

Paulo Silva Pinto (\*\*)

David Rodney Leonel Pennington (\*\*)

Claudete Catanhede do Nascimento (\*\*)

Zulmar Bonates da Cunha Neto (\*\*)

José Murilo Ferraz Suano (\*\*)

## RESUMO

Foram estudadas três espécies Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), Cedrorana (*Cedrelina catenaeformis*) e Fava-folha-fina (*Piptadenia suaveolens*), com o objetivo de determinar a resistência mecânica de laminados em comparação com a madeira maciça curvada quando submetidas a esforços mecânicos de flexão.

## INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico da indústria de adesivos sintéticos e, de um modo geral, de equipamentos eletro-mecânicos, o uso da madeira reconstituída na forma de laminados e compensados se expandiu em todos os ramos da indústria madeireira, inclusive à moveleira e artigos esportivos. Pela facilidade de trabalhar com lâminas de madeira de espessura reduzida e pela própria escassez das espécies mais aptas ao curvamento de madeira maciça, desenvolveu-se principalmente nos países nórdicos uma linha elegante de móveis incorporando peças laminadas curvas.

Como no curvamento de madeira maciça os processos de produção de laminados curvos requerem mão-de-obra e equipamento especializados para se alcançar uma razoável produtividade industrial. Isto, em grande parte dificulta a introdução do desenho de móveis com peças curvas em um esquema de produção de móveis tradicionais e de linhas retas. Como consequência, muitas indústrias moveleiras da Europa e Estados Unidos montam seções de produção exclusivas à manufatura desse tipo de produto. No Brasil, há indústrias que utilizam extensivamente compensados curvos e uma ou duas raras espécies que servem para o curvamento de madeira maciça. A produção de móveis com peças curvadas se faz praticamente de forma artesanal utilizando-se processos manuais detalhados com cipós, cana-da-Índia e patan.

(\*) Projeto Financiado pela Fipeq/Banco do Brasil.

(\*\*) Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - DPPP.

## CONSIDERAÇÕES GERAIS

O método de produção de laminados e compensados curvos consiste na colagem sob pressão de diversas lâminas sobrepostas e posicionadas sobre um molde de geometria curva. No laminado, as fibras da madeira correm na mesma direção, paralelas ao comprimento da peça, em todas as lâminas. No compensado, as fibras de uma lâmina são perpendiculares às fibras da lâmina consecutiva. Após a cura do adesivo, as lâminas se estabilizam no formato curvo dado pela geometria do molde. A espessura da peça final é estabelecida pela quantidade e espessura das lâminas.

Os laminados curvos foram primeiramente introduzidos como substitutos da madeira maciça de escassas espécies que eram apropriadas ao curvamento. Um exemplo relevante disso, foi a substituição do curvamento por vaporização da madeira maciça de ASH (*Fraxinus* spp.) na fabricação de raquetes de tênis por laminados desta e outras espécies combinadas. Por razões econômicas, técnicas e mesmo estéticas o uso de laminados curvos se expandiu por quase todos os setores industriais que utilizam a madeira como matéria-prima como por exemplo, móveis, artigos esportivos, embarcações e peças estruturais usadas na engenharia civil.

Pode-se listar alguns benefícios que as peças laminadas oferecem em comparação com as peças maciças. Geralmente nenhum tratamento prévio de plastificação é necessário para o curvamento. Pode-se utilizar um grande número de espécies para obter peças de qualquer espessura com pequenos raios de curvatura. A fixação da curvatura na peça laminada é mais simples e eficiente, isto é, a peça se conforma melhor à geometria do molde. Por outro lado, as desvantagens do laminado estão no seu custo de produção e na especialização técnica exigida da mão-de-obra, equipamentos e dispositivos.

No entanto, a escassez de espécies aptas ao curvamento de madeira maciça e a relativa simplicidade e grau de precisão dos métodos construtivos combinados com a maior eficiência do controle de qualidade na produção de laminados faz com que estes produtos sejam os mais convenientes em muitos projetos de peças curvadas.

