

MINISTÉRIO DO INTERIOR
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS
NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETÓRIA DE INCENTIVO À PESQUISA E DIVULGAÇÃO
LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS

LPF – SÉRIE TÉCNICA Nº 5

ARCOS DE MADEIRA

Brasília, 1989

Ministro do Interior

João Alves Filho

**Presidente do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos
Naturais Renováveis**

Fernando César de Moreira Mesquita

Diretor da Diretoria de Incentivo à Pesquisa e Divulgação

Luiz Fernando Soares de Assis

Chefe do Laboratório de Produtos Florestais

Mário Rabelo de Souza

COMITÊ EDITORIAL

Eleazar Volpato, Ph. D.

Marcos Antonio Eduardo Santana, Ph. D.

Sebastião Kengen, Ph. D.

Tereza Cristina Monteiro Pastore, M. Sc.

Vera Teresinha Rauber Coradin, M. Sc.

PUBLICAÇÃO

Ernesto Paz Guimarães

Noemia Regina Santos do Nascimento

Tereza Cristina Monteiro Pastore

Yeda Soares de Lucena Bataus

ARCOS DE MADEIRA

Autor: Júlio Eustáquio de Melo

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.
Diretoria de Incentivo à Pesquisa e Divulgação. Laboratório de Produtos
Florestais. Brasília, D. F.

Arcos de madeira, por Júlio Eustáquio de Melo. Brasília, D. F., 1989.
21p. ilustr. (IBAMA. DIRPED. LPF. Série Técnica, 5).

1. Madeira-Estrutura-Arcos. I. Melo, Júlio Eustáquio de. II. título. III. série.

ÍNDICE

RESUMO	5
ABSTRACT	5
1. GENERALIDADES	7
1.1 Arco de eixo parabólico	7
1.2 Arco de eixo circular	8
1.3 Arco de eixo coincidente com a linha de pressão das cargas permanentes, ou seja, em forma de catenária	8
2. ARCOS DE MADEIRA	9
2.1 Arco laminado colado	9
2.1.1 Efeito do nó em peças fletidas	10
2.1.2 Efeito de inclinação das fibras	10
2.1.3 Efeito de emenda das lâminas	11
2.1.4 Efeito de curvatura	12
2.1.5 Efeito de altura na peça fletida	12
2.1.6 Tensão radial	12
2.2 Arco laminado treliçado	13
2.3 Arco treliçado	20
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

RESUMO

Este trabalho mostra alguns dos tipos de arcos mais comumente utilizados em estrutura de madeira, suas principais características e considerações básicas que devem ser verificadas no seu dimensionamento.

ABSTRACT

This work shows some kinds of arcs which are usually utilized in wood structures and also shows principals characteristics and basics considerations that should be verified when they are being designed.

1. GENERALIDADES

Entende-se por arco uma estrutura plana com perfil curvo, que desempenha relativamente bem as duas funções básicas: estrutural e estética.

Normalmente os arcos são utilizados para coberturas de grandes vãos, sendo caracterizados pelo seu peso próprio relativamente baixo quando comparado com outros tipos de estruturas. Sua eficiência está vinculada à escolha de um perfil consistente com os requisitos arquitetônicos e compatível com as condições de carregamento.

Quanto ao esquema estático, os arcos mais comumente utilizados são classificados em:

- Arcos isostáticos
 - Triarticulados
- Arcos hiperestáticos
 - Biengastados
 - Biarticulados
 - Atirantados

Os arcos hiperestáticos são mais econômicos, por proporcionarem uma estrutura de maior esbelteza que os arcos isostáticos, resultante de uma melhor distribuição de esforços nos arcos, porém estão estreitamente vinculados às condições de apoio. Assim, os arcos biengastados podem se tornar vantajosos, se as condições de extremidades permitirem o engastamento sem possibilidade de recalques, a um custo relativamente baixo. Já os arcos biarticulados exigem condições de apoio onde os empuxos laterais e as reações verticais possam ser absorvidos. Quando os arcos apóiam-se em pilares flexíveis e a obstrução parcial do espaço interno não afeta seu bom funcionamento, os arcos biarticulados, atirantados são os mais recomendados. Os arcos triarticulados, por serem isostáticos, são mais adequados para construções em terrenos de má qualidade, onde os apoios poderão estar sujeitos a possíveis recalques. São mais vantajosos, em face da facilidade de transporte, quando pré-fabricados, por serem compostos de duas peças independentes.

Quanto à forma, a menos que as condições de utilização sejam o fator de definição, deve-se procurar fixar o eixo do arco num perfil tal que os momentos fletores sejam os menores possíveis. Para um determinado carregamento, pode-se impor a condição de momento fletor nulo ao longo de um determinado perfil, resultando somente em esforço

solicitante de compressão axial. O eixo que corresponde a essa situação denomina-se linha de pressão para aquele carregamento. A coincidência do eixo do arco com a linha de pressão é obtida por aproximações sucessivas, pois, para determinar a carga, é necessário o conhecimento prévio de sua linha de pressão e vice-versa.

As formas mais comuns do perfil de um arco são:

1.1 Arco de eixo parabólico

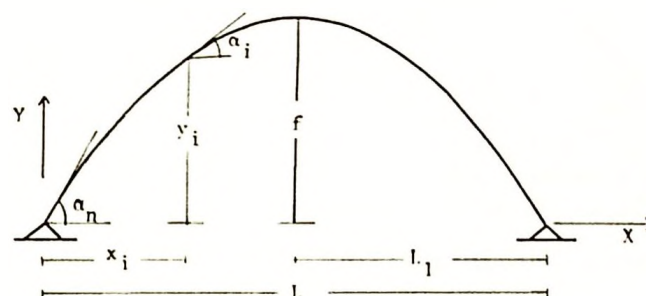


Figura 1 — Esquema geral

A equação de uma parábola do 2.º grau é

$$y = ax^2 + bx + c$$

Pela Figura 1, têm-se as condições de contorno

$$\begin{array}{ll} \text{Para } x = 0 & y = 0 \\ \text{Para } x = L & y = 0 \\ \text{Para } x = L/2 & y = f \end{array}$$

Substituindo estes valores na equação parabólica, determinam-se a, b, e c, tendo-se:

$$\begin{array}{l} c = 0 \\ aL + b = 0 \\ \frac{aL^2}{4} + \frac{bL}{2} = f \end{array}$$

resolvendo-se,

$$\begin{array}{l} a = -4f/L^2 \\ b = 4f/L \\ c = 0 \end{array}$$

Logo,

$$y = \frac{4fx}{L^2} (L - x)$$

Para um carregamento permanente, distribuído de modo uniforme, a última equação citada fornece um perfil onde os momentos fletores se aproximam de zero ao longo de sua seção.

Têm-se ainda as seguintes relações,

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{4f}{L^2} (L - 2x_i)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{2f}{L_1}$$

$$\cos \alpha_i = 1 / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i}$$

1.2 Arco de eixo circular

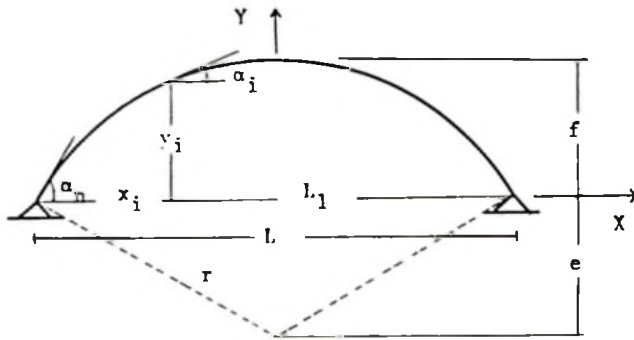


Figura 2 — Esquema geral

A equação de um eixo circular, conforme o esquema da Figura 2, é da forma

$$y_i = \sqrt{r^2 - x^2} - e$$

Têm-se também as seguintes relações entre os elementos de seu eixo:

$$r = \frac{f}{2} \left[1 + \left(\frac{L_1}{f} \right)^2 \right]$$

$$e = r - f$$

$$\cos \alpha_i = \frac{y_i + e}{r}$$

$$\cos \alpha_n = e/r$$

$$x = -r \cdot \sin \alpha_i$$

$$y_i = r \cdot \cos \alpha_i - e$$

$$\text{Comprimento do arco} = 2r \alpha_n \frac{\pi}{180}$$

1.3 Arco de eixo coincidente com a linha de pressão das cargas permanentes, ou seja, em forma de catenária.

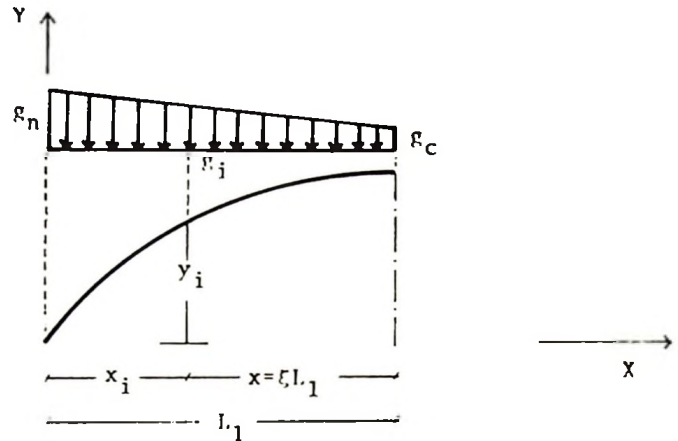


Figura 3 — Esquema geral

Supõe-se que a carga permanente seja uma função linear na ordenada $f - y_i$, de acordo com o esquema da Figura 3.

