

Reportando a densidade da madeira ao teor de umidade de referência Reporting wood specific gravity at the reference moisture content

¹Rainy da Conceição Soares, ²Norman Barros Logsdon, ³José Manoel Henriques de Jesus(jmhenriques@terra.com.br)

¹Centro Universitário de Várzea Grande – Curso de Engenharia Civil

²Universidade Federal de Mato Grosso - Faculdade de Engenharia Florestal

³Universidade Federal de Mato Grosso – Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia

Recebido: abr 2015 Aceito: jul Publicado: Out 2015

Resumo: A atual norma brasileira para o Projeto de Estruturas de Madeira define densidade aparente como a relação entre a massa e o volume do corpo-de-prova estabilizado ao teor de umidade de referência, adotado em 12%. Estabilizar o teor de umidade da madeira em exatos 12% é tarefa impraticável, o adequado seria estabilizar o corpo-de-prova em um teor de umidade próximo deste valor, determinar a densidade aparente nesta situação e, em seguida corrigir o resultado ao teor de umidade de 12%. Entretanto a referida norma é omissa a respeito dessa correção. Assim, os objetivos deste trabalho foram estabelecer modelos para reportar resultados de ensaio de densidade aparente ao teor de umidade de referência e verificar a possibilidade de fazê-lo também para ensaios realizados com madeira muito úmida. Para isto, foram selecionadas 10 espécies arbóreas florestais (repetições), de cada espécie foram realizados ensaios de densidade aparente em três corpos-de-prova, o mais parecido possível (gêmeos), respectivamente nas condições de umidade: madeira saturada em água, seca ao ar e condicionada em clima padrão. O resultado de cada um destes ensaios foi corrigido usando quatro diferentes modelos, obtidos na literatura, acarretando 12 tratamentos (3 umidades x 4 modelos). A comparação destes tratamentos foi feita utilizando a análise de variância e o teste de Tukey, validando os quatro modelos para as situações de madeira seca ao ar e condicionada, mas mostrando não ser possível reportar os resultados de ensaios em madeiras muito úmidas.

Palavras-chave: Madeira. Densidade aparente. Umidade de referência.

Abstract: The current Brazilian Code for Timber Structures Design defines specific gravity as the relationship between the mass and the volume of the specimen stabilized at the reference moisture content, adopted on 12%. Stabilize the moisture content of wood at exactly 12% is impractical, the appropriate task would be to stabilize the specimen in a moisture content around this value, determine the specific gravity in this situation and then fix the result to the 12% moisture content. However the referred Code omits this fix. Thus, the objectives of this study were to establish models for reporting test results from specific-gravity to the reference moisture content and check the possibility to do it also for tests with very wet wood. For this, were selected 10 forest tree species (repetitions), of each species were made specific gravity tests in three specimens, the closest possible (twins), respectively under the moisture conditions: wood saturated in water, air-dried and conditioned on standard weather. The result of each of these tests has been fixed using 4 different models, obtained in the literature, leading to 12 treatments (3 moisture x 4 models). The comparison of these treatments was done using analysis of variance and the Tukey test, validating the 4 models for situations of air-dried wood and conditioned, but showing it is not possible to report the results of tests on very wet wood.

Keywords: Wood. Specific gravity. Reference moisture content.

1

INTRODUÇÃO

A atual norma brasileira NBR 7190, da ABNT (1997), define densidade aparente como a relação entre a massa e o volume do corpo-de-prova estabilizado ao teor de umidade de referência, adotado em 12%.

Estabilizar o teor de umidade da madeira em exatos 12% é tarefa impraticável, o adequado seria estabilizar o

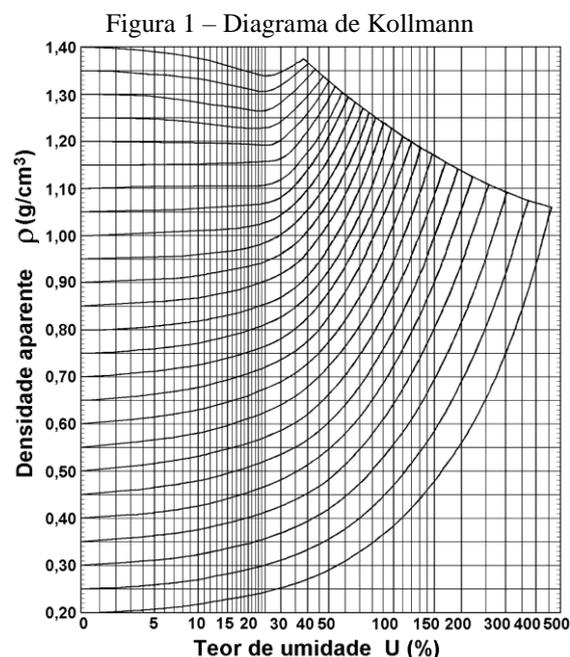
corpo-de-prova em um teor de umidade próximo deste valor, determinar a densidade aparente nesta situação e, em seguida corrigir o resultado ao teor de umidade de 12%. Entretanto a norma brasileira NBR 7190, da ABNT (1997), é omissa a respeito dessa correção.

