ser encontradas na referência (Moliterno, 1980).

### 2.9.2. VIGAMENTOS PARA PISOS

Os pisos ou soalhos de madeira são constituídos de vigas biapoiadas de seção retangular ou I com espaçamento da ordem de 50 cm e revestidas por tábuas (Fig. 2.15). O dimensionamento das vigas é usualmente feito para ação de uma carga estática uniformemente distribuída. Este critério pode, entretanto, conduzir a uma estrutura caracterizada por vibrações excessivas decorrentes do caminhar de pessoas. A avaliação deste estado limite de utilização é bastante difícil. As normas de projeto brasileira NBR7190 e europeia EUROCODE 5 apresentam critérios simplificados para garantir o atendimento a este estado limite.

A inclusão de contraventamentos entre as vigas propicia uma melhor distribuição de carga entre as vigas, reduzindo assim o problema das vibrações.

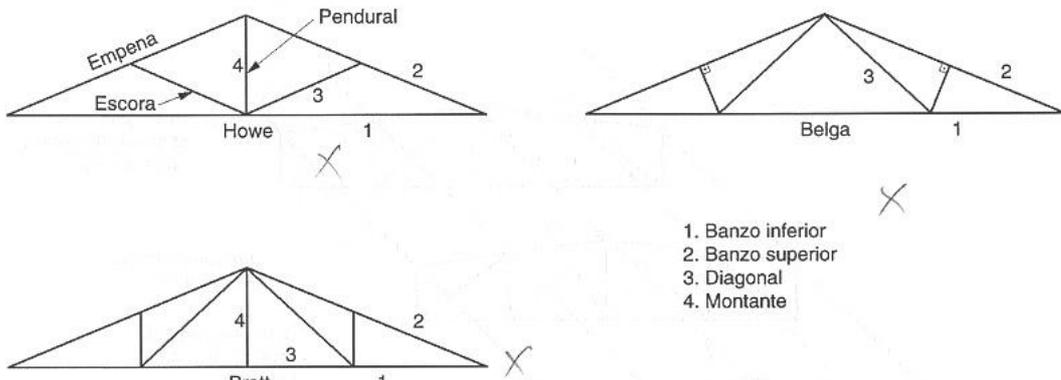
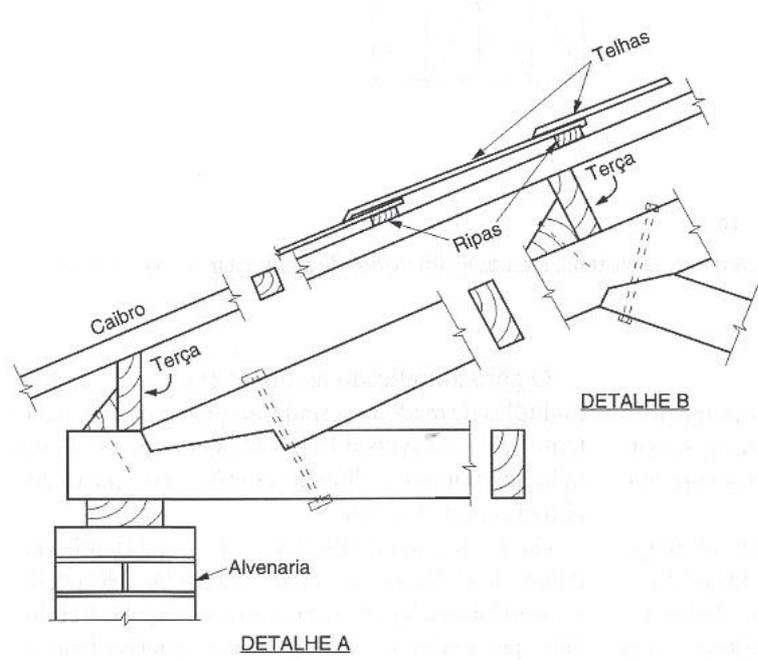
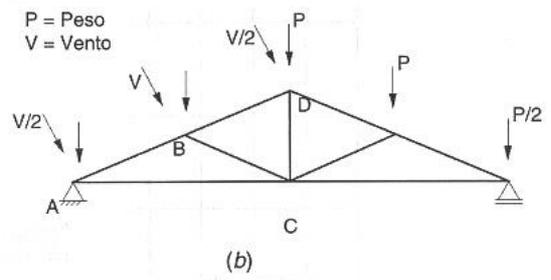
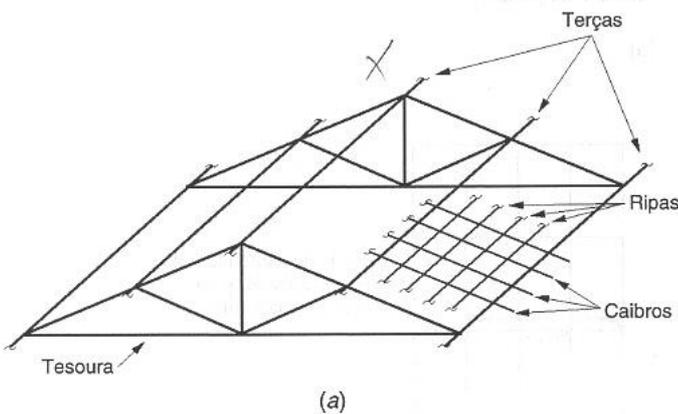


Fig. 2.12 Trelças para cobertura e nomenclatura de seus elementos.



(c)

Fig. 2.13 Estrutura para cobertura com telhas cerâmicas: (a) vigamento de apoio das telhas; (b) treliça de telhado e carregamentos; (c) detalhes de ligações.

