

INFLUÊNCIA DAS DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA E DA VELOCIDADE DE ENSAIO NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA DE TRÊS ESPÉCIES DE MADEIRAS TROPICAIS

INFLUENCE OF THE SPECIMEN SIZE AND TEST SPEED IN STATIC BENDING STRENGTH OF THREE TROPICAL WOOD SPECIES

Julio Eustaquio de Melo¹ Mario Rabelo de Souza² Alexandre Florian da Costa³

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo verificar a influência da combinação de três velocidades de ensaios e de cinco dimensões de corpos de prova na determinação da resistência à flexão estática de três espécies de madeiras de florestas naturais tropicais. Pretende-se fornecer subsídios para implementação de uma metodologia de ensaios que possibilite otimizar seus custos sem perda de precisão, qualidade e variabilidade nos resultados, considerando a inexistência de uma norma brasileira específica para caracterização físico-mecânica de espécies de madeira. As referências de dimensões e velocidades foram selecionadas com base na Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT 555/73). As normas COPANT estabelecem procedimentos para determinação das propriedades físicas e mecânicas de espécies de madeiras com pequenos corpos de prova isentos de defeitos. Tradicionalmente, ensaios para pequenas variações de velocidades e dimensões nos corpos de prova foram pouco abordados, possivelmente pela falta de interesse em alterar metodologias já consagradas. A metodologia utilizada envolveu ensaios de flexão estática com teor de umidade a 12%, cinco dimensões de corpos de prova e três velocidades de ensaios. Foram caracterizadas as espécies: cumaru (*Dipterix odorata*), jequitibá (*Allantoma lineata*) e quaruba (*Vochoyisia guianensis*). Os resultados mostraram que a resistência à flexão é significativamente aumentada com a redução da dimensão do corpo de prova, mas não é influenciada pela velocidade de teste para todas as espécies estudadas. Concluindo, para se manter a compatibilidade com os resultados de caracterização já publicados utilizando-se essa norma não é recomendado alterar o tamanho do corpo de prova atual, mas a velocidade de teste poderá ser aumentada dentro dos limites estudados.

Palavras-chave: propriedades mecânicas; velocidade de ensaios; dimensões de corpos de prova; resistência à flexão.

ABSTRACT

This paper discusses the influence of different test speeds and specimen sizes, free of defects, in determining the bending strength of three Brazilian woods. Its importance lies in the possibility of establishing methods of characterization with smaller specimens and higher speeds, resulting in time saving and cost reduction in transport, without loss of quality and precision in results. Traditionally, tests with small variations of speed and specimen size have been little discussed, possibly due to the lack of interest in changing methodologies which are already established. The methodology used here involved the static bending with moisture content at 12%, five specimen sizes and three test speeds. The species characterized were: cumaru (*Dipterix odorata*), jequitibá (*Allantoma lineata*) and quaruba (*Vochoyisia guianensis*). References on dimensions and speeds were selected based on the *Comisión Panamericana de Normas Técnicas* (COPANT 555/73). These standards establish procedures for determining the physical and mechanical properties of wood species,

1 Engenheiro Civil, Dr., Professor da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, *Campus* Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília (DF), Brasil. alej@unb.br

2 Físico, PhD., Analista Ambiental, Serviço Florestal Brasileiro, Laboratório de Produtos Florestais, SCEN Trecho 2, Campus do IBAMA, CEP 70818-900, Brasília (DF), Brasil. mario.rabelo@gmail.com

3 Engenheiro Florestal, Dr., Professor do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, *Campus* Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília (DF), Brasil. luate@unb.br

free of defects, using small specimen sizes. The results showed a significant influence of specimen size and no influence of the velocities in the tests for determining the bending properties of the species featured.

In conclusion, to maintain compatibility with the already published results, using this standard is not recommended to change the specimen dimensions but the current test speed can be increased within the limits studied.

Keywords: mechanical properties; test speed; specimen size; flexural strength.

INTRODUÇÃO

Os ensaios de caracterização, em pequenos corpos de prova sem defeitos, têm como objetivo determinar o potencial de usos das espécies de madeiras, seja por meio de análise destas propriedades ou pela comparação com espécies já tradicionalmente utilizadas no mercado. Os dados de caracterização em pequenos corpos de prova também são utilizados pela maioria das normas no dimensionamento de estruturas para determinar as tensões de cálculo, em vez de se utilizar peças em tamanho estrutural. As peças estruturais passam por um processo de classificação visual e/ou mecânico de resistência e a partir dos ensaios em pequenos corpos de prova sem defeitos, são determinadas as tensões de cálculo. A utilização de pequenos corpos de prova permite eliminar a influência de defeitos tais como nós, rachaduras, inclinação das fibras e teor de umidade permitindo que as resistências das madeiras possam ser comparadas com mais segurança.