Assim, surgem as perguntas desta pesquisa: “É possível estabelecer modelos para reportar a densidade aparente ao teor de umidade de referência?” e

“Considerando que a madeira geralmente é encaminhada ao laboratório, para ensaios, com elevado teor de umidade, algum modelo pode ser aplicado para corrigir resultados de ensaios realizados em corpos-de-prova com elevado teor de umidade?”.

A densidade é uma quantificação direta do material lenhoso por unidade de volume, estando relacionada a muitas propriedades e características tecnológicas fundamentais para a produção e utilização dos produtos florestais, é um dos parâmetros mais importantes entre as diversas propriedades físicas da madeira, pois afeta todas as demais propriedades (SHIMOYAMA, 1990).

Segundo Logsdon e Jesus (2013) os estudos mais importantes a respeito da influência do teor umidade sobre a densidade aparente se devem a Kollmann e datam do início do século XX, que segundo Kollmann e Côté Jr. (1984), resultaram no Diagrama de Kollmann, apresentado na Figura 1.



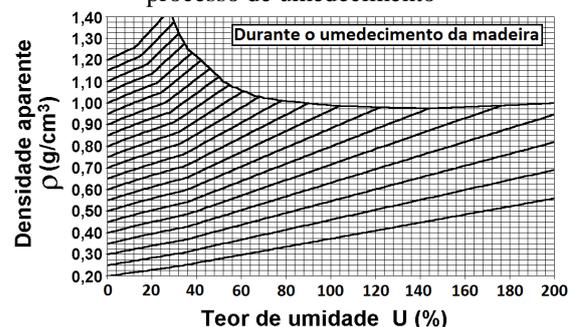
Fonte: KOLLMANN e CÔTÉ JR (1984)

O estudo de Kollmann, segundo Logsdon (2004), considerou o inchamento volumétrico da madeira, que ocorre com seu umedecimento, mas o fenômeno mais frequente é a retração volumétrica, que ocorre com a secagem da madeira.

Segundo o raciocínio de Kollmann, Logsdon (2004) incluiu em seus estudos o processo de secagem. Usando resultados experimentais de folhosas brasileiras e o modelo proposto para o diagrama de retrações volumétricas por Logsdon e Finger (2000), Logsdon (2004) construiu dois diagramas para representar a variação da densidade aparente com o teor de umidade, um em processos de umedecimento e outro nos de secagem. Esses diagramas são apresentados nas Figuras 2 e 3.

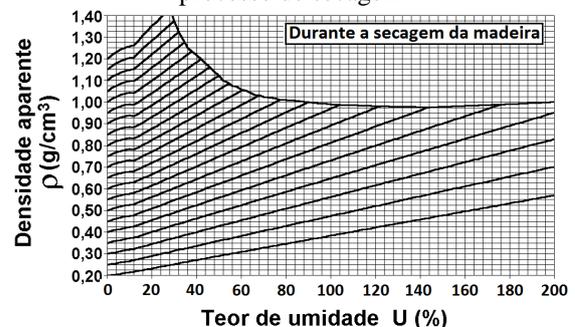
O comportamento diferente entre os fenômenos de inchamento e retração ocorre por serem diferentes as condições para percolação da água, de fora para dentro, durante o umedecimento, das condições, agora de dentro para fora, durante a secagem da madeira (LOGSDON e JESUS, 2013).

Figura 2 – Densidade aparente com umidade em processo de umedecimento



Fonte: LOGSDON (2004)

Figura 3 – Densidade aparente com umidade em processo de secagem



Fonte: LOGSDON, (2004)

É clara a dependência da densidade aparente ao teor de umidade, portanto há

necessidade de reportar os resultados dos ensaios ao teor de umidade de referência. A NBR 7190, da ABNT (1997), é omissa sobre essa correção.

Logsdon (1998), citado por Calil Junior et al (2002), propôs as Equações 1 a 3 para representar a influência da umidade na densidade aparente.

$$\rho_{12} = \rho_U + \rho_U \cdot \left[(1 + \delta_V) \cdot \left(\frac{12 + U}{100} \right) \right] \quad (1)$$

$$\delta_V = \frac{\Delta V}{U} \quad (2)$$

$$\Delta V = \frac{V_U - V_S}{V_S} \cdot 100 \quad (3)$$

Nas quais: ρ_{12} é a densidade aparente ao teor de umidade de 12%, em g/cm^3 ; ρ_U é a densidade aparente ao teor de umidade de U%, em g/cm^3 ; U é o teor de umidade da madeira no instante do ensaio, em %; δ_V é a variação da retração volumétrica por unidade de umidade; ΔV é a retração volumétrica, para uma variação no teor de umidade desde U% até 0%, em %; V_U é o volume do corpo-de-prova ao teor de umidade de U%, em cm^3 ; V_S é o volume do corpo-de-prova completamente seco (U=0%), em cm^3 .

A norma francesa, segundo Brochard (1960), permitia a aplicação de uma expressão simplificada para corrigir a densidade aparente ao teor de umidade de referência, adotado como 15%. Aplicando esta expressão, para o teor de umidade de referência de 12%, obtém-se a Equação 4.

$$\rho_{12} = \rho_{U\%} \cdot \frac{\left(1 + \frac{12}{100} \right)}{\left(1 + \frac{U}{100} \right)} \quad (4)$$

Nas qual: ρ_{12} é a densidade aparente ao teor de umidade de 12%, em g/cm^3 ; ρ_U é a densidade aparente ao teor de umidade de U%, em g/cm^3 ; U é o teor de umidade da madeira no instante do ensaio, em %.