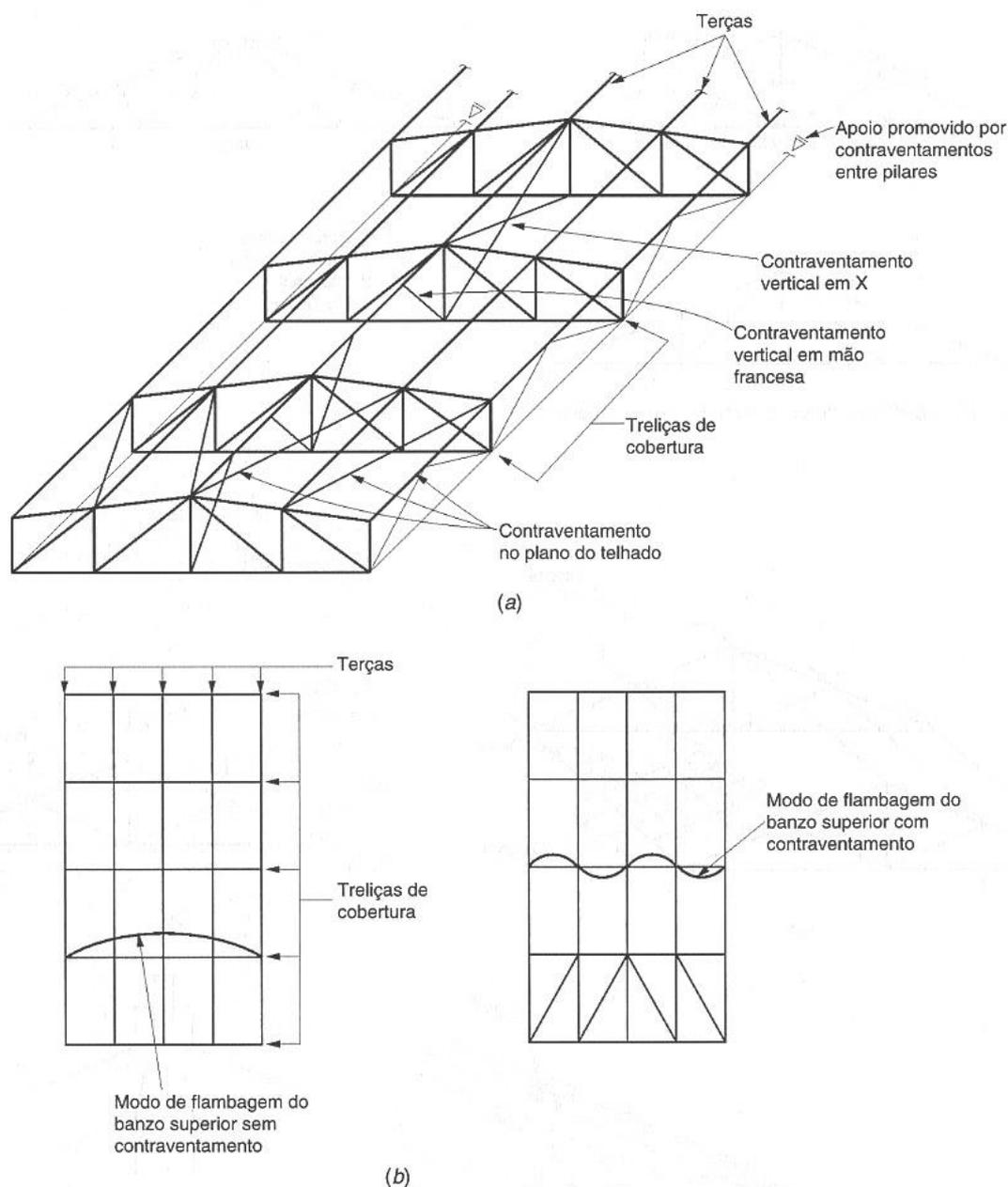


Fig. 2.14 Trelças de cobertura e sistemas de contraventamento: (a) sistema estrutural; (b) modos de flambagem do banzo superior fora do plano da treliça.

### 2.9.3. PÓRTICOS

Pórticos são usualmente adotados como sistema portante principal de edificações destinadas a galpões, estádios de esporte, piscinas ou estações rodoviárias com vãos livres variando entre 20 e 100 m.

A Fig. 2.16 apresenta alguns exemplos de pórticos. Em geral são estruturas biarticuladas ou triarticuladas. Os pórticos triarticulados são muitas vezes adotados pela facilidade e rapidez na montagem — cada semipórtico é elevado por uma grua e em seguida fixa-se a articulação central. Além disso, por ser uma estrutura isostática, não sofre esforços por variação de temperatura e umidade.

O pórtico treliçado da Fig. 2.16a é executado com peças múltiplas de madeira serrada, enquanto o pórtico da Fig. 2.16b tem seção transversal I fabricada com peças de madeira serrada nos flanges e alma descontínua composta de tábuas inclinadas (ver item 6.9).

Os pórticos das Figs. 2.16c, d são fabricados em madeira laminada colada com seção retangular. No pórtico de hastes retilíneas a ligação entre a viga e o pilar é rígida e executada, por exemplo, com pinos metálicos dispostos em circunferência. O pórtico de hastes curvas aproveita as potencialidades arquitetônicas da madeira laminada colada (ver Figs. 2.17 e 2.18).

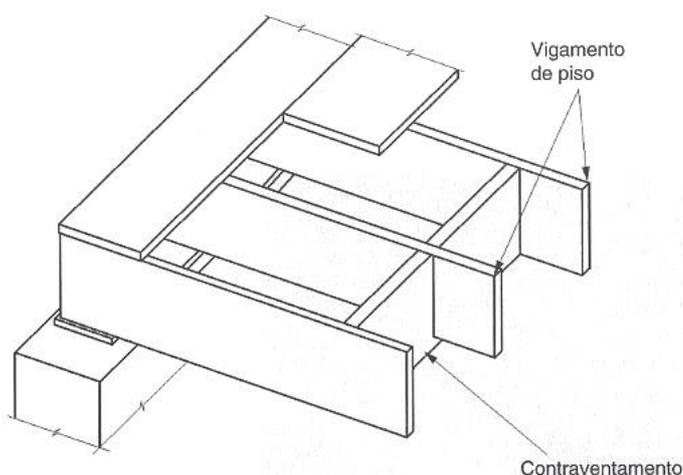


Fig. 2.15 Vigamento para piso de madeira.

