

Efeito do carregamento cíclico sobre as propriedades de flexão e ultrassom em madeiras de quatro espécies florestais

Effect of cycling loading on the bending and ultrasound properties of four wood species

Layse E. S. Guimarães¹, Angela P. Bussinguer²,
Cláudio H.S. Del Menezzi³, Milton L. Siqueira⁴ e Mário R. Souza⁵

Resumo

O objetivo desse estudo foi avaliar o efeito do carregamento cíclico em madeiras de quatro espécies florestais (*Dipteryx odorata*, *Pouteria guianensis*, *Cedrelinga catenaeformis* e *Tectona grandis*) sobre as propriedades mecânicas em flexão estática, velocidade de propagação da onda na peça e sua constante elástica. Foram submetidas a carregamentos de 40.000 e 100.000 ciclos, a uma frequência de 0,4 Hz e carga em flexão a 40% do módulo de ruptura (f_M). Antes e após os carregamentos foi realizada a leitura do tempo de propagação da onda de ultrassom para obter a velocidade e a constante elástica das amostras. O efeito do número de ciclos foi comparado por ANOVA, seguida pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Os valores médios de f_M e E_M foram estatisticamente iguais entre os ciclos, exceto o E_M de *C. catenaeformis*, justificado pelas variáveis usadas, que foram relativamente baixas. Valores da velocidade de propagação da onda e da constante elástica foram ligeiramente superiores conforme o aumento do número de ciclos. O aumento da constante elástica para *D. odorata* foi de aproximadamente 4 e 7% nos ciclos de 40.000 e 100.000, respectivamente. Para *P. guianensis* o aumento da constante elástica foi de aproximadamente 7 e 8% nos ciclos 40.000 e 100.000, respectivamente. Já para *C. catenaeformis* o aumento da constante elástica foi entre 3 e 7% e para *T. grandis* o aumento ficou entre 7 e 8%, nos ciclos de 40.000 e 100.000, respectivamente.

Palavras-chave: qualidade da madeira, *Dipteryx odorata*, *Pouteria guianensis*, *Cedrelinga catenaeformis*, *Tectona grandis*, ondas ultrassonoras.

Abstract

The main goal of the present study was to evaluate the effect of cyclic loading on the mechanical properties in static bending, wave speed propagation and elastic constant in pieces of four woody species: two high density species, *Dipteryx odorata* and *Pouteria guianensis*, and two of low density, *Cedrelinga catenaeformis* e *Tectona grandis*. The species were subjected to loads of 40.000 and 100.000 cycles, with 40% of the rupture modulus f_M applied in bending, at a frequency of 0.4 Hz. In order to obtain the speed of wave propagation and the elastic constants of the samples, ultrasound equipment was utilized before and after the loadings. The results of the cyclic loading were compared by ANOVA analysis, followed by Tukey test ($\alpha=0,05$). The average values of f_M and E_M were statistically the same for the cycles, except for the E_M of *C. catenaeformis*. This can be justified by the low value of the utilized variables, which were not able to cause resistance reduction. The wave propagation speed and elastic constant values increased slightly as the number of cycles increased. For *D. odorata*, the addition in the value of the elastic constant was around 4% and 7% when working with 40.000 and 100.000 cycles respectively. Moreover, for *P. guianensis*, the addition in the value of the elastic constant was around 7% and 8% when working with 40.000 and 100.000cycles respectively. For *C. catenaeformis*, the elastic constant increased between 3 and 7%, and for *T. grandis* it increased between 7 and 8% in 40.000 and 100.000 cycles, respectively.

Keywords: quality of wood, *Dipteryx odorata*, *Pouteria guianensis*, *Cedrelinga catenaeformis*, *Tectona grandis*, ultrasonic waves.

¹Engenheira Florestal, Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia, UNB - Universidade de Brasília, CP. 04357, 70904-970, Brasília, DF. E-mail: layse_ennes@hotmail.com

²Engenheira Florestal, Mestranda em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia, UNB - Universidade de Brasília, CP. 04357, 70904-970, Brasília, DF. E-mail: angelabussinguer@gmail.com

³Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia, UNB - Universidade de Brasília, CP. 04357, 70904-970, Brasília, DF. E-mail: cmenezzi@unb.br

⁴Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 70919-970, Brasília, DF. E-mail: milton@unb.br

⁵Analista Ambiental, PhD, Laboratório de Produtos Florestais, Serviço Florestal Brasileiro, 70818-900, Brasília, DF. E-mail: mario.souza@florestal.gov.br

INTRODUÇÃO

A maioria das estruturas de engenharia está sujeita a carregamentos que são de um modo geral variáveis no tempo, embora, muitas vezes, a carga seja estática em uma primeira observação. Outras estão sujeitas diretamente a carregamentos cíclicos, onde as cargas aplicadas ao longo do tempo sofrem variações de amplitude não desprezíveis, que comprometem a vida útil da estrutura.