Assim, os objetivos deste trabalho foram estabelecer modelos para reportar resultados de ensaio de densidade aparente ao teor de umidade de referência e verificar a possibilidade de fazê-lo também para ensaios realizados com madeira muito úmida.

MATERIAL E MÉTODOS

As espécies foram selecionadas, para este trabalho, de modo a abranger todas as classes de resistência das folhosas, definidas no projeto de revisão da NBR 7190 da ABNT (2011). Nenhuma conífera é nativa de Mato Grosso, onde praticamente não existem (re)florestamentos com essas árvores, por isso não foram objetos de estudo.

Foram utilizadas 10 espécies de folhosas, praticamente duas em cada classe de resistência definida no projeto de revisão da NBR 7190, da ABNT (2011). Na Tabela 1 são apresentadas as espécies selecionadas, suas resistências características à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) e suas classes de resistência (segundo o Banco de dados do GPMEM – Grupo de Pesquisa em Madeiras e Estruturas de Madeira). A coleta de material foi feita em regiões típicas de ocorrência das espécies, em municípios do Estado de Mato Grosso.

Na Tabela 2 são fornecidas as localidades onde cada espécie foi coletada.

Tabela 1 – Espécies selecionadas para o estudo

Espécies		f _{c0,k} (MPa)	Classe de resistência
Nome vulgar	Nome científico		
Ipê-amarelo	<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. O. Grose	76,42	D60
Itaúba	<i>Mezilaurus itauba</i> (Meissn.) Taubert ex Mez.	61,71	D60
Guariúba	<i>Clarisia racemosa</i> Ruiz & Pav.	59,14	D50
Cedro-marinheiro	<i>Guarea trichilioides</i> L.	57,01	D50
Pau-d'óleo	<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	47,64	D40
Angelim-amargoso	<i>Vataireopsis speciosa</i> Ducke	44,46	D40
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i> (Gmel.) Aubl.	38,39	D30
Cedro-rosa	<i>Cedrela odorata</i> L.	30,53	D30
Marupá	<i>Simarouba amara</i> Aubl.	27,29	D20
Pau-de-balsa	<i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. ex Lam) Urb.	11,63	--- ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Resistência inferior à da classe de resistência D20.

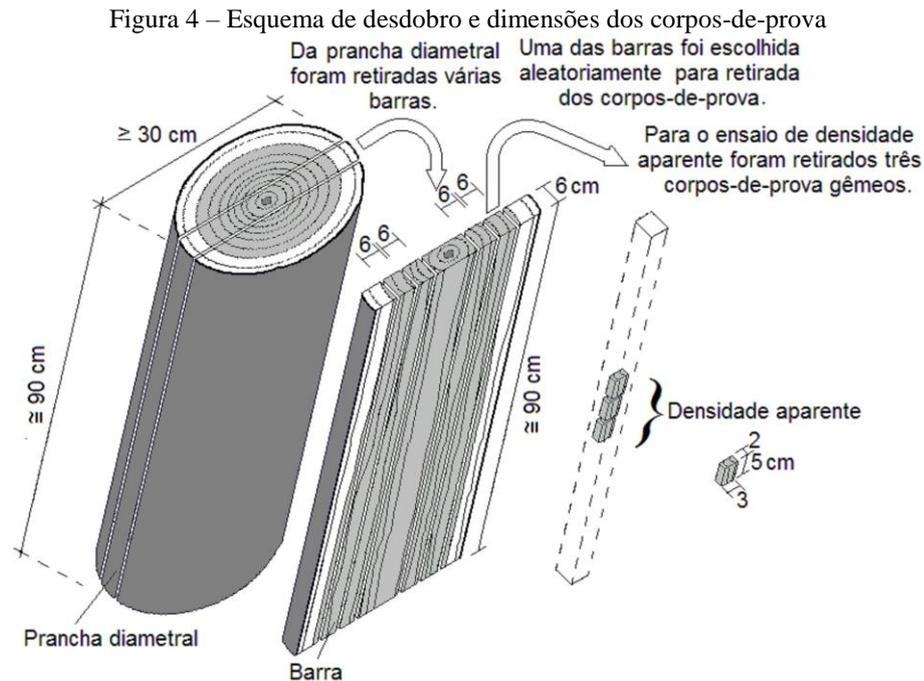
Tabela 2 – Localidade de coleta das espécies selecionadas para o estudo

Espécies (Nome vulgar, nome científico)	Localidade de coleta do material
Ipê-amarelo, <i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. O. Grose	Cotriguaçu - MT
Itaúba, <i>Mezilaurus itauba</i> (Meissn.) Taubert ex Mez.	Sorriso - MT
Guariúba, <i>Clarisia racemosa</i> Ruiz & Pav.	Nova Monte Verde - MT
Cedro-marinheiro, <i>Guarea trichilioides</i> L.	Cotriguaçu - MT
Pau-d'óleo, <i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	Chapada dos Guimarães - MT
Angelim-amargoso, <i>Vataireopsis speciosa</i> Ducke	Cotriguaçu - MT
Cupiúba, <i>Goupia glabra</i> (Gmel.) Aubl.	Brasnorte - MT
Cedro-rosa, <i>Cedrela odorata</i> L.	Cotriguaçu - MT
Marupá, <i>Simarouba amara</i> Aubl.	Cotriguaçu - MT
Pau-de-balsa, <i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. ex Lam) Urb.	Quatro Marcos - MT