Chamando-se g_n e g_c as cargas permanentes, por metro linear na nascente (região de apoio do arco) e na chave (região central do arco), respectivamente, a carga por unidade de comprimento em um ponto qualquer g_i será

$$g_i = g_c + \frac{f - y_i}{f} (g_n - g_c)$$

Fazendo-se $\frac{g_n}{g_c} = m$ e $f - y_i = y'$, teremos,

$$g_i = g_c \left[1 + \frac{y'}{f} (m - 1) \right]$$

Conforme sabemos, a equação diferencial da linha de pressão é

$$\frac{d^2 y'}{dx^2} = \frac{g_i}{H_g}$$

onde H_g é o empuxo no arco.

Substituindo o valor de g_i , teremos

$$\frac{d^2 y'}{dx^2} = \frac{g_c}{H_g} \left[1 + \frac{y'}{f} (m - 1) \right]$$

ou ainda:

$$\frac{d^2 y'}{d\xi^2} = L_1^2 \cdot \frac{g_c}{H_g} \left[1 + \frac{y'}{f} (m - 1) \right]$$

Fazendo-se

$$K^2 = L_1^2 \cdot \frac{g_c}{H_g} \cdot \frac{(m-1)}{f},$$

teremos

$$\frac{d^2 y'}{d\xi^2} = L_1^2 \cdot \frac{g_c}{H_g} + K^2 \cdot y'$$

Diferenciando esta equação, teremos

$$y' = \frac{f}{m-1} \left[\cosh(\xi k) - 1 \right],$$

que é a equação de uma catenária, onde "m" é a relação g_n/g_c , e o coeficiente "K" é o arco co-seno hiperbólico da relação "m".

$$m = g_n/g_c$$

$$K = \text{arc cosh } m = \text{Ln } (m + \sqrt{m^2 - 1})$$

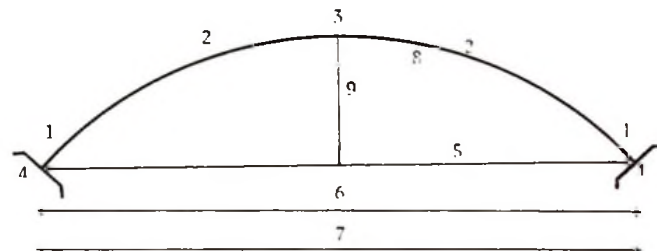
Com relação as suas dimensões, os arcos são caracterizados pelo seu vão livre "L", pela flecha "f" e pela altura "d" ou "H" de sua seção transversal.

Em função do material a ser usado na construção do arco e de aspectos econômicos, a relação f/L pode ser otimizada. Assim, para o aço esta relação varia de 1/6 a 1/5. Para a madeira, varia de 1/7 a 1/6. Entretanto, em alguns casos particulares, esta relação pode aumentar até 1/2.

A altura de sua seção transversal é fixada em função do esquema estático do arco, que irá definir as regiões de maiores solicitações. Assim, parece ser mais racional construir o arco com altura variável, de acordo com as solicitações ao longo de seu comprimento. Em geral, para os arcos de pequenos vãos é comum manter a altura constante em toda a sua extensão, em face da simplicidade de execução.

Em função do material, de aspectos econômicos e do perfil a ser adotado, também a relação d/L pode ser otimizada. Para o aço, esta relação varia de 1/60 a 1/40 e 1/40 a 1/20 para grandes e pequenos vãos, respectivamente. Para a madeira, esta relação varia de 1/25 a 1/6.

A seguir será mostrado o esquema geral de um arco, com a nomenclatura usual dos trechos que normalmente são referenciados:



onde:

1. nascença — região do arco próxima dos apoios;
2. rim — região intermediária do arco;
3. fecho ou chave — região central do arco;
4. imposta — parte da construção onde se apóia o arco;
5. linha da imposta — reta que une os pontos de apoio do arco;
6. corda — distância entre os pontos de apoio do arco;
7. vão — projeção horizontal da corda;
8. eixo — eixo da barra que constitui o arco;
9. flecha — distância do ponto mais afastado do eixo à linha de impostas.

Este trabalho apresenta alguns dos tipos de arcos mais comuns em madeira, bem como suas principais características e algumas considerações básicas que devem ser verificadas no seu dimensionamento.

2. ARCOS DE MADEIRA

A madeira é um material cujas propriedades permitem o desenvolvimento das mais variadas formas geométricas de arcos. A escolha de um determinado arco é influenciada por considerações econômicas, vão livre, condições de apoio e requisitos arquitetônicos. Dentre os arcos mais comumente utilizados, podemos citar os arcos laminados colados, arcos laminados colados treliçados e os arcos treliçados. Normalmente são articulados nos apoios, em face da dificuldade de se obter um engastamento perfeito na madeira. Os arcos laminados, sendo pré-fabricados, são mais vantajosos quando triarticulados, tendo em vista as limitações impostas pelo transporte.

2.1 Arco laminado colado

A laminação é um processo prático de se obter um alto grau de controle das propriedades dos produtos da madeira. As lâminas são peças de madeira que possuem espessura de até 5cm, coladas umas sobre as outras, formando uma viga ou um arco laminado. Isto permite controlar a localização das lâminas de diferentes qualidades dentro da peça, de acordo com as necessidades impostas pelas solicitações. Assim, colocando as lâminas de maior resistência nas bordas superior e inferior de uma peça solicitada à flexão e também nas seções de maior solicitação, seu desempenho pode ser maximizado. Do mesmo modo, colocando as lâminas de maiores módulos de elasticidade tão afastadas quanto possível da linha neutra,

as flechas podem ser minimizadas. Este arranjo de lâminas pode melhorar o desempenho de uma peça laminada de 10 a 20 por cento, dependendo da qualidade do material utilizado nas bordas.

Em relação às tensões internas que surgem da contração ou inchamento, conseqüentes de condições ambientais que possam alterar a umidade de equilíbrio da peça de madeira, é possível reduzi-las a índices praticamente nulos, através dos seguintes cuidados com as lâminas:

- uso de lâminas de mesma espécie ou de espécies com propriedades de contração e inchamento semelhantes;
- todas as lâminas preparadas tangencialmente ou radialmente;
- secar todas as lâminas para um mesmo conteúdo de umidade.

Podemos citar como vantagens do emprego de madeira laminada:

- possibilidade de serem obtidas seções robustas a partir de peças de bitola comercial;
- obtenção de formas compatíveis com os requisitos arquitetônicos;
- redução dos defeitos oriundos da secagem, comuns às peças de grandes dimensões;
- diminuição das seções transversais das peças estruturais, dada a possibilidade de seleção das lâminas e também ao acréscimo de resistência a conteúdo de umidade mais baixo. Em função da colagem, as lâminas devem apresentar um conteúdo de umidade em torno de 12 por cento;
- permite construir peças de seção variável.

Como desvantagens, temos:

- preparação prévia da madeira a ser colada (corte e aparelhagem). O processo de laminação é mais caro que qualquer outro sistema convencional;
- necessita maior controle de qualidade;
- por ser pré-fabricada, as dimensões da peça ficam limitadas pelo transporte;
- perda de serragem, sendo utilizadas peças com espessura variando de 19mm (3/4 polegada) até 50mm (2 polegadas).

No que se refere aos principais fatores determinantes da resistência de um arco laminado, os nós, a inclinação das fibras e as emendas das lâminas são considerados fatores dependentes, isto é, aplica-se aquele que apresentar menor capacidade de resistir esforços. Os fatores, referentes ao efeito de curvatura e efeito de altura da seção, devem ser calculados independentemente, e a tensão radial verificada nas seções críticas. A avaliação numérica destes fatores pode ser feita, conforme descrito a seguir, com base em pesquisas realizadas em madeiras de diferentes países.