Pode-se dividir os produtos laminados em duas classes distintas: os laminados finos e as vigas laminadas. Os laminados finos são compostos de lâminas cuja espessura individual varia de 0,6mm a 3,2mm. A produção de vigas laminadas curvas, usadas em estruturas de grande porte, incorpora os dados referentes aos raios mínimos de curvatura de peças maciças e os princípios básicos do curvamento de laminados finos. No presente trabalho não utilizou-se vigas laminadas, pois devido sua complexidade, exigiria um estudo a parte.

Devido à sua reduzida espessura, uma lâmina de madeira pode ser flexionada até limites de curvatura bem inferiores aqueles geralmente obtidos com a madeira maciça vaporizada, mesmo das espécies mais aptas ao curvamento. Dentro daquele intervalo dimensional, a diferença de aptidão ao curvamento entre as espécies se reduz consideravelmente. Em casos excepcionais pode-se aproveitar de alguma característica específica de uma dada espécie, mesmo que esta seja incompatível ao curvamento, para a produção de peças laminadas de curvatura acentuada. Para tanto, as lâminas são previamente vaporizadas, ou apenas imersas em água, por um certo período e então curvadas até um raio de curvatura

próximo daquele desejado no produto final. Depois de secas, as lâminas são coladas e pressionadas simultaneamente sobre um molde apresentando o raio de curvatura final da peça. No caso de compensados, o curvamento é facilitado pelo de que algumas lâminas são curvadas no sentido transversal das fibras, ou seja, suas fibras são paralelas ao eixo de curvatura da peça. Naturalmente, é muito mais fácil curvar uma lâmina no seu sentido transversal do que no longitudinal.

Sob o ponto de vista da matéria-prima, os principais parâmetros a serem observados são: a qualidade das lâminas e as propriedades físico-mecânicas da madeira, os quais devem satisfazer as exigências técnicas especificadas no projeto do produto. Para um curvamento satisfatório, as lâminas devem ter espessuras as mais uniformes possível a fim de se ter pressões de colagens também uniformes ao longo de toda peça. Deve-se evitar o uso de lâminas contendo qualquer tipo de deterioração pois isto as torna muito quebradiças (Stevens & Turner, 1970). O conteúdo de umidade da madeira deve ser apropriada a uma boa colagem. E, naturalmente, a espessura das lâminas deve ser condizente com o raio de curvatura desejado na peça para que não haja qualquer ruptura nas lâminas. O método de obtenção das lâminas, isto é, serrada, laminada em torno ou faqueada tem um efeito praticamente insignificante sobre a qualidade do laminado (Stevens & Turner, 1970). Entretanto, a qualidade das lâminas em termos de consistência e uniformidade de espessura, deve ser assegurada. Quanto as características físico-mecânicas, fatores como a razão resistência/peso, elasticidade, tensão máxima de ruptura e a resistência ao impacto da madeira em uso devem ser analisados em conjunto com a rigidez que o processo de colagem do laminado confere à estrutura do produto final.

Como as lâminas são previamente secas, devido as exigências de uma colagem adequada, elas apresentam uma elevada elasticidade e, assim, tendem a retornar facilmente aos seus estados retos originais. O ponto fundamental do processo de produção de laminados e compensados curvos é evitar que aquele retorno das lâminas aconteça e, com isto, inutilize a peça. Isto é, conseguido através do próprio processo de colagem das lâminas entre si, ou seja, a escolha correta do adesivo mais apropriado e do uso de equipamentos, dispositivos e técnicas de colagem que garantam uma pressão adequada, constante e uniforme em todo o corpo da peça.

