IPEF, n.39, p.33-40, ago.1988

RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA E DESENSIDADE APARENTE DA MADEIRA EM FUNÇÃO DA UMIDADE

MARCOS ANTONIO DE REZENDE
JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO
UNESP, Depto. Biofísica
18610 - Botucatu - SP

EPAMINONDAS S. B. FERRAZ
ESALQ-USP, Depto. de Física e Meteorologia
13400 - Piracicaba - SP

ABSTRACT - The objective of this paper is to provide general equations relating the density of wood with its moisture content. These equations are based on experimental and theoretical models considering mass and volume variations caused by the loss of moisture in wood. Such equations provide the various transformations for density in general, for any type of wood, and are fundamentally important from a practical and economic view-point, mainly when the quantification of wood is desired. The advantage of utilizing these equations is that from a single ratio between mass and volume for a certain wood sample and the moisture content at which it was obtained it is possible to obtain all other ratios required.

RESUMO - O objetivo deste trabalho é fornecer equações gerais relacionando densidade aparente da madeira com a sua umidade. Essas equações são baseadas em modelos experimentais e teóricos, considerando as variações de massa e de volume com o teor de água na madeira. Elas fornecem as diversas transformações para densidade de uma maneira geral, para qualquer espécie de madeira, e são fundamentalmente importantes do ponto de vista prático e econômico, principalmente quando se deseja quantificar um lote de madeira. As vantagens da utilização destas equações se baseiam no fato de que a partir de uma única relação entre massa e volume para uma determinada amostra de madeira, e a umidade em que esta foi obtida, podem-se obter as demais necessárias.

INTRODUÇÃO

Conforme MACEDO (1976) e AGUIAR (1980), a densidade de um corpo é definida como sendo uma relação entre sua massa específica e a massa específica da água pura. A massa específica de um corpo é a relação entre sua massa e seu volume. Para a água pura, esta relação é igual a 1,0 g/cm^3, permitindo concluir que os termos densidade e massa específica são idênticos em termos de valores numéricos e diferentes dimensionalmente.

Neste trabalho, por motivos de homogeneidade dimensional, optou-se por usar o termo densidade, definida como uma grandeza adimensional, conforme MACEDO (1976).

A madeira, por ser um material higroscópico, oferece grandes problemas nas determinações de sua densidade, sendo esta variável com a umidade. A literatura mostra

uma infinidade de maneiras de se expressar a densidade da madeira em função do teor de água, dificultando muitas vezes comparar os resultados obtidos com aqueles disponíveis.

Com a diminuição da umidade da madeira, além da perda de massa, tem-se também uma perda em volume, denominada de retratibilidade volumétrica parcial ou simplesmente retratibilidade volumétrica.

O termo retratibilidade volumétrica total refere à perda total de água desde a amostra totalmente saturada até secagem completa em estufa a $103 \pm 5^{o}C$.

Sabe-se também que a variação em volume na madeira se processa praticamente para umidades inferiores a 28% aproximadamente, sendo a madeira praticamente estável, com pequenas variações volumétricas, para umidades acima deste valor. Este valor crítico para a umidade é denominado ponto de saturação das fibras (PSF).

Do ponto de vista prático, pode-se utilizar três maneiras para se expressar a densidade da madeira:

Densidade aparente (ρ_{ap}), definida como relação entre a massa e o volume, determinada nas mesmas condições de umidade (U), e variável dependente do valor de U.

Densidade a 0%, definida como a relação entre massa e volume obtidos para U = 0, onde a massa e o volume são obtidos após secagem em estufa $103 \pm 5°C$.

Densidade básica (ρ_b). Esta é definida como a relação entre a massa seca para U = 0 e volume saturado em água.

As relações entre massa e volume são igualmente importantes, dependendo da finalidade. A densidade básica é geralmente utilizada nos inventários florestais para determinação da massa seca da floresta. Já a densidade a 0% parece mais adequada quando se deseja qualificar o material.

