

## Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente

### Strength and stiffness properties of wood esteemed through the specific gravity

Fabricio Moura Dias  
Francisco Antonio Rocco Lahr

---

**RESUMO:** A caracterização da madeira consiste, em parte, determinar suas propriedades físicas, de resistência e rigidez através de ensaios normalizados. O inconveniente, de grande parte desses ensaios, é a utilização de equipamentos de alto custo e grande porte, disponíveis apenas em centros de pesquisas. Porém, o ensaio de densidade aparente é de fácil determinação por utilizar equipamentos simples na sua execução. Sendo assim, neste trabalho são apresentadas as relações entre a densidade aparente e demais propriedades físicas, de resistência e de rigidez da madeira, de quarenta espécies nativas brasileiras, do grupo das dicotiledôneas. Através de análise de regressão, foram ajustadas equações que permitem estimar, a partir da densidade aparente, grande parte das propriedades de resistência e rigidez da madeira. Tais equações são apresentadas como proposta para a utilização na caracterização de espécies menos conhecidas, o que viabiliza o adequado emprego de espécies nativas nas mais variadas aplicações para as quais a madeira é indicada. A caracterização físico-mecânica das espécies foram realizadas segundo recomendações normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira.

**PALAVRAS-CHAVE:** Madeira, Densidade aparente, Resistência, Rigidez

**ABSTRACT:** The wood is a material that already has applications diffused in several sections, however, a lot of times it is used without the knowledge of its properties. The characterization of wood species consists of determining its physical, strength and stiffness properties, through Brazilian code NBR 7190. The inconvenience of many of those tests is the use of equipments of high cost and great load, available just in research centers. Even so, the test of specific gravity is of easy determination for using simple equipments in its execution. Being like this, in this study the correlations between the specific gravity, physical, strength and stiffness properties of wood from forty Brazilian native species of hardwoods are determined. The mathematical expressions obtained through this study, permit estimate most wood properties of strength and stiffness, based on their specific gravity. Such expressions are proposed as means of characterizing less-known species, what makes possible the appropriate employment of native species in most varied applications for which wood is the indicated material.

**KEYWORDS:** Wood, Specific gravity, Strength, Stiffness

---

## INTRODUÇÃO

A madeira é um recurso natural importante, por ser renovável e estar presente no cotidiano em diversos setores: na construção civil como esquadrias, material de revestimento de paredes, pisos, forros, estruturas de pontes e de cobertura, formas e cimbramentos de obras em concreto

armado e protendido; na construção rural, principalmente em silos e construção de habitação; na indústria de fabricação de papéis, combustíveis e substâncias químicas orgânicas; na indústria moveleira; na fabricação de instrumentos musicais, de artigos esportivos, de ferramentas, de lápis e embalagens (caixote e engradados); na fabricação

de chapas de fibras de madeira, de madeira compensada e de madeira aglomerada, entre outras extensas aplicações.

A pesar de sua utilização difundida, no Brasil, a madeira é um produto tratado tecnicamente com descaso. Tanto fornecedores quanto consumidores, na maioria das vezes, ignoram as propriedades mecânicas da madeira comercializada e utilizada.

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas possibilita um uso mais racional da madeira. A atual NBR7190/1997: Projeto de estruturas de madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas estabelece para espécies não conhecidas a caracterização completa, determinada pelas seguintes propriedades referidas à condição-padrão de umidade (12%):

- ✓ resistência à compressão e à tração paralela às fibras;
- ✓ resistência à compressão e à tração normal às fibras (considerada nula para efeito de projeto estrutural);
- ✓ resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;
- ✓ resistência ao embutimento paralelo e normal às fibras;
- ✓ densidade básica e densidade aparente.

O Anexo B da referida normalização especifica os ensaios das propriedades citadas e apresenta também ensaios para:

- ✓ módulo de elasticidade longitudinal na compressão e na tração paralela às fibras;
- ✓ módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática;
- ✓ tenacidade.

Esses ensaios tendem a ser realizados em laboratórios específicos, pois as máquinas requeridas são de grande porte e custos elevados. Por causa dessas dificuldades, muitas vezes a madeira é utilizada sem o conhecimento básico de suas propriedades, levando assim ao mau uso e desperdício desse material.

Por outro lado, uma propriedade física bem fácil de ser determinada é a densidade aparente, definida pela razão entre a massa e o volume a 12% de umidade. Utiliza-se no processo apenas

balança e paquímetro para sua execução. É uma das propriedades que mais fornece informações sobre as características da madeira.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi estabelecer as relações entre as propriedades físicas, de resistência e de rigidez em função da densidade aparente da madeira, imprescindível para, através de um ensaio simples (densidade aparente), estimar convenientemente as demais propriedades.

