

Paulo Silva Pinto (**)

David Rodney Lionel Pennington (**)

Claudete Catanhede do Nascimento (**)

Zulmar Bonates da Cunha Neto (**)

José Murilo Ferraz Suano (**)

RESUMO

O pré-selecionamento de espécies madeireiras da Amazônia, determinou quais as mais adequadas ao curvamento de madeira maciça. Foram elaborados ensaios mecânicos de compressão paralela às fibras em amostras representativas de um determinado número de espécies, que aquecidas por vaporização, determinaram os níveis de compressibilidade das mesmas. Foram testadas amostras de todas as espécies pré-selecionadas também no processo de curvamento e, determinados seus raios mínimos de curvatura.

INTRODUÇÃO

O uso da madeira curvada é tão antigo quanto o emprego desta matéria-prima para a manufatura de objetos úteis ao homem. A enorme variedade de aplicações da madeira curvada, sob a forma de peças maciças, laminados ou compensados, pode ser visto nas indústrias de móveis, artigos esportivos, objetos decorativos, tanoaria, embarcações ou vigas laminadas. Estas peças estruturais não são comuns no Brasil mas podem ser facilmente encontradas na Europa e nos Estados Unidos. Em todas as formas, a utilização de peças curvas é determinada por razões estéticas e/ou de ordem técnica como, por exemplo, as propriedades de resistência e rigidez de estruturas seja em um simples móvel ou seja em uma sofisticada embarcação.

É natural que a escolha da matéria-prima e do método de obtenção de peças curvas se baseie em fatores econômicos e técnicos relacionados ao tipo de produto final desejado. Peças de grandes curvaturas para serem usadas, por exemplo, em vigas laminadas ou na manufatura de barris, não requerem equipamentos e tratamentos sofisticados para sua produção. Por outro lado, a obtenção de peças com curvatura bastante acentuada para a produção de móveis ou artigos esportivos, exige técnicas, equipamentos e dispositivos apri-

*) Projeto Financiado pela Fipec/Banco do Brasil.

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

morados. Entretanto, em ambos os casos, a seleção da madeira deve ser rigorosa sob o ponto de vista de sua aptidão ao curvamento e sua resistência e durabilidade sob as condições de uso a que ela esteja exposta.

Por um longo tempo, os artesãos usaram cipós, galhos e troncos naturalmente curvos e peças adequadamente finas para a produção de objetos curvados. Na inconveniência desses materiais para se produzir economicamente grandes quantidades daqueles objetos, os artesãos e marceneiros cortavam as curvas de peças maciças. Este método, embora satisfatório para a obtenção de peças com grandes raios de curvatura, se torna inviável na produção de peças com curvatura acentuada. Isto é devido à grande perda de material no processo de corte e ao fato de que tal processo cria necessariamente áreas nas peças onde as fibras da madeira correm em uma direção perpendicular as suas faces. Tais áreas não resistem a grandes esforços mecânicos e tornam as peças muito frágeis.

Experiências ao longo dos anos mostraram que algumas espécies madeireiras curvavam melhor e mais facilmente do que outras. Com estas espécies obtinham-se raios de curvatura relativamente pequenos curvando as peças, manualmente ou por um dispositivo mecânico, quando "verdes" e deixando-se secar até que seus formatos curvos se estabilizassem.

Um grande avanço na técnica ou arte do curvamento da madeira, que prevalece até hoje, foi a descoberta experimental de que a madeira úmida se torna extremamente plástica e maleável quando aquecida. Aquecendo-se as peças antes de curvá-las, menores raios de curvatura podem ser obtidos sem que elas sofram rupturas e sem o emprego de grandes esforços de flexão no processo de curvamento. O método de aquecimento das peças variava de lugar a lugar e entre diferentes setores industriais. O contato direto da madeira úmida com as chamas provenientes ou de um bico de gás ou da queima de resíduos de madeira, a imersão das peças em areia úmida e quente ou em água fervente eram métodos muitas vezes empregados. Nos estaleiros de Manaus, o aquecimento, é feito pela exposição da peça previamente pincelada com óleo as chamas de um bico de gás. O aquecimento é feito simultaneamente a fixação da peça curva na estrutura do barco. Mais recentemente o aquecimento por ondas de rádio frequência foi introduzido mas não aplicado industrialmente por motivos técnicos e obviamente econômicos.

Um método de aquecimento muito antigo é a imersão da madeira em vapor de água saturado a pressão atmosférica. Um dos pioneiros desse método foi Thonet (1796-1871) que criou um (até hoje mundialmente famoso) desenho original de cadeiras e outros objetos mobiliários baseado no emprego extensivo de peças curvas de madeira. No Brasil, as cadeiras chamadas "austríacas" refletem em suas linhas curvas esse tipo de desenho. Esse método de aquecimento é hoje usado praticamente por todas as indústrias moveleiras que trabalham com madeira curvada porque é, não apenas, o mais econômico, mas também o mais adequado a uma produção em larga escala.

Equipamentos e dispositivos para o aquecimento por vaporização e posterior curvamento da madeira foram sendo aperfeiçoados ao longo dos anos mas o princípio básico do método permanece o mesmo. Embora este método de aquecimento e plastificação por vaporização se aplique a todas as espécies madeireiras, estudos sistemáticos desta técnica revelaram que apenas algumas poucas espécies atingem um grau de plasticidade suficiente

para serem empregadas eficientemente em processos de curvamento de madeira maciça usados nas indústrias moveleiras.

Atualmente, sabe-se que a plastificação da madeira pode ser obtida através de sua imersão em alguns produtos químicos como amônia líquida, monometilamina e alguns compostos de uréia. A toxicidade destes produtos, os equipamentos sofisticados exigidos e a limitação do processo a peças de pequenas espessuras tornam este método de plastificação custoso e de baixa praticidade industrial.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Por apresentar uma certa elasticidade natural, a madeira pode ser flexionada até um certo limite de curvatura. Logicamente, este limite é inversamente proporcional à espessura da peça a ser curvada. No entanto, ao se retirar as forças de flexão, ela voltará praticamente ao seu estado original a não ser que a peça seja imobilizada em seu formato curvo. Este método é muito empregado na fixação das tábuas de casco de barcos onde os raios de curvatura das peças são geralmente grandes.

Para a obtenção de peças com curvatura acentuada, as deformações da madeira, durante o curvamento, devem atingir o regime plástico sem provocar rupturas na peça. Ao se retirar as forças de flexão, a reabertura da curva será proporcional às deformações elásticas ocorridas mas a peça manterá uma certa curvatura residual devido às deformações plásticas. Assim, quanto mais plástica for a madeira, menor será o raio de curvatura obtido.

O grau de plasticidade da madeira varia enormemente entre as espécies. Entretanto, esta plasticidade inerente à madeira não é o suficiente para fazer uma peça resistir, sem rupturas, aos processos de curvamento geralmente almejados nas indústrias. Assim, lança-se mão de um método artificial de aumentar a plasticidade da madeira que é o aquecimento por vaporização. O aquecimento da madeira, na presença de umidade, aparentemente faz com que as cadeias de moléculas de celulose possam deslizar com mais facilidade por entre a matriz da lignina sem que haja uma completa ruptura das fibras. O mecanismo da plastificação da madeira, embora ainda não compreendido em toda sua complexidade, apresenta três características básicas que controlam o processo de curvamento. Primeiro, a plastificação da madeira afeta muito mais suas propriedades de compressão do que as de tração, ambas no sentido longitudinal das fibras. Segundo, o aumento da plasticidade varia muito de espécie a espécie, podendo variar mesmo entre as amostras de uma mesma espécie. E terceiro, o resfriamento e secagem da peça, depois de valorizada, curvada e imobilizada em seu formato curvo, torna as deformações ocorridas praticamente irreversíveis. Chamamos este último do processo de curvamento de "fixação da curva".

