

Método do Máximo Teor de Umidade aplicado à Determinação de Densidade Básica da Madeira do Eucalipto

CELSE EDMUNDO B. FOELKEL
AUGUSTO FERNANDES MILANEZ
CARLOS ALBERTO BUSNARDO
Rio Grande — Cia. de Celulose do Sul — Riocell

Summary

First, the theoretical aspects of the method are discussed. The reason for this paper is that the method has become very popular in the last ten years, however, some mistakes in using it are responsible to result in wrong estimation of the wood density. The method is based in two assumptions: a) the wood, when tested, is in its maximum moisture content; b) density of "wood substance" is considered to be equal to $1,53 \text{ g/cm}^3$. The authors discuss, with theoretical and practical considerations, the ways to avoid wrong utilization of the method, specially for eucalyptus wood.

Resumo

Inicialmente é apresentada a conceituação e bases teóricas do método do máximo teor de umidade para determinação da densidade básica de madeiras. O presente trabalho se fez necessário para servir de esclarecimento sobre a maneira correta de se utilizar o método, para não se criar o problema de estimar erroneamente a densidade básica. Para a aplicação do método são tomadas como verdadeiras duas suposições sobre as quais se alicerça a sua precisão: a) a madeira, quando no momento do teste, encontra-se no seu máximo teor de umidade; b) a densidade da "substância madeira" é admitida como igual a $1,53 \text{ g/cm}^3$. Os autores discutem, com exatidão teórica e prática, em como evitar os erros oriundos de discórdias para cumprir essas suposições, especialmente para as madeiras de eucalipto.

INTRODUÇÃO

Desde que o método do máximo teor de umidade passou a ser usado no estudo de madeiras em nosso país, o que ocorreu no início dos anos 70's, através de pesquisa de FOELKEL, BRASIL & BARRICHELO (1971), sua utilização tem-se difundido bastante. Essa crescente aceitação do método gerou uma preocupação, que seria a confirmação de que o método estivesse sendo utilizado corretamente. Frente à facilidade do procedimento metodológico, os autores têm observado que, em algumas situações, pesquisadores não afeitos à teoria do método, vêm utilizando-o erroneamente. A utilização do método se baseia em duas suposições básicas que precisam ser cumpridas para que corretos resultados sejam obtidos: a) a madeira precisa estar no seu máximo teor de umidade para a pesagem do material saturado, b) a densidade da "substância madeira" deve ser de aproximadamente $1,53 \text{ g/cm}^3$. Para que a primeira condição seja preenchida, deve-se trabalhar com fragmentos de madeira de dimensões reduzidas. Por outro lado, cada espécie de madeira apresenta variada penetrabilidade pela água. A penetrabilidade varia inclusive dentro da espécie, entre árvores e dentro da mesma árvore. Fica portanto difícil a pré-fixação de dimensões máximas dos fragmentos de madeira e do tempo de imersão para saturação. Já a densidade da "substância madeira" costuma variar, conforme inúmeros autores, entre $1,50$ a $1,56 \text{ g/cm}^3$, sendo razoável se assumir um valor médio de $1,53 \text{ g/cm}^3$.

A finalidade desse trabalho foi a de fornecer elementos aos usuários do método, especialmente para aqueles que o utilizam para madeiras de eucalipto, de forma que eles possam melhor entender suas bases teóricas e aplicá-lo corretamente.

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Em 1954, baseando-se na relação entre a densidade básica e o máximo teor de umidade da madeira, KEYLWERTH desenvolveu um método que depois foi empregado com sucesso por SMITH (1954,1955) e outros autores. A utilização do método para cavacos de madeira foi motivo de estudos por FOELKEL, BRASIL & BARRICHELO (1971) e os resultados foram bastante satisfatórios.

A equação fundamental para a determinação da densidade básica pelo método do máximo teor de umidade é a seguinte:

$$d_b = \frac{1}{\frac{P_t}{P_s} - 0,346}$$

onde:

d_b = densidade básica da madeira;

P_t = peso ao ar dos cavacos saturados;

P_s = peso absolutamente seco dos cavacos, conseguido através secagem em estufa a $105 \pm 39^\circ\text{C}$ até peso constante.