Os diversos pórticos paralelos de uma estrutura são ligados pelas terças e pelos contraventamentos, como mostra a Fig. 2.19. O contraventamento no plano do telhado transfere as cargas de vento na direção longitudinal do galpão para os pilares, além de impedir a flambagem lateral dos pórticos. O contraventamento vertical transfere estas cargas para as fundações e dá rigidez ao conjunto na direção longitudinal. A ação das cargas de vento transversais é absorvida pelos pórticos.

### 2.9.4. PONTES EM MADEIRA

Ao longo dos séculos, diversos sistemas estruturais, como os ilustrados na Fig. 2.20, têm sido adotados por engenheiros e construtores para executar pontes em madeira. Destacam-se os sistemas em viga reta, em treliças de várias geometrias, em arcos e pórticos.

Um importante aspecto do projeto de pontes é a durabilidade. Para manter a madeira sempre seca e, por conseguinte, aumentar a sua durabilidade, os projetos de pontes previam uma cobertura como a da Ponte Vecchio em Bassano del Grappa, Itália, ilustrada na Fig. 2.21. Após ter sido destruída por diversas vezes, esta ponte foi reconstruída toda em madeira, conforme o projeto de 1568 do famoso arquiteto italiano Andrea Palladio.

As modernas pontes em madeira geralmente não são construídas com coberturas e, portanto, a proteção da madeira deve ser garantida por tratamentos para preservação, revestimentos impermeáveis do tabuleiro e detalhes construtivos.

A elegante Ponte de Vihantasalmi, na Finlândia, é um exemplo de ponte moderna em madeira (Fig. 2.22). A escolha do material teve como principal motivação o aspecto de integração da obra com a natureza desta região produtora de madeira de reflorestamento (Rantakokko, 2000). O projeto utiliza um sistema treliçado tradicional (ver Fig. 2.20b) para vencer vãos de 42 m com peças de madeira laminada colada.

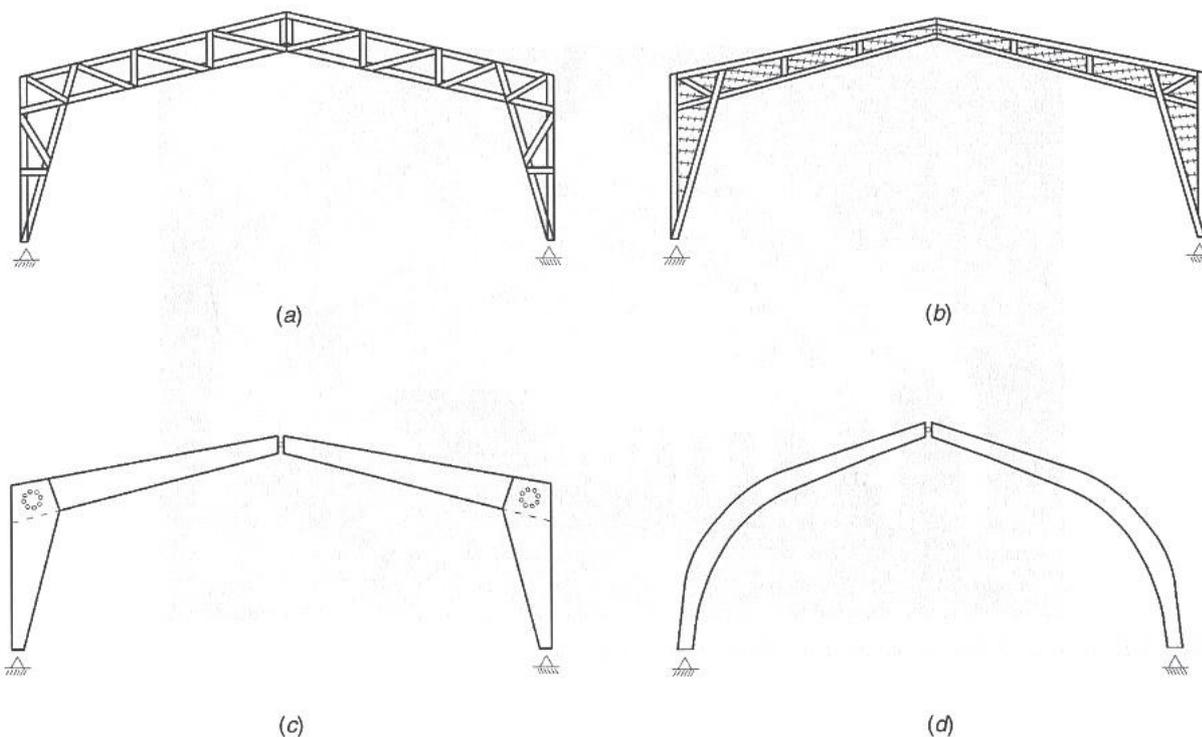


Fig. 2.16 Pórticos em madeira para galpões, estádios de esporte e espaços públicos em geral: (a) pórtico biarticulado treliçado; (b) pórtico biarticulado de alma cheia de seção I; (c) e (d) pórticos triarticulados em madeira laminada e colada.