Através dos trabalhos de Capron, 1963; Stevens & Turner, 1970 e Carlo Ratti, 1983, pode-se notar que a escolha da cola e dos equipamentos e técnicas de colagem das lâminas e de cura do adesivo deve corresponder primeiramente as particularidades do desenho do produto e de suas propriedades finais quando em uso. A sofisticação ou não desses equipamentos e técnicas depende apenas da economicidade que se queira alcançar na produção. Como exemplo, pode-se citar a indústria de raquetes de tênis que antes empregava moldes e prensas de madeira para a colagem das lâminas e estufas para a cura do adesivo e atualmente emprega prensas hidráulicas e geradores de alta frequência nos respectivos processos produtivos. Este avanço tecnológico expressa necessidades de ordem econômica como o nível de produtividade e a escala de produção. Deste modo, as propriedades do produto laminado dependem, em última análise, mais do tipo de madeira e adesivo usados e da eficiência do método construtivo do que da sofisticação tecnológica empregada na

produção.

## RESISTÊNCIA MECÂNICA A FLEXÃO DE LAMINADOS CURVOS E MADEIRA MACIÇA CURVADA POR VAPORIZAÇÃO

### Materiais e Métodos

Foram estudados somente três espécies, Angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*), Cedrorana (*Cedrelinga catenaeformis*) e Fava-folha-fina (*Piptadenia suaveolens*).

### Geometria, dimensões e números de amostras

Para cada espécie, testou-se três tipos de amostra: viga reta, viga laminada curva e viga maciça curvada por vaporização. Chama-se de vigas, não por suas dimensões, mas pela função estrutural que desempenham. A seção transversal das vigas, 27mm de largura por 20mm de altura, e o vão livre entre apoios de 430mm foram mantidos constantes em todas as amostras. O raio de curvatura das vigas curvas, laminadas e maciça, foi de 500mm, medido no lado côncavo das amostras. Escolheu-se esse raio de curvatura para evitar que qualquer ruptura ocorresse nas peças maciças curvadas e ao mesmo tempo ocasionar suficiente deformação plástica na madeira durante o curvamento reduzindo-se assim ao mínimo a reabertura da curvatura da peça.

### Qualidade e características físico-anatômicas das amostras

Todas as amostras, viga reta, lâminas e viga a ser curvada por vaporização, foram retiradas da região do cerne de uma única peça representativa de cada uma das três espécies pré-selecionadas. Assim, todas as amostras tinham o mesmo peso específico médio da espécie que elas representavam. Nenhum tipo de defeito que afetasse a resistência mecânica da madeira foi permitido no corpo das amostras.

### Preparação das amostras

Viga Reta: as amostras foram desempenadas e aplainadas em suas dimensões finais: 27 x 20 x 530mm. A fim de se permitir mobilidade longitudinal nas amostras quando solicitadas aos esforços mecânicos, deixou-se 50mm de balanço além dos apoios em cada extremidade da amostra. Antes dos ensaios, as amostras foram condicionadas a um conteúdo de umidade em torno de 12%.

Viga Laminada: as vigas foram obtidas pela colagem sob pressão de 10 lâminas de 2,0mm de espessura cada em um molde cujo raio de curvatura era de 500mm. O adesivo usado foi uréia-formaldeído, formulado para que a cura se desse à temperatura ambiente. Depois da cura do adesivo e desenvolvimento completo de sua resistência, as amostras foram usinadas em suas dimensões finais e mantidas em um conteúdo de umidade de equilíbrio de 12%.

Viga Maciça Curvada: depois de vaporizadas por um período de 30 minutos, as amostras foram fixadas no dispositivo, mostrado na Figura 2 e curvadas em torno de um molde de raio de curvatura de 500mm. Terminado o curvamento a amostra com o dispositivo para

fixação de curvatura da peça foi colocada em uma câmara de aclimatização até que o conteúdo de umidade da amostra se estabilizasse em 12%. O processo de secagem até este conteúdo de umidade assegurou a reabertura da curvatura das peças ficar em níveis insignificantes. Depois de estabilizadas em seus formatos curvos, as amostras foram aplainadas e lixadas até suas dimensões finais.