Alguns trabalhos publicados mostram que o tempo de duração de carga, as dimensões do corpo de prova e a velocidade do carregamento têm influência na resistência da madeira. Outros trabalhos mostram que existem controvérsias sobre o tema. Na realidade, a maioria dos trabalhos publicados é antiga e com enfoque na perda de resistência ao longo do tempo, em meses e anos. Poucos trabalhos estudam pequenas variações de dimensões dos corpos de prova e velocidades de ensaios com o objetivo de otimizar o processo de caracterização da madeira.

Em relação às dimensões dos corpos de prova, a norma ASTM D143 (American Society for Testing and Materials) prevê a redução da seção transversal dos corpos de prova de 50 x 50 mm para 25 x 25 mm para algumas propriedades, quando as toras a serem caracterizadas possuem pequenos diâmetros. Na seção introdutória, ela afirma que seções de 50 x 50 mm, por possuírem maior quantidade de anéis de crescimento, têm

a resistência menos influenciada pela diferença de lenho primaveril e tardio e apresentam um volume suficiente para representar uma proporção considerável do material madeira.

Segundo o American Institute of Timber Construction (AITC, 2005), data de 1920 o primeiro trabalho mostrando o efeito das dimensões da peça de madeira na sua resistência, quando solicitada à flexão. Com o advento da viga laminada colada, (AITC, 2005), estabeleceu-se uma equação que considera a influência da altura da viga na resistência a flexão.

Ainda segundo o American Institute of Timber Construction (2005), Bohannon, em 1966, apresentou um fator que mede a influência das dimensões da viga, baseado na teoria estatística de Weibull, que relaciona a resistência com o volume da peça de madeira, assumindo a ruptura por tração. Em 1989, o American Institute of Timber Construction (2005) fez uma série de ensaios utilizando uma equação obtida por Moody, que considera o volume da viga de madeira, resultando numa equação que foi adotada pela National Design Specification (NDS), a partir de 1991.

Thelandersson e Larsen (2003) comentam ser necessário o estabelecimento de grupos de controle para tempo de duração de carga, carregamentos com deformação ou carga constante, velocidade de ensaios e dimensões de corpos de prova, devido à diversidade de procedimentos metodológicos existentes sobre o tema.

A duração da carga ou o tempo em que a carga atua numa estrutura, seja de forma contínua ou intermitente, é um fator muito importante na determinação da capacidade de carga na madeira, ao longo do tempo. Os ensaios de caracterização são realizados com velocidade de carga ou velocidade de deformação constante até atingir a carga de ruptura, que ocorre em aproximadamente 5 minutos. Em condições reais, as cargas podem atuar por poucos segundos, como é o caso da ação do vento ou por vários anos, como no caso de sobrecargas ou peso próprio da estrutura. Para 10 anos de carregamento,

a perda de resistência da madeira pode variar de 40% (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2002) a 60% (LARSEN, 2001). Wood (1951) realizou ensaios com cento e vinte e seis amostras de douglas-fir de 1 polegada (2,54 cm) x 1 polegada (2,54 cm), com 6% e 12% de teor de umidade na flexão, com cargas de longa duração e com velocidade de carga constante. O trabalho teve início em 1943 e, apesar de não ter sido totalmente concluído, chegou a uma equação relacionada à perda de resistência com o tempo.

Segundo Gerhards (1977), as primeiras investigações sobre o efeito do tempo de duração de carga na resistência da madeira tiveram início em 1840. Em 1881, Thurston (*apud* GERHARDS, 1977), descobriu que peças fletidas, de pequenas dimensões, quebravam entre 8 e 15 meses com uma carga no valor de 60% da resistência da madeira obtida com cargas de curta duração. No mesmo período, Lanza (*apud* GERHARDS, 1977) ensaiou vigas com 6,30 m de vão livre, as quais quebravam após 6 meses, com tensões de 6,89 MPa a 11,71 MPa. Também neste período, Johnson (*apud* GERHARDS, 1977) concluiu que colunas com carregamento de longa duração suportavam aproximadamente 50% dos valores de resistência em ensaios convencionais. O autor analisou vários trabalhos sobre a influência da velocidade de carga, datados de 1908 a 1972. Apesar das metodologias de ensaios serem diferentes, ele propôs uma equação para correção de dados de ensaios na flexão estática, tomando como referência o tempo de ensaio, até a ruptura, de 5 minutos. O autor sugere que o efeito de velocidade de carga é exponencialmente relacionado com a tensão de ruptura na flexão e que o efeito de duração de carga é exponencialmente relacionado com a tensão de flexão.