A madeira é um material excepcional na aplicação estrutural, possui alta resistência mecânica, beleza estética, boa trabalhabilidade e grande durabilidade quando devidamente tratada. Dentre as diversas aplicações em que a madeira recebe cargas cíclicas, podem ser citadas pontes, passarelas, montanha russa, trilhos de trem, carrocerias de caminhões e carroças.

Desse modo, determinar esforços mecânicos da madeira que serão solicitados a distintas variáveis como frequência de aplicação, cargas diferenciadas e o tempo de permanência são aspectos muito importantes em uma análise estrutural. Quando submetida a carregamentos cíclicos, a madeira irá apresentar uma deformação residual. Isso ocorre dentro de um amplo intervalo de ciclos após a suspensão da aplicação de carga, fenômeno denominado fadiga.

A fadiga pode de ser definida de acordo com a norma ASTM E1823 (ASTM, 2007) como o processo de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva que ocorre em um material sujeito a variações de tensões e deformações flutuantes no mesmo ponto; ou pontos e que pode culminar em fissuras ou rupturas completas após um número suficiente de variações de tensões ou deformações cíclicas. Porém Smith *et al.* (2003) incorporam o argumento de duração da carga, que a interpretação do mecanismo de ruptura por fadiga não leva em consideração a influência da duração de carga, que é de fundamental importância para os materiais que apresentam propriedades que dependem do tempo e, assim, torna-se limitado avaliar a fadiga somente pelo mecanismo de ruptura quando o material analisado apresenta variações reológicas (MACÊDO, 2000).

O estudo do carregamento cíclico se faz importante na atuação de equipamentos e estruturas sujeitas a esforços dinâmicos e vibrações - em situações de tração, compressão, flexão, variações térmicas e de umidade, dentre outras -, onde o fenômeno da fadiga representa mais de

90% das causas mecânicas de falhas em serviço (ALVES, 2008; FONSECA JUNIOR, 2003; LOPES, 2006), e a frequência da carga é de fundamental importância para os materiais que apresentam propriedades que dependem do tempo. Antes que ocorra a falha por fadiga a madeira terá sua resistência diminuída e alterações nos elementos estruturais podem estar relacionadas a esse fenômeno. Assim, o uso de técnicas de ensaios não destrutivos como o método do ultrassom, que se baseia na análise da propagação das ondas ultra-sonoras e sua relação com as constantes elásticas da madeira (STANGERLIN *et al.*, 2010), revela-se com grande potencial para essa avaliação. Essa técnica tem sido empregada para a detecção de múltiplas interações com a microestrutura do material, além de oferecer resultados imediatos da avaliação.

A resistência à fadiga de materiais fibrosos, como a madeira, é em geral superior a dos materiais cristalinos, como os metais, e há escassez de estudos na área da tecnologia da madeira, tanto para espécies nativas como exóticas. Nesse sentido, presente trabalho tem como objetivo a avaliação do efeito do carregamento cíclico sobre as propriedades de madeiras tropicais obtidas por meio de ensaios de flexão estática e ondas ultrassônicas.

METODOLOGIA

Material Lenhoso

Foram utilizadas madeiras de duas espécies tropicais de alta massa específica, sendo *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd e *Pouteria guianensis* (Aubl.), e amostras de madeira maciça de duas espécies consideradas de baixa massa específica, *Cedrelinga catenaeformis* (Ducke) Ducke e *Tectona grandis* (L. f). As amostras foram adquiridas em madeiras do Distrito Federal e foram identificadas anatomicamente por meio da comparação com o material depositado na Xiloteca do Setor de Anatomia da Madeira do Laboratório de Produtos Florestais, Serviço Florestal Brasileiro (*Index Xylarium* FPBw). Em seguida, as pranchas foram submetidas à climatização em condições aproximadas de 65±1% de umidade relativa e 20±3° C de temperatura até peso constante. A partir do material aclimatado foram confeccionados 22 corpos de prova (CPs) para cada espécie com seção transversal de 25 mm x 25 mm e comprimento de 410 mm, conforme ASTM D143-94 (ASTM, 2000).

Ensaio de flexão estática e de carregamento cíclico

Depois de aclimatadas, foram realizados os ensaios de flexão estática conforme estabelecido pela ASTM D143-94 (ASTM, 2000) com 10 CP por espécie. Dessa forma foram obtidos a carga de ruptura (N) e determinados o módulo de ruptura (f_M) e do módulo de elasticidade (E_M), valores que foram corrigidos para a umidade de referência de 12%, segundo NBR 7190 (ABNT, 1997).