2.1.1 Efeito do nó em peças fletidas

A influência do nó em peças fletidas depende de seu número, de seu tamanho e de sua posição em relação à linha neutra, nas seções críticas. Uma maneira de medir esta influência é calcular os momentos de inércia, em relação ao centro de gravidade da seção das áreas ocupadas por todos os nós numa faixa de 150mm (6 polegadas) de cada lado da seção crítica, determinando a razão entre a somatória destes momentos de inércia (I_k) e o momento de inércia da seção total (I_g), conforme os gráficos das Figuras 4 e 5, cujas curvas foram derivadas empiricamente de ensaios de peças de madeira, contendo nós em várias concentrações.

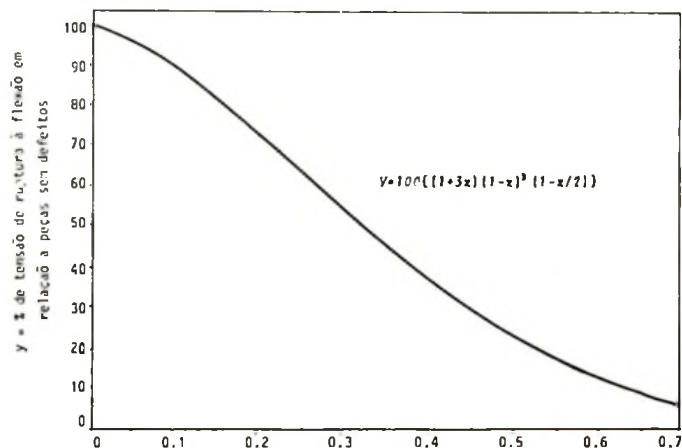


Figura 4 — Curva relacionando a tensão admissível à flexão com o momento de inércia das áreas ocupadas pelos nós nas lâminas de madeira laminada. Retirada do Wood Handbook (14).

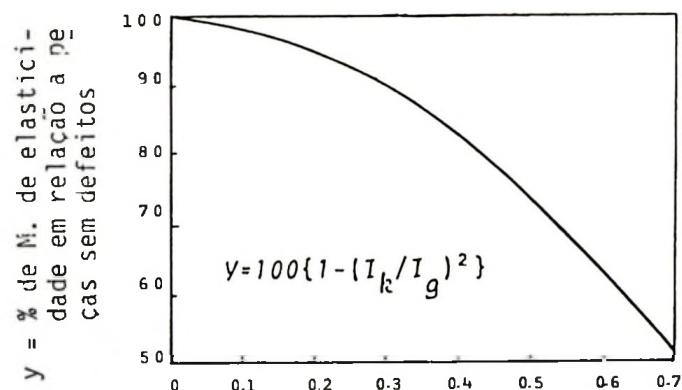


Figura 5 — Curva relacionando o módulo de elasticidade admissível com o momento de inércia das áreas ocupadas pelos nós nas lâminas de madeira laminada. Retirada do Wood Handbook (14).

2.1.2 Efeito de inclinação das fibras

Define-se inclinação como o desvio de direção das fibras em relação a uma linha paralela aos lados da peça. Deve ser con-

trolado porque pode dar origem a diferentes tipos de defeitos (empenamentos, torcedura, etc.) com a mudança de umidade. Afeta também a resistência da madeira, sendo necessário, portanto, limitar a influência deste efeito através de normas.

A diminuição de resistência pode ser avaliada, utilizando a fórmula de Hankinson:

$$N = \frac{PQ}{P \sin^n \theta + Q \cos^n \theta}$$

onde:

N = resistência da madeira num determinado ângulo;
Q = esforço de compressão normal;
P = esforço de compressão paralelo às fibras e
n = constante empírica.

A razão "Q/P" e o valor de "n" foram estudados para cada propriedade.

A Tabela 1 mostra a variação de resistência para Q/P = 0,1 e n = 1,5, cujos valores foram retirados do Wood Handbook (14). Na prática usa-se n = 2 na determinação da resistência da madeira, para diferentes inclinações de fibras.

Tabela 1 — Resistência de peças de madeira com várias inclinações das fibras, comparadas com a resistência de peças com fibras retas.

Máxima inclinação das fibras	Tensão de ruptura à flexão (%)	Tensão de ruptura à compressão paralela às fibras (%)
zero	100	100
1 em 25	96	100
1 em 20	93	100
1 em 15	89	100
1 em 10	81	99
1 em 5	55	93

Em vigas laminadas é possível diminuir esta influência em termos de resistência, colocando as lâminas com fibras inclinadas, próximo à linha neutra e em regiões de menores solicitações.

2.1.3 Efeito de emenda das lâminas

Devido aos grandes vãos que podem ser atingidos com peças laminadas, surge a necessidade de se fazer emendas das lâminas, devido às limitações de comprimento das peças comercializadas. Existem vários tipos de ligações possíveis com diferentes capacidades de transmitir esforços. Quanto maior a área de colagem melhor a ligação, porém, como consequência, o desperdício de madeira torna-se maior.

Os principais tipos de emendas de lâminas são os seguintes:

a) — em cunha simples (scarf joint):



Adaptam-se bem às peças curvas e peças expostas às intempéries, sendo consideradas as mais eficientes, por apresentarem maior área de colagem. Sua capacidade de resistir a esforços de tração simples ou tração resultante da flexão é dada como porcentagem da resistência de pequenos corpos-de-prova sem defeitos. Em peças de primeira qualidade, os ingleses utilizam os seguintes fatores de redução em função da inclinação da cunha:

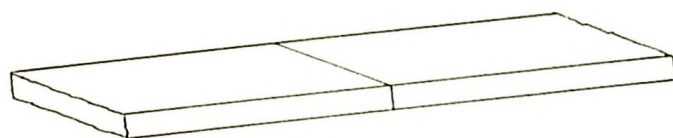
Inclinação da cunha	Fator de redução
1 em 6	0,69
1 em 8	0,77
1 em 10	0,84
1 em 12	0,88

b) — emendas encaixadas:



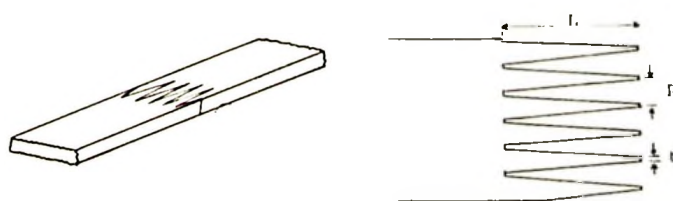
São utilizadas para melhorar o ajuste das lâminas, porém o encaixe não é considerado no cálculo.

c) — emendas de topos (butt joint):



São as mais simples e econômicas, porém de menor resistência. As tensões são transmitidas pelas lâminas adjacentes, não se considerando a transmissão de tensões pelos topos. Devido a sua ineficiência e, também, à concentração de tensões, este tipo de emenda não é recomendado para uso em peças laminadas estruturais.

d) — emendas dentadas (finger joint):



Neste caso, o consumo de madeira é menor do que as emendas de cunha, sendo também bastante eficientes. Sua fabricação exige equipamento especial.

As normas inglesas adotam fatores de redução para flexão e tração paralela às fibras, que são expressas como porcentagem de ensaios à flexão de peças isentas de defeitos.

A eficiência da emenda à compressão paralela às fibras é praticamente de 100% quando medida em teste, porém, devido ao efeito de flambagem, aplica-se um fator de redução assim calculado:

$$\frac{p - t}{p} \times 100$$

Os valores deste fator de redução para flexão estática, tração e compressão paralela às fibras em diferentes perfis de emendas estão listados na Tabela 2. Esta tabela foi retirada do Ozelton & Baird. (7).

Tabela 2 — Fator de redução para emendas dentadas (finger joint)

PERFIL DA EMENDA			FATOR DE REDUÇÃO		
Comprimento L (mm)	Passo p (mm)	Extremo t (mm)	Flexão Estática	Tração Paralela	Compressão Paralela
60	15,0	2,7	0,80	0,80	0,82
55	12,5	1,5	0,75	0,75	0,88
50	12,0	2,0	0,75	0,75	0,83
40	9,0	1,0	0,65	0,65	0,89
40	10,0	1,6	0,60	0,60	0,84
35	12,0	2,7	0,45	0,45	0,77
30	6,5	1,5	0,55	0,55	0,77
30	11,0	2,7	0,50	0,50	0,75
25	5,0	1,5	0,50	0,50	0,70
25	6,5	1,5	0,45	0,45	0,77

2.1.4 Efeito de curvatura

Tensões internas são induzidas quando as lâminas são inclinadas, formando as peças laminadas curvas. Estas tensões dependem da espécie de madeira, da espessura das lâminas (t) e do raio de curvatura (R).

