

Influência da densidade na dureza paralela e na dureza normal às fibras para algumas espécies tropicais brasileiras

Tropical woods: influence of density in hardness parallel and normal to the grain for some Brazilian tropical tree species

Francisco Antonio Rocco Lahr¹, Eduardo Chahud²,
Romualdo André Fernandes³ e Ronaldo Soares Teixeira³

Resumo

Este trabalho tem como objetivo evidenciar a possibilidade de serem correlacionadas a densidade e a dureza da madeira, determinadas nas direções paralela e normal às fibras. Deste modo, a expectativa é disponibilizar mais uma ferramenta para facilitar a decisão a respeito das espécies a utilizar em aplicações como pisos e dormentes. Para se alcançar o intento, foram considerados os resultados da dureza paralela e da dureza normal às fibras obtidos para catorze espécies tropicais de alta densidade (superior a 850 kg/m³, a 12% de umidade). Tais resultados foram determinados a partir de ensaios propostos no Anexo B da NBR7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Para cada espécie realizaram-se doze determinações, a partir de material obtido em diferentes épocas no comércio madeireiro de São Carlos e da região. A análise estatística levou a expressões para descrever a relação entre as citadas propriedades, com coeficiente de determinação da ordem de 0,8.

Palavras-Chave: Dureza paralela às fibras, Dureza normal às fibras, Densidade aparente, Espécies tropicais de madeira com alta densidade

Abstract

The aim of this work is to verify the possibility to correlating specific gravity and wood hardness parallel and perpendicular to the grain. The purpose is to offer one more tool to help in the decision about wood species choice for use in floors and sleepers. To reach this intent, we considered the results of standard tests (NBR 7190:1997, Timber Structures Design, Annex B, Brazilian Association of Technical Standards) to determine hardness parallel and normal to the grain in fourteen tropical high density wood species (over 850 kg/m³, at 12% moisture content). For each species twelve determinations were made, based on the material obtained at São Carlos and its regional wood market. Statistical analysis led to some expressions to describe the cited properties relationships, with a determination coefficient about 0.8.

Keywords: Hardness parallel to the grain, Hardness normal to the grain, Wood density, Tropical species of high wood density

INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, a madeira tem sido um dos materiais mais utilizados pelo ser humano para a solução de diferentes problemas construtivos. O consumo da madeira sempre esteve associado ao progresso das nações.

Nos dias de hoje, em nosso país, uma das mais abrangentes ações do Governo Federal para alavancar o desenvolvimento nacional, o PAC (Programa de Aceleração do Crescimento) prevê expressivos investimentos em infra-estru-

tura. No âmbito do PAC está contemplada a necessidade de expandir os limites estruturais, de ampliar a cobertura geográfica da infra-estrutura de transporte para, deste modo, reduzir as desigualdades regionais e harmonizar o desenvolvimento nacional (DNIT, 2009).

No tocante às ferrovias, o objetivo é chegar, no final de 2010, com mais de 2.500 quilômetros em plenas condições de operação. Concentram-se nas regiões Norte e Centro-oeste as intervenções mais significativas, que deverão consumir cerca de dois terços dos recursos do PAC destinados à

¹Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador Sancarlene, 400 - São Carlos, SP - 13560-290 - E-mail: frocco@sc.usp.br

²Professor Doutor da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Fundação Mineira de Educação e Cultura - Av. Afonso Pena, 3880 - Belo Horizonte, MG - 30130-009 - E-mail: chahud@fea.fumec.br

³Mestrando do Programa de Ciência e Engenharia de Materiais do Campus USP de São Carlos - Av. Trabalhador Sancarlene, 400 - São Carlos, SP - 1356-290 - E-mail: romualdo_bio@yahoo.com.br; ronaldostx@yahoo.com.br

recuperação e à expansão da malha ferroviária. Considerando que se utilizam entre 1.500 e 1.800 dormentes por quilômetro de estrada de ferro (MADEIRAS CC, 2009), nos próximos anos algo em torno de quatro milhões de dormentes serão utilizados para viabilizar tal parcela dos objetivos oficiais do PAC. Com certeza, a madeira tropical de alta densidade, proveniente das florestas certificadas, se constitui em excelente solução para a obtenção dos dormentes mencionados.