Para Madsen (1992), existe uma alta correlação entre a velocidade de carregamento e a duração do carregamento. Ambos são tratados de forma independentes, porque a velocidade de carregamento é de curta duração, enquanto a duração do carregamento causa efeitos significativos ao longo do tempo. O mesmo autor apresentou dados com cargas constantes para duas vigas que foram carregadas com 4100 kgf, ocorrendo a ruptura após uma hora. As outras duas foram carregadas com 2710 kgf, ocorrendo a ruptura após 176 dias e 197 dias. Ele concluiu que peças com dimensões estruturais suportam, durante a vida útil, a metade da carga determinada em ensaios com pequenas amostras sem defeitos. Madsen (1992) apresenta

também um trabalho feito por Lyman Wood, em 1943, que resultou no gráfico conhecido como "Madison Curve". Foram ensaiados 128 corpos de prova de 2,5 x 2,5 x 41,0 cm, com 6% e 12% de teor de umidade, na flexão. A carga foi mantida constante para cada série de 16 ensaios. O valor da carga foi diferente para cada série e definido como uma percentagem da resistência obtida em ensaios de curta duração.

O presente trabalho teve como objetivo verificar a influência da combinação de três velocidades de ensaios e de cinco dimensões de corpos de prova na determinação da resistência à flexão estática de três espécies de madeiras de florestas naturais tropicais. Pretende-se fornecer subsídios para implementação de uma metodologia de ensaios que possibilite otimizar seus custos sem perda de precisão, qualidade e variabilidade nos resultados, considerando a inexistência de uma norma brasileira específica para caracterização de espécies de madeira.

MATERIAIS E MÉTODOS

Espécies de madeira utilizadas na caracterização

Foram selecionadas três espécies de madeira disponíveis no mercado e obtidas em dimensões necessárias para que todos os corpos de prova pudessem ser retirados em uma mesma prancha. Os corpos de prova foram demarcados de forma aleatória em relação à largura e comprimento.

As madeiras, identificadas pela área de anatomia da madeira do Laboratório de Produtos Florestais – LPF do Serviço Florestal Brasileiro – MMA foram: cumaru (*Dipterix odorata*), jequitibá (*Allantoma lineata*) e quaruba (*Vochyisia guianensis*). As propriedades físicas e mecânicas dessas espécies são apresentadas na Tabela 1.

Preparação dos corpos de prova e dos testes

A definição das dimensões dos corpos de prova e velocidades de ensaios de caracterização teve como referência a norma COPANT 555/73. As seções transversais dos corpos de prova para os ensaios iniciaram-se em 50 x 50 mm (padrão COPANT), decrescendo em número inteiro até 10 x 10 mm, resultando em cinco dimensões. Da mesma forma, as velocidades de ensaio foram definidas como sendo o dobro e o triplo da velocidade de ensaio normalizada, resultando em 3 velocidades

diferentes e constantes. Velocidades muito elevadas não permitem acompanhar o ensaio, principalmente com corpos de prova com dimensões reduzidas.

Os corpos de prova foram colocados em ambiente climatizado ($65 \pm 1\%$ de umidade relativa e $20 \pm 3^\circ\text{C}$ de temperatura) para uniformização e estabilização do teor de umidade em 12%.

Os ensaios foram realizados em máquina universal Instron, modelo 1127, com capacidade de carga de 20 toneladas-força, desenvolvida para determinar a resistência de materiais, tais como a madeira. A unidade de força medida na máquina de ensaio Instron (kgf) foi convertida em Newton (N) e os resultados apresentados em megapascal (MPa). A metodologia de ensaios está de acordo com as normas COPANT 555/72. Antes de cada ensaio foi determinada a massa do corpo de prova em balança com precisão de 0,01 g e depois colocado em estufa a 105°C , até massa constante, para a determinação do teor de umidade.