Esta equação origina-se de um simples balanço de material estabelecido em relação a um bloco de madeira saturado com água.

1. Seja portanto, um bloco de madeira totalmente saturado com água, ou melhor, em seu máximo teor de umidade. A hipótese mais importante do método é que todos os espaços vazios da madeira encontram-se ocupados por água, de forma que no bloco saturado em questão só existam água e "substância madeira".

2. Seja:

P_a = peso da água existente no bloco;

P_s = peso da "substância madeira" existente no bloco;

P_t = peso total do bloco;

V_a = volume de água existente no bloco;

V_m = volume de madeira no bloco;

V_t = volume total do bloco de madeira úmida.

3. Sabe-se que:

3.1. $P_a + P_s = P_t$

e que

3.2. $V_a + V_m = V_t$

4. Dividindo-se ambos os termos da equação 3.2. por P_δ e la não se altera matematicamente.

$$\frac{V_a + V_m}{P_\delta} = \frac{V_t}{P_\delta}$$

$$\frac{V_a}{P_\delta} + \frac{V_m}{P_\delta} = \frac{V_t}{P_\delta}$$

5. Tomando-se a densidade da água como igual a 1, nas condições em que se realiza o experimento, o volume de água equivalerá ao seu peso.

Portanto:

$$\frac{P_a}{P_\delta} + \frac{V_m}{P_\delta} = \frac{V_t}{P_\delta}$$

6. Entretanto, tem-se que:

$$6.1. \frac{P_a}{P_\delta} = \frac{P_t - P_\delta}{P_\delta} = \frac{P_t}{P_\delta} - 1$$

$$6.2. \frac{V_m}{P_\delta} = \frac{1}{d_m}$$

onde d_m é a densidade da "substância madeira".

Admitindo-se que a densidade média da "substância madeira" é 1,53, tem-se

$$\frac{V_m}{P_\delta} = \frac{1}{1,53} = 0,654$$

$$6.3. \frac{V_t}{P_\delta} = \frac{1}{d_b}$$

7. Substituindo-se os valores obtidos no item 6. na equação do item 5.:

$$\frac{1}{d_b} = \frac{P_t}{P_\delta} - 1 + 0,654$$

$$\frac{1}{d_b} = \frac{P_t}{P_\delta} - 0,346$$

$$d_b = \frac{1}{\frac{P_t}{P_\delta} - 0,346}$$

O mesmo desenvolvimento matemático permite a obtenção de outros dois parâmetros de avaliação em determinações de qualidade da madeira: teor de vazios da madeira e volume de um fragmento de madeira saturado em água.

Teor de vazios da madeira

Muitas vezes, torna-se desejável ao pesquisador conhecer o volume total de vazios ou cavidades que a madeira possui. Com o presente procedimento, é possível se estimar, de forma aproximada, o volume porcentual de vazios da madeira em relação ao volume saturado em água da mesma. Por se tratar de um método rápido e empírico, não serão feitas distinções entre as frações de água

adsorvida e absorvida pela madeira. Estas duas frações são bem conhecidas por se caracterizarem por diferentes pesos específicos.

A metodologia de análise é a mesma daquela usada para a determinação da densidade básica: deve-se obter o peso da amostra no seu máximo teor de umidade e o peso da madeira ou "substância a madeira". A diferença entre peso úmido total e peso seco é o peso de água contida nos vazios. Se admitirmos que a densidade da água é 1, nas condições de realização do experimento, então o peso de água nos vazios será igual ao volume de vazios.

Tem-se:

$$P_a = P_t - P_\delta$$

$$V_a = P_t - P_\delta \text{ (volumes dos vazios em cm}^3\text{)}$$

8. Cálculo do volume total da madeira saturada (V_t)

Sabe-se que:

$$8.1. V_a + V_m = V_t$$

e que:

$$8.2. V_a = P_a$$

$$8.3. V_m = \frac{P_\delta}{d_m}$$

Logo:

$$P_a + \frac{P_\delta}{d_m} = V_t$$

$$8.4. P_a + \frac{P_\delta}{1,53} = V_t$$

Entretanto

$$8.5. P_a = P_t - P_\delta$$

Substituindo-se 8.5. em 8.4.