Por outro lado, a grande expansão da construção civil, vivenciada nos últimos anos e com ótimas perspectivas de continuidade, exigirá a disponibilização de uma considerável quantidade de madeira de alta densidade para a produção de pisos para residências e demais tipos de edificações. Informações apresentadas pela Revista da Madeira dão conta que, em 2007, foram produzidos no Brasil mais de 38 milhões de metros quadrados de pisos de madeira, com projeções de demanda equivalente nos próximos anos (REMADE, 2009).

A demanda por madeira de alta densidade traz à tona a conveniência de se dispor de ferramentas que permitam, de forma rápida e segura, definir as espécies mais convenientes para aplicações como os dormentes e pisos citados. Porém, a bibliografia disponível não é profícua em registrar as correlações básicas entre, por exemplo, a densidade aparente e a dureza, nas duas direções mencionadas.

O Boletim 31 (1956) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo traz o resultado de propriedades físicas e mecânicas de centenas de espécies de madeira crescidas no Brasil. Contudo, os dados do IPT não receberam um tratamento estatístico que permitisse definir as muitas correlações entre as propriedades publicadas no referido trabalho. (IPT, 1956)

Autores consagrados como Kollmann e Cote Jr (1968) destacam a relevância de se dispor de meios expeditos e estatisticamente confiáveis para se estimar a dureza da madeira. Mencionam trabalhos anteriores de Lorenz, de Newlin e Wilson, e registram a seguinte expressão para relacionar a dureza Janka (H_j) e a densidade aparente (R):

$$H_j = A.R^{9/4}$$

Nesta expressão, determinada a partir dos resultados de ensaio de espécies de clima temperado, crescidas em diversas regiões do Hemisfério Norte, o parâmetro A depende da umidade e da posição da força em relação às fibras.

Grobério e Rocco Lahr (2002), no estudo de critérios para indicar os usos mais adequados para madeiras tropicais, apontam a importância da dureza como parâmetro indicador do emprego de determinada espécie em pisos, dormentes ferroviários e peças integrantes de veículos de transporte.

Xavier e Chahud (2006), na avaliação do estado de conservação de dezenas de pontes de madeira do Estado de Minas Gerais, concluíram que as menos atingidas por danos decorrentes de intempéries foram aquelas construídas com madeira de densidade aparente superior a 800 kg/m³. Pelas mesmas razões, os autores mencionam a conveniência de se trabalhar com espécies de dureza mais elevadas para os rodeiros e os tabuleiros.

Padilha *et al.* (2006) assinalam a necessidade de se determinarem as características físico-mecânicas da madeira do gênero *Eucalyptus*, em especial para emprego em pisos, diante da ampliação deste segmento do mercado madeireiro no país. Constataram diferença de comportamento entre os diversos clones estudados e registraram seu comportamento ligeiramente inferior quando comparados com o desempenho das madeiras tropicais de uso consagrado para tal fim.

Caixeta *et al.* (2003) mostram que, para algumas aplicações específicas, é necessário se trabalhar com espécies de alta densidade e, por conseguinte, elevados valores das propriedades mecânicas, com destaque para a dureza; a resistência e o módulo de elasticidade, obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão estática. Embora dispusessem dos dados referentes a quarenta e quatro genótipos distintos, os autores não tinham como foco estabelecer correlações específicas entre as propriedades citadas. Contudo, como resultado da análise de regressão entre os valores médios da densidade básica (DB) e da dureza Janka (DJ), apresentados nas tabelas 2 e 3 do referido trabalho, chega-se a:

$$DJ = 2472 DB - 1102$$

Tal expressão, com coeficiente de determinação (R^2) = 0,8, apresenta distribuição não tendenciosa de resíduos, partindo-se de resultados obtidos para genótipos com densidade básica entre 0,602 e 0,817 g/cm³.

Colenci e Ballarin (2003), estudando o desempenho de dormentes, apontam as correlações entre dureza Janka e resistência à compressão paralela às fibras como bons estimadores das propriedades indispensáveis para definir a

conveniência (ou não) de determinadas espécies para aplicação na fabricação de dormentes. Os autores não tinham como objetivo relacionar a densidade aparente com as citadas propriedades mecânicas das madeiras estudadas.

Santana *et al.* (2001) avaliaram o desempenho da madeira de quatro clones de Seringueira (*Hevea brasiliensis*) com objetivo de indicar os usos mais convenientes para a madeira correspondente. Uma das propriedades determinadas foi a dureza, que em nenhum caso superou o valor de 537 daN/cm² (53,7 MPa) na condição de madeira seca ao ar. Os autores concluíram que a madeira dos clones estudados não deve ser empregada senão para construções leves, objetos de adorno e embalagens, devendo ser descartada para construções mais pesadas, entre elas os pisos e os dormentes ferroviários.