#### Descrição dos ensaios mecânicos de flexão

A Figura 1, mostra o sistema de carregamento e apoio das amostras usado nos ensaios mecânicos. Usou-se dois apoios móveis para se evitar reações axiais no corpo das amostras. Elas assim ficariam submetidas apenas ao momento fletor devido ao binário, carga central e reações verticais nos apoios. As extremidades das peças curvas foram chanfradas em um ângulo de  $20^{\circ}$  e pivotadas no eixo transversal central a fim de se permitir um livre movimento rotacional das peças quando solicitadas à flexão. Através de sinais emitidos por uma "célula de carga" e um deflectômetro, um plotador de gráficos imprimia simultaneamente os valores de carga e flecha que as amostras suportaram até a ruptura. A velocidade de carregamento foi de 2,5mm/mínuto. Todas as amostras foram testadas com conteúdo de umidade de 12%.

#### MÉTODO DE ANÁLISE

Através dos gráficos "Carga Vs. Flecha", analisou-se o comportamento mecânico das amostras quanto a rigidez, resistência e flecha até a ruptura. Devido ao limitado número de amostras por espécie, não fez-se nenhuma análise estatística dos valores mencionados acima. Foi limitado apenas uma descrição qualitativa do comportamento de carga tipo de viga e seu método de preparação.

#### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os gráficos (Figura 2) ilustram o comportamento mecânico dos três tipos de vigas, representativas das espécies estudadas. Os valores do Módulo de Elasticidade (MOE), carga e flecha de ruptura são dados na Tabela 1.

Observou-se a diferença de comportamento entre a viga maciça curvada por vaporização e a viga laminada curva. Esta última peça caracteriza-se pela elevada rigidez e resistência a altas cargas de ruptura. A viga maciça curva, por seu lado, apresenta uma baixa rigidez mas uma alta tenacidade, isto é, a capacidade de suportar cargas crescentes no regime plástico. Em angelim-pedra a redução do MOE da peça maciça curva em relação à laminada não foi tão significativa quanto a das duas outras espécies. Nota-se que, para fava-folha-fina, o MOE da peça maciça curva ( $115 \times 10^3$  kg/cm<sup>2</sup>) foi menor do que o MOE do mesmo tipo de amostra de angelim-pedra ( $135 \times 10^3$  kg/cm<sup>2</sup>), apesar da viga reta de fava-folha-fina apresentar MOE maior do que a dessa outra espécie. Certamente essa redução do MOE das peças curvadas por vaporização é função tanto da espécie de madeira quanto do raio de curvatura das peças.

As Figuras 3 e 4 mostram a impressionante diferença entre os níveis de deformação

suportada pela viga laminada e a viga maciça, respectivamente. Mesmo que as cargas de ruptura das vigas maciças tenham sido menores do que às correspondentes das vigas laminadas aquelas peças suportaram deformações bem maiores antes de romperem.

As peças apresentaram pequenas fraturas por compressão na parte convexa da curvatura antes da ruptura final por tração das fibras situadas na região côncava das peças. Este comportamento das vigas maciças curvas se explica pelo próprio processo de curvamento das peças. A plastificação da madeira através do aquecimento por vaporização acarreta grandes deformações plásticas na peça durante o curvamento. Depois da "fixação da curva", essas deformações vão dar origem ao comportamento tipicamente plástico das peças curvas quando submetidas aos esforços de flexão.

Os resultados, mostrados nos gráficos são similares aos obtidos por Juxford & Krone (1946) que estudaram a substituição de peças maciças curvas por laminados na fabricação de embarcações.