### Densidade da madeira

Hellmeister (1982) afirmou ser a densidade a propriedade física mais significativa para caracterizar madeiras destinadas à construção civil, à fabricação de chapas ou à utilização na indústria de móveis. Apresenta, como conceito físico, o da quantidade de massa contida na unidade de volume. Besley (1966), Souza et al. (1986) e Shimoyama e Barrichelo (1991) apresentaram a densidade como um dos mais importantes parâmetros para avaliação da qualidade da madeira, por ser de fácil determinação e estar relacionada às demais características do material.

Shimoyama e Barrichelo (1991) e Humphreys e Chimelo (1992) afirmaram que todas as demais propriedades da madeira estão relacionadas à sua densidade, sendo esta o principal ponto de partida no estudo da madeira, para as mais diversas formas de utilização.

Dependendo da condição de umidade da amostra, a densidade pode ser descrita de várias formas. As duas formas mais usuais de determinação são a densidade básica e a densidade aparente. A primeira forma, densidade básica, relaciona a massa da madeira completamente seca em estufa, com o seu respectivo volume saturado, ou seja, acima do ponto de saturação das fibras (PSF). A segunda, que do ponto de vista prático, é maior o interesse na sua determinação, devido ao fato desta ter influência da porosidade da madeira, é feita com determinação de massa e volume a um mesmo valor de teor de umidade, que para as condições internacionais é de 12%. (Oliveira, 1997).

Segundo Logsdon (1998), apesar da densidade da madeira poder ser determinada a qualquer porcentagem de umidade, os resultados obtidos

são tão variáveis que a padronização é necessária para fins de comparação. A nova versão da norma brasileira, NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira, da ABNT (1997), adota a umidade de referência de 12%.

### Densidade aparente

A densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ), corresponde à densidade medida a um certo conteúdo de umidade. Nas condições de uma atmosfera com 20 C de temperatura e uma umidade relativa de 65%, a umidade de equilíbrio para a madeira é 12% (Cisternas, 1994).

### Relações da densidade com as propriedades de resistência e rigidez da madeira

Bodig e Jayne (1982) afirmaram que muitas das propriedades mecânicas da madeira estão correlacionadas com a densidade.

De Paula et al. (1986) ensaiaram várias espécies de madeiras do Amazonas e procuraram relacionar as propriedades mecânicas com a densidade e outras propriedades. Afirmaram que, conhecendo-se a relação entre as diversas propriedades mecânicas, pode-se ter uma idéia aproximada do valor de uma propriedade mecânica através de outra. Concluíram ser viável a utilização da densidade como uma estimativa das propriedades mecânicas.

Zhang (1994) fez um estudo detalhado das relações entre a densidade básica com propriedades mecânicas, para 342 espécies de madeiras chinesas - 74 coníferas e 268 folhosas, baseado tanto na classificação taxonômica a que pertencem, quanto em grupos distintos de constituição anatômica. Segundo o autor, os resultados indicam que as relações densidade-propriedades mecânicas variam acentuadamente com a classe taxonômica, a categoria da madeira, bem como a própria propriedade em questão. Zhang (1994) encontrou dificuldades para explicar a relação mais íntima entre a densidade e propriedades mecânicas para madeira de folhosas, em razão de sua estrutura anatômica mais complexa.

Hellmeister (1982) relacionou a densidade com propriedades de resistência e rigidez da ma-

deira. Em prosseguimento aos estudos, Hellmeister (1983) afirma existir uma relação linear entre a resistência à compressão paralela às fibras e a densidade, para a espécie pinho do Paraná. Estas relações também foram estudadas por Armstrong et al. (1984) para madeiras comerciais do mundo, onde o modelo ajustado foi o logarítmico e por Pigozzo (1982) que apresenta um ajuste para a relação da densidade com a resistência à compressão paralela da madeira de *Eucalyptus citriodora*, em equação potencial. Já Cordovil e Almeida (1995) apresentam uma relação linear entre estas propriedades.

Segundo Giordano (1951) entre a densidade e a resistência à tração paralela às fibras existe para algumas madeiras uma relação linear, mas outras seguem curva côncava. Já Kollmann e Côté (1968) e Hellmeister (1982) apresentam uma relação linear entre estas propriedades.

Mendes (1984) e Melo e Siqueira (1992) afirmam ser o modelo linear satisfatório para estimar a resistência ao cisalhamento da madeira em função da densidade.

Estudos apresentados por Tanaami (1986); Cordovil e Almeida (1995) e Melo e Siqueira (1992) indicam existir uma relação linear da densidade com a resistência convencional no ensaio de flexão estática.

Armstrong et al. (1984) investigaram o efeito da densidade básica sobre o módulo de elasticidade à flexão estática, para diversas madeiras comerciais do mundo. Já Pigozzo (1982) estudou o efeito da densidade sobre o módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras para a espécie peroba rosa. Afirmou não ser significativo o efeito analisado.