Heräjärvi (2004), em estudo de duas espécies de madeira do gênero *Betula* determinou, entre outros parâmetros, a densidade básica e a dureza Brinell. Observou a existência de correlação entre as duas propriedades, mesmo para valores de densidade básica abaixo de 512 g/cm³.

Pogetto *et al.* (2006) afirmam a importância da determinação da dureza da madeira, nas direções paralela e perpendicular às fibras, com vistas ao emprego em dormentes. Assinalam que a dureza Janka vem ganhando destaque no conjunto das informações essenciais usadas para avaliar a qualidade da madeira e seu potencial tecnológico. Apontam que a relação entre a dureza paralela e a dureza normal às fibras (determinadas pelo método Janka) se aproxima de 1, com alguma tendência de aumento para as densidades mais elevadas.

Como observação para síntese das citações dos autores consultados, pode-se admitir que é oportuno determinar expressões que correlacionem a dureza paralela e a dureza normal às fibras com a densidade aparente, a 12% de umidade, em particular tendo-se em vista a aplicação dos resultados na definição de espécies tropicais a utilizar para a fabricação de dormentes e pisos de madeira, no contexto comentado no início deste artigo.

MATERIAL E MÉTODOS

Espécies de madeira

No desenvolvimento deste trabalho foram considerados os resultados da dureza paralela às fibras e da dureza perpendicular (ou normal) às fibras, obtidos para catorze espécies tropicais de

densidade superior a 850 kg/m³. São elas: Angelim Ferro (*Hymenolobium* sp), Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*), Angico Preto (*Piptadenia macrocarpa*), Champanhe (*Dipteryx odorata*), Cutiúba (*Goupia paraensis*), Garapa (*Apuleia leiocarpa*), Guaiçara (*Luetzelburgia* sp), Guarucaia (*Peltophorum vogelianum*), Ipê (*Tabebuia serratifolia*), Itaúba (*Mezilaurus itauba*), Jatobá (*Hymanaea* sp), Maçaranduba (*Manilkara uberi*), Oiuchu (*Pradosia* sp), Sucupira (*Diplotropis incexis*), Tachi (*Tachinalia myrmecophila*), e Tatajuba (*Bagassa guianensis*).

A madeira foi adquirida em serrarias da cidade de São Carlos e região, em diferentes épocas e em pequenas quantidades, para se garantir a aleatoriedade das amostras para cada espécie.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. A análise dos resultados foi desenvolvida na Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Fundação Mineira de Educação e Cultura, Belo Horizonte.

Ensaio realizados

Os ensaios para a determinação da densidade aparente, da dureza paralela e da dureza normal às fibras, doze por espécie, foram realizados de acordo com as recomendações do Anexo B da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas. A correção dos valores da dureza para a umidade de referência de 12% se faz atendendo-se ao recomendado pelo citado documento normativo.

Deve ser registrado que, no presente estudo, sempre se realizaram os ensaios com rigoroso controle da umidade da madeira. Não se obteve diferença superior a 0,3 ponto percentual (relativamente à umidade de referência, 12%) nos corpos-de-prova ensaiados, para as espécies consideradas.

Para confirmar a identificação das espécies foram empregados procedimentos usuais de laboratório, incluindo o uso de lupas de 10 aumentos e documentos bibliográficos bastante difundidos na área, como o de Mainieri (1983).

Análise dos resultados

Os resultados foram analisados aplicando-se os procedimentos de estatística: comparação de pares (para a avaliação de eventual equivalência entre os resultados da dureza paralela e da dureza perpendicular às fibras) e análise de regressão (para estabelecer os parâmetros de correlação entre as

variáveis estudadas). A definição das melhores expressões para correlacionar as variáveis em questão se baseou nos seguintes parâmetros: valores do coeficiente de determinação e dispersão de resíduos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentadas as médias das densidades aparentes a 12% (DA), da dureza paralela (H_0) e da dureza normal (H_{90}) às fibras, com os respectivos coeficientes de variação para as catorze espécies tropicais consideradas (doze corpos-de-prova por espécie). Os resultados já estão corrigidos para a umidade de referência 12% utilizando-se a expressão prescrita pela NBR7190:1997.