$$P_t - P_\delta + \frac{P_\delta}{1,53} = V_t$$

$$8.6. V_t = P_t - 0,346 P_\delta$$

9. Cálculo do teor volumétrico porcentual de vazios, base madeira saturada:

$$\text{Teor de vazios (\%)} = \frac{P_a}{P_t - 0,346 P_\delta} \times 100$$

$$\text{Teor de vazios (\%)} = \frac{P_t - P_\delta}{P_t - 0,346 P_\delta} \times 100$$

Volume de amostra de madeira saturada

É comum dentro da ciência e tecnologia da madeira, a necessidade de se conhecer o volume de amostras de madeiras de formas não geométricas. Esse fato ocorre principalmente para cavacos de madeiras e amostras de pequenas dimensões obtidas dos diferentes anéis de crescimento ou dos lenhos que os compõem. A determinação do chamado volume da madeira saturada em água pode ser obtida através do método da balança hidrostática e, na au-

sência da mesma, pela equação 8.6.

$$V_t = P_t - 0,346 P_\delta$$

Relação entre a umidade da madeira no ponto de máxima saturação e sua densidade básica

10. Sabe-se que:

$$V_t = V_a + V_m$$

11. Dividindo-se ambos os termos da equação do item 10. por P_δ , ela não se altera matematicamente.

$$\frac{V_t}{P_\delta} = \frac{V_a}{P_\delta} + \frac{V_m}{P_\delta}$$

12. Tem-se que

$$12.1. \frac{V_t}{P_\delta} = \frac{1}{d_b}$$

$$12.2. \frac{V_a}{P_\delta} = \frac{P_a}{P_\delta} = U$$

onde U é a umidade da madeira, expressa sobre madeira absolutamente seca (expressão absoluta não porcentual)

$$12.3. \frac{V_m}{P_\delta} = \frac{1}{d_m}$$

onde d_m é a densidade da "substância madeira", igual a 1,53.