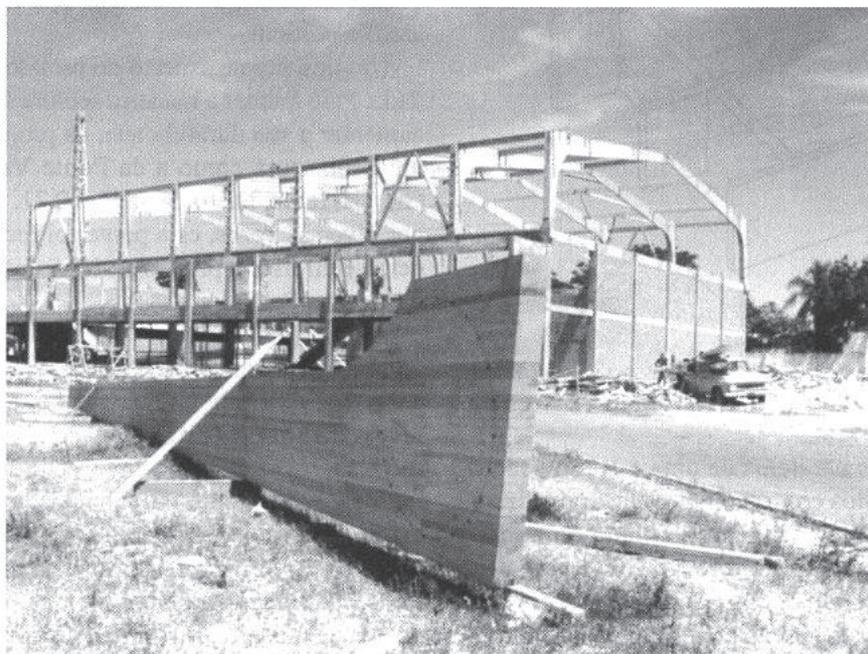


Fig. 2.17 Pórtico de hastes retas em madeira laminada e colada. Em primeiro plano, uma peça a ser montada.



Fig. 2.18 Pórtico triarticulado de hastes curvas em madeira laminada e colada.

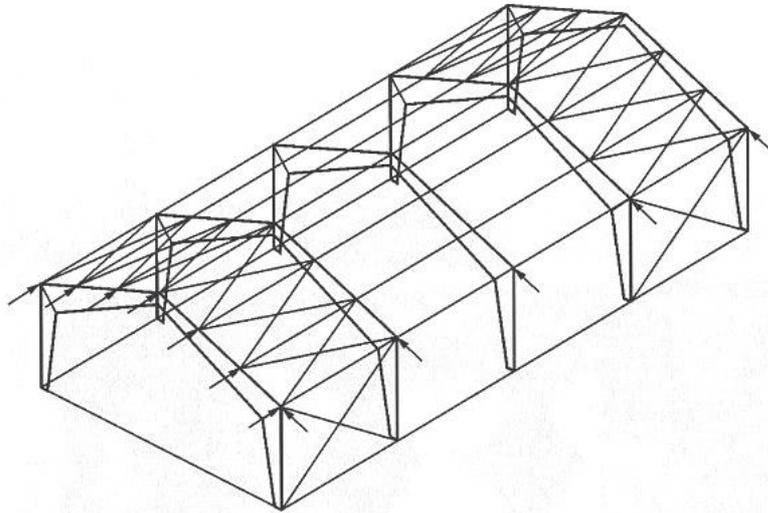


Fig. 2.19 Pórticos associados e sistemas de contraventamento.

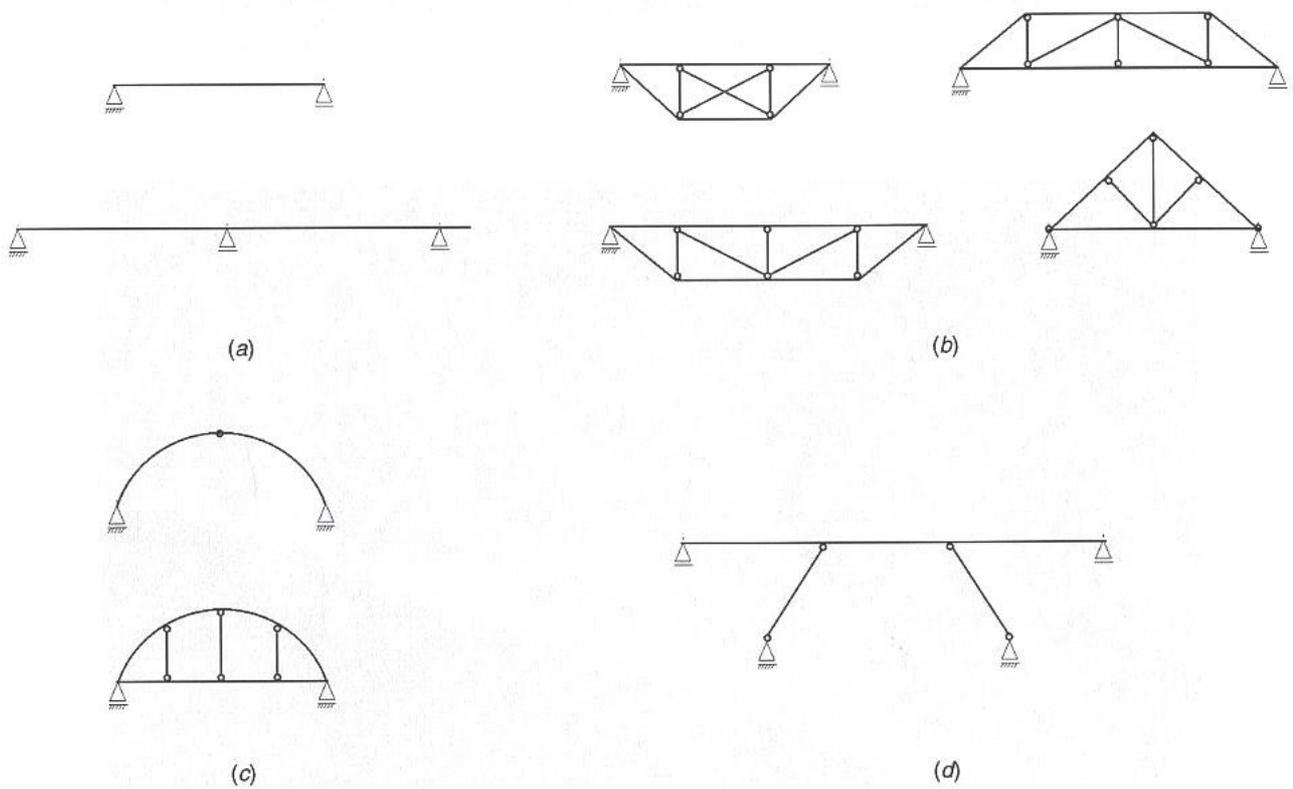


Fig. 2.20 Sistemas estruturais para pontes em madeira.