Como um dos objetivos deste trabalho foi avaliar os teores de umidade em que seria possível realizar os ensaios e corrigir satisfatoriamente os resultados, imaginou-se avaliar as seguintes situações de umidade:

- Madeira condicionada em um clima padrão (temperatura $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ e umidade relativa do ar de $65\% \pm 5\%$), que acarreta um teor de umidade muito próximo do de referência ($U \cong 12\%$);
- Madeira seca ao ar em condições gerais de laboratório (apenas protegida das intempéries) por ser um padrão prático de fácil obtenção;
- Madeira saturada em água, para representar elevados teores de umidade e permitir o controle de todos os ensaios de maneira uniforme.

Para obter corpos-de-prova “gêmeos”, o mais parecido possível, eles foram retirados de uma mesma barra (mesmos anéis de crescimento) e em sequência (material mais próximo possível). De cada espécie selecionada foi coletada uma árvore, na localidade indicada anteriormente na Tabela 2, da qual foi retirado um toro, na região do DAP (diâmetro à altura do peito, ou seja, a 1,30 m da linha de afloramento junto ao solo), do qual foi retirada uma prancha diametral (escolhida aleatoriamente). Desta prancha, cujas direções principais eram bem definidas, foram retiradas várias barras (função do diâmetro do toro) e escolhida uma delas, aleatoriamente, para o desdobro dos corpos-de-prova. Na Figura 4 são apresentadas as dimensões dos corpos-de-prova e o esquema de desdobro do toro coletado. O restante do material coletado foi aproveitado em outros trabalhos.



Foram utilizados, para o ensaio de densidade aparente: um paquímetro digital, com sensibilidade de 0,01 mm, utilizado para avaliar as dimensões do corpo-de-prova; uma balança analítica, com sensibilidade de 0,01g, para avaliar as massas; e uma estufa de secagem, que mantinha a temperatura em $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$, para secagem dos corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova de cada espécie, de dimensões 2 cm x 3 cm x 5 cm respectivamente nas direções tangencial, radial e axial, foram imersos em água destilada até completa saturação (madeira saturada em água), ou seja, até que se tivesse obtido variação de massa inferior a 0,5% em um intervalo de pelo menos 6 horas.

Em seguida os corpos-de-prova, saturados em água, foram separados em três grupos. Cada grupo continha um corpo-de-prova de cada espécie selecionada. Para um dos grupos, as dimensões e massas foram avaliadas, nesta condição de umidade, a fim de obter as densidades aparentes na situação saturada.

Os dois grupos restantes foram colocados para secar em ambientes distintos. Um deles em ambiente climatizado e outro nas condições gerais de

laboratórios (apenas protegido das intempéries).

Os corpos-de-prova, desses grupos, tiveram suas massas avaliadas diariamente até se constatar constância de massa (variação inferior a 0,5% em um intervalo de pelo menos 6 horas). Em seguida, foram avaliadas as massas e as dimensões dos corpos-de-prova, desses grupos, para obter as densidades aparentes nas situações condicionada (grupo seco em ambientes climatizado) e seca ao ar (grupo seco nas condições gerais de laboratório).

Finalmente, os corpos-de-prova foram colocados em estufa de secagem, com temperatura de $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$, até que se obtivesse variação de massa inferior a 0,5%, em um intervalo de pelo menos 6 horas. Nessa condição os corpos-de-prova foram considerados completamente secos ($U=0\%$) e suas massas e dimensões (secas) foram avaliadas, para obtenção do teor de umidade, em cada situação avaliada, e do volume seco de cada corpo-de-prova.

Os procedimentos e descrição dos ensaios de densidade aparente, utilizados neste trabalho, foram os descritos no item B.6 da NBR 7190, da ABNT (1997). Já para obtenção do teor de umidade, foram utilizados os métodos descritos no item B5 da referida norma.

Para a análise estatística e interpretação dos resultados, inicialmente todos os resultados dos ensaios foram reportados ao teor de umidade de referência de 12%.

Tanto na NBR 7190, da ABNT (1997), como em seu projeto de revisão da ABNT (2011), foi omitido o procedimento para reportar os resultados dos ensaios, em corpos-de-prova pequenos e isentos de defeito, de densidade aparente. Assim, para reportar os resultados de densidade aparente ao teor de umidade de referência foram utilizadas quatro maneiras: na primeira foram utilizadas as Equações 1 a 3, já validadas para o intervalo de umidade entre 10 e 20% por Logsdon (1998); na segunda foi utilizada a Equação 4, apresentada por Brochard (1960); na terceira foi utilizado o Diagrama de Kollmann, apresentado na Figura 1; e, na quarta foram utilizados os diagramas das Figuras 2 ou 3, conforme o sentido da variação de umidade a ser corrigida, apresentados por Logsdon (2004).

Optou-se por utilizar como variável, para a análise estatística, o erro relativo cometido ao reportar o resultado de ensaio à umidade de referência. Essa escolha se deve, basicamente, a duas razões: o erro relativo já é um parâmetro de aceitação/rejeição da validade do procedimento adotado e comparar o erro relativo médio tem sentido prático, quanto menor o erro relativo, em média, melhor o procedimento adotado.