O ensaio de carregamento cíclico foi realizado por máquina universal de ensaios com sistema de funcionamento pneumático (Festo) do Laboratório de Ensaio de Móveis, laboratório acreditado pelo INMETRO para aferição da qualidade de móveis. Devido à falta de norma de padronização de ensaios cíclicos em flexão para madeira, esses foram conduzidos conforme as dimensões segundo ASTM D143-94 (ASTM, 2000) e procedimentos de ensaio conforme metodologia adotada por Del Menezzi *et al.* (2011).

As quatro espécies foram submetidas a dois ciclos de carregamento (40.000 e 100.000 ciclos), sendo o quadrado real (actual square) a forma do ciclo escolhida para os ensaios, na qual o maior tempo do ciclo a carga permanece residente na amostra com a máxima tensão (SMITH *et al.*, 2003). Cada ciclo teve a duração de 2,5 segundos, sendo 2 segundos para a duração da carga e 0,25 segundo de tempo de aplicação e retorno do atuador, o que corresponde a uma frequência de 0,4 Hz. A contagem e duração dos ciclos foram estabilizadas por um controlador lógico programável SIEMENS.

Foram utilizados seis CPs para combinação de espécie e ciclos de carregamento. Os valores de f_M obtidos nos ensaios estáticos foram utilizados como referência para o cálculo da carga do atuador aplicada em L/2 nos ensaios de carregamento cíclico. A carga foi equivalente àquela necessária para gerar uma tensão nas bordas do CP equivalente 40% do f_M obtido, garantindo atuação dentro do regime elástico da madeira. Após a conclusão do ensaio cíclico, cada CP foi levado para climatização e, decorrido uma semana, submetido ao ensaio de flexão estática, de acordo com a norma ASTM D143-94 (ASTM, 2000), para determinação e comparação dos valores de f_M e E_M após a exposição a diferentes condições de carregamento cíclico.

Ensaio com ultrassom

Para o ensaio de ultrassom foi utilizado o equipamento de emissão de ondas ultrassono-

ras USLab do fabricante Agricef, com transdutores piezoelétricos de face plana com frequência de 45 kHz e resolução de 0,1 μ s. Adotando-se como referencial a velocidade da propagação de ondas nas madeiras como 4.500 m/s, a frequência (f) dos transdutores, o comprimento de onda (λ) da ordem de 10 cm e o comprimento do CP de 41 cm, a relação L/λ foi de 4,1; e encontra-se dentro da faixa em que a variação da velocidade longitudinal está em torno de 2,6% e não é afetada pelo λ . A avaliação com o ultrassom foi realizada antes e após cada ciclo de carregamento. A partir da leitura do tempo (Δt) e do comprimento do trecho percorrido (L) calculou-se a velocidade de propagação da onda (V_{LL} , m/s). A constante longitudinal elástica (C_{LL} , N/mm²) foi calculada pelo produto da velocidade ao quadrado pela massa específica do CP a 12% de umidade (kg/m³).

Análise estatística

A análise estatística utilizada consistiu inicialmente de análise de variância (ANOVA) para comparação das médias entre grupos. Quando rejeitada a hipótese de médias iguais, a análise foi seguida pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha=0,05$. Para a comparação dos valores da constante elástica (C_{LL}) e da velocidade de propagação (V_{LL}) antes (0 ciclos) e depois do ensaio de cíclico (40000 e 100000 ciclos) empregou-se o teste t pareado ao nível de $\alpha=0,05$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaio de flexão estática

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão estática foram comparados com os encontrados na literatura a fim de serem referenciais de comparação com os obtidos nos ensaios cíclicos. Na Tabela 1 estão representados os valores de resistência e rigidez da madeira para cada espécie, obtidos nos ensaios de caracterização mecânica.

Os valores são superiores para *Dipteryx odorata* (massa específica 1,08 g/cm³) e proximidade com os encontrados pelo IBAMA, onde o f_M foi de 173,1 N/mm² e E_M de 17958 N/mm²; para *Pouteria guianensis* (massa específica 1,03 g/cm³) o f_M foi de 140,6 N/mm² e E_M de 14.916 N/mm². Ao caracterizar a espécie Rocha *et al.* (1988), também, obtiveram para *D. odorata* f_M de 178,6 N/mm² e E_M 15.800 N/mm². Para as madeiras de baixa massa específica - 0,63 g/cm³ para cedronana e 0,57 g/cm³ para teca - *Cedrelinga catenaeformis* apresentou menor resistência de ruptura

Tabela 1. Propriedades de flexão estática das espécies estudadas.

Table 1. Flexing properties of species.