A determinação das propriedades físicas não foi incluída neste estudo devido às dimensões já reduzidas dos corpos de prova normalizados. A escolha do ensaio de flexão se deve à sua importância no dimensionamento de estruturas na caracterização de espécies e na definição de usos específicos.

Ensaio de caracterização mecânica

Foram realizados ensaios de caracterização

na flexão estática, com teor de umidade de 12% e velocidade de deformação constante. O ensaio de flexão, de acordo com os procedimentos da norma COPANT 555/73, é realizado em corpos de prova de seção transversal de 50 x 50 mm, utilizando esquema estático de viga isostática bi apoiada com carga concentrada central, relação vão livre/altura do corpo de prova de 14 e com velocidade constante de ensaio de 2,5 mm/min, onde são determinados a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade. A flecha para determinar o módulo de elasticidade na flexão foi obtida diretamente pelo deslocamento do travessão de aplicação de carga.

As dimensões dos corpos de prova foram reduzidas de 50 x 50 mm de seção transversal até o mínimo de 10 x 10 mm, conforme mostra a Tabela 2, seguindo a relação vão livre/altura do corpo de prova igual a 14.

As velocidades de deformação constante para os ensaios foram definidas para uma, duas e três vezes maiores do que as velocidades especificadas pela norma COPANT, conforme mostra a Tabela 3.

Condições de umidade dos corpos de prova de ensaios de caracterização

A opção por ensaios com madeira seca se deve à presença no mercado de madeira seca em torno de 12% de teor de umidade em pranchas com dimensões tais que seria possível retirar todos os

TABELA 1: Propriedades físicas e mecânicas das espécies a serem caracterizadas.

TABLE 1: Physical and mechanical properties of the species to be characterized.

Espécie de madeira	Massa específica básica kg/m^3	Flexão estática		
		Teor de umidade	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Cumaru – <i>Dipterix odorata</i>	910	12%	176,4	18 300
Jequitibá – <i>Allantoma lineata</i>	600	12%	117,1	13 000
Quaruba – <i>Vochysia guianensis</i>	540	12%	123,7	14 300

Fonte: IBDF(1981); IBDF(1988); IBAMA (1997).

TABELA 2: Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de flexão estática (mm).

TABLE 2: Specimen dimensions used in static bending (mm).

	Dimensão 1	Dimensão 2	Dimensão 3	Dimensão 4	² Dimensão 5
Flexão estática	10 x 10 x 150 ¹ L _L = 140	20 x 20 x 300 ¹ L _L = 280	30 x 30 x 450 ¹ L _L = 420	40 x 40 x 600 ¹ L _L = 560	50 x 50 x 750 ¹ L _L = 700

Em que: ¹L_L = vão livre de ensaio; ²Padrão da norma COPANT 555/73

TABELA 3: Velocidades de ensaios utilizadas no ensaio de flexão estática (mm/min).

TABLE 3: Speed of tests used in static bending (mm/min).

Tipo de ensaio	Dimensão do corpo de prova	¹ Velocidade 1	Velocidade 2	Velocidade 3
Flexão estática	10 x10 x 150 mm			
	20 x20 x 300 mm			
	30 x30 x 450 mm	2,5 mm/min.	5,0 mm/min.	7,5 mm/min.
	40 x40 x 600 mm			
	50 x50 x 750 mm*			

¹Padrão da norma COPANT 555/73.

corpos de prova em uma mesma prancha.

Análise estatística dos resultados

Na análise estatística partiu-se do pressuposto que cada prancha de madeira é homogênea, isto é, não existe variação significativa de resistência para as diferentes posições. Dessa forma, optou-se por uma amostragem totalmente aleatória com relação à posição dos corpos de prova na prancha em um desenho completamente aleatorizado. Foi utilizado um delineamento estatístico fatorial completo, com três velocidades e cinco tamanhos de corpos de prova e o teste de Tukey para comparar os tratamentos a um intervalo de confiança de 95%. O número de amostras utilizadas em cada combinação de teste está na Tabela 4.

Buscou-se verificar o efeito das velocidades de ensaio e das dimensões dos corpos de prova (variáveis independentes ou fatores) na resistência da madeira (variável dependente ou resposta) e se

existe interação entre as duas variáveis. A análise da variância foi realizada utilizando-se o aplicativo de estatística SPSS (1992).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas de 5 a 7 apresentam os valores médios do módulo de elasticidade, tensão de ruptura, número de corpos de prova e duração do ensaio para flexão estática. Como o teor de umidade dos ensaios realizados ficou muito próximo de 12%, optou-se por analisar os dados de caracterização, sem fazer correção da resistência pela umidade.