Kollmann e Côté (1968) afirmaram existir relação linear entre a densidade e a dureza da madeira. Já Bodig e Jayne (1982) apresentaram como significativo um modelo exponencial para expressar a relação entre a densidade e dureza paralela e normal às fibras.

Kollmann e Côté (1968) afirmaram que a curva para descrever a relação da tenacidade com a densidade pode ser ajustada para uma parábola cúbica.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Nos últimos anos têm-se caracterizado diversas espécies de madeiras no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira – LaMEM-SET-USP. Essa caracterização foi realizada de acordo com os métodos de ensaio especificados na NBR 7190/1997. As propriedades determinadas foram as seguintes:

- ✓ densidade;
- ✓ retração radial e tangencial total;
- ✓ resistência à compressão paralela às fibras;
- ✓ resistência à tração paralela e normal às fibras;
- ✓ resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;
- ✓ resistência ao fendilhamento;
- ✓ resistência convencional no ensaio de flexão estática;
- ✓ módulo de elasticidade longitudinal na compressão e na tração paralela às fibras;
- ✓ módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática;
- ✓ dureza paralela e normal às fibras;
- ✓ tenacidade.

Os resultados das propriedades de resistência e de rigidez foram corrigidos para a umidade padrão de referência, 12%, como estabelecido pela NBR 7190/1997, através das equações 1 e 2.

$$f_{12} = f_{U\%} \left[ 1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (1)$$

Onde:

$f_{12}$ : resistência corrigida para a umidade de 12%;

$f_{U\%}$ : resistência para a umidade U%;

U%: teor de umidade.

$$E_{12} = E_{U\%} \left[ 1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad (2)$$

Onde:

$E_{12}$ : módulo de elasticidade (rigidez) corrigido para umidade de 12%;

$E_{U\%}$ : módulo de elasticidade para a umidade U%;

U%: teor de umidade.

Os respectivos valores foram tabelados e utilizados neste trabalho, sendo um total de 40 espécies das dicotiledôneas (madeiras duras). Ensaiou-se, seguindo a determinação da NBR 7190/1997 para caracterização mínima de espécies pouco conhecidas, o total de 12 corpos-de-prova para cada propriedade. Algumas dessas espécies foram ensaiadas pelo autor em paralelo a essa pesquisa, sendo essas, as espécies de nome comum: angelim-saia, angico-preto, cupiúba, goiabão e parinari.

O lote investigado constituía de 12 tábuas de cada espécie, com dimensões de 12x12x300 cm. Deste lote foi extraído uma amostra com corpos-de-prova distribuídos aleatoriamente ao longo do lote, representando a totalidade deste. Não se retirou mais de um corpo-de-prova de uma mesma peça. Seguindo determinação da NBR7190/1997, os corpos-de-prova eram isentos de defeitos e foram retirados de regiões afastadas das extremidades das peças de pelo menos 30 cm. Todas as peças eram constituídas de madeira do cerne das árvores. Na Tabela 1 são apresentados os nomes comuns e científicos das espécies estudadas.

### Procedimentos para análise estatística

Estudou-se a relação da densidade aparente com as outras propriedades da madeira, utilizando o agrupamento médio das espécies. Para garantir uma base experimental adequada, estudaram-se espécies de madeiras correspondentes às quatro classes de resistências, adotadas para dicotiledôneas pela NBR 7190/1997. As espécies foram enquadradas nas classes de resistência através da resistência característica à compressão paralela às fibras. As resistências características foram calculadas pela equação 3 e comparadas às classes de resistência que constam na Tabela 2.

$$f_{w,k} = \left[ 2 \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - f_{\frac{n}{2}} \right] \quad (3)$$

Onde:

$f_{w,k}$ : resistência característica;

n: número de corpos-de-prova ensaiados.

**Tabela 1**

Nomes das espécies analisadas  
(Woods species names)