Nota-se também que o MOE e a carga de ruptura da viga laminada foi até maior do que da viga reta para as espécies cedrorana e angelim-pedra. O processo produtivo de laminados, isto é, a colagem sob determinada pressão, confere à peça essa elevada rigidez e resistência. Não foi observado nenhuma ruptura por cisalhamento das linhas de cola. As peças laminadas romperam por tensões de tração originadas nas lâminas localizadas na parte côncava da curvatura. Os valores do MOE e carga de ruptura da peça laminada e da viga reta para fava-folha-fina talvez sejam uma indicação de que para madeiras de alta densidade, o processo de construção de laminados não implica em grandes variações do MOE e carga de ruptura da peça em relação à viga reta. Entretanto, pode-se afirmar que, em geral, o MOE e carga de ruptura das peças laminadas se situa a níveis próximos dos valores determinados para as vigas retas.

Os resultados dos experimentos mostram claramente a viabilidade técnica de se usar, com vantagens, peças laminadas curvas em substituição às peças maciças curvas por vaporização. A rigidez e alta resistência a ruptura das peças laminadas certamente confere a qualquer estrutura, seja de um simples móvel ou de um barco, uma também elevada rigidez e resistência. Neste sentido, as peças podem ter dimensões menores para suportarem os mesmos esforços mecânicos a que as peças maciças curvas estiverem sujeitas.

Para um cálculo estrutural mais detalhado e preciso, é necessário uma análise das possíveis influências que a espessura da peça e menores raios de curvatura possam ter sobre o comportamento mecânico das vigas laminadas em relação às vigas maciças curvas por vaporização. O módulo de elasticidade e de ruptura, as tensões de cisalhamento e as tensões radiais de tração e compressão devem ser determinados em função daqueles fatores a fim de estabelecer critérios rigorosos de cálculo estrutural.

## CONCLUSÕES

O processo produtivo de laminados curvos confere às peças uma elevada rigidez e resistência a ruptura. As peças maciças curvas por vaporização, por outro lado, apre-

sentam um baixo Módulo de Elasticidade (MOE) mas suportam grandes deformações plásticas antes de romperem.

A diferença de valores do MOE e carga de ruptura entre os laminados curvos e as peças maciças é específica para cada espécie de madeira.

Em projetos que requerem peças curvas de alta rigidez e resistência, as peças laminadas podem ser usadas com grande confiabilidade e em dimensões menores do que aquelas que seriam exigidas em peças maciças curvas.

#### SUMMARY

##### *Plywood and laminated wood bending.*

*In order to compare the bending property of laminated wood with massive wood, three species were studied: Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*) Cedronana (*Cedrelinga catenaeformis*), and Faveira-folha-fina (*Piptadenia suaveolens*). Flex mechanic strenght was used in the evaluation of mecanic resistance.*