Para cada tratamento, o erro relativo considerado foi em relação ao valor obtido a partir da situação “madeira condicionada”, já corrigido para o teor de umidade de referência, por ser, ao menos teoricamente, o resultado mais próximo do real.

Dessa forma, os tratamentos utilizados na análise estatística corresponderão a erros relativos correspondentes à maneira de reportar o resultado à umidade de referência em cada situação de umidade avaliada. A descrição de cada tratamento será apresentada no

item “Resultados e discussão”, com o intuito de deixar mais clara a discussão. O número de espécies, utilizadas no trabalho, corresponde ao número de repetições dos tratamentos.

As ferramentas estatísticas utilizadas foram a “análise de variâncias (ANOVA)”, que identifica a existência de médias diferentes, e o “teste de Tukey”, que agrupa as médias consideradas homogêneas.

Evidentemente também foi utilizado como critério a ordem de grandeza do erro cometido, não se aceitando erros relativos superiores a 10%. Para aplicação destas análises foi utilizado o aplicativo Microsoft Excel.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para acompanhamento dos ensaios de densidade aparente foi utilizada uma planilha, na qual foram registradas as dimensões e as massas do corpo-de-prova no instante do ensaio (úmido) e após completa secagem em estufa (seco).

Com estes valores foi possível obter: a densidade aparente no instante do ensaio (ρ_U); o teor de umidade no instante do ensaio (U); a variação volumétrica para variação de umidade entre U% e 0% (ΔV); e a variação volumétrica por unidade de umidade (δ_V).

Os resultados dos ensaios de densidade aparente foram corrigidos para o teor de umidade de referência, usando quatro diferentes maneiras: na primeira foi utilizada a Equação 1, já validada para o intervalo de umidade entre 10 e 20% por Logsdon (1998); na segunda foi utilizada a Equação 4, apresentada por Brochard (1960); na terceira foi utilizado o Diagrama de Kollmann, apresentado na Figura 1; e, na quarta foram utilizados os diagramas das Figuras 2 ou 3, conforme o sentido da variação de umidade a ser corrigida, apresentados por Logsdon (2004). Nas Tabelas 3 a 5 são apresentados estes resultados.

A partir dos dados, reportados a 12% de umidade, da densidade aparente (Tabelas 3 a 5) foram obtidos os valores dos erros relativos, tomando por base a

correção feita pelas Equações 1 a 3, já validada para o intervalo de umidade entre 10 e 20% por Logsdon (1998), dos corpos-de-prova condicionados.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de densidade aparente dos corpos-de-prova saturados em água

Espécies (Nome vulgar)	Resultados dos ensaios			Densidades aparente a 12% ($\rho_{ap,12\%}$), em g/cm ³ , reportadas por:			
	U (%)	δ_v	ρ_U (g/cm ³)	Logsdon (1998)	Brochard (1960)	Diag. de Kollmann	Logsdon (2004)
Ipê-amarelo	27,7	0,604	1,202	1,127	1,054	1,210	1,050
Itaúba	30,6	0,330	0,876	0,767	0,752	0,835	0,763
Guariúba	55,1	0,151	0,982	0,623	0,709	0,790	0,750
Cedro-marinheiro	61,6	0,259	1,018	0,644	0,705	0,785	0,755
Pau-d'óleo	50,7	0,229	1,215	0,852	0,903	1,020	0,970
Angelim-amargoso	76,5	0,204	0,993	0,483	0,630	0,710	0,670
Cupiúba	55,9	0,232	1,148	0,761	0,825	0,930	0,850
Cedro-rosa	131,4	0,080	0,843	-0,083	0,408	0,610	0,580
Marupá	179,2	0,053	0,930	-0,543	0,373	0,750	0,650
Pau-de-balsa	268,3	0,047	0,932	-1,343	0,283	0,765	0,630

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de densidade aparente dos corpos-de-prova secos ao ar

Espécies (Nome vulgar)	Resultados dos ensaios			Densidades aparente a 12% ($\rho_{ap,12\%}$), em g/cm ³ , reportadas por:			
	U (%)	δ_v	ρ_U (g/cm ³)	Logsdon (1998)	Brochard (1960)	Diag. de Kollmann	Logsdon (2004)
Ipê-amarelo	13,3	0,720	1,136	1,132	1,123	1,130	1,125
Itaúba	15,9	0,402	0,805	0,786	0,778	0,799	0,799
Guariúba	13,1	0,527	0,726	0,722	0,719	0,720	0,715
Cedro-marinheiro	14,7	0,562	0,774	0,765	0,756	0,761	0,770
Pau-d'óleo	14,9	0,474	0,966	0,951	0,941	0,945	0,950
Angelim-amargoso	16,3	0,482	0,701	0,686	0,675	0,680	0,690
Cupiúba	17,7	0,562	0,891	0,869	0,848	0,870	0,870
Cedro-rosa	19,6	0,291	0,456	0,431	0,427	0,420	0,410
Marupá	14,1	0,388	0,394	0,389	0,387	0,380	0,380
Pau-de-balsa	13,8	0,269	0,313	0,309	0,308	0,305	0,300

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de densidade aparente dos corpos-de-prova condicionados