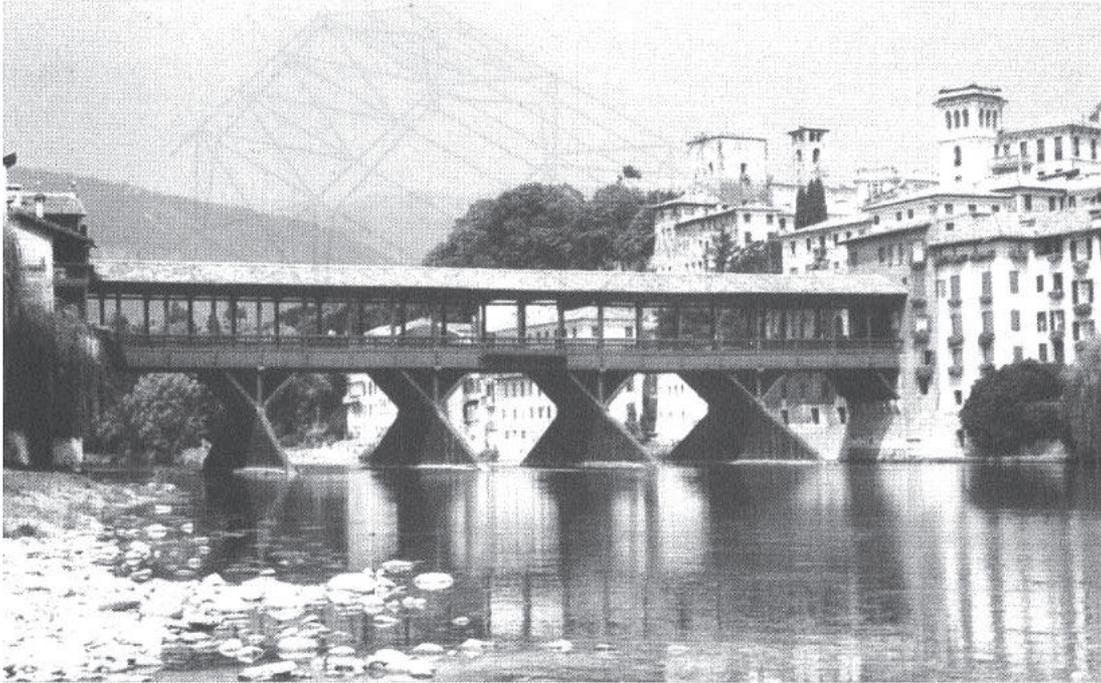


Fig. 2.21 Ponte Vecchio em Bassano del Grappa, Itália, conforme projeto de 1568 do arquiteto italiano Andrea Palladio.

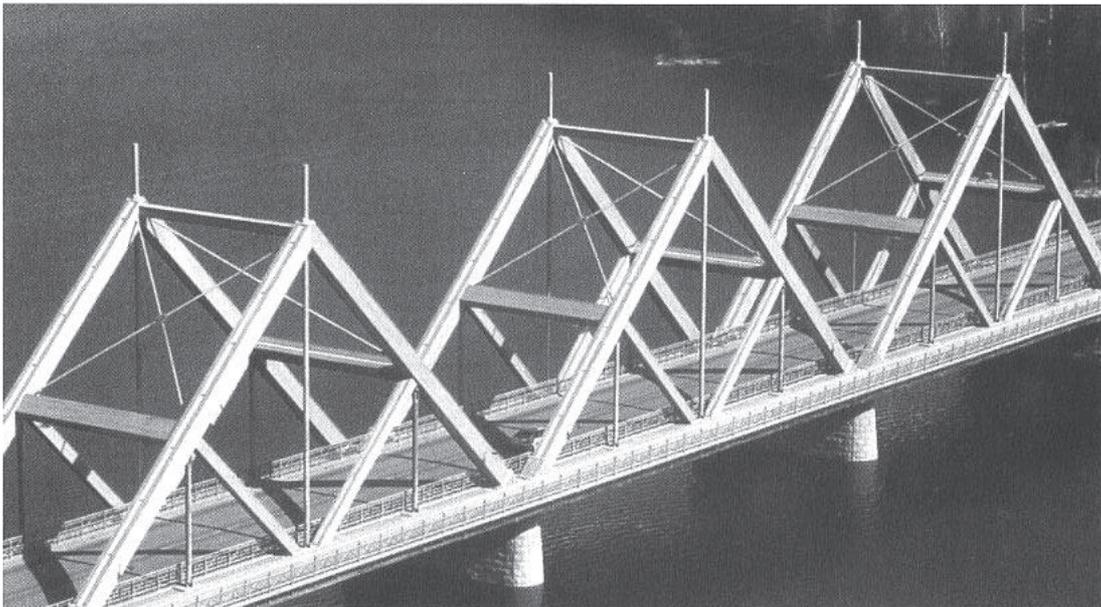


Fig. 2.22 Ponte de Vihantasalmi, na Finlândia.