Os resultados evidenciam que: os coeficientes de variação (CV) obtidos estão de acordo com Rocco Lahr (1990), que apontou valores de CV até 28% para propriedades de resistência da madeira, com densidades aparentes a 12% variando entre 0,6 e 1,2 g/cm³; os coeficientes de variação obtidos estão de acordo com a NBR 7190:1997: entre 18% (para resistência à compressão paralela às fibras) e 28% (para tração paralela às fibras e cisalhamento); é, assim, possível admitir a hipótese de que as amostras são aleatórias.

Utilizando-se o procedimento estatístico "pairing" (comparação de pares) aplicado aos dois conjuntos de resultados da dureza, obteve-se o seguinte intervalo de confiança para a média das diferenças entre os respectivos conjuntos:

$$10,8 \leq \mu \leq 23,2$$

Como o zero não pertence ao intervalo determinado, admite-se que não é possível se

considerarem estatisticamente equivalentes os resultados para a dureza paralela e para a dureza normal às fibras.

Nestas condições, buscou-se a equação mais conveniente para relacionar as variáveis: densidade aparente a 12% com a dureza paralela e com a dureza normal às fibras. Tentados diferentes modelos, o que se mostrou mais conveniente foi o estabelecido pela regressão linear simples (mais elevado R² para distribuições não tendenciosas de resíduos).

Assim, foram definidas as expressões (1) e (2), mostradas a seguir para as correlações citadas. Para os dois casos, a dispersão dos resíduos não mostrou qualquer tendência.

$$H_0 = 183DA - 56, \text{ com } R=0,77 \text{ (} R^2=0,59 \text{)} \quad (1)$$

$$H_{90} = 193DA - 83, \text{ com } R=0,88 \text{ (} R^2=0,77 \text{)} \quad (2)$$

Nas citadas expressões, H_0 e H_{90} são dadas em MPa e DA em g/cm³.

O coeficiente de correlação obtido é compatível com aquele ao qual se poderia chegar (R² = 0,8) analisando os resultados apresentados no trabalho de Caixeta *et al.* (2003). Esses autores avaliaram, entre outros aspectos, a correlação entre a densidade básica (contidas no intervalo entre 0,602 e 0,817 g/cm³) e a dureza normal às fibras de *Eucalyptus*.

Por outro lado, não é possível comparar os resultados aqui obtidos com a expressão sugerida por Kollmann e Côté (1968), pois as porcentagens de umidade utilizadas pelos autores no estudo mencionado são distintas das adotadas neste trabalho, com base na NBR7190:1997.

Tabela 1. Valores médios e coeficientes de variação referentes à densidade, à dureza paralela e à dureza normal às fibras para as espécies estudadas (umidade 12%).

Table 1. Mean values and variation coefficients of wood density, hardness parallel and hardness perpendicular to the grain (moisture 12%).

Espécie	Média (g/cm ³) e CV (%)		Média (MPa) e CV (%)		Média (MPa) e CV (%)	
	Densidade aparente		Dureza paralela		Dureza normal	
Angelim Ferro	1,18	5	152	11	135	13
Angelim Vermelho	1,13	10	146	14	137	15
Champanhe	1,09	3	138	10	127	13
Cutiúba	1,17	5	165	12	132	20
Garapa	0,93	7	115	11	102	16
Guaíçara	1,08	4	118	7	111	8
Guarucaia	0,94	5	100	10	84	12
Ipê	1,05	4	155	12	133	14
Jatobá	1,07	4	162	9	135	8
Maçaranduba	1,14	7	157	10	144	11
Oiuchu	0,94	6	126	10	98	14
Sucupira	1,11	5	154	11	136	13
Tachi	1,05	7	120	9	123	15
Tatajuba	0,95	6	121	17	94	14

Além destas determinações e considerando, ainda, a não equivalência estatística entre as propriedades H_0 e H_{90} , é possível se estabelecer a seguinte correlação entre tais variáveis, mais uma vez a partir de análise de regressão:

$$H_0 = 0,96 H_{90} + 22, \text{ com } R = 0,88 \text{ (} R^2 = 0,76 \text{)} \quad (3)$$

Nesta expressão, as propriedades H_0 e H_{90} são dadas em MPa.