<b>Números</b>	<b>Nome vulgar</b>	<b>Nome científico</b>
01	Angelim-amargoso	<i>Vatairea fusca</i>
02	Angelim-araroba	<i>Vataireopsis araroba</i>
03	Angelim-ferro	<i>Hymenobium sp</i>
04	Angelim-pedra-verdadeiro	<i>Dinizia excelsa</i>
05	Angelim-pedra	<i>Hymenobium petraeum</i>
06	Angelim-saia	<i>Vatairea sp</i>
07	Angico-preto	<i>Piptadenia macrocarpa</i>
08	Branquilha	<i>Sebastiania commersoniana</i>
09	Cafearana	<i>Andira stipulacea</i>
10	Canafístula	<i>Cassia ferruginea</i>
11	Casca-grossa	<i>Ocotea odoriferar</i>
12	Castelo	<i>Calycophyllum multiflorum.</i>
13	Catanudo	<i>Calophyllum sp</i>
14	Cedro-amargo	<i>Cedrela odorata</i>
15	Cedro-doce	<i>Cedrella sp</i>
16	Cedrorana	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>
17	Champanhe	<i>Dipteryx odorata</i>
18	Copaiba	<i>Copaifera cf. ret</i>
19	Cupiúba	<i>Goupia glabra.</i>
20	Cutiúba	<i>Goupia paraensis</i>
21	Garapa	<i>Apuleia leiocarpa</i>
22	Goiabão	<i>Planchonella pachycarpa</i>
23	Guaiçara	<i>Luetzelburgia sp</i>
24	Guarucaia	<i>Peltophorum vogelianum</i>
25	Ipê	<i>Tabebuia serratifolia</i>
26	Itaúba	<i>Mezilaurus itauba</i>
27	Jatobá	<i>Hymenaea sp</i>
28	Louro-preto	<i>Ocotea sp</i>
29	Maçaranduba	<i>Manilkara huberi</i>
30	Mandioqueira	<i>Qualea paraensis</i>
31	Oiticica amarela	<i>Clarisia racemosa</i>
32	Oiuchu	<i>Pradosia sp</i>
33	Parinari	<i>Parinari excelsa</i>
34	Piolho	<i>Tapirira sp</i>
35	Quarubarana	<i>Erisma uncinatum</i>
36	Rabo-de-arraia	<i>Vochysia haenkeana</i>
37	Sucupira	<i>Diploptropis incexis</i>
38	Tachi	<i>Tachigali myrmecophila</i>
39	Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i>
40	Umirana	<i>Qualea retusa</i>

**Tabela 2**

Classes de resistência das dicotiledôneas.  
(Strength classes of hardwood).

<b>DICOTILEDÔNEAS</b>					
(valores na condição padrão de referência, U = 12%)					
Classes	$f_{c0,k}$ MPa	$f_{v,k}$ MPa	$E_{c0,m}$ MPa	$\rho_{bas,m}$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{apa}$ kg/m <sup>3</sup>
C20	20	4	9500	500	650
C30	30	5	14500	650	800
C40	40	6	19500	750	950
C60	60	8	24500	800	1000

Os resultados foram colocados em ordem crescente,  $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n$ , desprezando-se o valor mais alto para número de corpos-de-prova ímpar. Não se tomou para  $f_{v,k}$  valor inferior a  $f_1$ , nem a 0,70 do valor médio.

Para se estudar as relações entre as características especificadas, utilizou-se à análise de regressão linear simples, ao nível de significância de 95%. A análise de resíduos ou desvios e o co-

eficiente de determinação  $r^2$  foram usados para avaliar a qualidade da regressão.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As classes de resistência para cada espécie são apresentadas na Tabela 3.

Os valores médios das propriedades de resistência e rigidez da madeira das espécies ensaiadas são apresentados nas Tabelas 4 e 5.

**Tabela 3**

Apresentação das classes de resistência e resistências características para as espécies estudadas.  
(Strength classes and characteristics strength for the woods species studied).

Número	$f_{c0,k}$ (MPa)	CR	Número	$f_{c0,k}$ (MPa)	CR
01	47,7	C40	21	65,4	C60
02	45,3	C40	22	43,1	C40
03	71,0	C60	23	58,9	C40
04	72,7	C60	24	61,1	C60
05	44,5	C40	25	62,9	C60
06	51,1	C40	26	68,4	C60
07	55,6	C40	27	78,7	C60
08	45,6	C40	28	42,1	C40
09	42,4	C40	29	79,5	C60
10	36,4	C30	30	59,2	C40
11	44,5	C40	31	73,5	C60
12	54,5	C40	32	72,3	C60
13	51,0	C40	33	56,2	C40
14	30,4	C30	34	43,7	C40
15	27,9	C20	35	27,2	C20
16	28,9	C20	36	48,7	C40
17	96,2	C60	37	90,5	C60
18	44,1	C40	38	75,8	C60
19	39,9	C30	39	55,0	C40
20	55,3	C40	40	52,1	C40

CR – Classe de resistência

$f_{c0,k}$  – Resistência característica

**Tabela 4**

Valores médios das propriedades de resistência e rigidez da madeira das espécies analisadas.  
(Average values of strength and stiffness properties of the woods species studied).