O objetivo deste trabalho é fornecer equações teóricas e experimentais relacionando a densidade aparente com a umidade da madeira, considerando as variações de massa e de volume. Estas equações permitirão transformações nas diversas maneiras de se expressar a densidade, para qualquer espécie desejada. A utilização destas equações também permite determinar a umidade de peças de madeira através do conhecimento prévio da densidade básica, com a densidade aparente determinada gravimetricamente, Com isto, pode-se dispensar em alguns casos a secagem da peça em estufa para determinação desse parâmetro.

As equações aqui propostas são baseadas em relações teóricas e experimentais, e os resultados obtidos através dessas equações foram comparados experimentalmente, utilizando-se um segundo lote de amostras .

Uma relação experimental importante e utilizada nas transformações foi proposta por Newlin (1919) citado por KOLLMANN & COTÊ (1968). Esta relação mostra que a retratibilidade volumétrica total é diretamente proporcional à densidade básica e pode ser dada pela relação $R_v = 28\rho_b$.

MATERIAL E MÉTODO

Para obtenção da curva de retratibilidade volumétrica foram utilizadas amostras com dimensões 2x2x3 cm, sendo: 2 amostras de **Pinus** e 10 de **Eucalyptus.**

Após saturação em água, as amostras tiveram seus volumes determinados com paquímetro de precisão, essas amostras foram colocadas ao ar livre e à medida que perdiam água, eram determinados massa, volume e umidade das amostras. Este procedimento se

manteve até a secagem completa das amostras em estufa, totalizando um número de 175 determinações.

As equações utilizadas para determinação da umidade e retratibilidade volumétrica foram:

$$U = \frac{m_u - m_o}{m_o} . 100$$

$$R = \frac{v_v - v_{ap}}{v_v} . 100$$

Sendo:

U = umidade base seca
m_u = massa total da umidade considerada U
m_o = massa de madeira seca
v_v = volume da amostra na umidade de saturação
v_{ap} = volume aparente da amostra na umidade considerada

Assim, obtiveram-se as curvas de retratibilidade volumétrica em função da umidade, mostrados na Figura 1 e 2. A utilização dessas curvas, juntamente com uma equação experimental proposta por Newlin (1919), citado por KOLLMAN & COTÊ (1968), tornou possível o desenvolvimento das equações gerais propostas neste trabalho.

Após a obtenção dessas equações, foram utilizadas amostras de um segundo lote para comprovação experimental dos resultados, sendo 5 amostras de **Eucalyptus** e 4 de **Pinus**, com dimensões de 2x2x3 cm.

PROCEDIMENTO TEÓRICO E RESULTADOS

a) Relação entre densidade a 0% e densidade básica.

A densidade de 0% e a densidade básica são definidas pelas relações:

$$\rho_o = \frac{m_o}{v_o} \qquad (1)$$

$$\rho_b = \frac{m_o}{v_v} \qquad (2)$$

Sendo ρ_o = densidade a 0%

m_o, v_o = massa e volume de madeira seca em estufa a 103 ± 5°C
ρ_b = densidade básica
v_v = volume de madeira saturada água

Nas equações (1) e (2), geralmente o denominador aparece multiplicado por ρ_w que é a densidade da água pura (1,0 g/cm^3) a 4°C tornando ρ_g e ρ_b grandezas adimensionais. Para facilitar o desenvolvimento das equações neste trabalho, o símbolo ρ_w foi omitido, já que não alteraria os valores numéricos.

O volume v_o pode ser dado por:

$$v_o = v_v - \Delta v \qquad (3)$$

Sendo Δv a variação volumétrica total desde a amostra perfeitamente saturada até sua secagem completa.

A retratibilidade volumétrica total é dada pela relação:

$$R_v = \frac{v_v - v_o}{v_v} . 100 \qquad (4)$$

Sendo: R_v = retratibilidade volumétrica total

De (3) e (4):

$$R_v = \frac{\Delta v}{v_v} . 100 \qquad (5)$$

ou

$$\Delta v = \frac{R_v . v_v}{100} \qquad (6)$$

Substituindo (6) em (3):

$$v_o = v_v - \frac{R_v . v_v}{100} \qquad (7)$$

ou

$$v_o = v_v \left(1 - \frac{R_v}{100}\right) \qquad (8)$$

Substituindo (8) em (1):

$$\rho_o = \frac{m_o}{v_v (1 - \frac{R_v}{100})} \qquad (9)$$

e como

$$\frac{m_o}{v_v} = \rho_b$$

tem-se que:

$$\rho_o = \frac{\rho_b}{1 - \frac{R_v}{100}} \qquad (10)$$

A equação (10) relaciona densidade a 0% com a densidade básica através da retratividade total R_v.