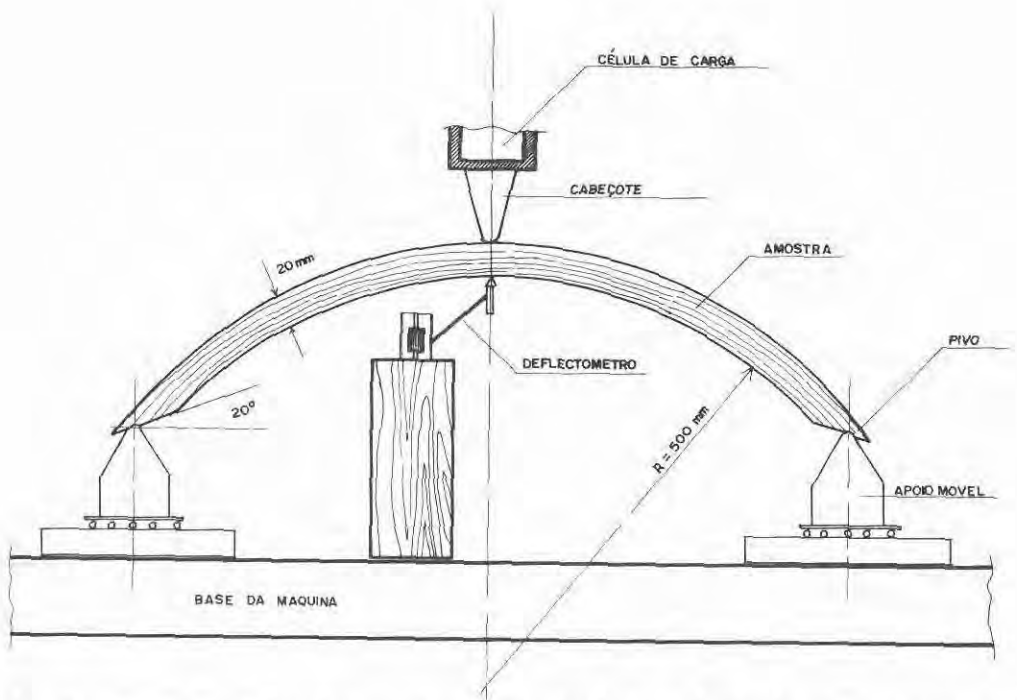


Fig. 1. Desenho esquemático dos ensaios de flexão de peça laminada curva e peça maciça curvada por vaporização.

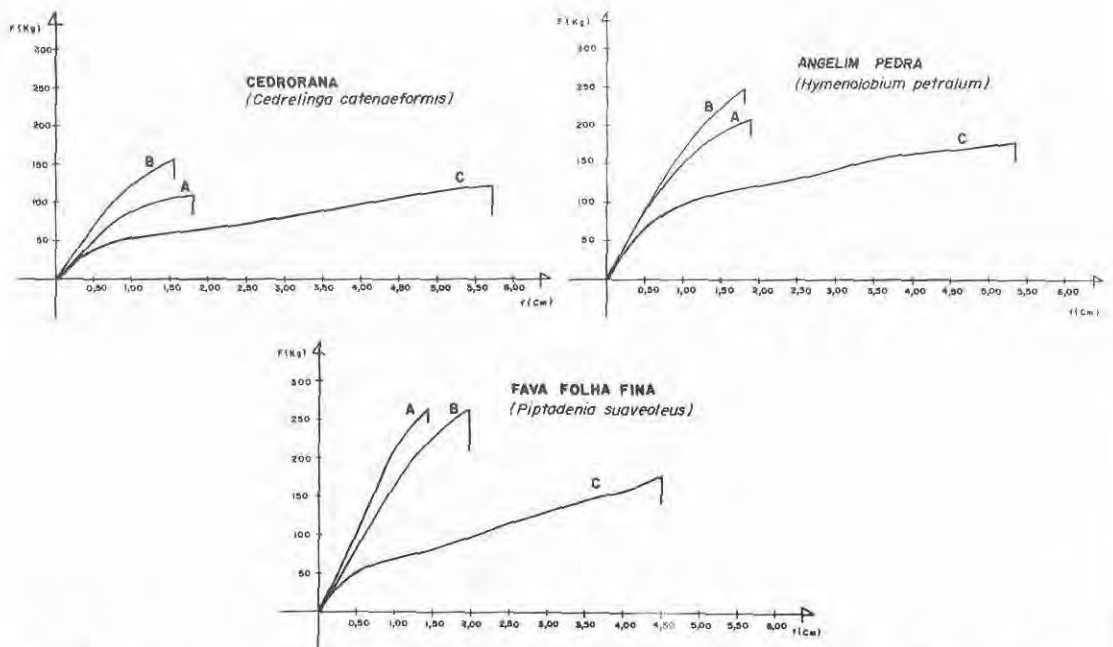


Fig. 2. Diagrama "Carga vs. Flecha" da viga reta (A) Viga Laminada (B) e Maciça Curva (C) para as três espécies ensaiadas.