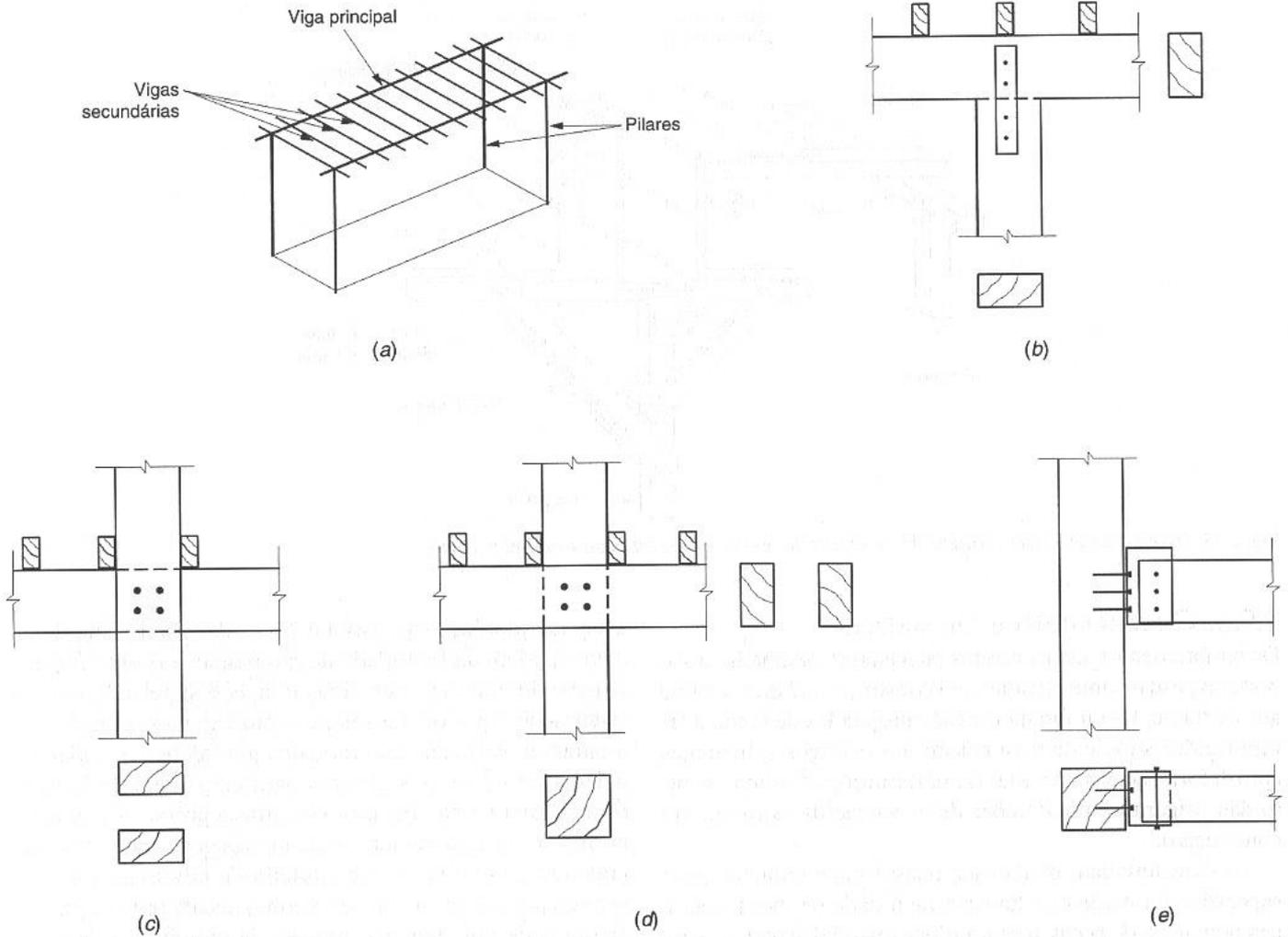


Fig. 2.23 Sistema estrutural para edificações e tipos de ligação viga-pilar.

2.9.5. ESTRUTURAS APORTICADAS PARA EDIFICAÇÕES

Os sistemas estruturais para edificações são, em geral, constituídos de grelhas planas para os pisos, com suas vigas principais apoiadas em pilares e formando com estes um sistema de pórtico espacial. As vigas secundárias do piso transferem as cargas verticais para as vigas principais e estas para os pilares, conforme mostra a Fig. 2.23. Também nesta figura encontram-se exemplificados alguns tipos de ligação viga-pilar, conforme estes elementos sejam de seção simples ou dupla. Na Fig. 2.23b ilustra-se uma ligação de apoio vertical da viga por contato no pilar, aplicável a uma edificação de um andar. Os esquemas com seção dupla (Figs. 2.23c, d) permitem a continuidade da viga e do pilar, e a ligação entre estes elementos pode ser feita por meio de conectores ou pinos metálicos. A Fig. 2.23e mostra um exemplo de apoio da viga em um berço metálico pregado no pilar.

A estabilidade da edificação tendo em vista as ações horizontais (por exemplo, vento) e os efeitos de imperfeições como

desalinhamento de pilares, depende da rigidez das ligações viga-pilar. Se estas ligações forem rígidas, as cargas horizontais atuam sobre pórticos formados pelas vigas e pilares. Para as ligações viga-pilar flexíveis, aquelas que se aproximam do funcionamento de uma rótula, a estabilidade lateral da edificação depende de sistemas de contraventamento vertical como paredes diafragma ou treliçados em X, conforme ilustrado na Fig. 2.24.

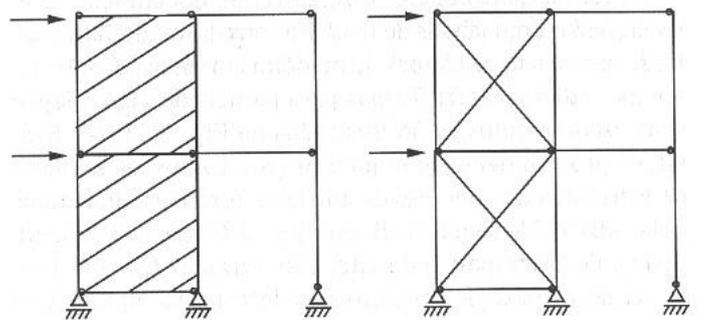


Fig. 2.24 Elementos de contraventamento vertical para edificações.