Em uma peça de madeira previamente aquecida por vaporização, as deformações plásticas de compressão atingem níveis muito maiores do que na madeira natural, quando submetidas a uma mesma carga até o limite de ruptura. Denominamos esse nível de deformação plástica, "compressibilidade da madeira". Além disso, para um mesmo nível de deformação, as tensões de compressão são bem menores na madeira vaporizada do que na madeira natural. Isto é, a madeira torna-se bastante maleável quando aquecida por vaporização.

Tais efeitos são muito menos pronunciados nas peças submetidas a tensões e deformações por tração.

Tal característica do mecanismo de plasticização da madeira nos leva a uma consideração de ordem prática. Como no curvamento de uma peça, as fibras da madeira são comprimidas na região côncava da curva e tracionadas na sua região convexa, devemos limitar ao máximo as deformações por tração a fim de que o raio de curvatura da peça dependa somente da compressibilidade da madeira. A redução das deformações por tração é obtida através de um dispositivo que incorpora encostos nas extremidades da peça a ser curvada e uma fita metálica tracionada na parte convexa da curva. O dispositivo mostrado na Figura 2, é apenas um exemplo de uma variedade de outros igualmente eficazes e que funcionam sob o mesmo princípio.

Não se sabe com precisão porque uma dada espécie é mais apta ao curvamento por vaporização do que outras. Este fato acontece, embora em grau reduzido, mesmo entre amostras de uma mesma espécie. Estudos passados demonstraram que, de um modo geral, as madeiras de espécies folhosas de clima temperado suportam raios de curvatura bem menores do que as de espécies folhosas de clima tropical. As espécies de coníferas são as piores. Esses mesmos estudos revelaram que não havia nenhuma correlação significativa entre fatores como peso específico, resistência e tenacidade da madeira e taxa de crescimento da árvore e a aptidão da madeira ao curvamento. No entanto, constatou-se que um bom curvamento era geralmente obtido quando se fazia um criterioso pré-selecionamento das peças baseado na existência de defeitos que reduzem a resistência da madeira tais como, deterioração, grã cruzada, nós, medula, fendas e lascamento superficiais e madeira quebradiça. No mesmo sentido, o conteúdo de umidade da madeira é um parâmetro a ser observado (Luxford & Krone, 1946; Reck, 1957; Stevens & Turner, 1970).

Na fase de fixação da curvatura da peça, o processo de secagem deve ser o mais apropriado ao tipo de madeira uma vez que algumas espécies apresentam uma forte tendência ao empenamento e rachadura. Além disso, uma peça de madeira plastificada por vaporização tende a se contrair bastante ao longo de seu comprimento. Tal contração pode provocar fendilhamentos profundos no sentido longitudinal das fibras da madeira. Estes defeitos geralmente inutilizam a peça curvada sob o ponto de vista tanto estético quanto de sua resistência mecânica.

Experimentos passados nos mostram que há uma gama enorme de equipamentos e dispositivos que podem ser usados satisfatoriamente nas diferentes fases do processo de curvamento. Stevens & Turner (1970) descrevem detalhadamente os diversos métodos de produção de peças curvadas partindo da seleção dos materiais, os equipamentos e dispositivos empregados na vaporização e curvamento das peças e fixação da curva até a montagem final do produto. Esses métodos de produção são logicamente determinados a partir do desenho do produto e das condições de uso a que ele estará submetido.

TRABALHOS EXPERIMENTAIS

Baseando-se nas considerações teóricas e práticas expostas acima, desenvolveu-se alguns experimentos que visam caracterizar, quantitativa e qualitativamente, o comportamento de algumas espécies amazônicas quando submetidas ao curvamento por vaporização.

Primeiramente fez-se ensaios mecânicos de compressão paralela às fibras em amostras representativas de um número limitado de espécies. Estas amostras foram previamente aquecidas por vaporização e suas deformações, quando submetidas a cargas de compressão, foram medidas a fim de determinar os níveis de compressibilidade daquelas espécies.

Posteriormente testou-se amostras de todas as espécies pré-selecionadas no processo de curvamento para determinar os seus raios mínimos de curvatura.

Por fim, analisou-se o comportamento das diferentes espécies no curvamento tendo como parâmetros de referência: a compressibilidade da madeira, a espessura das amostras, o tempo de vaporização e algumas características físicas e anatômicas da madeira.

Usando aquelas espécies mais aptas ao curvamento construiu-se um protótipo de móvel com o intuito de estudar alternativas de design utilizando-se peças maciças curvadas.

MATERIAL E MÉTODOS

De todas as espécies pré-selecionadas para os testes de curvamento, apenas seis foram usadas nos ensaios de compressibilidade. Estas espécies estão incluídas na Tabela I, e marcadas com um asterisco (*).

Preparação das Amostras

As amostras foram todas retiradas da região do cerne de peças que tinham o mesmo peso específico médio das espécies que elas representavam. Tomou-se o devido cuidado na preparação das amostras para que não houvesse nenhum defeito natural em seus corpos e que a grã da madeira fosse paralela ao eixo longitudinal da amostra. Foram retiradas seis amostras representativas de cada espécie. Todas elas foram aplainadas, lixadas e com a área de secção transversal de 25mm x 25 mm e comprimento de 60mm. O conteúdo de umidade inicial das amostras variou de 15% a 19%, entre todas as espécies.

Descrição dos Ensaios

Plastificação das Amostras

Metade das amostras representativas de cada espécie foram vaporizadas, isto é, imersas em vapor de água saturada a pressão atmosférica, por um período de 50 minutos. A outra metade das amostras não foram vaporizadas a fim de representarem o comportamento da madeira "madeira natural" das espécies. Para a vaporização, utilizou-se um recipiente de água aquecida por uma resistência elétrica, através de um termostato, a temperatura do vapor foi previamente estabilizada em torno de 100°C antes da imersão das amostras.

Compressibilidade

Todas as amostras foram testadas em ensaios mecânicos de compressão paralela às fibras com velocidade de carregamento de 1,0mm/min. O recipiente usado para a vaporização das amostras foi colocado próximo ao equipamento de ensaio a fim de dar-se procedimento nos ensaios após o período de vaporização e, assim, evitar qualquer resfriamento das amostras. A leitura das cargas foi feita em um plotador de gráficos conectado ao equipamento de ensaio. Realizou-se as medidas das deformações através de um extensômetro

colado na parte central do corpo da amostra e cujo eixo maior coincidia com o eixo longitudinal da amostra. Este extensômetro estava conectado a um equipamento eletrônico que media e imprimia as deformações simultaneamente à leitura das cargas.

MÉTODO DE ANÁLISE

Com os dados obtidos, pelo plotador e pelo extensômetro, levantou-se gráficos "Carga Vs. Deformação" para cada amostra, vaporizada e não vaporizada, representativa das espécies ensaiadas. Através destes gráficos, analisou-se o comportamento das amostras no regime elástico e plástico e determinou-se a máxima deformação que as amostras suportam sem romper, isto é, o grau de compressibilidade da madeira.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os gráficos da Figura 1, ilustram o comportamento elástico-plástico da madeira sob o efeito da plastificação obtido através do aquecimento por vaporização. Testou-se diferentes espécies com o objetivo de mostrar que o aumento da plasticidade da madeira varia entre espécies. Devido ao número reduzido de amostras por espécie, os valores de carga e deformação dadas nos gráficos são de importância relativa, isto é, servem apenas para mostrar o grau de plasticidade de uma espécie em comparação com as outras.