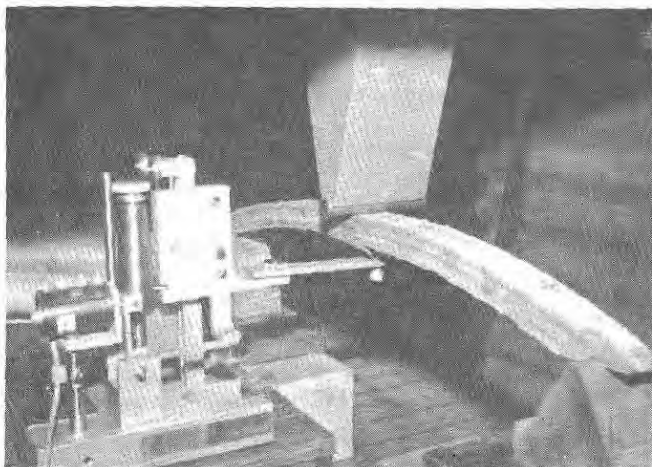


Fig. 3. Ensaio de flexão de peça laminada.

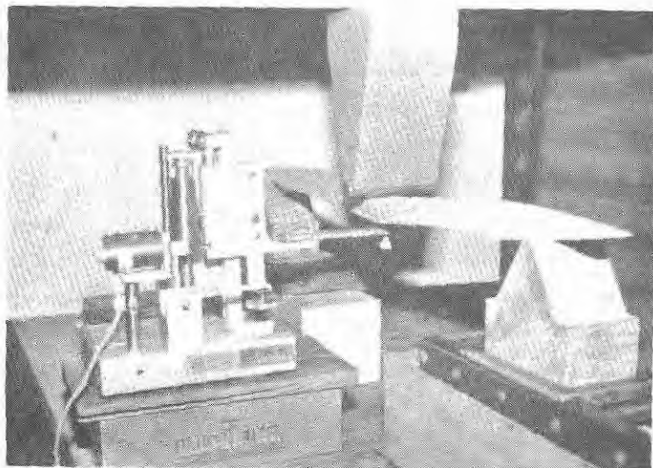


Fig. 4. Ensaio de flexão de peça curvada por vaporização.

## Referências bibliográficas

- Branco, A. A. - 1983. Para uma maior compatibilização. In: **Madeira Móveis**. São Ben-  
to do Sul/FETEP. p. 22.
- Bonsiepe, G. (ed.) - 1984. **Metodologia Experimental: Desenho Industrial**. Brasília/CNPq.  
p. 9.
- Candilis, G. - 1981. **Muebles Thonet**. Barcelona, Ed. Gustavo Gili.
- Capron, J. H. - 1963. **Wood Laminating** Mcknight Publishing Co. Bloomington.
- Donnay - 1983. **Informations Techniques**.
- IBDF - 1983. **Madeiras da Amazônia: Características e Utilização**. Brasília, CNPq.
- Kesley, J. - 1981. **Fine Woodworking: Design book two** Newtown, Conn. The Taunton Press.
- Koch, P. - 1972. Utilization of the Southern Pines. v. II. Processing. **USDA. Forest  
Service. Agriculture Handbook (420)**.
- Kollmann, F. F. P. & Côté Jr., W. A. - 1968. **Principles of Wood Science and Technology  
I Solid Wood**. New York, Springer-Verlag.
- Luxford, R. F. & Krone, K. H. - 1946. **Laminated Oak Frames for a 50 - Foot Navy Motor  
Launch Compared to Steam-Bent Frames**. **USDA. Forest Service**.
- Meilach, D. Z. - 1981. **Woodworkings, the New Wave**. New York, Crown Publishers.
- Peck, E. C. - 1957. **Bending Solid Wood to Form**. **USDA. Forest Service**.
- Ratti, C. - 1983. **Tecnologia del Legno Curvato**. Milano, Ribera Editore.
- Stevens, W. C. & Turner, N. - 1970. **Wood Bending Handbook**. England, Ministry of Tech-  
nology.

(Aceito para publicação em 23.08.1989)