Hudson, em 1960, mostrou que a razão de resistência à flexão de uma viga curva para uma viga reta é de:

$$1 - \frac{15t}{R}$$

para valores de t/R variando de 1/60 a 1/250. Wilson, em 1939, havia chegado à seguinte razão:

$$1 - 2000 \left(\frac{t}{R} \right)^2$$

As equações, citadas no parágrafo anterior, foram plotadas num gráfico, conforme mostra a Figura 6. Considerando o número limitado de ensaios realizados e a falta de informações mais precisas desta influência em espécies individuais, o fator de redução recomendado é o menor valor das duas curvas, conforme mostra a Tabela 3, onde o valor de t/R não deve exceder 1/125 para as coníferas e 1/100 para as folhosas.

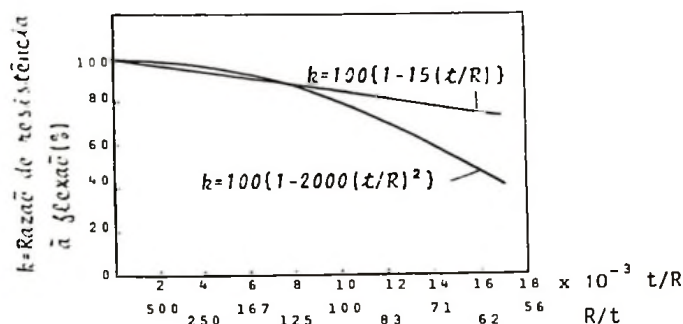


Figura 6 — Efeito de curvatura sobre a resistência de peças laminadas fletidas. Retirada de Booth (1).

Tabela 3 — Fator de redução para peças laminadas curvas

t/R	1/100	1/25	1/150	1/175	1/200	1/250	1/300
K	0,80	0,87	0,90	0,91	0,93	0,94	0,95

2.1.5 Efeito de altura na peça fletida

A cada aumento na altura de uma peça fletida não corresponde um acréscimo equivalente em sua resistência. Alguns trabalhos foram realizados a partir de 1924, verificando-se que a tensão de ruptura à flexão depende da altura, do comprimento da peça e também do tipo de carregamento. A equação abaixo é recomendada no cálculo do fator de redução em peças laminadas estruturais solicitadas à flexão, com altura superior a 305mm (o efeito é considerado desprezível para peças com altura inferior a este valor),

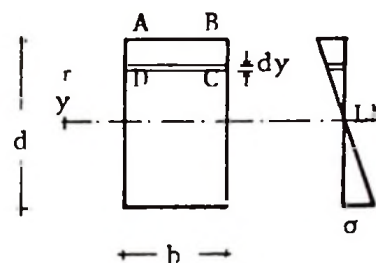
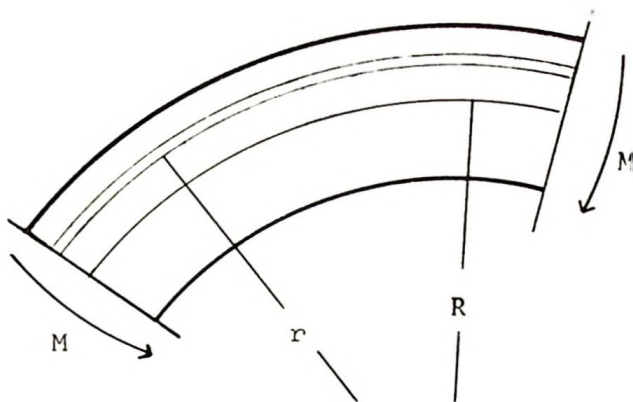
$$K_d = 0,81 \left(\frac{d^2}{d^2 + 56800} \right)$$

onde:

d — altura da peça, em milímetros

2.1.6 Tensão radial

O momento fletor em peças curvas produz uma tensão no sentido radial, que é calculada pela fórmula deduzida por Wilson, em 1939, assumindo uma distribuição linear de tensões numa seção transversal retangular.



Seção Transv.

Considere um elemento DC de altura dy a uma distância y da linha neutra. Pela teoria da resistência dos materiais, a tensão na altura y é dada por:

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

A força de tração no elemento dy é $= \sigma bdy$.

Na área ABCD, a força de tração é igual a:

$$\int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \sigma bdy = \frac{Mb}{I} \cdot \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} y dy = \frac{Mb}{I} \left[\frac{d^2}{8} - \frac{y^2}{2} \right]$$

Para uma casca cilíndrica de parede delgada de raio r , sujeita a uma pressão interna σ , a força circunferencial por unidade de comprimento é $\sigma \cdot r$.

Como uma casca é considerada delgada quando satisfaz a relação

$$\frac{d}{r} \leq \frac{1}{20}$$

Wilson considerou válida a aproximação para arcos de madeira.

Logo,

$$\sigma_{rb} = \frac{Mb}{I} \left[\frac{d^2}{8} - \frac{y^2}{2} \right]$$

Como y é pequeno comparado com R , podemos fazer $r = R$.

Daí, a tensão radial para uma seção retangular torna-se,

$$\sigma = \frac{2M}{Rbd^3} \left[\frac{d^2}{8} - \frac{y^2}{2} \right]$$

O máximo valor de σ ocorre quando $y = 0$, logo

$$\sigma = \frac{3M}{2Rdb}$$

A Figura 7 mostra as relações características para o arco laminado bi ou triarticulado. Nas Figuras 8 a 12 estão esquematizados alguns arcos laminados de madeira, construídos na Alemanha.

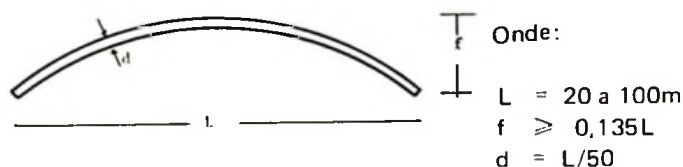


Figura 7 — Esquema de um arco laminado colado bi ou triarticulado com suas relações características.

2.2 Arco laminado treliçado

O mais conhecido é o arco com banzo superior laminado de curvo (bowstring truss), no Brasil comumente construído em aço. É considerado o mais econômico para galpões industriais e caracteriza-se pelos baixos esforços nas peças intermediárias, conforme podemos verificar na Figura 13, que mostra os coeficientes da magnitude dos esforços atuantes em três tipos básicos de treliças com suas relações específicas entre a altura e o vão da treliça (H/L).

Teoricamente, o banzo superior na forma parabólica é mais eficiente para carga uniformemente distribuída, mas por razões práticas adota-se a forma circular.

Os esforços neste tipo de estrutura são calculados utilizando a teoria das treliças, devendo ser verificada a flexão do banzo superior, devido à excentricidade da linha de carga. A parte da treliça em arco (banzo superior) é calculada como uma coluna entre pontos de contraventamento (onde atua a força normal), momento fletor (devido à excentricidade entre a linha neutra e a linha de força) e esforço resultante da flexão imposta por terças que normalmente são colocadas entre dois nós.