Uma primeira análise dos gráficos mostrou que a plastificação por aquecimento leva uma redução da rigidez da madeira. Isto é, a madeira torna-se mais maleável. Tal efeito ocorre, em graus diferentes, em todas as espécies ensaiadas. Kollmann & Côté (1968) e Ratte (1983) mostram que o efeito de plastificação é mais pronunciado quando há um aumento simultâneo da temperatura e do conteúdo de umidade da madeira. Como as amostras foram completamente submersas em vapor de água a uma considerável redução de rigidez da madeira. De fato, usando-se conhecidas fórmulas de resistência dos materiais, pode-se verificar que, em relação às amostras a umidade e temperaturas de tauarí, angelim, itaúba, maçaranduba, cedrorana e cardeiro diminuíram de 90%, 50%, 41%, 39%, 28% e 6% respectivamente. Um efeito prático da redução do módulo de elasticidade da madeira é a redução proporcional das forças de flexão exigidas durante o curvamento. Através dos gráficos, observou-se claramente, a redução das cargas de ruptura combinada com significativo aumento das deformações plásticas quando a madeira é aquecida por vaporização. Tal fenômeno confirma os resultados dos estudos feitos por Kollmann & Côté (1968), Stevens & Turner (1970) e outros autores.

Embora o aumento da plastificação tenha ocorrido em todas as espécies estudadas, observou-se que algumas atingiram graus de compressibilidade muito maiores do que outros. Assim, tem-se que, antes da ruptura das amostras, cedrorana suportou uma deformação plástica de 5,2%; itaúba e maçaranduba, ambas 4,2%; tauarí 0,65%; cardeiro 0,58%; e angelim 0,51%. Estes valores confirmam estudos feitos com madeiras folhosas de clima temperado que concluíram que estas espécies apresentam índices de plastificação muito maiores do que as madeiras tropicais (Stevens & Turner, 1970; Peck, 1957).

Mesmo que o número de espécies testadas seja muito reduzido para se tirar conclu-

sões finais, estatisticamente precisas, pode-se notar que aparentemente não há nenhuma relação direta entre o peso específico da madeira e o aumento de seu grau de compressibilidade quando aquecida por vaporização. Ao analisar-se os valores do peso específico, dados na Tabela 1, e da compressibilidade para diferentes espécies, verificou-se que a cedrorana com um peso específico básico 0,46% menor do que o das outras espécies, apresentou o maior grau de compressibilidade. Por outro lado, madeiras mais pesadas como itaúba e maçaranduba atingiram também graus de compressibilidade maiores do que o das outras espécies, exceto cedrorana. Através dos dados compilados por Peck (1957), que determinou os graus de compressibilidade de amostras vaporizadas de 12 diferentes espécies pode-se observar também que não há uma correlação entre o peso específico e compressibilidade da madeira. Outros fatores inerentes à madeira, como estrutura anatômica e composição química, podem ter alguma influência significativa sobre o aumento da compressibilidade da madeira quando submetida ao aquecimento por vaporização. Entretanto, não temos conhecimento de qualquer estudo feito nesse sentido.

CONCLUSÕES

Os experimentos, em concordância com estudos anteriores, demonstram que o aquecimento por vaporização aumenta a plasticidade da madeira. A madeira assim plasticizada torna-se bastante maleável e apresenta um elevado grau de compressibilidade. O efeito de plastificação varia significativamente entre as espécies. Das espécies testadas, cedrorana, itaúba e maçaranduba apresentaram os maiores aumentos de compressibilidade. Aparentemente, não há nenhuma relação direta entre o peso específico e grau de compressibilidade da madeira.

RAIOS MÍNIMOS DE CURVATURA

Material e Métodos

Vinte e uma espécies da região amazônica foram testadas no curvamento. A Tabela 1 lista estas espécies, incluindo peso específico e tipo de grã geralmente encontrada na madeira destas espécies.

Preparação das Amostras

As amostras foram tiradas em quatro classes diferentes de espessuras de 3, 13, 20 e 25mm. A largura de 50mm e o comprimento de 750mm foram mantidos constantes devido à dificuldade em manter um estoque regular de madeira, o número de amostras para cada classe de espessura variou de 10 a 20 entre todas as espécies, porém para algumas espécies não foi possível obter amostras para todas as classes de espessura.

Todas as amostras foram retiradas somente da região do cerne das peças representativas das espécies. Todas elas foram previamente serradas, desempenadas e aplainadas antes de qualquer tratamento. Evitou-se ao máximo o uso de amostras contendo defeitos como deterioração, furos de insetos, nós, fendas e rachaduras. Não existiu a preocupação com a variação do peso específico das amostras de uma mesma espécie uma vez que

desejou-se verificar a possível influência desta variável no comportamento da espécie no curvamento. Do mesmo modo, o tipo de grã variou aleatoriamente entre as amostras pois isto corresponde a variação que ocorre naturalmente, na madeira, mesmo de uma única espécie. Para a maioria das espécies, o conteúdo de umidade inicial das amostras variou de 15% a 19%. As amostras com conteúdo de umidade abaixo de 15% foram imersas em água por um período de 24 horas antes de serem vaporizadas.

Descrição dos Ensaios

Plastificação das Amostras

Antes dos ensaios de curvamento, as amostras foram mantidas em recipiente de vapor de água e pressão atmosférica. Através de um termostato, estabilizou-se a temperatura do vapor em torno de 100°C antes de colocar as amostras no recipiente. Para cada classe de espessura foram estabelecidos dois tempos de vaporização de 30 minutos e 50 minutos.

Ensaio de Curvamento

Depois de vaporizadas durante os períodos pré-estabelecidos, as amostras, foram fixadas no dispositivo de curvamento mostrado na Figura 2. Pelo desenho esquemático da Figura 3, observou-se que este dispositivo é composto de duas partes (a) a mesa contendo um molde curvo (7) e um pequeno sarrilho, com engrenagem e catraca, na qual são presos dois cabos de aço (8) conectados aos dois braços (1); (b) o dispositivo de fixação da amostra (6). Este dispositivo de fixação é formado por dois tipos de encostos, de topo (4) e lateral (2), e uma fita metálica (5) presa por um parafuso no encosto lateral. Assim que os cabos de aço são puxados pelo giro do sarrilho, os braços vão se fechando e envergando a amostra em torno do molde. A flexão da amostra acarreta cargas de compressão nos encostos de topo e, como são fixos aos encostos laterais através da peça (3), por reação, os encostos laterais transmitem cargas de tração na fita metálica ou seja, grande parte das tensões de tração ocasionadas pelo curvamento são transferidos à fita metálica. A fita, assim tracionada, fica fortemente ajustada na superfície convexa da amostra, independentemente de seu grau de curvatura.

Como citado anteriormente, a plastificação por vaporização aumenta a compressibilidade da madeira mas tem um efeito insignificante sobre o seu comportamento quando tracionada. Assim, o objetivo de se criar tensões de compressão nos encostos de topo e de tração na fita metálica é reduzir ao mínimo as deformações, e conseqüentemente rupturas, por tração que normalmente ocorreriam na região convexa da curvatura a que as amostras vaporizadas são submetidas. Reduzindo-se as deformações por tração, as deformações por compressão provocadas na amostra podem ser estendidas até o limite máximo de compressibilidade da madeira. Deste modo, o raio de curvatura da amostra depende, em grande parte, somente do grau de compressibilidade da espécie.