Espécies (Nome vulgar)	Resultados dos ensaios			Densidades aparente a 12% ($\rho_{ap,12\%}$), em g/cm ³ , reportadas por:			
	U (%)	δ_v	ρ_U (g/cm ³)	Logsdon (1998)	Brochard (1960)	Diag. de Kollmann	Logsdon (2004)
Ipê-amarelo	11,6	0,767	1,126	1,127	1,130	1,132	1,130
Itaúba	10,9	0,319	0,792	0,798	0,800	0,800	0,800
Guariúba	11,6	0,501	0,724	0,725	0,726	0,725	0,727
Cedro-marinheiro	10,6	0,434	0,772	0,778	0,782	0,780	0,780
Pau-d'óleo	10,3	0,425	0,951	0,960	0,966	0,960	0,965
Angelim-amargoso	12,2	0,594	0,680	0,680	0,679	0,680	0,678
Cupiúba	11,6	0,400	0,888	0,890	0,891	0,890	0,890
Cedro-rosa	12,7	0,306	0,437	0,435	0,434	0,430	0,425
Marupá	12,7	0,400	0,391	0,389	0,388	0,389	0,389
Pau-de-balsa	12,8	0,470	0,303	0,302	0,301	0,299	0,295

A forma de obtenção de cada erro relativo, que varia com a situação da umidade (madeira saturada, seca ao ar e condicionada) e a maneira de reportar os

resultados a 12% (Equações 1 a 3, Equação 4, Diagrama de Kollmann e os diagramas propostos por Logsdon em 2004), corresponde a um tratamento da análise

estatística, na variável “erro relativo”. Estes tratamentos são apresentados a seguir:

T₁ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira condicionada e reportada à umidade de referência pelas Equações 1;

T₂ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira condicionada e reportada à umidade de referência pela Equação 2;

T₃ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira condicionada e reportada à umidade de referência pelo Diagrama de Kollmann (Figura 1);

T₄ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira condicionada e reportada à umidade de referência por um dos diagramas das Figuras 2 ou 3 (conforme o sentido da variação de umidade a ser corrigida);

T₅ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira seca ao ar, apenas protegida das intempéries, e reportada à umidade de referência pela Equação 1;

T₆ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira seca ao ar, apenas protegida das intempéries, e reportada à umidade de referência pela Equação 2;

T₇ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira seca

ao ar, apenas protegida das intempéries, e reportada à umidade de referência pelo Diagrama de Kollmann (Figura 1);

T₈ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira seca ao ar, apenas protegida das intempéries, e reportada à umidade de referência por um dos diagramas das Figuras 2 ou 3 (conforme o sentido da variação de umidade a ser corrigida);

T₉ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira saturada em água e reportada à umidade de referência pela Equação 1;

T₁₀ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira saturada em água e reportada à umidade de referência pela Equação 2;

T₁₁ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira saturada em água e reportada à umidade de referência pelo Diagrama de Kollmann (Figura 1);

T₁₂ - Erro relativo da densidade aparente obtida em ensaio de madeira saturada em água e reportada à umidade de referência por um dos diagramas das Figuras 2 ou 3 (conforme o sentido da variação de umidade a ser corrigida).

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os erros relativos, para a densidade aparente, obtido nos diversos tratamentos.

Tabela 6 – Erros relativos obtidos ao reportar a densidade aparente a 12% de umidade, nos tratamentos T₁ a T₆

Espécies (Nome vulgar)	Erro relativo, em %, nos tratamentos:					
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
Ipê-amarelo	0,00	-0,26	-0,42	-0,24	-0,43	0,35
Itaúba	0,00	-0,24	-0,30	-0,30	1,47	2,52
Guariúba	0,00	-0,16	0,00	-0,27	0,41	0,86
Cedro-marinheiro	0,00	-0,46	-0,22	-0,22	1,76	2,93
Pau-d'óleo	0,00	-0,56	0,01	-0,51	0,96	1,96
Angelim-amargoso	0,00	0,08	-0,03	0,27	-0,85	0,66
Cupiúba	0,00	-0,11	-0,05	-0,05	2,36	4,72
Cedro-rosa	0,00	0,13	1,09	2,24	0,84	1,85
Marupá	0,00	0,21	-0,02	-0,02	0,00	0,56
Pau-de-balsa	0,00	0,29	1,03	2,35	-2,19	-1,91
Médias	0,00	-0,11	0,11	0,32	0,43	1,45

Tabela 7 - Erros relativos obtidos ao reportar a densidade aparente a 12% de umidade, nos tratamentos T₇ a T₁₂

Espécies (Nome vulgar)	Erro relativo, em %, nos tratamentos:					
	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂
Ipê-amarelo	-0,24	0,20	-0,01	6,49	-7,34	6,86
Itaúba	-0,17	-0,17	3,83	5,78	-4,69	4,40
Guariúba	0,69	1,38	14,11	2,18	-8,96	-3,45
Cedro-marinheiro	2,22	1,07	17,31	9,37	-0,86	2,99
Pau-d'óleo	1,57	1,05	11,23	5,98	-6,24	-1,03
Angelim-amargoso	-0,03	-1,50	28,92	7,29	-4,44	1,44
Cupiúba	2,20	2,20	14,44	7,28	-4,55	4,44
Cedro-rosa	3,39	5,69	119,02	6,13	-40,32	-33,42
Marupá	2,30	2,30	239,71	4,15	-92,84	-67,12
Pau-de-balsa	-0,96	0,70	544,63	6,20	-153,23	-108,54
Médias	1,10	1,29	99,32	6,08	-32,35	-19,34

Observa-se nas Tabelas 6 e 7 uma exagerada amplitude nos valores do erro relativo, que variam desde -153,23% até 544,63%. Isto implica em exagerada variabilidade de resultados que tornará a análise estatística muito tolerante e, portanto, na necessidade de maior rigor de resultados, é recomendável refinar a análise estatística.