Números	$\rho_{\text{apar}}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{t0}$ (MPa)	$f_{t90}$ (MPa)	$f_{v0}$ (MPa)	$f_{s0}$ (MPa)
01	772	4,5	8,6	60	75	2,8	16,0	0,6
02	674	3,8	6,0	50	70	3,1	12	0,4
03	1163	5,0	8,3	82	115	3,5	19,4	0,8
04	1131	5,1	8,4	78	105	4,8	18,9	0,9
05	663	3,9	6,2	58	71	3,4	13,3	0,6
06	764	4,3	8,0	63	101	2,2	14,6	0,9
07	888	4,3	7,7	73	110	5,0	24,5	1,0
08	810	4,9	9,1	49	88	3,2	16,0	0,7
09	678	5,5	9,9	58	84	3,3	10,2	0,6
10	860	4,	7,7	52	85	6,0	18,5	1,1
11	788	6,0	11,5	57	119	4,1	13,4	0,8
12	759	4,0	6,6	55	104	7,0	21,3	1,4
13	804	5,4	8,4	51	68	3,6	16,4	0,6
14	514	4,0	5,3	38	59	2,8	10,2	0,5
15	512	3,6	5,2	33	70	3,0	9,4	0,5
16	566	3,5	6,4	41	62	3,1	11,9	0,6
17	1090	4,0	6,4	93	122	2,9	17,8	0,8
18	695	3,5	7,0	50	71	3,3	14,6	0,6
19	839	4,3	7,2	54	77	3,1	17,1	0,7
20	1152	4,9	7,8	79	108	3,5	17,9	0,2
21	920	4,3	7,6	73	116	7,3	19,6	2,0
22	938	8,9	18,8	49	119	8,7	14,1	1,2
23	995	4,0	6,0	66	107	3,9	19,0	0,7
24	916	4,1	8,1	62	75	5,7	20,3	1,0
25	1065	5,1	7,8	78	108	3,5	21,3	0,7
26	908	2,9	8,3	69	104	2,1	18,8	0,6
27	1084	3,4	6,8	91	162	3,4	25,5	0,8
28	680	4,1	8,1	55	68	3,1	13,8	0,6
29	1143	6,5	8,9	83	139	5,4	24,9	0,8
30	855	4,8	9,4	71	93	2,8	17,2	0,6
31	756	2,5	6,2	70	86	3,9	17,8	0,6
32	931	5,9	9,2	77	130	3,0	20,1	0,6
33	792	5,4	8,6	60	112	*	13,4	1,0
34	828	4,6	8,6	62	73	4,3	14,7	0,7
35	544	3,6	7,2	38	58	2,6	9,6	0,4
36	729	3,9	7,5	60	73	2,3	13,4	0,5
37	1103	5,8	7,1	94	119	3,8	20,1	1,0
38	1050	4,3	9,4	88	111	5,3	20,9	1,2
39	945	4,2	5,8	79	93	4,0	19,9	0,9
40	705	3,6	6,3	54	54	2,9	14,5	0,6

$\rho_{\text{ap}}$  = Densidade aparente;  $\epsilon_{r,2}$  = Retratibilidade radial;  $\epsilon_{r,3}$  = Retratibilidade tangencial;  $f_{c0}$  = Resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{t0}$  = Resistência à tração paralela às fibras;  $f_{t90}$  = Resistência à tração normal às fibras;  $f_{v0c}$  = Resistência ao cisalhamento;  $f_{s0}$  = Resistência ao fendilhamento.

**Tabela 5**

Continuação dos valores médios das propriedades de resistência e rigidez da madeira das espécies analisadas.  
(Continuation of the average values of strength and stiffness properties of the woods species studied).

Números	$f_M$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)	$E_{t0}$ (MPa)	$E_{M0}$ (MPa)	$f_{H0}$ (MPa)	$f_{H90}$ (MPa)	T (daN.m)
01	89	15940	16023	14947	100	61	0,95
02	75	12587	11661	11457	66	42	0,70
03	134	21263	19750	19938	154	136	1,92
04	110	16695	17024	15215	146	137	1,98
05	84	11990	11096	10755	82	54	0,70
06	110	24081	20821	17561	84	62	0,45
07	120	15375	16040	16498	157	145	1,46
08	83	13813	14439	15490	88	71	0,92
09	95	14185	13699	13982	83	48	0,74
10	89	14613	14087	14769	*	*	*
11	107	17936	17444	16802	103	65	1,14
12	103	11105	13167	11375	101	66	1,40
13	83	13029	15499	14729	85	59	1,31
14	62	9601	10033	9176	53	31	0,41
15	58	8358	9851	8866	51	34	0,51
16	61	10252	10970	10032	58	36	0,45
17	165	23002	20953	25174	138	127	*
18	87	14012	14627	13572	86	51	0,64
19	79	14125	14439	13148	97	65	0,78
20	127	18238	16569	16984	164	118	1,62
21	119	17718	16696	16923	113	98	1,44
22	107	18717	18267	18367	*	*	*
23	112	14027	14946	13866	109	102	2,09
24	96	16214	13870	15002	96	77	1,27
25	127	17398	16469	16670	158	131	1,57
26	117	17443	17630	17345	77	74	1,45
27	159	22967	21394	21367	165	127	2,11
28	85	13536	12851	13556	85	50	0,66
29	136	21900	20267	18184	158	140	1,97
30	115	19274	19226	18679	113	76	1,14
31	108	14719	14675	14491	96	59	1,34
32	123	17718	18184	16709	126	91	1,74
33	112	21881	18847	16457	88	68	0,38
34	76	13404	13454	11790	99	72	1,45
35	67	8783	9172	8842	64	39	0,49
36	87	14411	14172	14324	89	53	0,78
37	147	20917	21579	20518	154	136	1,83
38	140	19901	19475	20813	116	129	*
39	110	18574	16750	17905	117	88	0,95
40	67	10178	11044	10794	88	53	0,50

\*Valores de propriedades não obtidos para esta espécie.