Espécie	N	ME (g/cm ³)	f _M (N/mm ²)	E _M (N/mm ²)
<i>Dipteryx odorata</i>	10	1,08	155,7 (13,3)	19384 (8,5)
<i>Pouteria guianensis</i>	10	1,03	149,9 (8,4)	16592 (8,2)
<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	10	0,63	74,8 (18,9)	9312 (24,4)
<i>Tectona grandis</i>	10	0,57	95,1 (7,8)	10433 (12,5)

Nota: coeficiente de variação (%) entre parênteses.

e menor módulo de elasticidade, comparados aos valores médios encontrados por Gonçalves; Gonçalves (2001) de 92,8 N/mm² para o f_M e 11285 N/mm² para o E_M e, Dias e Lahr (2004) encontraram 61 N/mm² para o f_M e 10032 N/mm² para o E_M. Já para *Tectona grandis* Govaere *et al.* (2003) encontraram 10991 N/mm² para o E_M e 97 N/mm² para o f_M.

A diferença encontrada para *D. odorata* e *C. catenaeformis* dos valores publicados em relação aos encontrados nos testes de ensaios desse estudo não comprometem a veracidade das propriedades mecânicas. Tal divergência pode-se inferir que seja devido à heterogeneidade das amostras, diferença de idade, procedência do lote de amostras, condições de crescimento, porção de retirada da peça de madeira, dentre outros. Essa variação de característica na madeira consequentemente causa variação nas propriedades físicas e mecânicas da espécie. Devido à característica anisotrópica da madeira, tal evidência é comum entre indivíduos da mesma espécie e, por vezes, dentro do mesmo indivíduo.

Ensaio de carregamento cíclico

O efeito do número de ciclos sobre as propriedades mecânicas da madeira em flexão estática foi comparado estatisticamente com os resultados dos corpos-de-prova testemunhas. Os valores médios e os desvios-padrão dessas propriedades são encontrados na Figura 1.

Os valores de f_M e E_M apresentaram altos valores de variância para as espécies de alta massa específica e suas médias comparadas estatisticamente em função do número de ciclos não tiveram diferenças significativas. Os resultados demonstram que não houve diferença significativa para os valores do módulo de ruptura (f_M) em nenhum dos ciclos para nenhuma das espécies de baixa massa específica. Entretanto, para os módulos de elasticidade (E_M) houve diferença significativa para os ciclos em *Cedrelinga catenaeformis*.

De acordo com o modelo proposto por Clorius (2002) acredita-se que, para os resultados onde não houve diferenças significativas, o com-

portamento das espécies para o carregamento a que foram submetidos esteja concentrados no regime III. Desse modo, entende-se que as falhas não sejam encontradas, pois as variáveis do ensaio cíclico encontram-se abaixo do limite do limiar da fadiga para as espécies avaliadas. Logo, o número de ciclos, frequência e carga aplicada foram relativamente baixos para que pudesse ocorrer fadiga significativa na madeira.

As diferenças encontradas para os módulos de elasticidade de *Cedrelinga catenaeformis* podem ser explicadas devido à natureza viscoelástica da madeira, onde a deformação sob esforços depende do histórico de carregamento. Assim, além da deformação elástica há um acúmulo da deformação com o tempo, mesmo com uma carga mantida constante, caracterizando o efeito da fluência.

A mesma relação de acréscimo do E_M foi encontrada por Macêdo; Calil Júnior (2007) em análise de madeira laminada colada e maciça de *Pinus caribea* a partir da qual observaram que esse aumento não ultrapassa 5% dos valores anteriores, seguido por uma fase de estabilização e um posterior decréscimo, com ruptura iminente do material, entretanto esse aumento na rigidez não é considerado significativo. Afirmam ainda que o acréscimo da rigidez em relação à rigidez inicial se justifica por uma reorganização na estrutura da madeira, como pode ser observado para os valores da espécie.

Entre os exemplos para ensaios cíclicos pode-se citar o estudo de Del Menezzi *et al.* (2011) que realizaram testes de carregamento cíclico com metodologia análoga ao do presente estudo. Foram ensaiados painéis de MDF e MDP avaliados em tratamento com ciclos da ordem de 104 a 25% do f_M e frequência de 0,45 Hz. Segundo os autores, o número de ciclos não afetou significativamente as propriedades de flexão dos painéis, e justifica ser devido aos baixos valores aplicados.

Ensaio de ultrassom

As médias obtidas para a velocidade de propagação da onda (V_{LL}) e a constante longitudi-

nal elástica (C_{LL}) dos CP's antes e após o carregamento em flexão por ciclos de 40.000 e 100.000 para as espécies encontram-se na Figura 2.

Na literatura não são fornecidos valores médios da velocidade da onda em madeira que sofreu carregamento cíclico para uma possível comparação com os resultados desse estudo. Porém, no que se refere à velocidade da propagação da onda em sólidos, os valores encontram-se na faixa de 4.000 a 6.000 m/s, relatados por

Gonçalez *et al.* (2001); Puccini (2002) e Stangerlin *et al.* (2010).