Também se observa nas Tabelas 6 e 7, que os tratamentos T₁ até T₈ apresentam erros relativos compatíveis com a prática da engenharia, que usualmente aceita erro de até 10%. Isto indica que todos os procedimentos avaliados, para reportar a densidade aparente ao teor de umidade de referência, podem ser aplicados em corpos-de-prova condicionados ou secos ao ar.

O erro relativo máximo de 9,37% observado no tratamento T₁₀, na Tabela 7, muito próximo ao limite de erro usualmente aceito na prática da engenharia, indica a possibilidade de utilizar, com cautela, a Equação 2, apresentada por Brochard (1960), para reportar valores de madeira com elevado teor de umidade (U > 25%) a seu valor de referência de 12%. Já os exagerados erros

observados nos tratamentos T₉ (544,63%), T₁₁ (-153,23%) e T₁₂ (-108,54%), indicam que os demais procedimentos avaliados, para reportar a densidade aparente ao teor de umidade de referência, não devem ser aplicados em corpos-de-prova com elevado teor de umidade (U > 25%).

Fazendo-se a análise de variância da variável “erro relativo” dos tratamentos T₁ a T₁₂ (Tabelas 6 e 7), obtém-se o quadro da ANOVA (*Analysis of Variance*), apresentado na Tabela 8, na qual se percebe que ao menos uma das médias difere das demais ($F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$).

Para separar os tratamentos em grupos de média homogênea aplicou-se o Teste de Tukey. Desta aplicação foram obtidos: a amplitude total estudentizada, ao nível de significância de 5%, $q(5\%, 12, 108) \cong q(5\%, 12, 120) = 4,71$; o quadrado médio dos resíduos, $QM_{\text{res.}} = 2858,3$; o número de repetições, $r = 10$; a diferença mínima significativa, $\Delta = 79,63$. Resultados que possibilitam separar os grupos de média homogêneas, representados por letras iguais na Tabela 9.

Tabela 8 – Quadro de ANOVA, para a densidade aparente, utilizando os 12 tratamentos

Fonte da variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrados Médios (QM)	F calculado (F _{calc})	F crítico (F _{tab})
Entre grupos (tratamentos)	110437,0	11	10039,7	3,5125	1,8784
Dentro dos grupos (resíduos)	308696,4	108	2858,3		
Total	419133,4	119			

Tabela 9 - Grupos de médias homogêneas resultantes do Teste de Tukey, para a densidade aparente, utilizando os 12 tratamentos

Tratamentos	Erro relativo médio (%)	Grupos de médias homogêneas
T ₉	99,32	a
T ₁₀	6,08	b
T ₆	1,45	b
T ₈	1,29	b
T ₇	1,10	b
T ₅	0,43	b
T ₄	0,32	b
T ₃	0,11	b
T ₁	0,00	b
T ₂	-0,11	b
T ₁₂	-19,34	b
T ₁₁	-32,35	b

Observa-se na Tabela 9 que o tratamento T₉ foi separado dos demais, uma vez que o erro relativo médio (99,32%) é muito superior ao dos demais tratamentos. Retirando-se este tratamento da análise, diminui-se a variabilidade dos dados, refinando-se a análise, ou seja, verificando se o grupo indicado pela letra "b", na Tabela 9, não se desdobra em outros. Desta nova análise obtém-se o quadro da ANOVA, apresentado na Tabela 10, no qual se percebe que ao menos uma das médias difere das demais ($F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$).

Tabela 10 – Quadro de ANOVA, para a densidade aparente, utilizando os tratamentos do grupo b na Tabela 9

Fonte da variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrados Médios (QM)	F calculado (F_{calc})	F crítico (F_{tab})
Entre grupos (tratamentos)	13097,93	10	1309,8	3,4661	1,9277
Dentro dos grupos (resíduos)	37410,65	99	377,9		
Total	50508,58	109			

Para separar os tratamentos em grupos de média homogênea aplicou-se o Teste de Tukey. Desta aplicação foram obtidos: a amplitude total estudentizada, ao nível de significância de 5%, $q(5\%, 11, 99) \cong q(5\%, 11, 120) = 4,64$; o quadrado médio dos resíduos, $QM_{\text{res.}} = 377,9$; o número de repetições, $r = 10$; a diferença mínima significativa, $\Delta = 29,52$. Resultados que possibilitam separar os grupos de média homogêneas, representados por letras iguais na Tabela 11.

Observa-se na Tabela 11 que os tratamentos T₁₁ e T₁₂ formaram um grupo separado dos demais, uma vez que os erros relativos médios (-19,34% e 32,35%) são, em valor absoluto, muito superior ao dos demais tratamentos. Retirando-se este tratamento da análise, diminui-se a variabilidade dos dados, refinando-se a análise, ou seja, verificando se o grupo indicado pela letra "a", na Tabela 11, não se desdobra em outros. Desta nova análise obtém-se o quadro da ANOVA, apresentado na Tabela 12, no qual se

percebe que ao menos uma das médias ainda difere das demais ($F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$).