$f_M$  = Resistência convencional no ensaio de flexão estática;  $E_{c0}$  = Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras;  $E_{t0}$  = Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras;  $E_{M0}$  = Módulo de elasticidade na flexão estática;  $f_{H0}$  = Dureza paralela às fibras;  $f_{H90}$  = Dureza normal às fibras; T = Tenacidade.



As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados de regressões que relacionam a densidade aparente com as propriedades de resistência e rigidez da madeira. Nessas tabelas, tem-se:

- ✓ Relação 1: relação entre a densidade aparente e a resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ );
- ✓ Relação 2: relação entre a densidade aparente e a resistência à tração paralela às fibras ( $f_{t0}$ );
- ✓ Relação 3: relação entre a densidade aparente e a resistência ao cisalhamento ( $f_{s0}$ );
- ✓ Relação 4: relação entre a densidade aparente e a resistência convencional no ensaio de flexão estática ( $f_M$ );
- ✓ Relação 5: relação entre a densidade aparente e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras ( $E_{c0}$ );
- ✓ Relação 6: relação entre a densidade aparente e o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras ( $E_{t0}$ );
- ✓ Relação 7: relação entre a densidade aparente e o módulo de elasticidade na flexão estática ( $E_{M0}$ );
- ✓ Relação 8: relação entre a densidade aparente e a dureza paralela às fibras ( $f_{H0}$ );
- ✓ Relação 9: relação entre a densidade aparente e a dureza normal às fibras ( $f_{H90}$ );

✓ Relação 10: relação entre a densidade aparente e a tenacidade (T);

✓  $r^2$ : coeficiente de determinação

Conforme descrições apresentadas por Bodig e Jayne (1982), De Paula et al. (1986) e Zhang (1994), observa-se na Tabela 6, que a densidade aparente da madeira está relacionada com suas propriedades de resistência e rigidez.

Para a relação 1, entre a densidade aparente e a resistência à compressão paralela às fibras, o valor do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) está bem próximo ao apresentado por Pigozzo (1982), 0,815, em forma de potência e, Armstrong et al. (1984), de 0,80 para modelo logarítmico.

O valor do  $r^2$  para a relação 4 é superior ao apresentado por Melo e Siqueira (1992) que correspondem a 0,56 para a relação entre a densidade verde e a resistência à flexão estática.

Na relação 5, densidade aparente com a resistência ao cisalhamento da madeira, apresentou coeficiente mais alto que os relatados por Mendes (1984) e Melo e Siqueira (1992). Os autores apresentaram um coeficiente de correlação de 0,549 e 0,518 respectivamente, para esta relação.

O valor do coeficiente de determinação apresentado para a relação 7 (densidade aparente e o módulo de elasticidade à flexão estática) é próximo ao apresentado por Armstrong et al. (1984),  $r^2$  de 0,79.

**Tabela 6**

Resultados da estatística de regressão para o agrupamento dos valores médios para todas espécies.  
(Statistical analysis of regression for the woods species)

RESULTADOS DA ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO				
Relações	N	$r^2$	Função	Erro padrão
Relação 1	40	0,77104	$f_{c0} = 0,0714 \rho_{apa}^{1,006}$	0,05395
Relação 2	40	0,62773	$f_{t0} = 0,1561 \rho_{apa}^{0,9472}$	0,07176
Relação 3	40	0,78433	$f_{V0c} = 0,0237 \rho_{apa}^{0,9691}$	0,05648
Relação 4	40	0,75747	$f_M = 0,0953 \rho_{apa}^{1,0344}$	0,05759
Relação 5	40	0,64911	$E_{c0} = 21,86 \rho_{apa}^{0,9761}$	0,07061
Relação 6	40	0,68672	$E_{t0} = 53,77 \rho_{apa}^{0,8407}$	0,05587
Relação 7	40	0,71312	$E_{M0} = 27,30 \rho_{apa}^{0,9374}$	0,05850
Relação 8	38	0,84768	$f_{H0} = 0,0188 \rho_{apa}^{1,2775}$	0,05450
Relação 9	38	0,92249	$f_{H90} = 3 \times 10^{-4} \rho_{apa}^{1,8707}$	0,05457
Relação 10	36	0,71262	$T = 2 \times 10^{-6} \rho_{apa}^{1,9720}$	0,12489

Observa-se para a relação da densidade aparente com a dureza paralela às fibras da madeira (relação 8) que o coeficiente obtido é igual ao apresentado por Melo e Siqueira (1992), 0,85. Porém, para a relação da densidade aparente com a dureza normal às fibras da madeira, o coeficiente obtido foi superior ao de 0,88 apresentado pelos autores.