No que diz respeito ao efeito causado pelo ciclo, os resultados das variáveis mostraram alta correlação entre antes e após os carregamentos: correlações de teste t pareado variando de 0,86 a 0,99. Os valores de velocidade da onda e da constante elástica obtidos foram estatisticamente diferentes para todas as espécies. Isto implica afirmar que houve efeito de carregamento cíclico

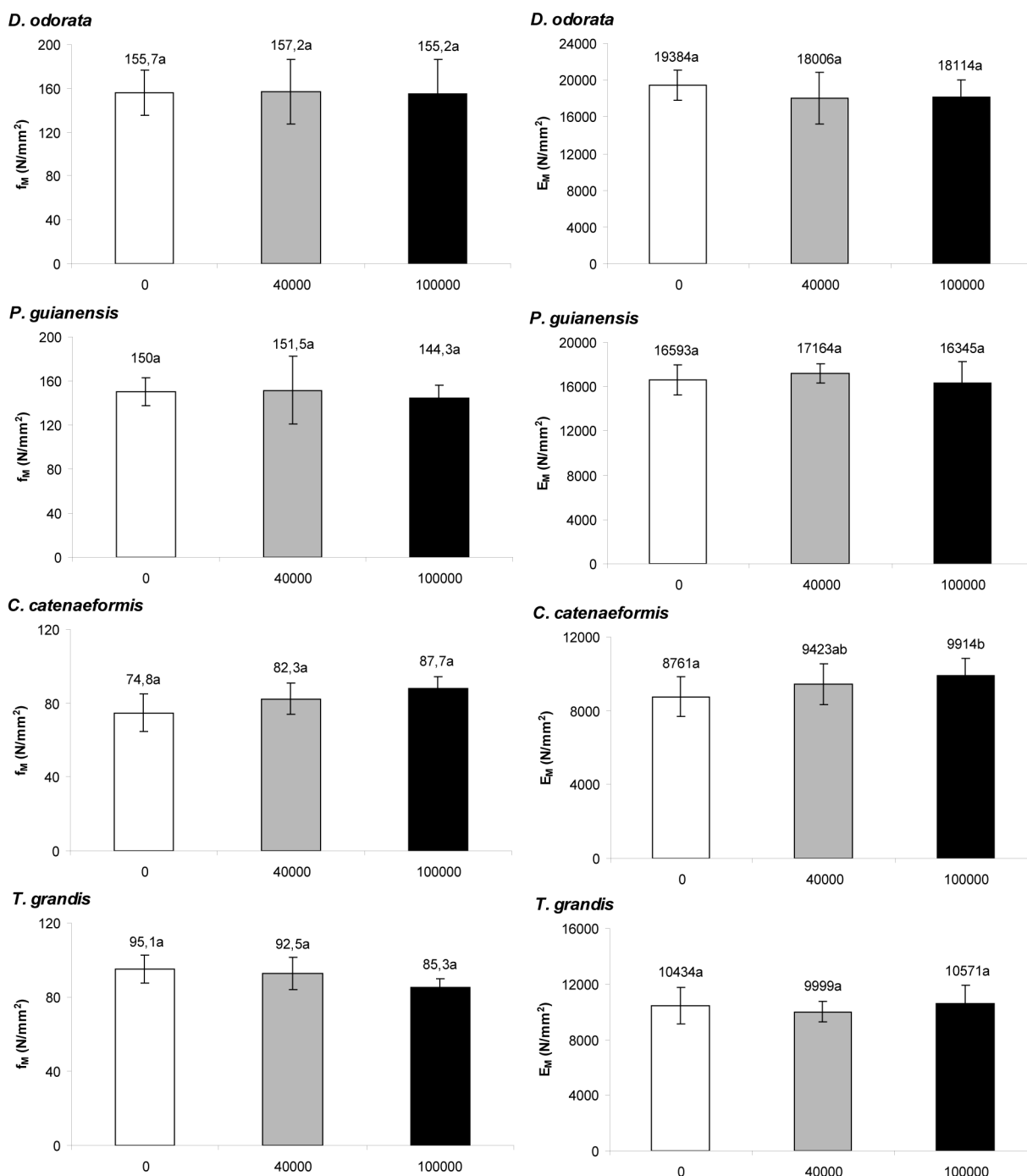


Figura 1. Valores médios e desvios-padrão para o módulo de ruptura (f_M) e módulo de elasticidade (E_M) nos diferentes ciclos obtidos para as espécies estudadas. (Nota: letras diferentes indicam médias estatisticamente distintas pelo teste de Tukey)

Figure 1. Mean and standard deviations of modulus of rupture (f_M) and modulus of elasticity (E_M) for the different loading cycles for the species studied. (Note: Different letters imply that means are statistically different according to the Tukey test)

sobre a madeira, possível de ser percebido pelo método do ultrassom, considerando a sensibilidade do aparelho. Outro aspecto observado foi o aumento dos valores de V_{LL} e C_{LL} tanto para as amostras submetidas a carregamentos de 40.000 como para 100.000, como pode ser visualizado nos gráficos e nos valores percentuais da Tabela 2.