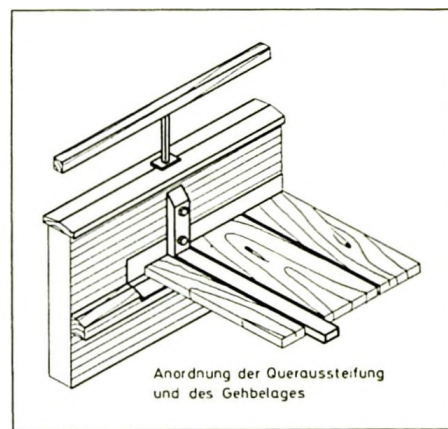
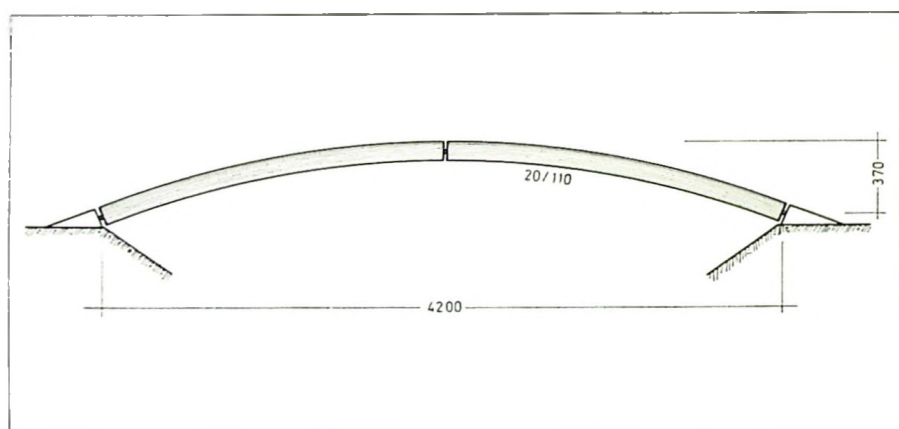
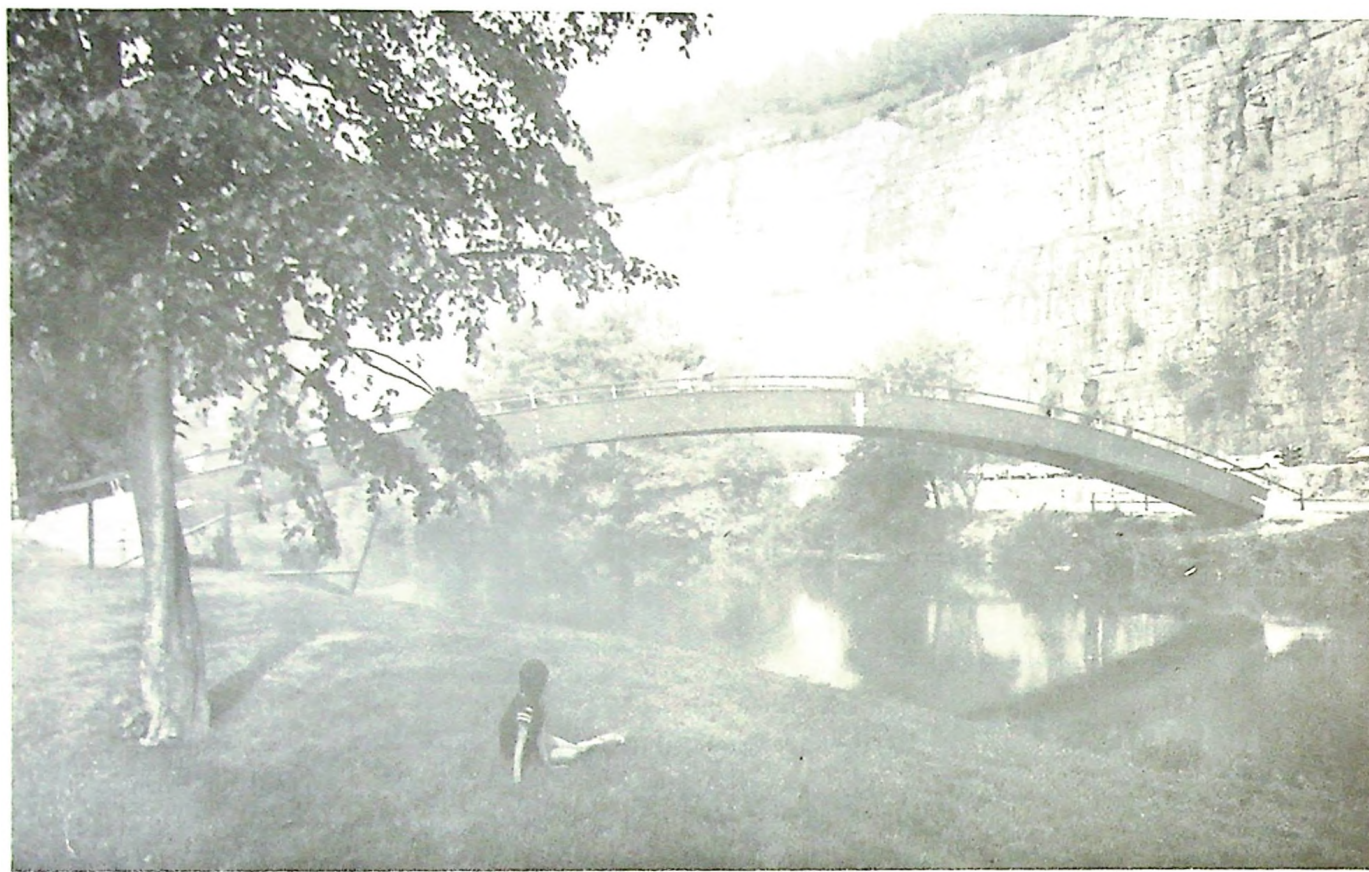


Figura 8 — Arco laminado colado triarticulado: ponte para pedestre. Foto retirada da revista alemã "Informationsdienst Holz."

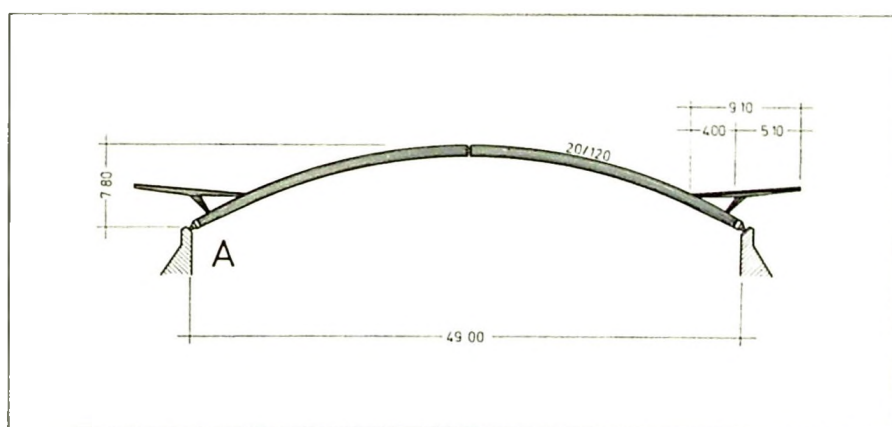
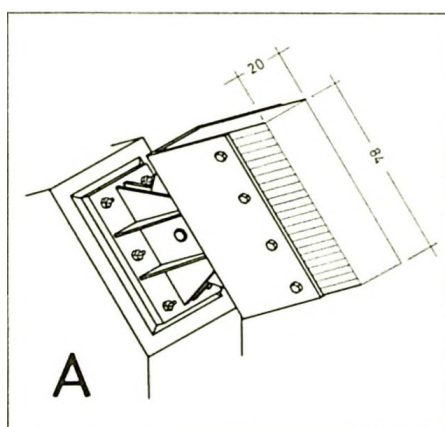
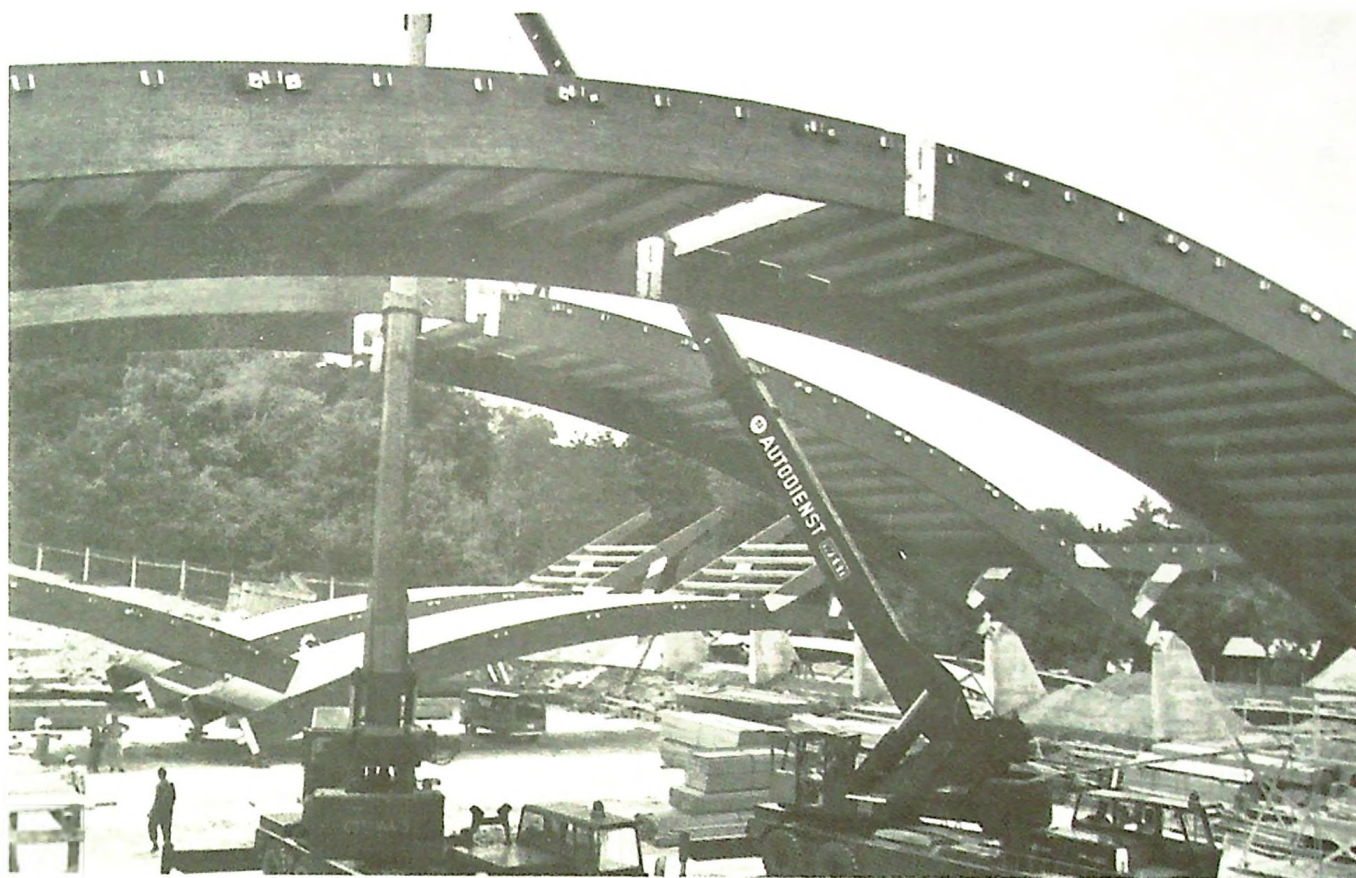