Depois de fixadas no dispositivo, as amostras foram curvadas até que os primeiros sinais de ruptura, por compressão ou tração, aparecessem em suas superfícies.

O raio de curvatura final foi determinado por um simples cálculo geométrico da impressão tirada desta em uma folha de papel. Para se fazer as medidas, usou-se um transferidor, um esquadro e uma régua graduada em milímetros.

MÉTODOS DE ANÁLISE

Determinou-se o raio mínimo de curvatura de uma espécie e o maior raio de curvatura obtido dentre as amostras daquela espécie. Assim, por exemplo, de 20 amostras, 19 (95% das amostras) apresentariam raios de curvatura menores do que o raio mínimo determinada para a espécie que elas representam. O raio mínimo foi determinado para cada classe de espessura e tempo de vaporização. Como o número de amostras para cada classe de espessura variou de 10 a 20, o número de amostras com raios de curvatura menores do que o raio mínimo da espécie variou de 90% a 95% das amostras.

Definido o raio mínimo de curvatura, tem-se uma razoável margem de segurança no processo de curvamento de uma determinada espécie, pois, pode-se estimar de antemão a porcentagem de peças que suportarão, sem rupturas, o curvamento até um pré-estabelecimento limite de curvatura.

Posteriormente, analisou-se os valores dos raios mínimos de curvatura das espécies tendo como variáveis o processo de curvamento em si, isto é, a espessura das amostras e o tempo de vaporização, e algumas características inerentes às espécies como a compressibilidade, peso específico, e o tipo de grã da madeira.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de realizar os testes, alguns ensaios preliminares foram feitos com o propósito de avaliar a eficiência do dispositivo de curvamento e a melhor maneira de operá-lo. Como explicado anteriormente, o dispositivo incorpora dois encostos de topo que são ajustados conforme o comprimento da peça que se queira curvar e conforme a pré-tensão de tração que se deve dar na fita metálica antes de se iniciar o curvamento da peça. Esta pré-tensão tem que ser suficiente para que a fita fique tracionada contra a superfície da peça que se tornará a parte convexa da curvatura. Acontece que, durante o curvamento, a peça tende a forçar os encostos de topo e, estando estes já pré-fixados, grandes tensões de compressão são criadas nas extremidades da peça. Essas tensões freqüentemente causam esmagamento nos topos da peça e rupturas prematuras em sua região curva. Uma solução para este problema seria a utilização de encostos acoplados a pistões hidráulicos, ou pneumáticos, com pressostato e válvulas calibradas para garantir uma certa pressão constante durante todo o curvamento. Stevens & Turner (1970) mencionam o uso desse tipo de dispositivo em algumas indústrias. Embora mais simples, o dispositivo mecânico usado por Koch (1970), incorporando uma alavanca com dois pivôs, um fixo e outro móvel, é igualmente adequado para se controlar as pressões de topo.

Neste dispositivo, manteve-se um relativo controle das pressões de topo através do seguinte método. Primeiro, as extremidades das amostras foram chanfradas na aresta que suportaria as maiores tensões de compressão durante o curvamento. Segundo, usou-se uma fita de aço cuja espessura (bitola de 21 BWG ou 0,8mm) e maleabilidade permitiram uma certa deformação elástica quando fortemente tracionada. Deste modo, as pressões de topo se reduzem de maneira proporcional à distensão da fita. A utilização de fitas mais finas

para se conseguir maiores distensões não é recomendável pois, em curvamentos mais severos, as deformações se tornam plásticas, e assim, irreversíveis, inutilizando a fita para curvamentos posteriores. E, por último, a pré-tensão de tração foi limitada ao mínimo necessário para que a fita ficasse ajustada à superfície da amostra.

Os ensaios preliminares demonstraram também que o controle da qualidade das amostras deve ser o mais rigoroso possível. Deve-se evitar a presença de nós, deterioração, furos de insetos, madeira próxima à medula da árvore e qualquer lascamento na superfície das peças, principalmente na região a ser curvada, porque tais defeitos são pontos de início de fraturas prematuras. O conteúdo de umidade da madeira deve ser previamente ajustada. Amostras com baixo conteúdo de umidade (menor do que 15%) precisam ser submersas em água por um certo período até que o conteúdo de umidade esteja próximo ao "ponto de saturação das fibras". De outro modo, são necessários tempos mais longos de vaporização das amostras. O objetivo é permitir que a vaporização aqueça uniformemente toda a peça, da superfície ao centro, e assim, induza uma plastificação também uniforme da peça. O vapor é apenas um meio de transferência de calor.

Tomadas as devidas precauções quanto a qualidade das amostras e operação do dispositivo de curvamento, os testes foram feitos e os valores do raio mínimo de curvaturas das 21 espécies testadas estão dispostos na Tabela II.

Como previsto, houve uma enorme variação de comportamento entre as espécies. E, observa-se que, para todas as espécies, os raios mínimos diminuíram bastante com a redução da espessura das amostras. Além disso, a redução do raio mínimo com a espessura da peça foi condizente com o comportamento geral da espécie. Isto é, em relação às melhores espécies, as piores espécies apresentaram grandes raios de curvatura mesmo para amostras de pequena espessura. Verifica-se também que, para amostras de 13mm e 3mm de espessura, houve uma redução na variação dos raios mínimos entre as espécies. Assim, em projetos que requeiram peças curvas de pequena espessura o número de espécies que podem ser usadas satisfatoriamente amplia-se.

O comportamento das espécies em relação ao parâmetro "tempo de vaporização", foi aleatório, embora de um modo geral, não houvesse uma variação significativa entre um período e outro de vaporização. Com o aumento do tempo de vaporização para as amostras de 25mm de espessura, 10 espécies apresentaram uma redução de seus raios mínimos, 5 suportaram maiores raios de curvatura e, em 4 espécies, não houve qualquer variação. Para as amostras de 20mm, o aumento do tempo de vaporização resultou em uma redução do raio mínimo em 10 espécies e um aumento do mesmo raio em 8 espécies. Nesse sentido, verifica-se que, mesmo com a redução da espessura das amostras, o aumento do tempo de vaporização foi benéfica para algumas espécies e prejudicial para outras. É interessante notar também que a variação do raio mínimo com o aumento do tempo de vaporização não teve nenhuma relação com o peso específico das espécies testadas. Assim, observou-se que tanto madeiras pesadas, como fava-folha-fina, itaúba, maçaranduba e tanimbuca, como madeiras mais leves, como assacu, cedrorana, mogno e morototô, apresentaram maiores raios de curvatura com o aumento do tempo de vaporização.

Com o propósito de se resumir o comportamento de cada espécie no curvamento clas-

sificou-se as espécies conforme o critério dado abaixo.

CRITÉRIO PARA CLASSIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES QUANTO AO RAIÃO DE CURVATURA.

| Classe de Qualidade | Raio de Curvatura (cm) |
|---------------------|------------------------|
| Excelente | < 20 |
| Boa | 20 a 40 |
| Média | 41 a 60 |
| Ruim | > 60 |

Para a definição desse critério, tomou-se como parâmetros os valores de raio mínimo de curvatura compilados por Stevens & Turner (1970) que testaram dezenas de espécies de madeiras folhosas e coníferas, tanto de clima temperado quanto tropical. Para tanto, baseou-se em valores de raio mínimo obtidos com amostras de 25mm de espessura, exceto envira preta e fava-folha-fina, e escolheu-se o melhor tempo de vaporização para cada espécie. A Tabela III mostra as classes de qualidade para todas as espécies testadas.