Os resultados da Tabela 2 mostraram uma tendência crescente conforme aumento do número de ciclos. Entre as espécies de alta massa específica, *Pouteria guianensis* apresentou os maiores valores percentuais e entre as de baixa massa específica, *Tectona grandis* apresentou os maiores valores percentuais para a constante elástica e para a velocidade de propagação.

Tabela 2. Valores percentuais de aumento para velocidade de propagação da onda (V_{LL}) e para constante elástica (C_{LL}) obtidos após ensaios de carregamento cíclico.

Table 2. Percentual values of the increase of ultrasonic velocity (V_{LL}) and stiffness constant (C_{LL}) obtained after cycling loading level.

Espécie	Ciclo	V_{LL} (%)	C_{LL} (%)
<i>Dipteryx odorata</i>	40000	102,1	104,2
	100000	103,6	107,4
<i>Pouteria guianensis</i>	40000	103,4	107,0
	100000	103,9	107,9
<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	40000	102,4	103,2
	100000	102,7	106,9
<i>Tectona grandis</i>	40000	104,5	108,3
	100000	103,0	107,0

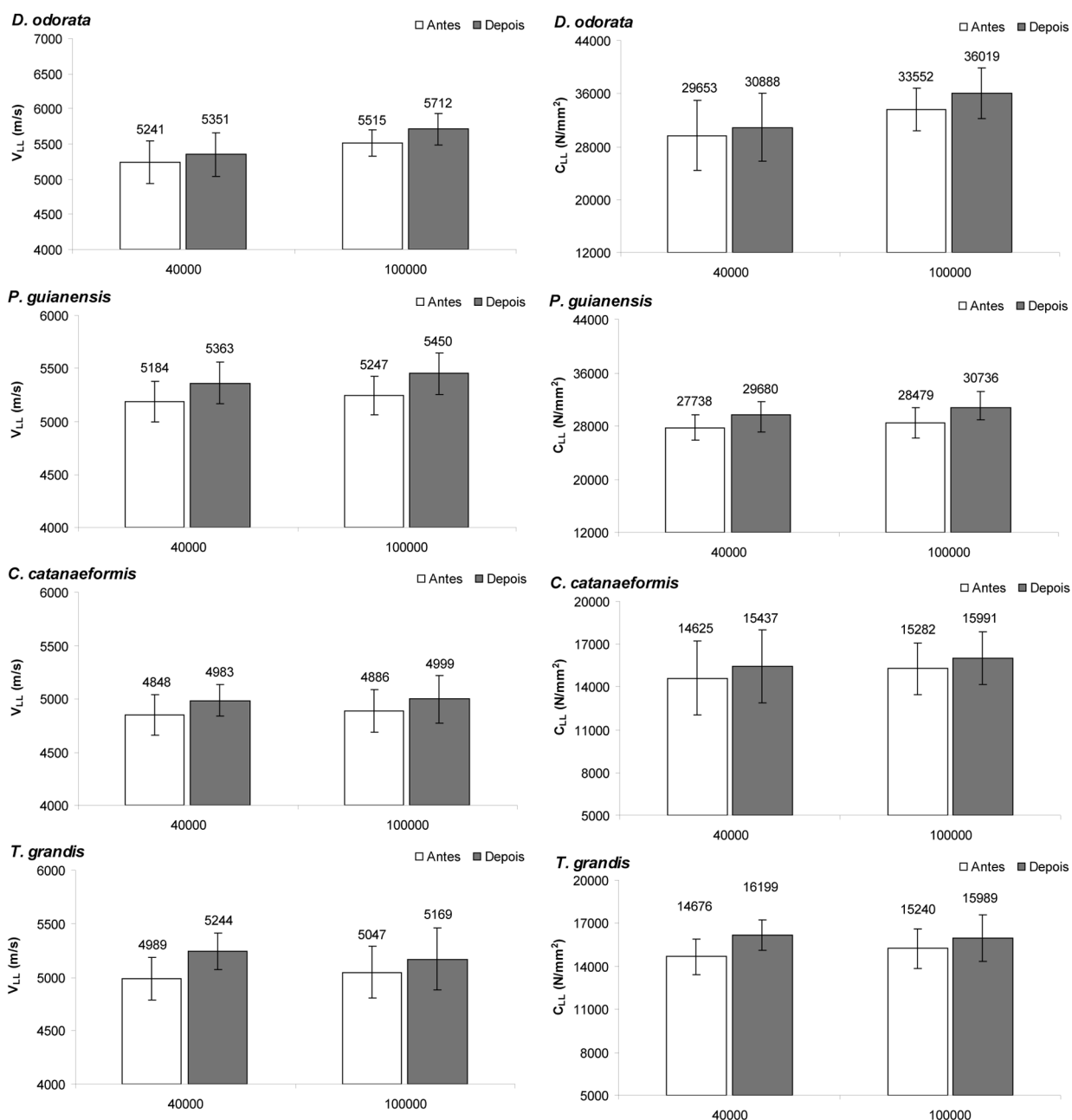


Figura 2. Valores médios da velocidade de propagação da onda (V_{LL}) e da constante longitudinal elástica (C_{LL}), obtidos antes e após o carregamento cíclico (40000 e 100000 ciclos), para as espécies estudadas.