Newlin (1919) citado por KOLLMAN & COTÊ (1968) encontrou uma equação experimental relacionando a retratibilidade volumétrica com a densidade básica, independente da espécie de madeira. Esta equação é a seguinte:

$$R_v = 28\rho_b \qquad (11)$$

Substituindo-se (11) em (10) obtém-se:

$$\rho_o = \frac{\rho_b}{1 - 0{,}28 \ \rho_o} \qquad (12)$$

$$\rho_o = \frac{\rho_o}{1 + 0{,}28 \ \rho_o} \qquad (13)$$

As equações (12) e (13) relacionam densidade a 0% com a densidade básica e vice-versa. Deve-se observar que estas foram obtidas a partir de uma relação experimental, e a precisão dos resultados obtidos depende exclusivamente desta relação empírica.

b) Relação entre densidade a 0% e densidade aparente para umidades inferiores a 25%.

A massa seca, obtida para U = 0, pode ser dada por:

$$m_o = m_{ap} - m_a \qquad (14)$$

sendo:

m_o = massa seca em estufa.
m_{ap} = massa aparente (madeira + água) obtida a uma certa umidade (U).
m_a = massa de água na madeira.

A umidade é definida por:

$$U = \frac{m_u - m_o}{m_o}.100 = \frac{m_a}{m_o}.100 \qquad (15)$$

Sendo: m_u a massa de madeira a uma dada umidade U.

Explicitando m_a na equação (15) tem-se:

$$m_a = \frac{U.m}{100} \qquad (16)$$

Substituindo-se 16 na equação 14 obtém-se:

$$m_o = m_{ap} - U\frac{m_o}{100} \qquad (17)$$

ou

$$m_{ap} = \frac{U.m_o}{100} + m_o \qquad (18)$$

Explicitando m_o tem-se que:

$$m_o = \frac{m_{ap}}{\frac{U}{100} + 1} \qquad (19)$$

Esta equação transforma massa a uma determinada umidade u em massa seca (estufa a 105 ± 3°C) e é bastante comum na literatura.

Para a transformação de volume a uma umidade (v_{ap}) em volume de matéria seca, deve-se levar em conta a retratibilidade volumétrica. De acordo com as Figuras A1 e A2, a curva de retratibilidade pode ser considerada de forma linear para umidades abaixo de 25%. No entanto, até 25%, tem-se somente uma porcentagem de 75% da retratibilidade volumétrica total. Portanto, esta correção também deve ser feita. Dessa forma, pode-se escrever:

$$R_{25} = R_v \,.\, 0{,}75 \qquad (20)$$

Sendo R_{25} = retratibilidade volumétrica encontrada a (25) a zero de umidade;
R_v = retratibilidade volumétrica total.

Deve-se ressaltar que a equação (20) foi obtida experimentalmente através das Figuras A1 e A2. Entretanto este mesmo resultado foi apresentado por Morath (1932) citado por KOLLMANN & COTÉ (1968) considerando o processo inverso correspondente à expansão volumétrica. Para efeito prático o processo pode ser considerado reversível e a histerese pode ser considerada, neste caso, desprezível.

O volume v_o pode ser dado pela relação:

$$v_o = v_{ap} - \frac{R_{25}}{25} \cdot \frac{U\, v_{ap}}{100} \qquad (21)$$

Sendo: v_{ap} = volume aparente (madeira + água + ar).
v_o = volume de madeira seca em estufa a 100 ± 3°C.