Análise estatística dos resultados

A Tabela 8 apresenta um resumo da análise de variância para as diferentes dimensões dos corpos de prova e velocidades de ensaios. O aumento da velocidade de ensaio de 2,5 mm/min, que é a velocidade normalizada pela COPANT, para 5,0 e 7,5 mm/min, não teve influência na resistência

TABELA 4: Número médio de corpos de prova por ensaio, para cada velocidade e para cada espécie.

TABLE 4: Average number of specimens, for each velocity and for each species.

Dimensão	Nº. de velocidades	Nº. de espécies	Nº. de amostras por combinação	Total de amostras
10 x 10 cm	3	3	20	180
20 x 20 cm	3	3	17	153
30 x 30 cm	3	3	13	117
40 x 40 cm	3	3	12	108
50 x 50 cm	3	3	9	81
Total de amostras ensaiadas				639

TABELA 5: Flexão estática - Valor médio do módulo de elasticidade, tensão de ruptura, número de corpos de prova e duração do ensaio para a espécie cumaru (*Dipterix odorata*).TABLE 5: Static bending - Average modulus of elasticity, modulus of rupture, number of specimens and duration test for the species cumaru (*Dipterix odorata*).

Corpo de prova (mm)	Velocidade = 2,5 mm/min.				Velocidade = 5,0 mm/min.				Velocidade = 7,5 mm/min.			
	MOE (GPa)	MOR (MPa)	N	Duração (min)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	N	Duração (min)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	N	Duração (min)
10 x 10 x 150	14,0	163,7	17	2,0	13,0	166,6	15	1,1	12,8	164,0	15	0,7
20 x 20 x 300	15,3	165,0	13	3,7	15,1	159,1	16	1,9	14,9	163,9	15	1,3
30 x 30 x 450	14,5	158,1	12	6,0	14,6	161,1	12	2,8	14,7	160,4	12	1,9
40 x 40 x 600	15,5	169,1	12	6,4	14,5	153,5	13	3,1	14,5	158,4	13	2,2
50 x 50 x 750	12,4	139,6	8	8,6	12,6	144,0	9	4,5	12,4	138,1	10	3,0

Em que: N = número de corpos de prova; MOR: Tensão de ruptura; MOE: Módulo de elasticidade.

TABELA 6: Flexão estática - Valor médio do módulo de elasticidade, tensão de ruptura, número de corpos de prova e duração do ensaio para a espécie jequitibá (*Allantoma lineata*).TABLE 6: Static bending - Average modulus of elasticity, modulus of rupture, number of specimens and duration test for the species jequitibá (*Allantomalineata*).

Corpo de prova (mm)	Velocidade = 2,5 mm/min.				Velocidade = 5,0 mm/min.				Velocidade = 7,5 mm/min.			
	MOE (GPa)	MOR (MPa)	N	Duração (min)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	N	Duração (min)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	N	Duração (min)
10 x 10 x 150	10,2	111,7	24	2,1	9,3	108,2	23	1,2	10,0	105,3	24	0,7
20 x 20 x 300	10,4	94,0	26	4,1	10,3	95,0	25	2,0	10,2	95,7	24	1,4
30 x 30 x 450	10,7	96,7	15	6,2	10,87	97,0	16	3,2	10,6	95,0	15	2,1
40 x 40 x 600	10,1	91,9	11	7,9	10,6	93,3	10	3,7	10,7	93,5	10	2,3
50 x 50 x 750	9,0	94,5	9	11,1	8,6	97,5	10	5,8	8,5	97,0	10	3,9

Em que: N = número de corpos de prova; MOR: Tensão de ruptura; MOE: Módulo de elasticidade.

TABELA 7: Flexão estática - Valor médio do módulo de elasticidade, tensão de ruptura, número de corpos de prova e duração do ensaio para a espécie quaruba (*Vochysia guianensis*).TABLE 7: Static bending - Average modulus of elasticity, modulus of rupture, number of specimens and test duration for the species quaruba (*Vochysia guianensis*).