Uma análise das Tabelas II e III e dos gráficos da Figura I revelam que, conforme estudos anteriores demonstraram, há uma clara relação entre o grau de compressibilidade da madeira e seu comportamento no curvamento. Das espécies mostradas nos gráficos, observou-se que aquelas que suportaram maiores deformações plásticas de compressão, como itaúba, maçaranduba e cedrorana, foram também as espécies que apresentaram os menores raios de curvatura. A classe de qualidade da madeira de cedrorana, abaixo da qualidade apresentada por itaúba e maçaranduba, deveu-se ao fato de que amostras de peso específico abaixo do normal e com grã muito cruzada tenham sido incluídas nos testes de curvamento daquela espécie. O efeito negativo desses fatores no curvamento da madeira vaporizada será explicado a seguir. Excluindo-se aquelas amostras, cedrorana apresenta um comportamento tão bom quanto as outras duas espécies.

Analisando-se as Tabelas I, II e III, verifica-se que, à exceção da cedrorana, as espécies de baixo peso específico apresentaram grandes raios de curvatura e foram classificadas como "ruins". Em geral, essas madeiras são muito "quebradiças", isto é, frágeis, e não suportam as tensões a que são submetidas durante o curvamento. Nota-se também que um elevado peso específico não implica em baixo rendimento no curvamento por vaporização. De fato, as únicas três espécies que tiveram classe de qualidade "BOA", apresentam um peso específico igual ou acima de 0,70. Por outro lado, outras espécies mais pesadas, como louro aritu, muiracatiara e tanimbuca foram classificadas como "ruins".

A espécie cedrorana, apesar de peso específico relativamente baixo, apresentou um comportamento satisfatório. Do mesmo modo, a madeira de pente-de-macaco (*Apeiba* spp.) que é muito usada e apreciada em curvamentos de peças maciças pelas indústrias moveleiras, também apresenta um baixo peso específico; peso específico médio = 0,36 (IBDF, 1981).

Entretanto, uma análise dos valores de peso específico calculados em todas as amostras de cedrorana revelou que aquelas com peso específico bem abaixo da média desta espécie apresentaram os maiores raios de curvatura. Um outro fator que prejudicou o comportamento dessa espécie, durante o curvamento, foi a inclinação da grã ao longo das peças. Amostras com grã bastante inclinada apresentaram não só grandes raios de curvatura mas também uma forte tendência ao torcimento quando submetidas aos esforços de flexão. As amostras com grã relativamente reta e peso específico em torno do valor médio da espécie apresentaram raios de curvatura menores que 30mm; fato que incluiria a espécie na classe de qualidade "BOA".

A inclinação da grã ao longo das amostras foi um fator prejudicial em todas as espécies testadas. Mesmo pequenos desvios de grã localizadas na região a ser curvada da amostra resultaram em fraturas prematuras nas peças.

Nas espécies testadas, não foi observado nenhum efeito significativo da inclinação dos anéis de crescimento em relação ao plano de curvatura da peça sobre o comportamento da amostra no curvamento. Dados da literatura também indicam que se pode usar tanto peças provenientes de corte tangencial na tora quanto de corte radial ("quateada") para se obter um curvamento satisfatório (Stevens & Turner, 1970; Peck, 1957).

CONCLUSÕES

Do exposto acima pode-se tirar as seguintes conclusões:

a. Exceto realizando-se ensaios prévios de compressibilidade da madeira, não há um método preciso de se estimar a susceptibilidade de uma espécie ao curvamento por vaporização. O emprego de uma certa espécie em projetos de peças maciças curvas deve necessariamente ser procedido por testes sistemáticos com a madeira dessa espécie para se avaliar seu comportamento durante o curvamento.

b. De um modo geral, as madeiras mais leves são impróprias ao curvamento por vaporização. Entretanto, curvamentos satisfatórios podem ser obtidos tanto com madeiras de classe de densidade alta quanto com algumas madeiras de baixa densidade.

c. Depois de selecionada uma espécie própria ao curvamento, deve se fazer um rigoroso controle de qualidade das peças a serem curvadas. Deve-se evitar o uso de madeira de peso específico muito abaixo daquele considerado normal para a espécie. A presença de defeitos como nós, grã cruzada, deterioração, furos de insetos, lascamentos superficiais e o uso de madeira próxima à medula da árvore deve também ser evitada. O conteúdo de umidade inicial da madeira mais apropriado deve estar em torno do "ponto de saturação das fibras".

d. A eficiência do dispositivo de curvamento é tão importante para um bom curvamento quanto o uso das espécies mais apropriadas e o controle de qualidade das peças. O princípio operacional do dispositivo é limitar ao mínimo as tensões e deformações de

tração na madeira durante o curvamento. Assim, o raio de curvatura da peça dependerá somente do grau de compressibilidade da madeira quando aquecida por vaporização.

e. O efeito da variação do tempo de vaporização sobre o comportamento da madeira no curvamento foi específico para cada espécie. Deste modo, o parâmetro - tempo de vaporização - deve ser incluído nos testes preliminares de avaliação da susceptibilidade de uma determinada espécie ao curvamento.

f. Dentre as 21 espécies ensaiadas, itaúba, maçaranduba e fava-folha-fina apresentaram os menores raios mínimos de curvatura e foram consideradas boas para o curvamento. Cedrorana pode ser incluída nessa classe de qualidade desde que se faça rigoroso pré-selecionamento das peças de madeira desta espécie antes de vaporizá-las e curvá-las.

SUMMARY

The pre-selection of Amazonian wood species was determined by the most adequate performance showed in the bending process. Mecanic assays of parallel compression of the wood fiber was take from a big range samples of individual specie. The level of bending strength (or compressibility) was evaluated by warm vaporization. Samples from all species pre-selected were also tested by the bending process in which its minimum ray of curvature was determined.

Tabela 1. Características físicas e anatômicas das espécies.

| Espécie | Peso Específico Básico g/cm ² | Tipo de Grã |
|--|--|---------------------------|
| Amapa doce Brosimum parinarioides Ducke | 0,54 | entre cruzada |
| Angelim pedra* Hymenolobium petraium | 0,68 | reversa |
| Assacu Hura creptans | 0,26 | direita |
| Cardeiro* Scleronema micranthum | 0,59 | direita |
| Cedrorana* Cedrelinga catenaeformis | 0,46 | direita a cruzada reversa |
| Cumarurana Dipteryx alata | 0,83 | direita a cruzada reversa |
| Envira preta Onychopetalum amazonium Freis | 0,54 | direita |

continuação (Tabela 1).

| Espécie | Peso Específico Básico g/cm ² | Tipo de Grã |
|--|--|---------------------------|
| Fava-folha-fina Piptadenia suaveolens | 0,77 | direita a cruzada reversa |
| Freijó Cordia goeldiana Huber. | 0,49 | direita a cruzada reversa |
| Itauba amarela* Mezilaurus itauba | 0,70 | direita |
| Louro aritu Licaria aritu | 0,79 | direita |
| Louro gamela Nectandra rubra | 0,52 | direita |
| Maçaranduba* Manilkara huberi | 0,92 | direita |
| Mogno Swietenia macrophylla | 0,46 | entrecruzada |
| Morototó Scheffelera morototoni | 0,51 | direita |
| Muiracatiara Astronium lecointei Ducke | 0,75 | direita |
| Mandioqueira Qualea sp. | 0,66 | cruzada reversa |
| Tanimbuca Buchenavia oxycarpa | 0,72 | direita |
| Tauari (1) * Couratari oblongifolia | 0,49 | direita |
| Tauari (2) Couratari stellata | 0,60 | direita |
| Tauari (3) Cariniana integrifolia | 0,49 | direita |