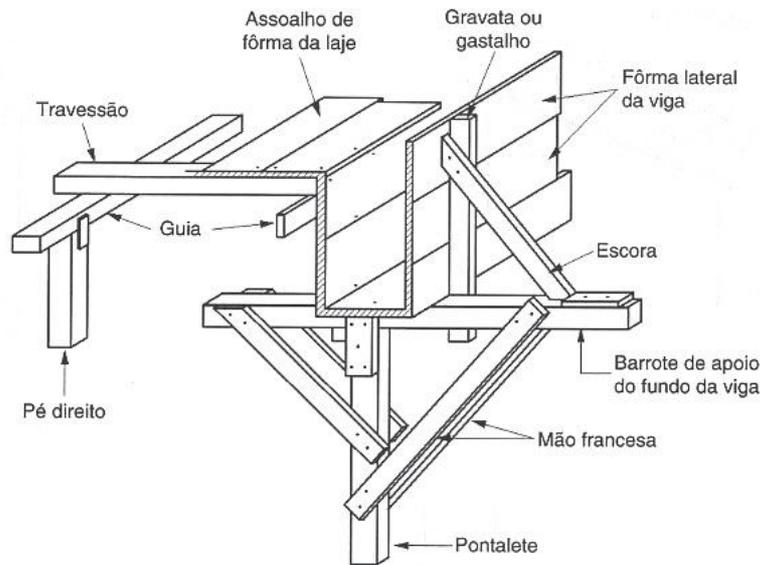


Fig. 2.25 Sistema tradicional de fôrmas de madeira para vigas e lajes em concreto (ABCP, 1944).

### 2.9.6. CIMBRAMENTOS DE MADEIRA

Os cimbramentos são estruturas provisórias destinadas a suportar o peso de uma estrutura em construção até que se torne autoportante. Os cimbramentos são projetados de modo a terem rigidez suficiente para resistir aos esforços solicitantes com deformações moderadas (as deformações do cimbramento dão origem a imperfeições de execução da estrutura em construção).

As características de elevada resistência e reduzido peso específico da madeira, aliadas à facilidade de montagem e desmontagem de peças, tornaram este material vantajoso para uso em estruturas de cimbramentos. Nestas condições, a madeira foi utilizada com exclusividade nos cimbramentos de arcos e abóbadas em alvenaria de pedra desde a época do Império Romano e nas construções em concreto armado da primeira metade do século XX. Nas últimas décadas do século XX foram desenvolvidos e amplamente utilizados sistemas de cimbramento padronizados tanto em estrutura de aço quanto de madeira.

A madeira é muito utilizada atualmente em estruturas auxiliares provisórias, em fôrmas para concreto armado, em vigamento para apoio de fôrmas e em escoramentos.

As fôrmas para concreto armado eram inicialmente confeccionadas com tábuas de madeira serrada, evoluindo mais tarde para o uso de chapas de madeira compensada. Os sistemas tradicionais de fôrmas para painéis de viga e laje e seus escoramentos estão ilustrados na Fig. 2.25. No Brasil, os procedimentos e requisitos para fôrmas de madeira de estruturas de concreto de edifícios foram estabelecidos pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 1944). Os principais requisitos são a rigidez (para resistir às cargas de peso de concreto sem deformação apreciável)

e a estanqueidade (para evitar o vazamento de nata de cimento), além da facilidade de montagem e desmontagem. O peso do concreto nas vigas e lajes é suportado por um sistema de vigas (travessas de apoio e guias) apoiadas nos montantes verticais denominados pontaletes, no caso dos painéis de viga e pés-direitos para os painéis de laje. As fôrmas laterais da viga estão sujeitas à pressão do concreto fresco e se apóiam lateralmente nas peças denominadas gravatas e escoras. A substituição de tábuas de madeira serrada por chapas de madeira compensada para os painéis de laje e de viga tem a vantagem de reduzir o número de juntas, além de permitir maior número de reusos, graças ao seu revestimento com verniz impermeável.

Para o escoramento de obras de pequena altura destaca-se o uso de madeira roliça, em especial no caso de pontes, como ilustra o esquema da Fig. 2.26. O escoramento é formado por montantes contraventados nas duas direções. No topo do escoramento, devido às irregularidades das madeiras roliças, há necessidade de se colocar calços para nivelamento do assoalho de apoio da fôrma.

Em muitos casos utilizam-se peças de madeira roliça apenas para os montantes, completando-se o cimbramento com madeira serrada. Nesta alternativa reduzem-se os problemas de nivelamento e os de ligações entre peças roliças. Na parte superior da Fig. 2.26 observam-se detalhes construtivos das fôrmas da superestrutura da ponte.

A Fig. 2.27 mostra um escoramento de viaduto de concreto executado com torres de madeira de grande altura, a maior com 40 m, e mãos-francesas.

Uma descrição completa de cimbramentos em madeira para estruturas de concreto pode ser encontrada na obra *Cimbramentos* (Pfeil, 1987).