Corpo de prova (mm)	Velocidade = 2,5 mm/min.				Velocidade = 5,0 mm/min.				Velocidade = 7,5 mm/min.			
	MOE (GPa)	MOR (MPa)	N	Duração (min)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	N	Duração (min)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	N	Duração (min)
10 x 10 x 150	9,5	98,1	18	1,8	9,4	94,6	20	0,9	9,0	98,1	22	0,6
20 x 20 x 300	9,1	83,4	10	3,5	8,9	83,2	10	1,5	8,7	83,9	11	1,1
30 x 30 x 450	8,5	78,4	9	5,0	8,4	79,4	10	2,4	7,9	77,8	10	1,7
40 x 40 x 600	8,5	82,9	12	6,7	8,6	79,5	12	3,1	8,5	84,0	12	2,3
50 x 50 x 750	8,0	71,3	7	7,5	7,7	69,5	7	3,7	7,7	73,3	8	2,5

Em que: N = número de corpos de prova; MOR: Tensão de ruptura; MOE: Módulo de elasticidade.

mecânica. A redução das dimensões da seção transversal dos corpos de prova de 50 x 50 mm até 10 x 10 mm apresentou influência na resistência mecânica, para as três espécies. As interações, apesar de algumas serem significativas, não evidenciam um padrão entre as três espécies. Precisar-se-ia de mais testes para se ter uma conclusão sobre essas interações.

Como houve diferença significativa na resistência mecânica entre as diferentes dimensões de corpos de prova procedeu-se então a uma análise comparativa entre as mesmas para as três espécies estudadas. Nessa comparação, todos os corpos de prova das três velocidades foram agrupados, visto que não foi encontrada diferença significativa entre as velocidades de teste. A Tabela 9 apresenta um resumo da comparação entre as cinco dimensões de corpos de prova. Observa-se uma tendência de aumento na resistência e na rigidez com a redução do corpo de prova, mas sem uma definição clara de um padrão para essa diferença.

As Figuras 1 e 2 permitem visualizar a

tendência do módulo de elasticidade e da tensão de ruptura com a diminuição das dimensões dos corpos de prova, para o valor médio das três velocidades agrupadas. Analisando o módulo de elasticidade, verificam-se dois comportamentos distintos. Para as duas espécies com maior massa específica, o comportamento é parabólico e existe uma diferença significativa entre o MOE para os corpos de prova de 10 x 10 e 50 x 50 mm. O valor máximo do MOE está nos pontos intermediários da curva que não apresentam diferença significativa entre si, mas com os extremos. Para a espécie de menor massa específica, quaruba, o comportamento foi linear com uma tendência de aumento no MOE com a diminuição nas dimensões do corpo de prova. O comportamento parabólico do MOE deve estar ligado à massa específica do material, visto que a curvatura se acentua ao se aumentar a mesma, uma vez que todas as outras variáveis são mantidas constantes.

A tensão de ruptura apresenta clara tendência linear de aumentar, com a diminuição de

TABELA 8: Resumo da análise de variância para as diferentes dimensões dos corpos de prova e velocidades de ensaios.

TABLE 8: Summary of analysis of variance with 95% confidence interval for different sizes of specimens and test speeds.

	Cumarú		Jequitibá		Quaruba	
	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR
Dimensão	SS	SS	SS	SS	SS	SS
Velocidade	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Interação	NS	SS	SS	SS	NS	NS

Em que: SS: diferença significativa; NS: diferença não significativa; MOR: Tensão de ruptura; MOE: Módulo de elasticidade.

TABELA 9: Resumo da comparação entre as cinco dimensões de corpos de prova para as três espécies estudadas usando Tukey.

TABLE 9: Summary, with 95% confidence interval of the comparison between the five dimensions of specimen for the three species studied using Tukey.

Corpo de prova (mm)	Cumarú		Jequitibá		Quaruba	
	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR
10 x 10 x 150	b	b	b	c	d	c
20 x 20 x 300	c	b	c	b	cd	b
30 x 30 x 450	c	b	c	ab	ab	b
40 x 40 x 600	c	b	c	a	bc	b
50 x 50 x 750	a	a	a	ab	a	a

Em que: MOR: Tensão de ruptura; MOE: Módulo de elasticidade. Dimensões com a mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si.

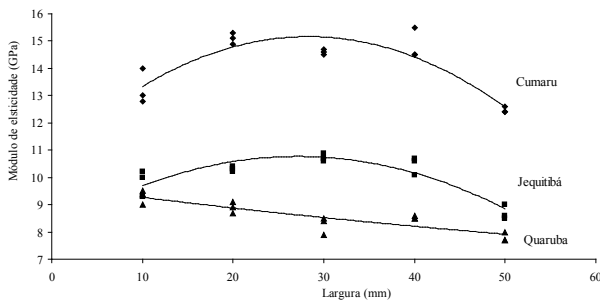


FIGURA 1: Variação do módulo de elasticidade em flexão estática em função da largura do corpo de prova resultante do agrupamento das três velocidades para cada espécie.