13. A equação do item 11. ficará transformada em:

$$\frac{1}{d_b} = U + \frac{1}{1,53}$$

$$\frac{1}{d_b} = U + 0,654$$

14. Seja

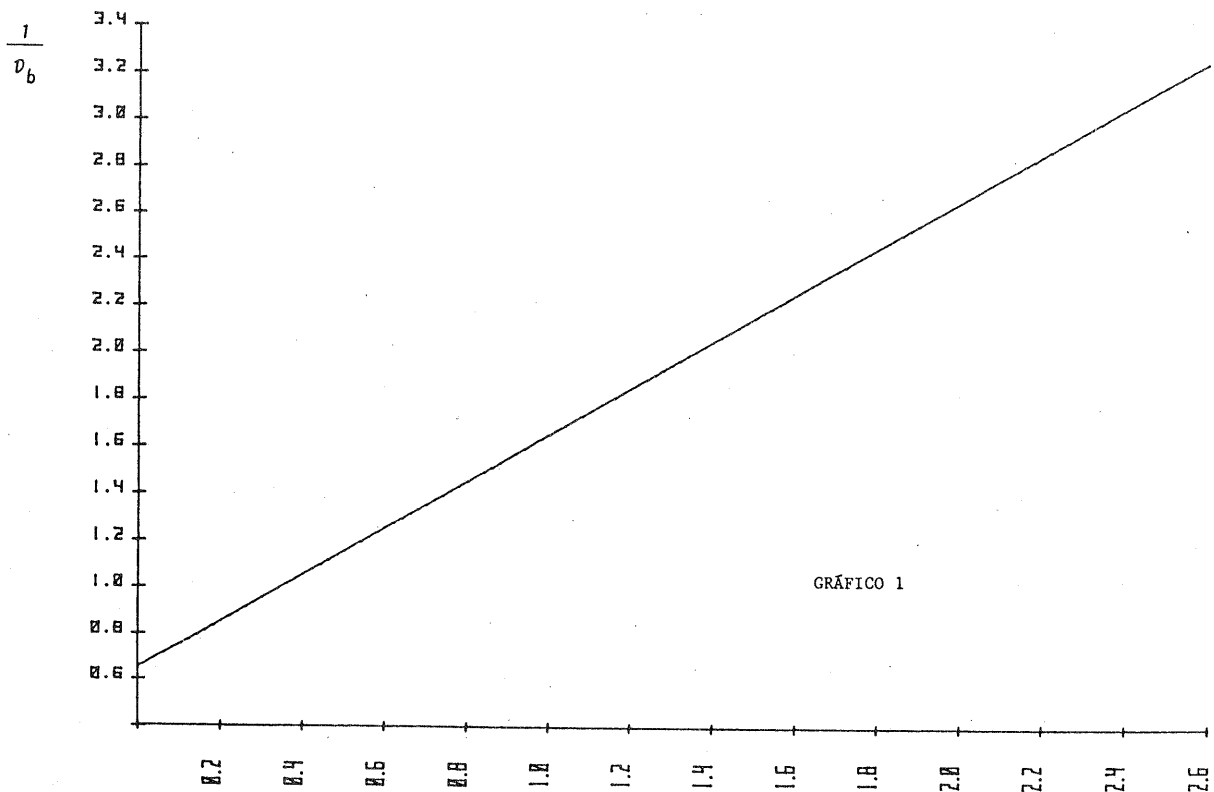
$$\frac{1}{d_b} = y$$

15. A equação linear

$$y = U + 0,654$$

relaciona a umidade da madeira no seu ponto de máxima saturação com o inverso da densidade básica. O gráfico a seguir mostra o tipo de relação encontrado.

16. Conclui-se que, conforme o teor de máxima umidade da madeira decresce, a densidade básica aumenta até atingir



u

gir um ponto máximo, quando $U = 0$. Nesse ponto,

$$\frac{1}{d_b} = 0,654 \text{ e } d_b = 1,53, \text{ ou seja, a densidade básica}$$

ca igualar-se-ia à densidade da "substância madeira". Para que isso acontecesse, não deveria existir nenhum vazio na madeira que pudesse ser ocupado por água. A madeira deveria ser então uma substância totalmente sólida e desprovida de vazios.

CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

Conforme mencionado anteriormente, as duas suposições básicas que precisam ser cumpridas para perfeita execução do método são:

a) Densidade básica da "substância madeira" aproximadamente igual a $1,53 \text{ g/cm}^3$.

Para a comprovação se a densidade da "substância madeira" obedecia ao valor teórico de $1,53 \text{ g/cm}^3$, tomaram-se amostras de madeira de *Eucalyptus saligna*, *E. grandis*, *E. citriodora* e *E. paniculata*. Nessas amostras, determinou-se picnometricamente a densidade da "substância madeira", usando-se acetona, ao invés de água, como substância de saturação. A acetona, sendo menos polar que a água, tende a ocupar melhor os vazios da madeira e o resultado obtido é mais preciso.

Os resultados encontrados foram os seguintes:

<i>Eucalyptus saligna</i> ..:	$1,532 \text{ g/cm}^3$
<i>Eucalyptus grandis</i> ..:	$1,533 \text{ g/cm}^3$
<i>Eucalyptus citriodora</i> ..:	$1,540 \text{ g/cm}^3$
<i>Eucalyptus paniculata</i> ..:	$1,526 \text{ g/cm}^3$
Média	$1,533 \text{ g/cm}^3$

Como conseqüência, pode-se considerar que a condição de se admitir a densidade da "substância madeira" igual a $1,53 \text{ g/cm}^3$ deve estar sendo cumprida, pois mesmo espécies tão diferentes quanto à sua densidade básica, como *E. grandis* e *E. paniculata*, possuíam densidade da "substância madeira" próximas a $1,53 \text{ g/cm}^3$.

b) Madeira completamente saturada no momento do teste.

A completa saturação da amostra por água é condição essencial para o sucesso do método. Recomenda-se especial cuidado em usar fragmentos de madeira pequenos, que sejam mais aptos a terem seus vazios ocupados por água. A aceleração do processo de remoção do ar interior da madeira por vácuo e substituição por água é a técnica mais recomendada. Deve-se evitar ferver ou passar vapor sobre os fragmentos de madeira para não causar hidrólise e solubilização, com conseqüente perda de "substância madeira".