Substituindo (20 em (21):

$$v_o = v_{ap} - \frac{R_v \,.\, 0{,}75}{25} \cdot \frac{U\, v_{ap}}{100} \qquad (22)$$

ou

$$v_o = v_{ap}\,(1 - 3R_v \,.\, U \times 10^{-4}) \qquad (23)$$

Substituindo (19) e (23) na equação 1:

$$\rho_o = \frac{m_{ap}}{v_{ap}\,(\frac{U}{100} + 1)(1 - 3R_v\, U \times 10^{-4})} \qquad (23)$$

A densidade aparente e dada por:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ap}}{v_{ap}} \qquad (25)$$

Substituindo (11) e (25) e (13 em (24):

$$\rho_o = \frac{\rho_o}{(\frac{U}{100} + 1)(1 - 3\,.\,0{,}28\, U \times 10^{-2}\, \frac{\rho_o}{(1 + 0{,}28\rho o)})} \qquad (26)$$

$$\rho_{ap} = \rho_o \left(\frac{U}{100} + 1\right)\left[1 - 3 . 0{,}28\, U . 10^{-2} \frac{\rho_o}{(1 + 0{,}28\, \rho_o)}\right] \qquad (27)$$

ou ainda

$$\rho_{ap} = \rho_o\, (0{,}01U + 1)\left[1 - \frac{8{,}4 \text{ x } 10^{-3} . U . \rho_o}{1 + 0{,}28\, \rho_o}\right] \qquad (28)$$

A equação (28) relaciona a densidade aparente com a densidade a 0% para umidades variando de 0 a 25%

c) Relação entre densidade a 0% e densidade aparente para umidade variando de 25 a 90%.

De acordo com a curva experimental de retratibilidade em função da umidade, podem-se considerar duas retas: uma até 25% de umidade e outra de 25 % a 90%.

No intervalo de 25% a 90% de umidade, o volume de madeira seca em estufa (U = 0) pode ser dado por:

$$v_o = v_{ap} - \left[\frac{0{,}75R}{100} + \frac{0{,}25R}{(90 - 25)} + \frac{(U - 25)}{100}\right] v_{ap} \qquad (29)$$

Substituindo (11) na equação (29):

$$v_o = v_{ap} - \left[\frac{0{,}75 . 28\rho_b}{100} + \frac{0{,}25 . 28\rho_b}{65} . \frac{(U - 25)}{100}\right] \qquad (30)$$

$$v_o = v_{ap}\, [1 - 0{,}21\rho_b + 1{,}08 \text{ x } 10^{-3}\rho_b\, (U-25)] \qquad (31)$$

$$v_{ap} = \frac{v_o}{1 - \rho_b\, [0{,}21 + 1{,}08 \text{ x } 10^{-3}\, (U - 25)]} \qquad (32)$$

Substituindo (13) em (32) obtém-se:

$$v_{ap} = \frac{v_o}{1 - \dfrac{\rho_o}{1 + 0{,}28\, \rho_o}\, [0{,}21 + 1{,}08 \text{ x } 10^{-3}\, (U - 25)]} \qquad (33)$$

Substituindo (19) e (33) em (25):

$$\rho_{ap} = \rho_o\ (0{,}01U + 1)\ \frac{\rho_o (0{,}21 + 1{,}08 \times 10^{-3}\ (U - 25)}{1 + 0{,}28\rho_o} \qquad (34)$$

A equação 34 relaciona a densidade aparente com a densidade a 0% no intervalo de 25% a 90% de umidade.

d) Relação entre densidade a 0% e densidade aparente para umidade acima de 90%

O volume de matéria seca é dado por:

$$v_o = v_v - \frac{R_v}{100}\, v_{ap} \qquad (35)$$

Considerando que acima de 90% não existe nenhuma alteração no volume com a variação do teor de água, tem-se que:

$$v_{ap} = v_v \text{ (para } U > 90\%) \qquad (36)$$

Substituindo (11) e (36) em (35):

$$v_o = v_{ap}\ (1 - 0{,}28\rho_b) \qquad (37)$$

Substituindo (19) e (37) na equação (1):

$$\rho_o = \frac{m_{ap}}{(0{,}01U + 1)(v_{ap}(1 - 0{,}28\rho_b))} \qquad (38)$$

Substituindo (13) e (25) na equação (38):

$$\rho_o = \frac{\rho_{ap}}{(0{,}010 + 1)(1 - 0{,}28 . \frac{\rho_o}{1 + 0{,}28\rho_o})} \qquad (39)$$

$$\rho_{ap} = \rho_o (0{,}01U + 1)(1 - \frac{0{,}28\rho_o}{1 + 0{,}028\rho_o}) \qquad (40)$$