FIGURE 1: Modulus of elasticity variation in static bending according to the width of the specimen obtained by grouping three speeds for each species.

Sendo “x” a largura do corpo de prova, as equações de melhor ajuste para essas curvas foram:

Para o cumaru:

$$MOE = -0,0055x^2 + 0,3099x + 10,78 \quad (R^2 = 0,80)$$

Para o jequitibá:

$$MOE = -0,0037x^2 + 0,1996x + 8,0613 \quad (R^2 = 0,82)$$

Para a quaruba:

$$MOE = 0,0002x^2 - 0,0437x + 9,6867 \quad (R^2 = 0,76)$$

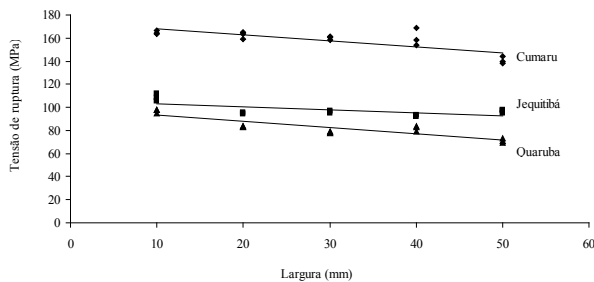


FIGURA 2: Variação da tensão de ruptura em flexão estática em função da largura do corpo de prova resultante do agrupamento das três velocidades para cada espécie.

FIGURE 2: Modulus of rupture variation in bending to the width of the specimen obtained by grouping three speeds for each species.

Sendo “x” a largura do corpo de prova, as equações de melhor ajuste para essas curvas foram:

Para o cumaru:

$$MOR = -5,0733x + 172,86 \quad (R^2 = 0,58)$$

Para o jequitibá:

$$MOR = -2,6133x + 105,59 \quad (R^2 = 0,43)$$

Para a quaruba:

$$MOR = -5,25x + 98,243 \quad (R^2 = 0,77)$$

equação de melhor ajuste para essa curva foi:

$$CV-MOE = 0,0025x^2 - 0,2629x + 12,607 \quad (R^2 = 0,76)$$

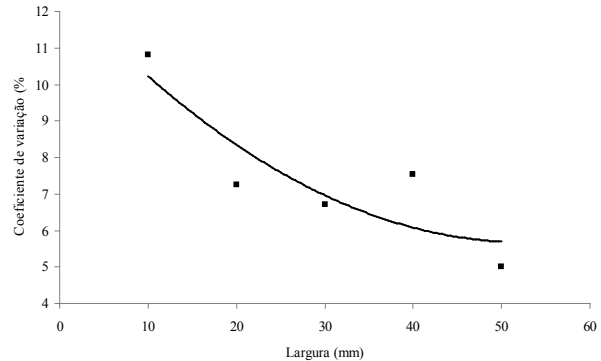


FIGURA 3: Flexão estática - Variabilidade do valor médio do coeficiente de variação (CV) do módulo de elasticidade, resultante do agrupamento das três espécies e das três velocidades.

FIGURE 3: Static bending - Average coefficient of variation (CV) variability of the modulus of elasticity, obtained by grouping the three species and three speeds.

Sendo “x” a largura do corpo de prova, a equação de melhor ajuste para essa curva foi:

$$CV-MOE = 0,0025x^2 - 0,2629x + 12,607 \quad (R^2 = 0,76)$$

das dimensões dos corpos de prova, sendo que as taxas de variação (inclinação da curva) para as três espécies apresentam um comportamento muito próximos.

Considerando que todas as amostras são sem defeitos, foram cortadas e testadas sob as mesmas condições e que a amostragem foi aleatória em todas as pranchas de madeira, a explicação para esse comportamento de aumento de MOE e MOR com a diminuição do tamanho do corpo de prova está na homogeneidade do mesmo. Pequenas amostras tendem a ser mais homogêneas.