Tabela 2. Raio mínimo de curvatura das espécies em relação ao tempo de vaporização e espessura das amostras.

| | RAIO MÍNIMO DE CURVATURA (cm) | | | | | | | |
|--|-------------------------------|----|----|----|----------------|----|----|----|
| | Tempo de Vaporização (min) | | | | | | | |
| | 30 | | | | 50 | | | |
| | Espessura (mm) | | | | Espessura (mm) | | | |
| | 3 | 13 | 20 | 25 | 3 | 13 | 20 | 25 |

Tabela 2. Raio mínimo de curvatura das espécies em relação ao tempo de vaporização e espessura das amostras.

| Espécie | RAIO MÍNIMO DE CURVATURA (cm) Tempo de Vaporização (min) | | | | | | | |
|-----------------|---|----|-----|-----|----------------|-----|-----|-----|
| | 30 | | | | 50 | | | |
| | Espessura (mm) | | | | Espessura (mm) | | | |
| | 3 | 13 | 20 | 25 | 3 | 13 | 20 | 25 |
| Amapã doce | 12 | 53 | 92 | 96 | 13 | 46 | 76 | 88 |
| Angelim pedra | 10 | 39 | 56 | 83 | 9,7 | 31 | 43 | 89 |
| Assacu | 68 | 94 | 110 | 135 | 79 | 108 | 154 | 172 |
| Cardeiro | 10 | 36 | 64 | 67 | 10 | 30 | 53 | 59 |
| Cedrorana | 8,6 | 27 | 35 | 54 | 8,8 | 17 | 44 | 51 |
| Cumarurana | 15 | 31 | 54 | 64 | 13 | 27 | 51 | 50 |
| Envira preta | | 63 | 86 | | | 76 | 80 | |
| Fava-folha-fina | | 21 | 33 | | | 34 | 39 | |
| Freijõ | 15 | 55 | 70 | 87 | 12 | 50 | 65 | 71 |
| Itaúba | 8,6 | 18 | 22 | 27 | 9,0 | 17 | 20 | 29 |
| Louro aritú | 16 | 58 | 91 | 109 | 14 | 49 | 60 | 110 |
| Louro gamela | | | | 58 | | | | 64 |
| Maçaranduba | 9,1 | 14 | 17 | 33 | 8,7 | 12 | 21 | 45 |
| Mandioqueira | 27 | 49 | 81 | 83 | 25 | 32 | 50 | 76 |
| Mogno | 14 | 44 | 65 | 86 | 17 | 54 | 74 | 86 |
| Morototó | 32 | 57 | 76 | 100 | 36 | 62 | 98 | 120 |
| Muiracatiara | 26 | 62 | 71 | 86 | 24 | 54 | 61 | 75 |
| Tambuca | 16 | 39 | 60 | 88 | 18 | 64 | 65 | 70 |
| Tauarí (1) | 15 | 36 | 43 | 76 | 19 | 42 | 58 | 79 |
| Tauarí (2) | | | | 116 | | | | 98 |
| Tauarí (3) | | | | 92 | | | | 74 |

Tabela 3. Classes de qualidade de curvamento.

| Espécie | Classe de Qualidade |
|------------------|---------------------|
| Amapã doce | ruim |
| Angelim pedra | ruim |
| Assacu | ruim |
| Cardeiro | média |
| Cedrorana | média |
| Cumarurana | média |
| Envira preta* | ruim |
| Fava-folha-fina* | boa |
| Freijõ | ruim |
| Itaúba amarela | boa |
| Louro aritú | ruim |
| Louro gamela | média |
| Maçaranduba | boa |
| Mogno | ruim |
| Morototó | ruim |
| Muiracatiara | ruim |
| Mandioqueira | ruim |
| Tambuca | ruim |
| Tauarí (1) | ruim |
| Tauarí (2) | ruim |
| Tauarí (3) | ruim |

(*) Espessura das amostras 20 (mm).

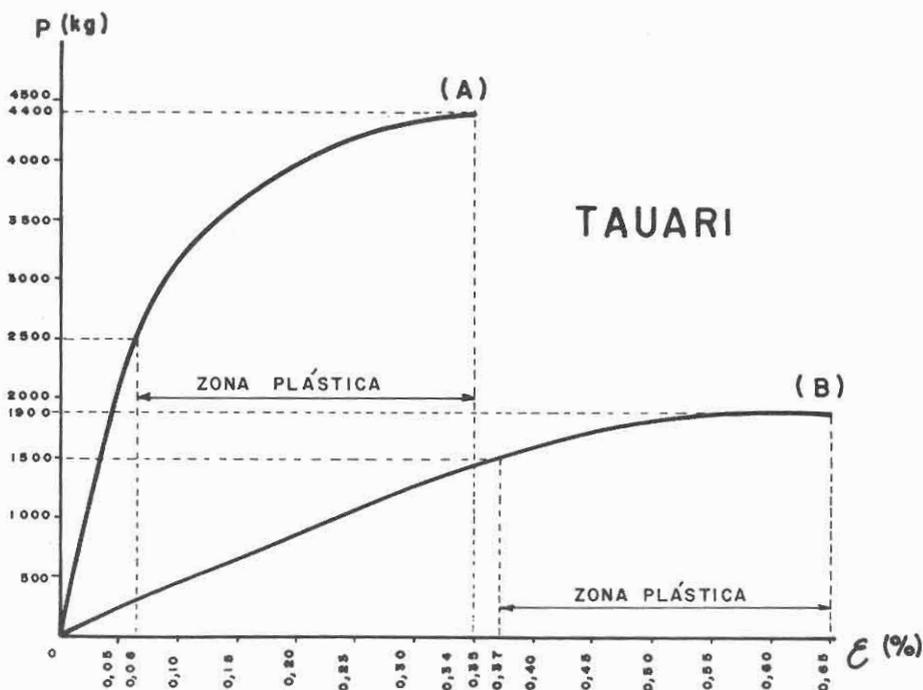


Fig. 1.1. Gráfico carga x deformação. (A) sem vaporização; (B) com vaporização.

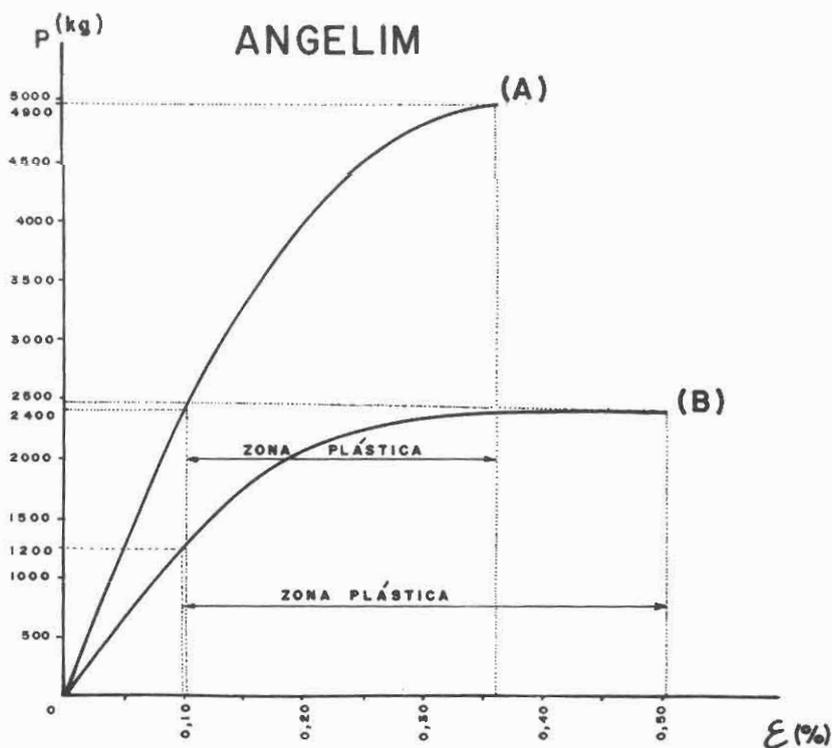


Fig. 1.2. Gráfico carga x deformação. (A) sem vaporização; (B) com vaporização.