A equação (40) relaciona a densidade aparente com a densidade a 0% para umidades acida de 90%.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A conversão entre a densidade a 0% e densidade básica pode ser obtida através das equações 12 e 13 e a precisão dos resultados obtidos depende exclusivamente da equação

11, obtida experimentalmente. A partir da equação 12,construiu-se o gráfico da Figura 4,que mostra esta curva de conversão .

As equações 28, 34 e 40 relacionam a densidade aparente com á densidade a 0% em função da umidade da madeira. São usadas 3 equações dependendo da faixa de umidade. Os resultados fornecidos pelas equações dependem de relações experimentais e principalmente da precisão da equação 11.

O gráfico da Figura 3 pode comprovar estes resultados dentro de uma pequena faixa de densidade, utilizando-se **Eucalyptus** e **Pinus**. Nesta figura tem-se alguns resultados obtidos experimental mente comparados com valores obtidos através das equações 28, 34 e 40. A Figura mostra que os resultados são compatíveis, demonstrando boa precisão. Entretanto, deve-se ressaltar que para valores extremos essa precisão tende a diminuir, sendo esta bem menor para valores de densidade acima de 0,65 e abaixo de 0,30. Isto é devido à faixa de validade relação experimental 11.

Ainda na Figura 3 pode-se perceber para ambas as curvas duas inclinações. uma até 28% de umidade, correspondente ao ponto de saturação de fibras e outra para umidades superiores a 28%. Essa descontinuidade é devido à interrupção brusca da variação de volume da madeira com a umidade.

A partir das equações 28, 34 e 40, construiu-se a Figura 5,que relaciona a densidade aparente com a umidade. Os resultados são gerais e podem ser aplicados para qualquer espécie de madeira. Portanto, conhecendo-se uma relação entre massa e volume de uma amostra de madeira e a umidade em que esta relação foi obtida, pode-se obter qualquer outra relação, utilizando-se as equações de transformações 12, 28, 34 e 40. Também pode-se através dessas equações obter a umidade da madeira determinando-se sua densidade aparente, desde que se conheça previamente sua densidade a 0%, ou densidade básica.

Todas essas transformações são importantes para a tecnologia da madeira, pois através delas pode-se determinar teoricamente densidade aparente e retratibilidade volumétrica em função da umidade da madeira de uma forma geral, independentemente da espécie.

CONCLUSOES

As equações propostas permitem a obtenção da densidade aparente em função da umidade da madeira de uma forma bem geral. Isto significa que a partir de uma única relação entre massa e volume em determinada umidade, pode-se obter qualquer outra relação independente da espécie.

É possível também obter a umidade de uma peça de madeira, com o conhecimento prévio da densidade básica, determinando-se a densidade aparente.

Pode-se determinar a densidade básica indiretamente, a partir da densidade aparente, permitindo que esta seja avaliada a partir da relação entre massa e volume obtida na umidade de equilíbrio, evitando-se com isso as dificuldades que se tem quando se procura trabalhar com amostras completamente saturadas em água.

As equações propostas são baseadas em dados experimentais e teóricos, cujos resultados apresentaram boa precisão, principalmente para o **Pinus** e **Eucalyptus**, os quais foram comprovados experimentalmente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela bolsa de estudo concedida.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura e ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP.

Ao Professor Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky, Dr. Luiz Ernesto George Barrichelo e José Nivaldo Garcia, pela valiosa colaboração nos trabalhos.

À Duratex S/A. pelos constantes auxílios concedidos no fornecimento de materiais e amostras para o laboratório.

Expressamos também nossos agradecimentos, à secretária Neisa Jovencio Narcizo e ao desenhista Antonio Aparecido Martins, do Departamento de Biofísica, do Instituto de Biociências - UNESP/Campus de Botucatu, pela colaboração prestada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGUIAR, O. **Determinação da umidade em madeira por atenuação da radiação gama do ^{241}Am**. Piracicaba, 1980. 84p. (Tese-Mestrado-ESALQ).