Tabela 11 - Grupos de médias homogêneas resultantes do Teste de Tukey, para a densidade aparente, utilizando os tratamentos do grupo b na Tabela 9

Tratamentos	Erro relativo médio (%)	Grupos de médias homogêneas
T ₁₀	6,08	a
T ₆	1,45	a
T ₈	1,29	a
T ₇	1,10	a
T ₅	0,43	a
T ₄	0,32	a
T ₃	0,11	a
T ₁	0,00	a
T ₂	-0,11	a
T ₁₂	-19,34	a b
T ₁₁	-32,35	b

Para separar os tratamentos em grupos de média homogênea aplicou-se o Teste de Tukey. Desta aplicação foram obtidos: a amplitude total estudentizada, ao nível de significância de 5%, $q(5\%, 9, 81) \cong q(5\%, 9, 120) = 4,47$; o quadrado médio dos resíduos, $QM_{\text{res.}} = 1,7615$; o número de

repetições, $r = 10$; a diferença mínima significativa, $\Delta = 1,88$. Resultados que possibilitam separar os grupos de média

homogêneas, representados por letras iguais na Tabela 13.

Tabela 12 – Quadro de ANOVA, para a densidade aparente, utilizando os tratamentos do grupo a na Tabela 11

Fonte da variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrados Médios (QM)	F calculado (F_{calc})	F crítico (F_{tab})
Entre grupos (tratamentos)	296,305	8	37,038	21,027	2,0549
Dentro dos grupos (resíduos)	142,679	81	1,7615		
Total	438,984	89			

Tabela 13 - Grupos de médias homogêneas resultantes do Teste de Tukey, para a densidade aparente, utilizando os tratamentos do grupo a na Tabela 11

Tratamentos	Erro relativo médio (%)	Grupos de médias homogêneas
T ₁₀	6,08	a
T ₆	1,45	b
T ₈	1,29	b
T ₇	1,10	b
T ₅	0,43	b
T ₄	0,32	b
T ₃	0,11	b
T ₁	0,00	b
T ₂	-0,11	b

Assim, depois de seguidos refinamentos do teste de Tukey, é possível separar os seguintes grupos de médias homogêneas: T₁ a T₈; T₁₀; T₁₁ e T₁₂; T₉. Estes resultados ratificam as observações feitas anteriormente ao discutir os resultados dos erros relativos observados nas Tabelas 6 e 7.

CONCLUSÕES

Para reportar adequadamente a densidade aparente ao teor de umidade de referência, de 12%, inicialmente os corpos-de-prova devem ser condicionados em clima padrão ou secos ao ar. Em seguida deve ser realizado o ensaio de densidade aparente, avaliando-se, além dos parâmetros típicos do ensaio, dimensões e massas do corpo-de-prova, no instante do ensaio e após completa secagem em estufa, e, finalmente, aplicar uma das maneiras de reportar o resultado à umidade de referência apresentadas a seguir:

- Aplicar a correção proposta por Logsdon (1998), apresentada anteriormente nas Equações 1 a 3;
- Aplicar a correção adaptada da descrita por Brochard (1960), apresentada anteriormente na Equação 4;
- Utilizar o Diagrama de Kollmann, apresentado anteriormente na Figura 1, e fazer a correção graficamente;
- Utilizar os diagramas propostos por Logsdon (2004), apresentados anteriormente nas Figuras 2 e 3, e fazer a correção, considerando o sentido de variação da umidade, graficamente.

Na necessidade de obter rapidamente a densidade aparente, o ensaio pode ser feito em madeira úmida, com umidade superior a 25%, para, em seguida, aplicar a correção adaptada da descrita por Brochard (1960), apresentada anteriormente na Equação 4. Deve-se ressaltar que este procedimento deve ser utilizado com cautela, pois foram observados, na amostra avaliada, erros relativos de até 9,37%, portanto, muito próximos do limite usualmente aceito, de 10%, na prática da engenharia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR**

7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto de Revisão da NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira.** Rio de Janeiro, 2011.

BROCHARD, F. X. **Bois et charpente em bois (Le matériau et son utilisation).** Collection de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics. Paris. Éditions Eyrolles, 1960.

CALIL JÚNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira.** 1. ed. Barueri: Manole Ltda., v. 1, 2002.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ JR. W.A. **Principles of wood science and technology.** vol. I Solid Wood. Reprint. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag. 1984.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira.** 1998. 174p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos. 1998.

LOGSDON, N. B. Variação da densidade aparente da madeira com sua umidade, modelagem teórico experimental. **Madeira Arquitetura e Engenharia** (CD-ROM), São Carlos, SP, v. 12, n.12, p. artigo 5, 2004.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z. Modelos para especificação das curvas dos diagramas de retrações e inchamentos. **Madeira Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, SP., v. 3, n.3, p. artigo 3, 2000.

LOGSDON, N. B.; JESUS. J. M. H. **Caracterização de madeira.** Programa de Pós-graduação em Engenharia da Edificação e Ambiental, Faculdade de

Arquitetura, Engenharia e Tecnologia – Universidade Federal de Mato Grosso. 2013. 222p

SHIMOYAMA, V. R. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* sp.** 1990. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1990.