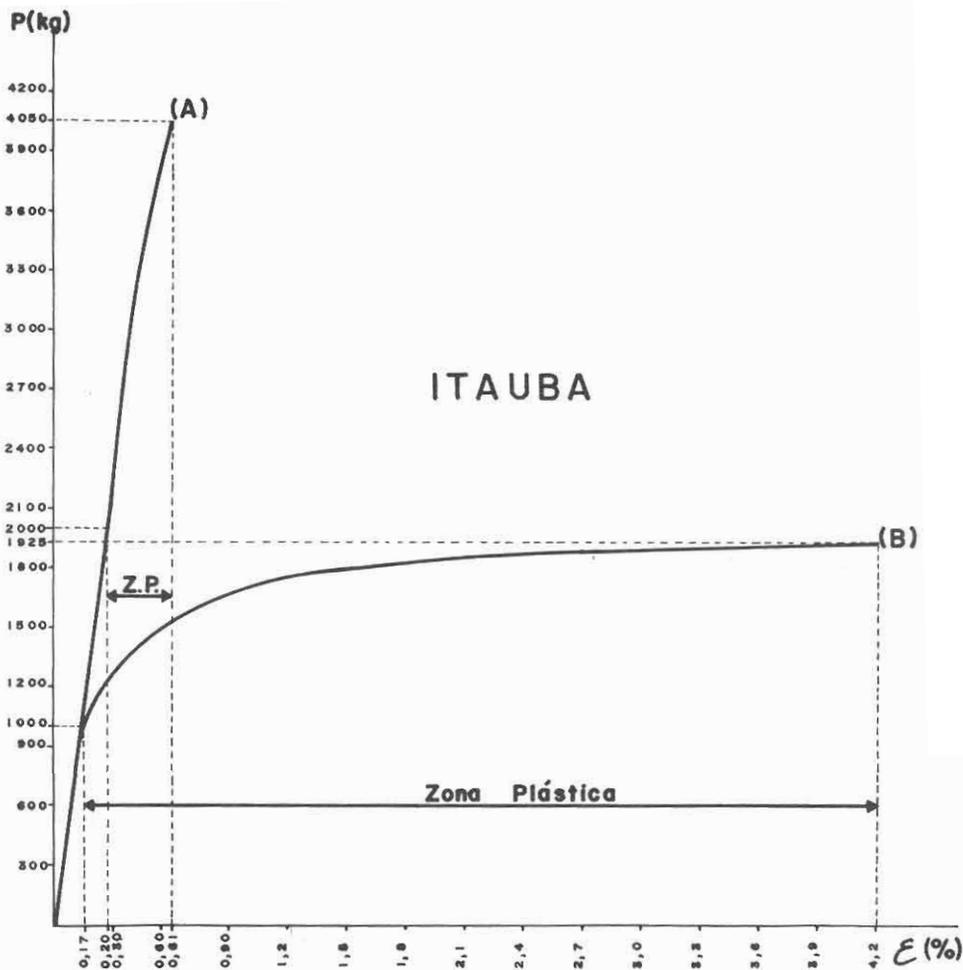


Fig. 1.3. Gráfico carga x deformação. (A) sem vaporização; (B) com vaporização.

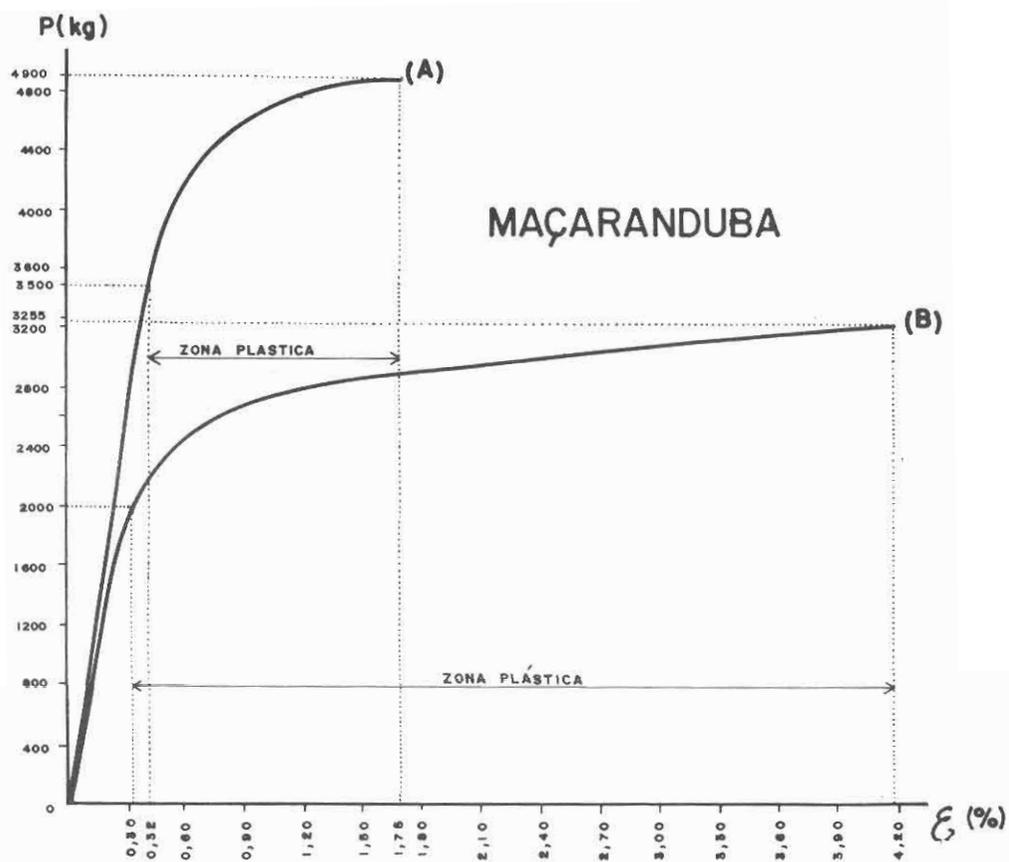


Fig. 1.4. Gráfico carga x deformação. (A) sem vaporização; (B) com vaporização.