Figura 9 — Arco laminado colado triarticulado: cobertura de um ginásio de esporte. Foto retirada da revista alemã "Informationsdienst Holz."

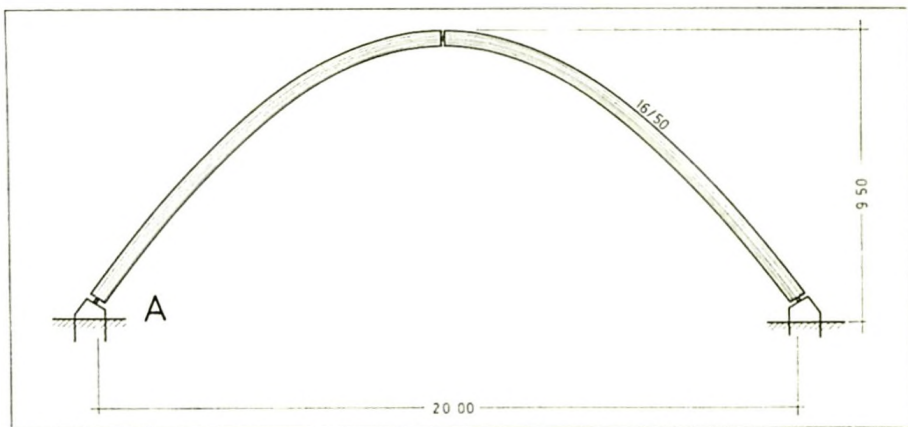
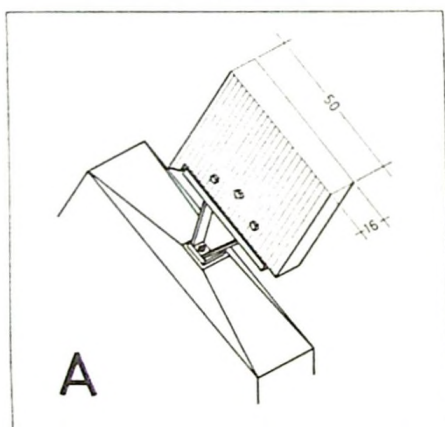
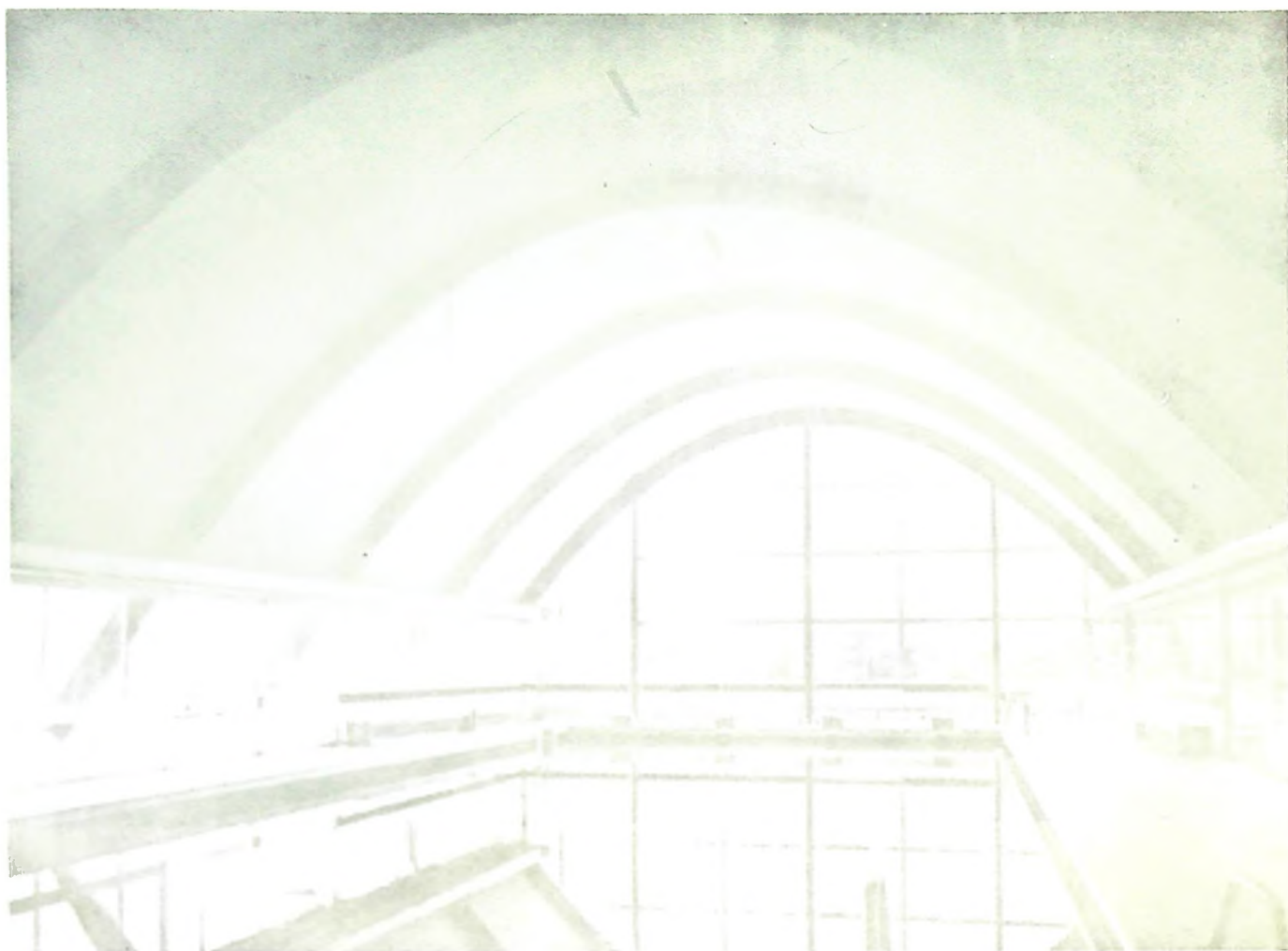


Figura 10 — Arco laminado colado triarticulado: cobertura de uma piscina. Foto retirada da revista alemã "Informationsdienst Holz."