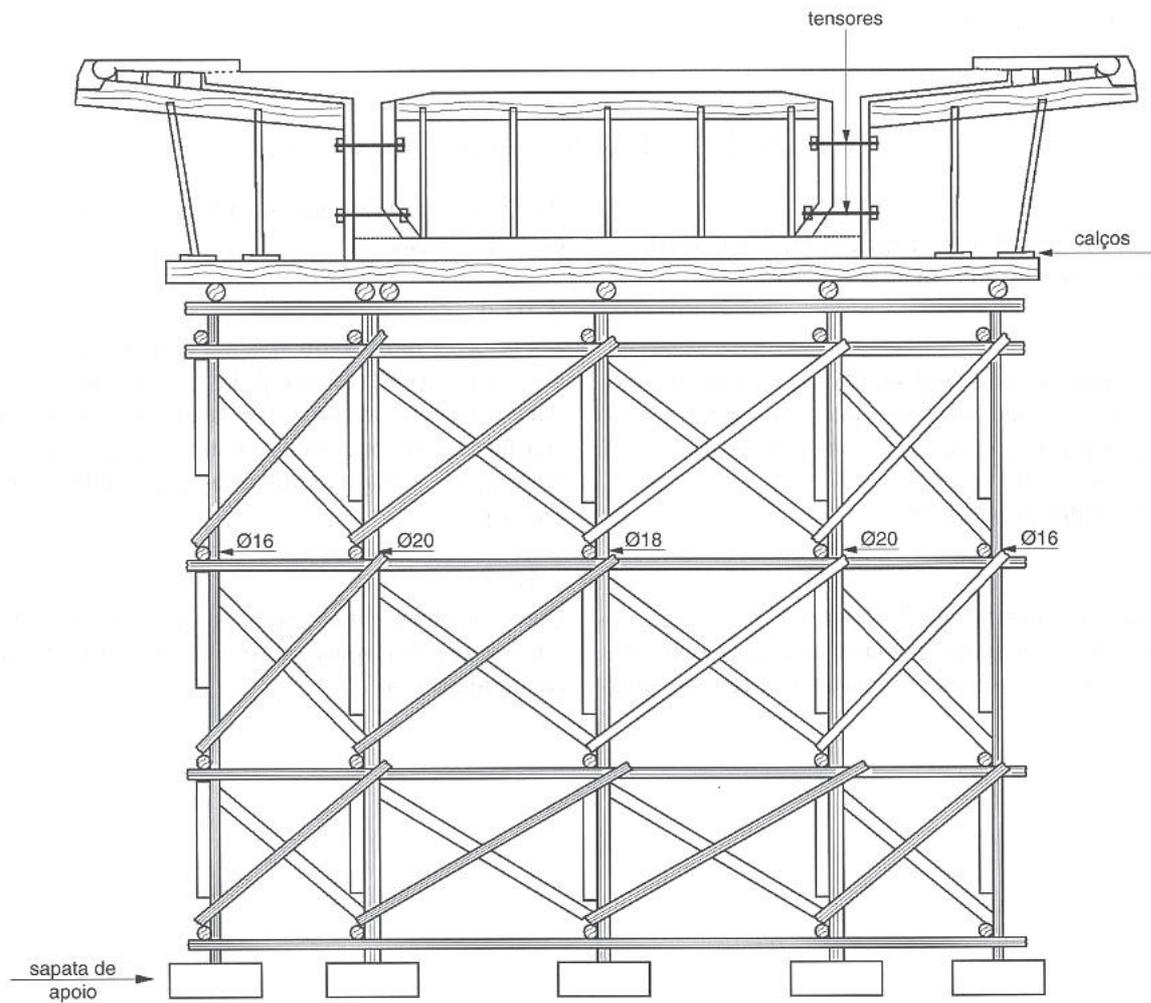


Fig. 2.26 Esquema da seção transversal de um escoramento em montantes verticais de madeira roliça, contraventados nas direções transversal e longitudinal. Na parte superior da figura estão ilustrados detalhes construtivos das fôrmas em madeira serrada.

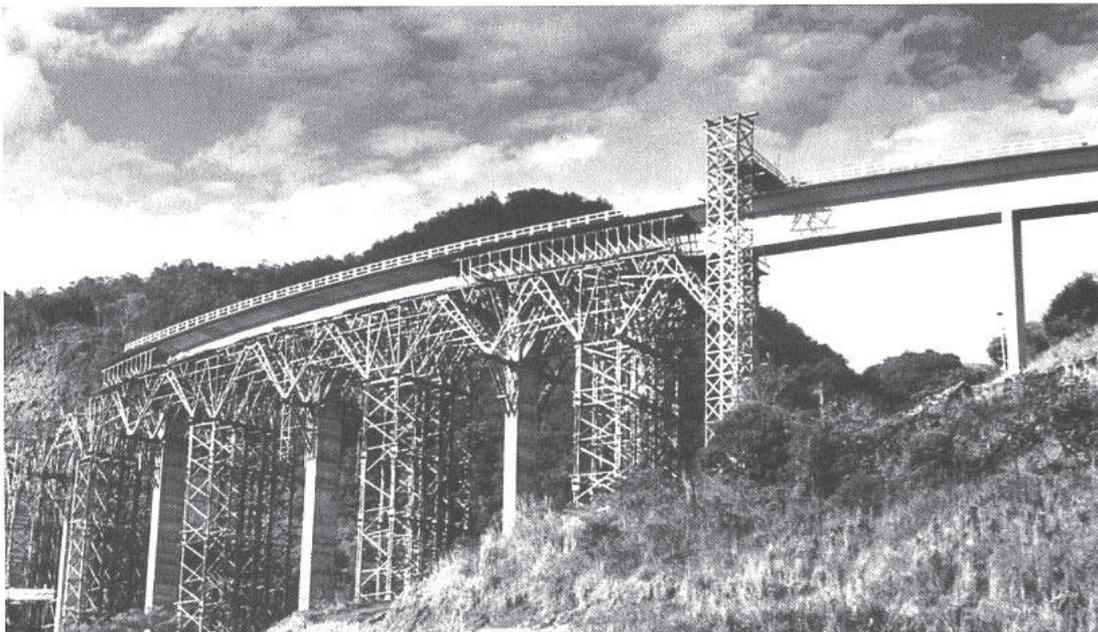


Fig. 2.27 Escoramento em torres e mãos-francesas de madeira, para viaduto rodoviário em vigas contínuas de 30 m de vão. As torres mais altas do escoramento têm 40 m. As torres foram executadas com madeira roliça e as mãos-francesas com madeira serrada. Viaduto sobre o Vale dos Diabos, BR-158/RS. Projeto estrutural do autor. Projeto do escoramento: eng.º Viktor Boehm. Firma executora: ESBEL. Foto do autor, 1960.

## 2.10. PROBLEMAS PROPOSTOS

### 2.10.1.

Por que a madeira serrada deve passar por um período de secagem antes de ser utilizada em construções?

### 2.10.2.

Aponte as vantagens da madeira laminada colada sobre a madeira serrada em relação aos seguintes aspectos:

- distribuição dos defeitos ao longo das peças
- geometria das peças
- defeitos oriundos de secagem

### 2.10.3.

As treliças de cobertura da Fig. 2.14 estão dispostas em planos verticais paralelos e ligadas por meio de terças, contraventamentos verticais e de contraventamentos no plano do telha-

do. Descreva as funções estruturais destes elementos de ligação das treliças.

### 2.10.4.

A Fig. 2.19 mostra um sistema de pórticos paralelos ligados no plano do telhado pelas terças. Destacam-se na figura os sistemas de contraventamento. Descreva as funções estruturais do contraventamento no plano do telhado para as ações de vento nas direções longitudinal e transversal do galpão.

### 2.10.5.

Quais são os principais requisitos para o bom desempenho de um sistema de fôrmas ou escoramento de uma estrutura em concreto armado?