As Figuras 3 e 4 permitem visualizar a tendência do coeficiente de variação dos resultados

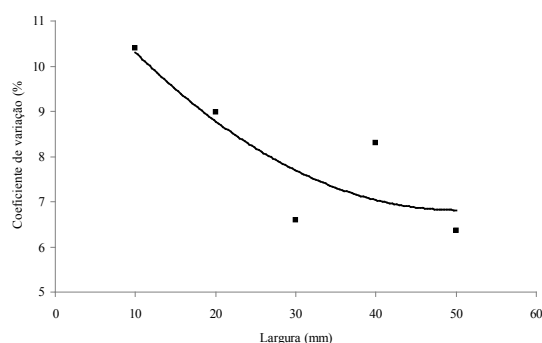


FIGURA 4: Flexão estática - Variação do valor médio do coeficiente de variação da tensão de ruptura, resultante do agrupamento das três espécies e das três velocidades.

FIGURE 4: Static bending - Average coefficient of variation variability of the modulus of rupture, resulting from the clustering of three species and three speeds.

Sendo “x” a largura do corpo de prova, a equação de melhor ajuste para essa curva foi:

$$CV-MOR = 0,0022x^2 - 0,2173x + 12,261$$

(R² = 0,73)

resistência obtidos nos ensaios com a diminuição das dimensões dos corpos de prova, para o valor médio das três espécies agrupadas. A assertiva de que a probabilidade de ocorrer regiões de baixa resistência em peças de grande volume é maior do que em peças de menores volumes, pode ser reforçada com o aumento da variabilidade dos resultados de ensaios, em função da diminuição das dimensões. Uma explicação para esse comportamento é que grandes corpos de prova incorporam regiões de alta e baixa resistência, sendo que o valor medido é uma média dessas regiões, gerando um menor coeficiente de variação.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, com a redução da seção transversal do corpo de prova de 50 x 50 mm para 10 x 10 mm e aumento da velocidade de ensaio em três vezes pode-se concluir que:

- O módulo de elasticidade na flexão aumenta de forma significativa quando o corpo

de prova é reduzido de 50 x 50 mm para valores menores ou iguais a 40 x 40 mm e que essa redução não é sempre linear. O módulo de ruptura na flexão aumenta de forma significativa quando o corpo de prova é reduzido de 50 x 50 mm para valores menores ou iguais a 40 x 40 mm e que essa redução é sempre linear. Por outro lado, não há alteração no módulo de elasticidade e módulo de ruptura à flexão para as diferentes velocidades de ensaio, para as três espécies caracterizadas.

- Os coeficientes de variação dos resultados de resistência à flexão para as três espécies caracterizadas, em relação a diferentes dimensões dos corpos de prova aumentam de forma significativa com a redução dos mesmos. Com isto, o número de corpos de prova para ensaios de caracterização, tende a aumentar.

Para se manter a compatibilidade com todos os resultados de caracterização já publicados utilizando-se a norma COPANT não é recomendado alterar o tamanho do corpo de prova atual, mas a velocidade de teste poderá ser aumentada dentro dos limites estudados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION - AITC. Volume Factor for Structural Glue Laminated Timber. AITC Technical Note 21. USA. 2005. 4 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-143:2000. Standard Methods Testing: Small Clear Specimens of Timber. USA. 2000. 57 p.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. COPANT 555: 1973. Método de Ensayo de Flexión Estática. Buenos Aires. 1973. 10 p.
- GERHARDS, C. C. Effect of Duration and Rate of Loading on Strength of Wood and Wood-based Materials. Forest Product Laboratory, Forest Service. U. S. Department of Agriculture. FPL 283. Madison, Wis. 1977. 24 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL – IBDF. **Madeiras da Amazônia:** Características e Utilização. Brasília: CNPq., 1981. 113p. v. 1
- INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL – IBDF. **Madeiras da Amazônia:** Características e Utilização. Brasília, 1988. 236 p. v. 2.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE

E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Madeiras da Amazônia:** Características e Utilização. Amazônia Oriental. Brasília, 1997. 140 p. v. 3.

LARSEN, H. J. Properties Affecting Reliability Design of Timber Structure. COST E24 – Seminar on Reliability of Timber Structures. Coimbra, Portugal. May 2001. 26 p.

MADSEN, B. **Structural Behaviour of Timber.** Canada: Timber Engineering Ltda., 1992. 437 p.

THELANDERSSON, S.; LARSEN, H. J. **Timber**

Engineering. London: Ed. Wiley & Sons. 2003. 20 p.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**—Wood as an engineering material. Madison: WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2002. 463 p.

WOOD, L. W. Relation of Strength of Wood to Duration of Load. Forest Products Laboratory. Forest Service. Department of Agriculture. USA. 1951. 10 p.