Figure 2. Mean values of ultrasonic velocity (V_{LL}) and stiffness constant (C_{LL}) according to cyclic loading level (40000 or 100000).

Apesar de a madeira de *Tectona grandis* ter apresentado menor massa específica em relação à madeira de *Cedrelinga catenaeformis* – 0,63/cm³ e 0,57g/cm³, respectivamente –, os valores ligeiramente maiores da velocidade de propagação das ondas para a primeira justificam-se pela importância da estrutura anatômica da madeira na propagação das ondas, como o comprimento das fibras (OLIVEIRA; SALES, 2003), sendo a velocidade favorecida numa relação diretamente proporcional ao comprimento da fibra. De acordo com a revisão realizada, os valores médios para o comprimento das fibras de *T. grandis* encontram-se entre 955 e 2240 µm enquanto que para *C. catenaeformis* os valores estão entre 750 e 1200 µm (RICHTER; DALLWITZ, 2009; SILVA, 2010).

De acordo com Oliveira e Sales (2000) citado por Carrasco; Azevedo Júnior (2003), mantida a umidade constante ao longo da amostra, um aumento da massa específica acarreta em uma maior velocidade de propagação da onda na madeira. Porém, o efeito do carregamento cíclico tende a reduzir os espaços vazios – compactação do material – (GARDETE, 2006), havendo maior deposição de celulose na parede celular, gerando também um aumento significativo do coeficiente de rigidez. Dessa forma mesmo que haja um aumento da massa específica, a velocidade não diminui porque é compensada por um aumento da rigidez da madeira, como observado para todas as espécies analisadas.

Deve ser salientado o leve aumento da massa específica referenciado não implica em mudanças significativas para a massa específica aparente encontrada no corpo de prova, e utilizada para obter o valor da constante elástica. Desse modo, a referência é feita a um aumento local da massa específica, que pode ter reorganizado as estruturas internas, aumentando a massa específica de uma pequena região. Logo, as condições tornaram-se favoráveis para redução do tempo de leitura com o equipamento de ultrassom.

Essa justificativa também está aliada ao fato de não ter sido observado deterioração das fibras para as condições aplicadas, visto que as propriedades mecânicas não apresentaram diferença significativa, ou seja, não houve redução da resistência das madeiras, o que indica fibras em condições estáveis.

Observa-se que as propriedades mecânicas de amostras submetidas a ensaios cíclicos avaliadas por flexão estática apresentaram médias iguais; já aquelas avaliadas pelo método do ul-

trassom foram distintas, revelando-se ser sensível às pequenas alterações no interior das amostras. Entretanto, vale ressaltar que nesse método os valores obtidos referem-se a uma avaliação feita no mesmo corpo de prova antes e depois de sofrer carregamento cíclico. Por outro lado, os valores de f_M e E_M comparados anteriormente tomam como referenciais os resultados encontrados em ensaios de flexão estática realizados com corpos de prova distintos (testemunhas). Nesse sentido, recomenda-se uma análise anatômica das estruturas da madeira, visto que esta possui uma microestrutura bastante complexa em face de sua constituição orgânica.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

✓ Os valores médios de f_M e E_M foram estatisticamente iguais entre os ciclos, exceto para *Cedrelinga catenaeformis*; portanto, para as demais espécies não houve redução das propriedades de resistência em flexão estática, devido aos baixos valores adotados de frequência, número de ciclos e carga aplicada e, dessa maneira, também não foi possível a observação de um efeito pronunciado de fadiga;

✓ Valores da velocidade de propagação da onda ultrassonora no material e da constante longitudinal elástica apresentaram uma tendência crescente conforme o aumento do número de ciclos. O aumento da constante elástica para *Dipteryx odorata* foi de aproximadamente 4 e 7 % nos ciclos de 40.000 e 100.000, respectivamente. Para *Pouteria guianensis* o aumento da constante elástica foi de aproximadamente 7 e 8% nos ciclos 40.000 e 100.000, respectivamente. Para *Cedrelinga catenaeformis* o aumento da constante elástica foi entre 3 e 7% e para *Tectona grandis* o aumento ficou entre 7 e 8%, nos ciclos nos ciclos de 40.000 e 100.000, respectivamente.