Os valores de  $r^2$  para as relações propostas estão compreendidos entre 0,62773 e 0,92249. Segundo livros estatísticos, quanto mais próximo da unidade, melhor é a regressão. Porém, devido à alta variabilidade nas propriedades da madeira encontradas até mesmo numa mesma peça, a NBR 7190/1997 adota um coeficiente de variação de 18% para as resistências a esforços normais e 28% para as resistências a esforços tangenciais, para fins de cálculos estruturais. Vale ressaltar que o universo estudado apresenta como variáveis, o agrupamento de propriedades de madeiras oriundas de espécies distintas e a abrangência das diversas resistências características estabelecidas pela NBR 7190/1997.

Outra análise efetuada para se concluir a validade da regressão, foi à análise de resíduos. Em todas as relações estudadas, observou-se a não existência de tendenciosidade na distribuição dos resíduos. Há distribuições homogêneas ao longo dos domínios, ou seja, os pontos oscilam em torno do eixo X nos diagramas de resíduos.

Os erros padrões das médias para cada relação dão uma boa precisão da estimativa, pois apresentam valores baixos. Estes erros são apre-

sentados na Tabela 6. Somente a relação 10 apresenta um erro na ordem de 0,12489, os demais estão compreendidos entre 0,05395 e 0,07176.

Os coeficientes de determinação para as relações entre a densidade aparente e retratibilidade radial total; retratibilidade tangencial total; resistência à tração normal às fibras e resistência ao fendilhamento estão apresentados na Tabela 7. Estes coeficientes, para cada modelo estatístico analisado, foram baixos, o que evidencia uma baixa relação entre a densidade aparente e essas propriedades. Portanto, torna-se irrelevante a apresentação das análises de regressões para essas variáveis.

Melo e Siqueira (1992) apresentaram estudo sobre a relação entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras da Amazônia. Obtiveram para a relação da densidade básica com: retratibilidade tangencial, coeficiente de correlação de 0,1936 e retratibilidade radial, 0,25. Para a relação da densidade verde com a tração normal às fibras os autores apresentaram um coeficiente de determinação de 0,289.

Em estudo recente, Logsdon (2003) apresentou um coeficiente de determinação de 0,1257 para a relação entre a densidade aparente e a retração volumétrica da madeira para espécies ocorrentes no Estado do Mato Grosso. Os valores dos coeficientes de determinação, apresentados na Tabela 7, comprovam os baixos valores apresentados por Logsdon (2003) e Melo e Siqueira (1992).

**Tabela 7**

Valores de coeficientes de determinação para demais propriedades analisadas.  
(Values of determination coefficients for other analyzed properties)

Relações da densidade aparente e:	COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO				
	Modelo matemático				
	Linear	Logaritmo	Polinômio de grau 2	Potência	Exponencial
Retratibilidade radial total	0,135	0,139	0,141	0,151	0,148
Retratibilidade tangencial total	0,049	0,066	0,139	0,106	0,081
Resistência à tração normal às fibras	0,053	0,059	0,140	0,135	0,123
Resistência ao fendilhamento	0,153	0,169	0,187	0,210	0,191

## CONCLUSÕES

Alguns trabalhos em âmbito mundial, apresentam a existência de relações entre a densidade aparente e demais propriedades físicas, de resistência e de rigidez da madeira. Alguns autores referem-se ao modelo linear como significativo, outros afirmam ser expressa essa relação pelo modelo exponencial. Nenhum autor nacional estabeleceu um modelo suficientemente abrangente para as mencionadas relações, a partir das propriedades de madeiras tropicais.

Os valores obtidos neste trabalho para os coeficientes de determinação e a análise de resíduos indicam um ajuste adequado ao modelo de potência para a relação da densidade aparente e: resistência à compressão e tração paralela às fibras; resistência ao cisalhamento; resistência convencional no ensaio de flexão estática; módulo de elasticidade na compressão, na tração paralela às fibras e na flexão estática; dureza paralela e normal às fibras e tenacidade.

Foi observada a homogeneidade da variância e um valor baixo de erro padrão para estas relações. Sendo assim, as expressões obtidas são significativas para estimar valores médios de resistência e rigidez. Oferecem viabilidade e um subsídio a mais para se trabalhar com o conhecimento básico das propriedades de madeira.