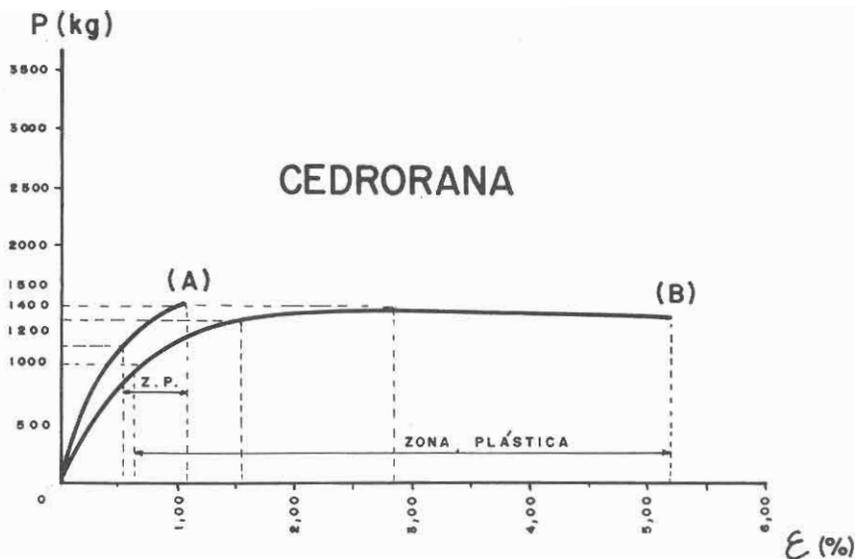


Fig. 1.5. Gráfico carga x deformação. (A) sem vaporização; (B) com vaporização.

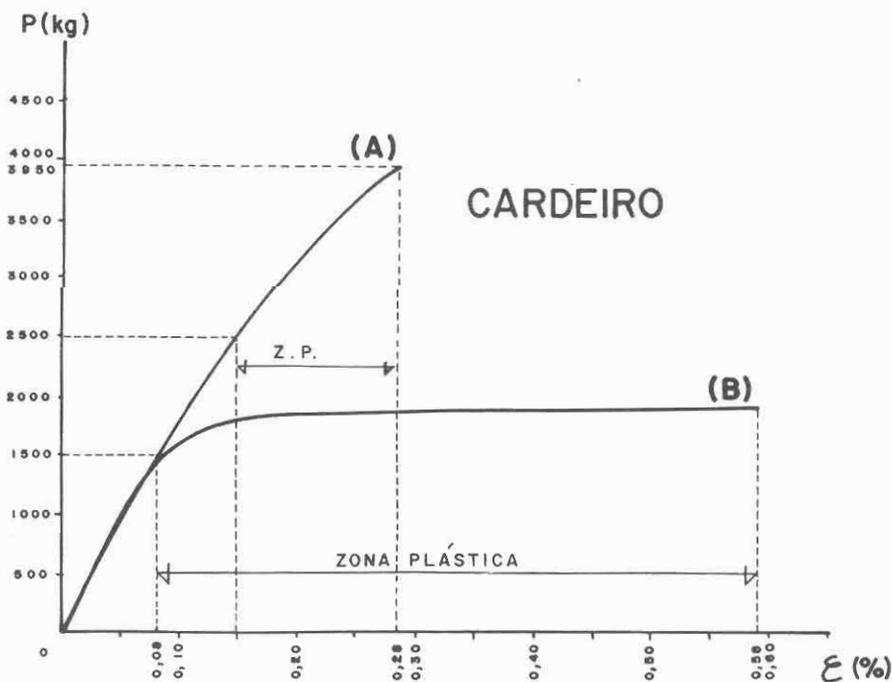


Fig. 1.6. Gráfico carga x deformação. (A) sem vaporização; (B) com vaporização.

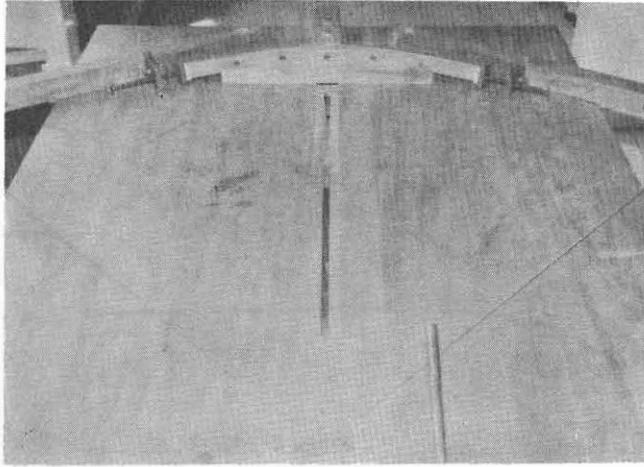


Fig. 2. Dispositivo para testes de curvamento.

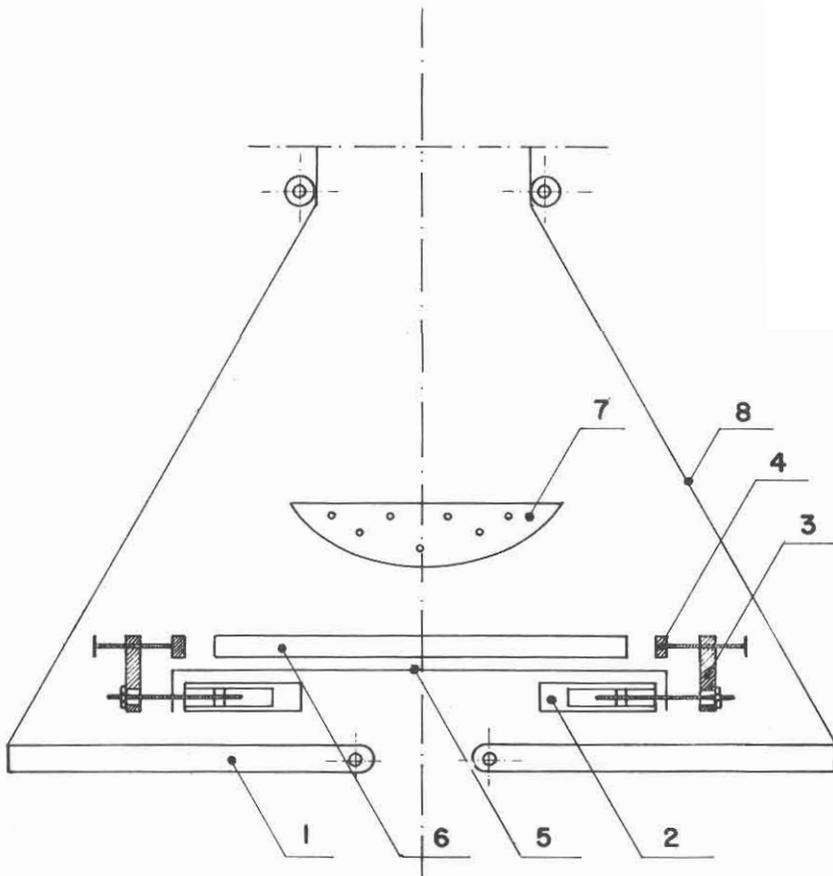


Fig. 3. Desenho esquemático do dispositivo de curvamento.

Referências bibliográficas

- Branco, A. A. - 1983. Para uma maior compatibilização ... In: **Madeira Móveis**. São Bento do Sul/FETEP. p. 22.
- Bonsiepe, G. (ed.) - 1984. **Metodologia Experimental: Desenho Industrial**. Brasília/CNPq.
- Candilis, G. - 1981. **Muebles Thonet**. Barcelona. Gustavo Gili ed.
- Capron, J. H. - 1963. **Wood Laminating** Mcknight Publishing Co.
- 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. & Côtê Jr., W. A. - 1968. **Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood**. New York, Springer-Verlag.
- Luxford, R. F. & Krone, R. 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 Technology.

(Aceito para publicação em 22.08.1989)