✓ O ultrassom é um método sensível e de rápida avaliação da qualidade da madeira, estimando inclusive as propriedades mecânicas elásticas. Essas, juntamente com a velocidade de propagação das ondas nas espécies, foram alteradas significativamente pelo efeito dos carregamentos cíclicos, indicando uma alteração estrutural da madeira.

✓ Para o desenvolvimento de trabalhos futuros na análise dos efeitos da fadiga em madeira e sua avaliação nas propriedades mecânicas, sugere-se trabalhar em níveis superiores de frequência, carga e ciclos aos testados nesse estudo; sugere-se também a aquisição de dados computadorizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7390 - Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.
- ALVES, C.G. *Análise de confiabilidade em fadiga. Estudo de caso: braço de controle de suspensão automotiva.* 2008. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Philadelphia. ASTM E 1823 - Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing. Philadelphia, 2007. 22p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D143 – 94 - Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Philadelphia, 2000. 31p.
- CARRASCO, E.V.M.; AZEVEDO JÚNIOR, A.P. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som – fundamentos físicos e resultados experimentais. *Cerne*, Lavras, v.9, n.2, p.178-191, 2003.
- CLORIUS, C.O. *Fatigue in Wood – An investigation in tension perpendicular to the grain.* 2002. Tese (PhD em Structural Mechanics and Materials) – Technical University of Denmark, Lyngby, 2002..
- DEL MENEZZI, C.H.S.; SANTOS, C.M.T.; FERRAZ, J.M.; MARTINS, S.A.; MELO, R.R.; SIQUEIRA, M.L.; PAZETTO, V.M.F. Estudo do Carregamento Cíclico Sobre as Propriedades de Flexão de Painéis Comerciais de MDF e MDP. *Cerne*, Lavras, v.17, n.3, p.403-409, 2011.
- DIAS, F.M.; LAHR, F.A.R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n.65, p102–113, 2004.
- FONSECA JUNIOR, T.M.I. *Métodos de previsão da curva deformação-vida em fadiga para as ligas de alumínio AA6261-T6 e AA6351-T6.* 2003. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- GARDETE, D.C. *Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente.* 2006. 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Rodoviária) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2006.
- GONÇALEZ, J.C.; GONÇALVES, D.M. Valorização de duas espécies de madeira *Cedrelinga catenaeformis* e *Enterolobium shomburgkii* para a indústria madeireira. *Brasil Florestal*, Brasília, n.70, p.69-74, 2001.
- GONÇALEZ, J.C.; VALLE, A.T.; COSTA, A.F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). *Cerne*, Lavras, v.7, n.2, p.81-92, 2001.
- GOVAERE, G.; CARPIO, I.; CRUZ, L. *Descripción anatómica, durabilidad y propiedades físicas y mecánicas de Tectona grandis.* Costa Rica: Laboratorio de Productos Forestales, 2003.
- LOPES, J.T.B. *Influência da Presença de Fases Frágeis e da Temperatura nas Propriedades de Propagação de Trinca por Fadiga do Aço Inoxidável Duplex UNS S3180.* 2006. 178p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- MACÊDO, A.N. *Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada.* São Carlos. 2000. 219p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- MACÊDO, A.N.; CALIL JÚNIOR, C. Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v.9, n.37, p.95-126, 2007.
- OLIVEIRA, F.G.R.; SALES, A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultrassônica da madeira. *Minerva*, São Carlos, v.2, n.1, p.25-31, 2003.
- PUCCINI, C.T. *Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultra-som.* 2002. 158p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RICHTER, H.G.; DALLWITZ, M.J. **Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval**. 25ed. Pequim: Intitute of Botany, The Chinese academy of Sciences, 2009.

ROCHA, J.S.; PAULA, E.V.C.M.; SIQUEIRA, M.L. Flexão estática em amostras pequenas livres de defeitos. *Acta Amazonica*, Manaus, v.18, n.1-2, p.147-162, 1988.

SILVA, D.M.R. **Avaliação das propriedades físicas e da elasticidade da madeira de *Tectona grandis* L.F. proveniente de povoamento com três densidades de plantio em Cáceres-MT**. Seropédica. 2010. 34p. Monografia (Graduação em Engenheiro Florestal) — Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SMITH, I.; LANDIS, E.; GONG, M. **Fracture and fatigue in wood**. John Wiley and Sons Chichester: John Wiley and Sons, 2003. 234p.

STANGERLIN, D.M.; GATTO, D.A.; MELO, R.R.; CALEGARI, L.; VIVIAN, M.A.; CASTELO, P.A.R.; BELTRAME, R. Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. *Ciência da Madeira*, Pelotas, v.1, n.2, p.44-53, 2010.

Recebido em 11/05/2012
Aceito para publicação em 11/09/2012