Alguns cuidados devem ser tomados para garantir a adequada utilização das expressões obtidas. Quanto à extração do corpo-de-prova de densidade aparente, do lote a ser investigado deve-se extrair uma amostra com corpos-de-prova distribuídos aleatoriamente ao longo do lote e não retirar mais de um corpo-de-prova de uma mesma peça. Os corpos-de-prova devem ser isentos de defeitos e constituídos da porção do cerne da madeira. Estes cuidados visam assegurar a representativa da totalidade do lote de madeira estudado. Deve-se adotar o valor médio da densidade aparente, para assim, obter uma estimativa de valores médios de propriedades de resistência e rigidez.

Para a relação da densidade aparente e retratibilidade radial total; retratibilidade tangencial total; resistência à tração normal às fibras e

fendilhamento, em todos os modelos analisados, os coeficientes de determinação  $r^2$  apresentaram valores baixos, estatisticamente não significativos. Isto evidencia uma fraca relação entre a densidade aparente e essas propriedades.

Na continuidade destes estudos pretende-se estabelecer as relações da densidade aparente com as propriedades de resistência e rigidez da madeira, para espécies de reflorestamento, do grupo coníferas e dicotiledôneas e para as espécies de reflorestamento do grupo dicotiledôneas. Pretende-se ainda realizar as regressões por classe de resistência.

## AUTORES E AGRADECIMENTOS

FABRICIO MOURA DIAS é Engenheiro Civil, Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais na Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais – EESC/USP – Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro - São Carlos, SP – 13566-590 – E-mail: fmdias@sc.usp.br

FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR é Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC/USP – Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro - São Carlos, SP – 13566-590 – E-mail: frocco@sc.usp.br

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. (NBR-7190)
- ARMSTRONG, J.P. et al. The effect of specific gravity on several mechanical properties of some world woods. **Wood science and technology**, v.18, p.137-146, 1984.
- BESLEY, L. Importance, variation and measurement of wood density and moisture. **Pulp and Paper Research Institute of Canada**, n.489, p.1-30, 1966.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Reinhold Company, 1982.
- CISTERNAS, P.A. Conversion de densidades de la mader. **Ciencia e investigación forestal**, v.8, n.2, p.300-315, 1994.

- CORDOVIL, F.A.B.; ALMEIDA, P.A.O. Influência da densidade na resistência da madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 5, Belo Horizonte, 1995. **Anais**. Belo Horizonte: UFMG, CEFET-MG, 1995. v.2, p.143-152
- DE PAULA, E.V.C.M et al. Propriedades mecânicas de trinta e nove espécies de madeiras no Amazonas. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2, São Carlos, 1986. **Anais**. São Carlos: USP, EESC, SET, LaMEM, 1986. v.1
- GIORDANO, G. **Il legno e le sue caratteristiche: trasformazioni meccaniche e miglioramenti**. Milão: Editore Ulrico, 1951.
- HELLMEISTER, J.C. Madeiras e suas características. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1, São Carlos, 1983. **Anais**. São Carlos: USP, EESC, SET, LaMEM, 1983. v.1
- HELLMEISTER, J.C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira**. São Carlos, 1982. 119p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- HUMPHREYS, R.D.; CHIMELO, J.P. Comparação entre propriedades físicas, mecânicas e estereológicas para agrupamento de madeiras. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS, 2, São Paulo, 1992. **Anais**. São Paulo, 1992. p.480-490.
- KOLLMANN, F.E.P.; CÔTÉ, W.A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer Verlag, 1968. v.1
- LOGSDON, N.B. Estabilidade dimensional: estimativas a partir da densidade básica. **Revista madeira: arquitetura e engenharia**, v.4, n.12, 2003. (Cd-rom)
- LOGSDON, N.B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. São Carlos, 1998. 174p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MELO, J.E.; SIQUEIRA, M.J. Correlação entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras da Amazônia. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, São Carlos, 1992. **Anais**. São Carlos: USP, EESC, SET, LaMEM, 1992. v.1, p.67-76
- MENDES, A.P. **Resistência da madeira ao cisalhamento**. São Carlos, 1984. 157p. Tese (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção Civil**. São Paulo, 1997. 1v. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- PIGOZZO, J.C. **Influência da umidade e da densidade na resistência à compressão da madeira**. São Carlos, 1982. 141p. Tese (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- SHIMOYAMA, V.R.; BARRICHELO, L.E.G. Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 24, São Paulo, 1991. **Anais**. São Paulo: ABTCP, 1991.
- SOUZA, V.R.; CARPIM, M.A.; BARRICHELO, L.E.G. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posições em árvores de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **IPEF**, n.33, p.65-72, 1986.
- TANAAMI, R.G. **Influência da umidade e da densidade em propriedades de resistência e elasticidade à flexão da madeira**. São Carlos, 1986. 200p. Tese (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- ZHANG, S.Y. Mechanical properties in relation to specific gravity in 342 Chinese woods. **Wood and fiber science**, v.26, n.4, p.512-526, 1994.