Para garantia de que a água penetrou completamente, pode-se acompanhar a penetração de duas formas: a) pesagens sucessivas de um mesmo fragmento em saturação, até estabilização do peso; b) uso de um corante na água, p.e. safranina, e quando da estabilização do peso úmido, verificar a penetração por cortes longitudinais dos blocos de madeira.

Lembrar sempre que, quando a madeira não se encontra saturada, o peso úmido total é menor que o real e, com isso, a densidade é super-estimada.

c) Relações entre densidade básica e umidade no ponto de máxima saturação.

Durante as considerações teóricas apresentadas anteriormente, comentou-se que o inverso da densidade básica da madeira correlaciona-se linearmente com a umidade da madeira no seu máximo teor de umidade. A equação teórica encontrada era:

$$\frac{1}{D_b} = U + 0,654$$

Em experimento prático, decidiu-se confirmar a fórmula teórica, bem como procurar correlações entre densidade básica e teor de umidade base úmida e também entre teores de umidade base úmida e seca.

Foram coletadas 250 amostras de madeira de treze espécies de *Eucalyptus*, a saber: *E. camaldulensis*, *E. cloeziana*, *E. deglupta*, *E. dunnii*, *E. phaeotricha*, *E. teneticornis*, *E. pilularis*, *E. tonelliana*, *E. urophylla*, *E. citriodora*, *E. paniculata*, *E. robusta* e *E. grandis*. As amostras foram tiradas ao longo dos diâmetros, cm a cm, de discos de 2,0 cm de espessura, retirados ao nível do DAP e a 25% da altura comercial das árvores. A superfície transversal de cada bloquinho era de cerca de 1 cm^2 .

Após saturação, determinou-se em cada amostra: densidade básica, teor de umidade base úmida (U_u) e teor de umidade base seca (U_s).

Obtidos os resultados, procuraram-se correlações de interesse entre as variáveis. As correlações mais importantes obtidas foram:

$$1) \frac{1}{D_b} = 0,650377 + U_s$$

$$r = 1,00$$

$$\frac{1}{D_b} \text{ médio} = 2,009$$

$$U_s \text{ médio} = 1,357$$

$$N = 250$$

Esse resultado praticamente equivale à equação teórica. A densidade da "substância madeira" média para os 250 bloquinhos foi igual a $\frac{1}{0,650377} = 1,5376 \text{ g/cm}^3$.

$$2) \frac{1}{D_b} = 6,1177 U_u - 1,432936$$

$$r = 0,97$$

$$\frac{1}{D_b} \text{ médio} = 2,009$$

$$U_u \text{ médio} = 0,5626$$

$$N = 250$$

$$3) U_s = -1,881872 + 5,755963 U_u$$

$$r = 0,97$$

$$U_s \text{ médio} = 1,3562$$

$$U_u \text{ médio} = 0,5626$$

$$N = 250$$

$$4) D_b = 1,291912 - 1,37617 U_u$$

$$r = 0,99$$

$$U_u \text{ médio} = 0,5626$$

$$D_b \text{ médio} = 0,5177$$

$$N = 250$$

$$5) D_6 = 0,841628 - 0,238828 U_s$$

$$h = 0,97$$

$$U_s \text{ médio} = 1,3562$$

$$D_6 \text{ médio} = 0,5177$$

$$N = 250$$

CONCLUSÃO

O método do máximo teor de umidade para cálculo da densidade da madeira constituiu-se em técnica simples e acessível a todos os que necessitem trabalhar com avaliação de qualidade da madeira. Entretanto, para a perfeita utilização do método, deve-se cuidar para que as amostras estejam perfeitamente satura-

das em água, caso contrário, a densidade básica será super-estimada.

BIBLIOGRAFIA

FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.M. e BARRICHELO, L.E.G. I.P.E.F. (2/3): 65 - 74, 1971

KEYLWERTH, R. Holz Roh-u Werkstoff 12 (3): 77 - 83, 1954

SMITH, D.M. "U.S. Forest Products Laboratory Report nº 2014", 8 pp., 1954

SMITH, D.M. "U.S. Forest Products Laboratory Report nº 2033", 21 pp., 1955