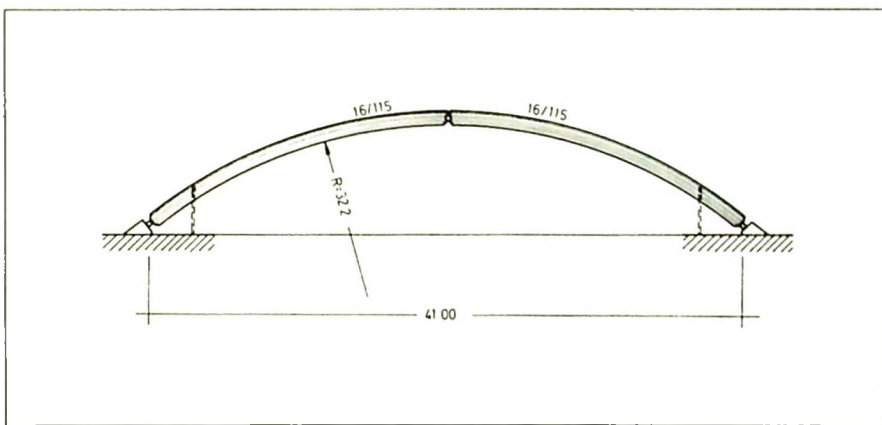
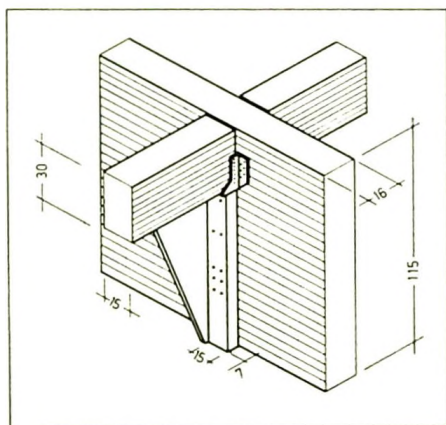


Figura 11 — Arco laminado colado triarticulado: cobertura de um mercado. Foto retirada da revista alemã "Informationsdienst Holz".

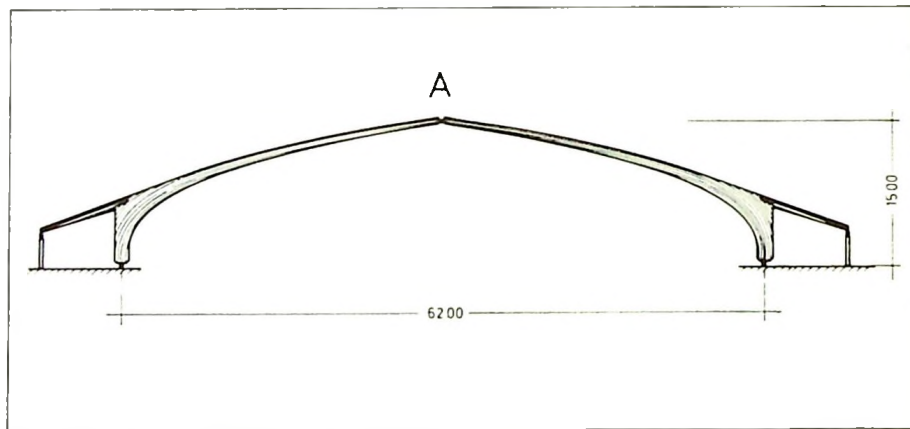
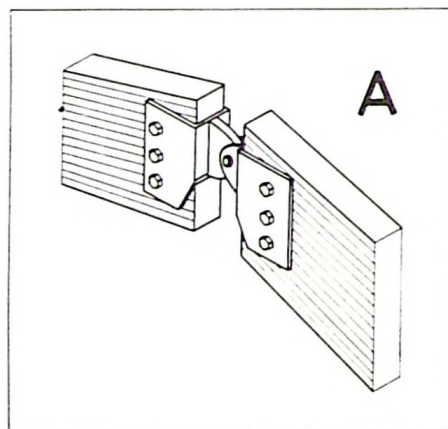


Figura 12 — Arco laminado colado com seção variável: cobertura de um parque de exposição. Foto retirada da revista alemã "Informationsdienst Holz".

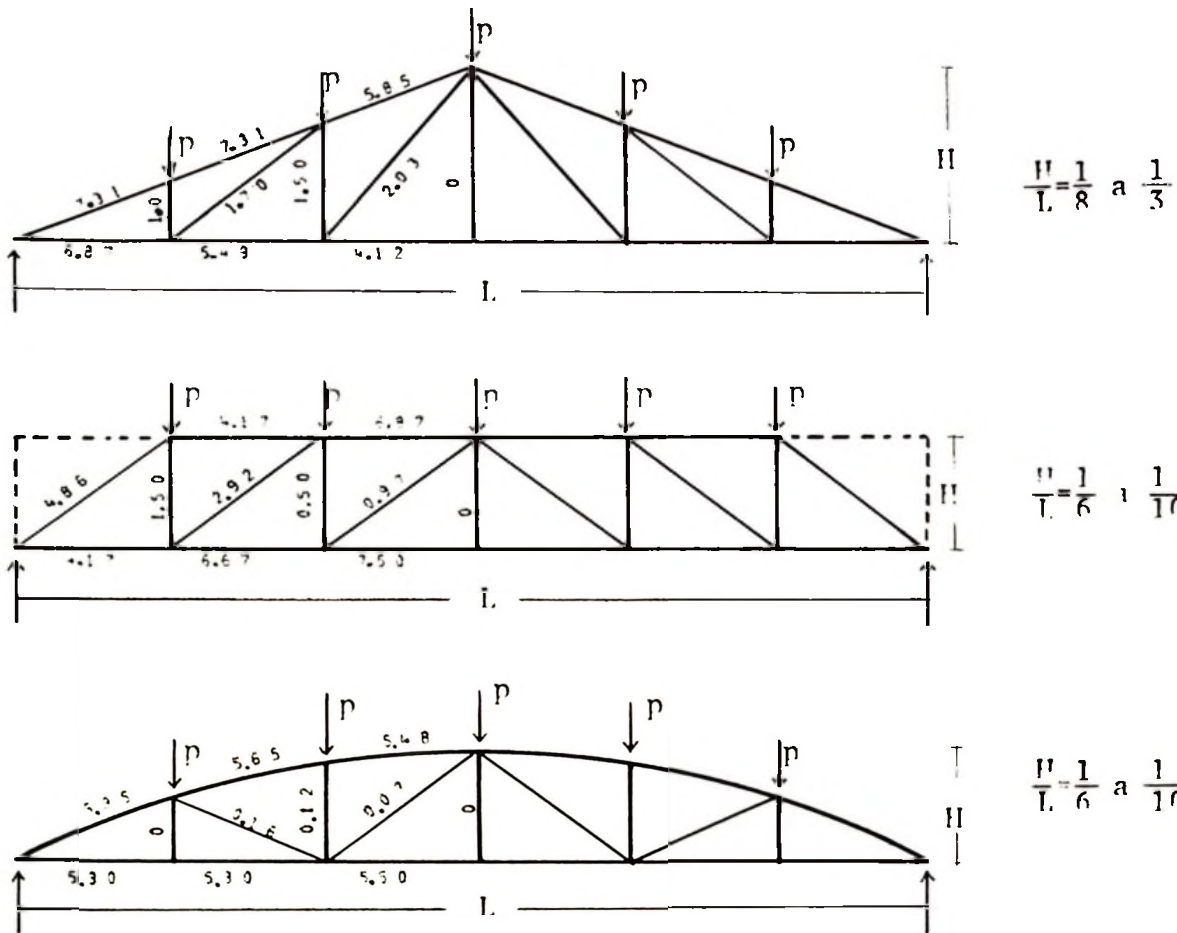


Figura 13 — Comparação de esforços, considerando a relação econômica H/L , para cada tipo de treliça. Retirada do "Timber Design Manual".

O momento fletor devido à excentricidade é determinado pelo produto da força axial tangente no ponto central entre dois nós e a excentricidade destes pontos em relação à peça curva, que pode ser contrabalanceada com o momento fletor produzido por uma terça intermediária.