Resultados de Pogetto *et al.* (2006) mostram que a relação entre H_0 e H_{90} é "próxima a um", estabelecida para espécie de floresta plantada (*Eucalyptus citriodora*) e, também, com espécies nativas (famílias das Lauraceas e Vochysiaceae). Os resultados obtidos no presente trabalho são coerentes com os apresentados pelos citados pesquisadores.

Os resultados aqui obtidos também se harmonizam com os apontados por Heräjärvi (2004), que estabeleceu a correlação entre a dureza Brinell e a densidade básica de madeiras do gênero *Betula*.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para a densidade aparente a 12% de umidade, para a dureza paralela e para a dureza normal às fibras de catorze espécies tropicais de elevada densidade, permitem confirmar a possibilidade de correlacionar tais variáveis empregando-se as expressões: $H_0 = 183 \text{ DA} - 56$ e $H_{90} = 193 \text{ DA} - 83$.

Além disto, a expressão $H_0 = 0,96 H_{90} + 22$ é adequada para relacionar a dureza paralela e a dureza normal às fibras (umidade 12%).

Nas expressões citadas, H_0 e H_{90} são dadas em MPa e DA em g/cm^3 .

Desta forma, disponibilizam-se ferramentas para facilitar a decisão a respeito das espécies de madeira a serem utilizadas em aplicações como pisos e dormentes, no contexto em que se encontra nosso país, conforme apontado no início deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, 1997. (NBR 7190).
- CAIXETA, R.P.; TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S.; LIMA, J.T. Propriedades e classificação da madeira aplicadas à seleção de genótipos de *Eucalyptus*. *Revista Árvore*, Viçosa, v.27, n.1, p.43-51, 2003.
- COLENCI, R.A.; BALLARIN, A.W. Correlações entre a dureza Janka e a compressão paralela às fibras em madeiras para dormente ferroviário. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v.18, n.2, p.1-11, 2003.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. *PAC – Programa de Aceleração do Crescimento*. Brasília, 2009. Disponível em: www.dnit.gov.br. Acesso em: 31 de março de 2009.
- GROBÉRIO, M.P.; ROCCO LAHR, F.A. Indicações para o emprego da madeira de espécies tropicais do Brasil. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, São Carlos, v.8, 2002. (CDROM)
- HERÄJÄRVI, H. Variation on basic density and Brinell hardness within mature *Betula pendula* and *Betula pubescens* Stems. *Wood and Fiber Science*, Madison, v.36, n.2, p.216-227, 2004.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Madeiras nacionais: tabelas de resultados de ensaios físicos e mecânicos. *Boletim IPT*, São Paulo, n.31, p.1-28, 1956.
- KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ Jr, W.A. *Principles of wood science and technology*. Berlin: Springer Verlag, 1968. 592p.
- MADEIRAS CC. *A madeira de eucalipto para dormentes*. São Paulo, 2009. Disponível em: www.madeiras.cc/dormentes. Acesso em: 31 de março de 2009.
- MAINIERI, C. *Manual de identificação das principais madeiras comerciais brasileiras*. São Paulo: Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1983. 241p.
- PADILHA, C.; LIMA, J.T.; SILVA, J.R.M.; TRUGILHO, P.F.; ANDRADE, H.B. Avaliação da qualidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* para utilização em pisos. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n.71, p.119-130, 2006.
- POGETTO, M.H.F.A.; BALLARIN, A.W.; COLENCI, R.A. Relações entre a dureza paralela e normal às fibras em madeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10, 2006, Águas de São Pedro. *Anais...* Botucatu:UNESP, 2006. (CDROM).

REMADE – Revista da Madeira. Disponível em: www.remade.com.br/bd/madeira. Acesso em: 30 de março de 2009.

ROCCO LAHR, F.A. **Considerações a respeito da variabilidade das propriedades de resistência e de elasticidade da madeira**. 1990. 162p. Tese (Livre-Docência). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

SANTANA, M.A.E.; EIRAS, K.M.M.; PASTORE, T.C.M. Avaliação da madeira de quatro clones de *Hevea brasiliensis* por meio de sua caracterização físico-mecânica. **Brasil Florestal**, Brasília, n.70, p.61-68, 2001.

XAVIER, A.P.P.; CHAHUD, E. Pontes de madeira de Minas Gerais: principais sistemas construtivos e seu estado de conservação. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, v.18, 2006. (CDROM).

Recebido em 03/05/2009
Aceito para publicação em 08/03/2010