Assim, teremos, conforme a figura seguinte:

$$M = M_0 - Ne$$

$$M = \frac{PS}{4} - Ne,$$

onde:

M_0 = momento fletor devido à terça;

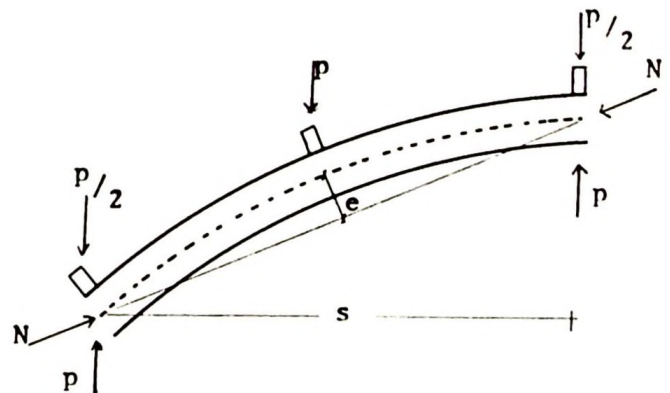
N = força axial tangente no centro de dois nós e

$e = \frac{L^2}{8R}$ (excentricidade da linha de ação de N)

sendo,

L = distância entre dois nós e

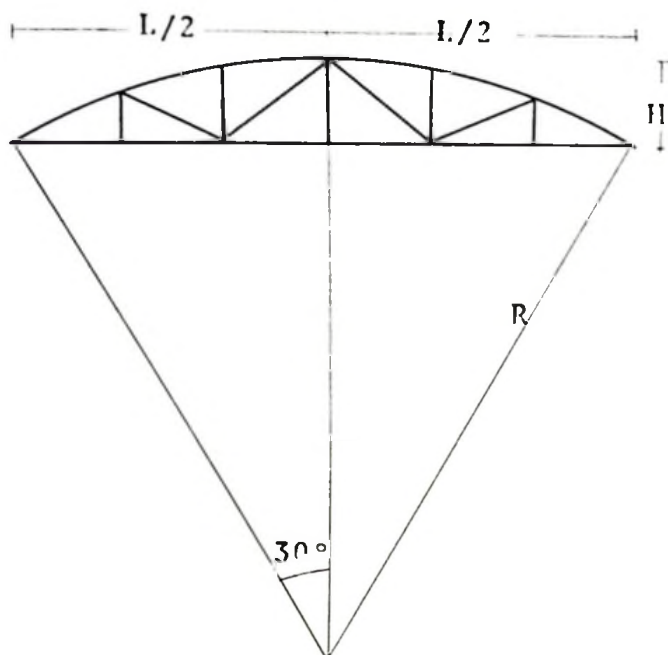
R = raio de curvatura



A geometria mais utilizada para este tipo de arco treliçado em peças laminadas é a seguinte:

- relação H/L próxima de $1/8$, para evitar grandes flechas, por um lado, e excessivas altura e curvatura, outro lado.
- raio de curvatura igual ao vão do arco treliçado.

Consequentemente, teremos



onde a altura H do arco treliçado será:

$$H = R - R \cdot \cos 30^\circ;$$

$$H = 0,134R;$$

e seu comprimento,

$$\frac{60 \times 2 \pi R}{360} = 1,04L$$

Nas Figuras 14, 15 e 16 estão esquematizados alguns arcos com banzo superior laminado e as principais relações entre seus elementos.

2.3 Arco treliçado

É construído normalmente em madeira maciça com trechos retilíneos, resultando, portanto, num perfil poligonal. É calculado utilizando a teoria das treliças. As Figuras 17 e 18 mostram os arcos treliçados mais comuns, bem como as principais relações entre seus elementos. Os perfis compostos apresentados nas Figuras 14 e 16 podem também ser construídos em madeira maciça com trechos retilíneos.

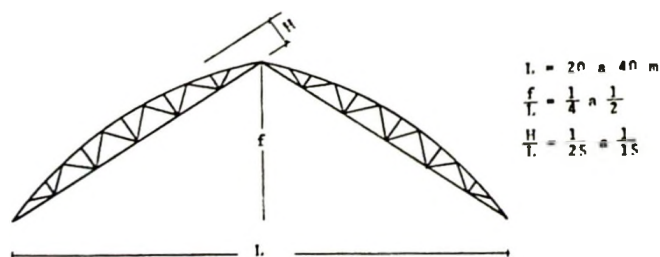


Figura 14 – Composição de arcos laminados treliçados com banzos superiores curvos (Bowstring truss).

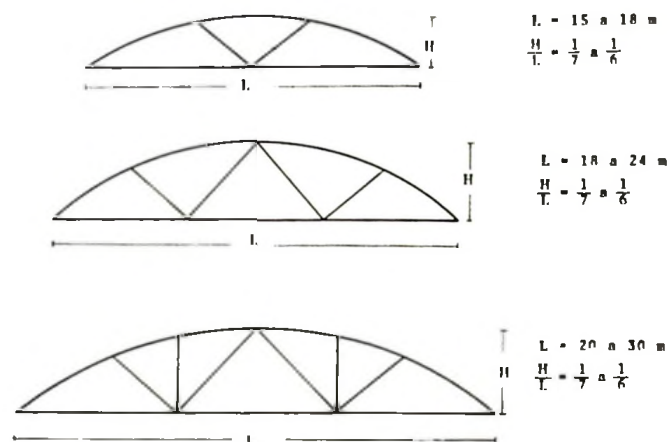


Figura 15 – Arcos laminados treliçados com banzos superiores curvos (Bowstring truss).

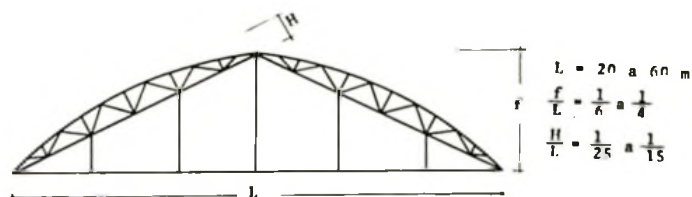


Figura 16 – Composição atirantada de arcos laminados treliçados com banzos curvos (Bowstring truss).

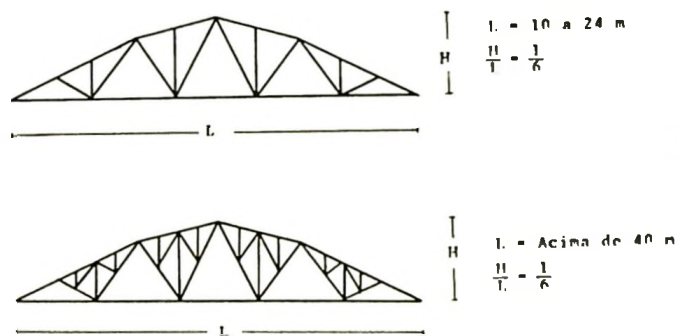


Figura 17 – Arcos treliçados com banzo superior em segmentos retos (Bowstring truss).

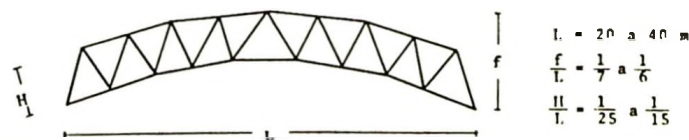


Figura 18 – Arco treliçado em segmentos retos.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BOOTH, L. G. & REECE, P. O. *The structural use of timber*. London, UK, E. & F. N. Spon, 1967 285 p.
2. DARKOV, A. & KUZNETSOV, V. *Structural mechanics*. Moscow, Mir Publishers, S. d., Trad. B. Lachinov. 704 p.
3. HOYLE, R. J. *Wood technology in the design of structures*. Pullman, Washington, Washington State University, 1971. 312 p.
4. INFORMATIONSDIENST HOLZ. Düsseldorf-Nord, Alemanha Ocidental, Arbeitsgemeinschaft Holz. s. d., 40p.
5. KARLSEN, G. G. *Wooden structures*. Moscow, Mir Publishers, 1967. Trad W. L. Goodman. 637 p.
6. MAFFEIS L. G. *Arco parabólico bi-articulado de madeira laminada preparada*. São Carlos SP. Universidade de São Paulo, 1979. (Dissertação de mestrado).
7. OZELTON, E. C. & BAIRD, J. A. *Timber designers' manual*. London, U. K., Crosby Lockwood Staples, 1976. 518 p.
8. PFEIL, W. *Estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1977. 252 p.
9. ROCHA, A. M. *Hiperestática plana geral*. Rio de Janeiro, R. J. Editora Científica, 1972. vol. 2. 3ª ed.
10. ROCHA, A. M. *Hiperestática plana geral*. Rio de Janeiro, R. J. Editora Científica, 1972. vol. 2. 2ª ed.
11. SILVA Jr., J. F. *Sistemas estruturais*. Belo Horizonte, M. G., Edições Escola de Arquitetura, 1960. vol. 4ª parte.
12. STRASSNER, A. *Sistemas estaticamente indeterminados*. Rio de Janeiro RJ, Editora Globo, 1960, vol. 5. 227 p.
13. **TIMBER DESIGN MANUAL**. Ottawa, Canada, Laminated Timber Institute of Canada, 1972. 1 v. 458 p.
14. **WOOD HANDBOOK**; wood as an engineering material. Madison, Wisconsin, Forest Products Laboratory, 1974. 1 v. (Agriculture handbook, 72).
15. YAGUI, T. *Estruturas em arco para cobertura*. Faculdade de Engenharia de Limeira. s. d. 10 p.

LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS – IBAMA

Endereço: SAIN – Av. L4 Norte – Lote 04 – CEP 70770

Fones: (061) 224-4789/224-5337/223-5664

Telex: (061) 2120/1711 – Fax: 224-5206

Caixa Postal 152874 – CEP 70919

BRASÍLIA-DF