KOLLMANN, F.F.P. & COTÉ, W.A. **Principles of wood and technology**. New York, Springer Verlag, 1975. v.1

MACEDO,H. **Dicionário de física**. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1976. 367p.

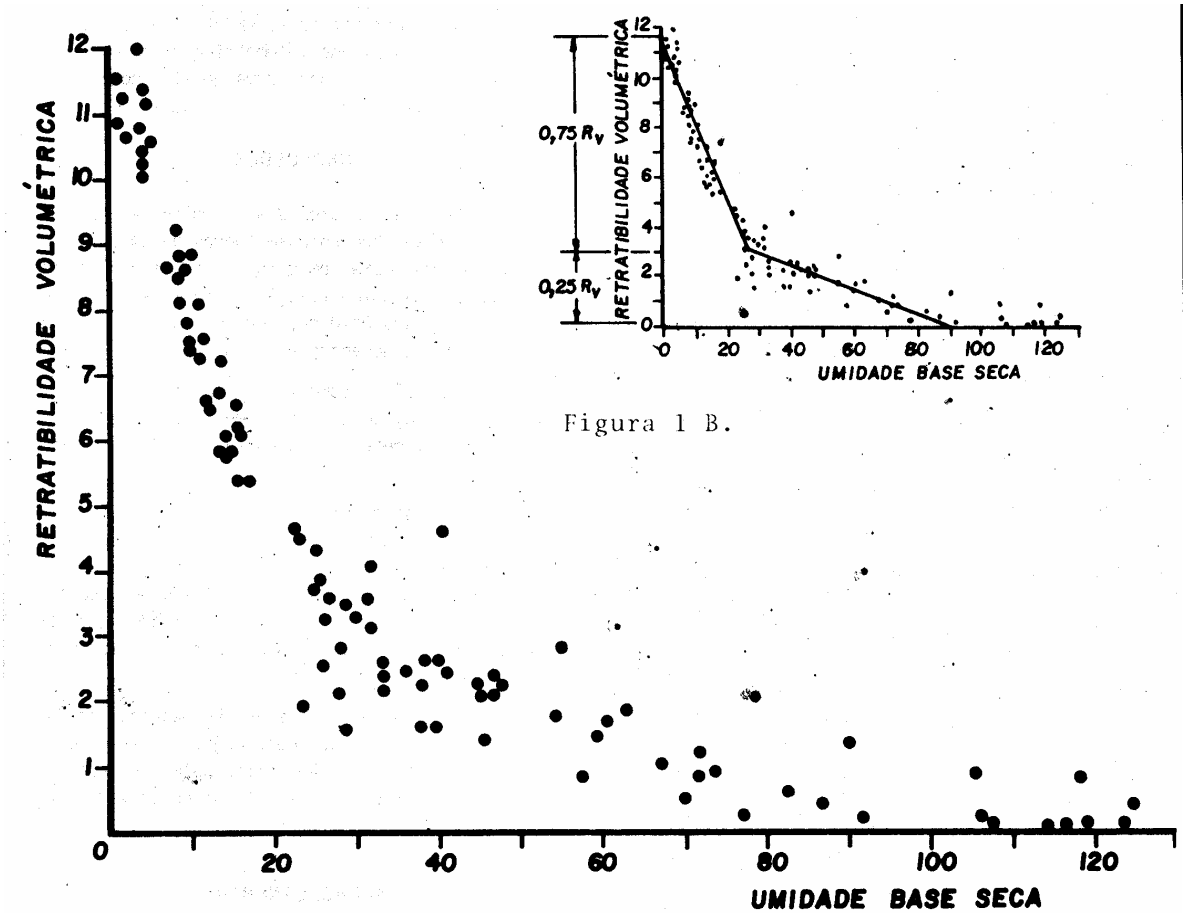

Figura 1 A: Curva de retratibilidade volumétrica em função da umidade da madeira obtida experimentalmente com amostras de *Eucalyptus* (2x2x3 cm). A figura 1 B evidencia as retas utilizadas para correções de volume.

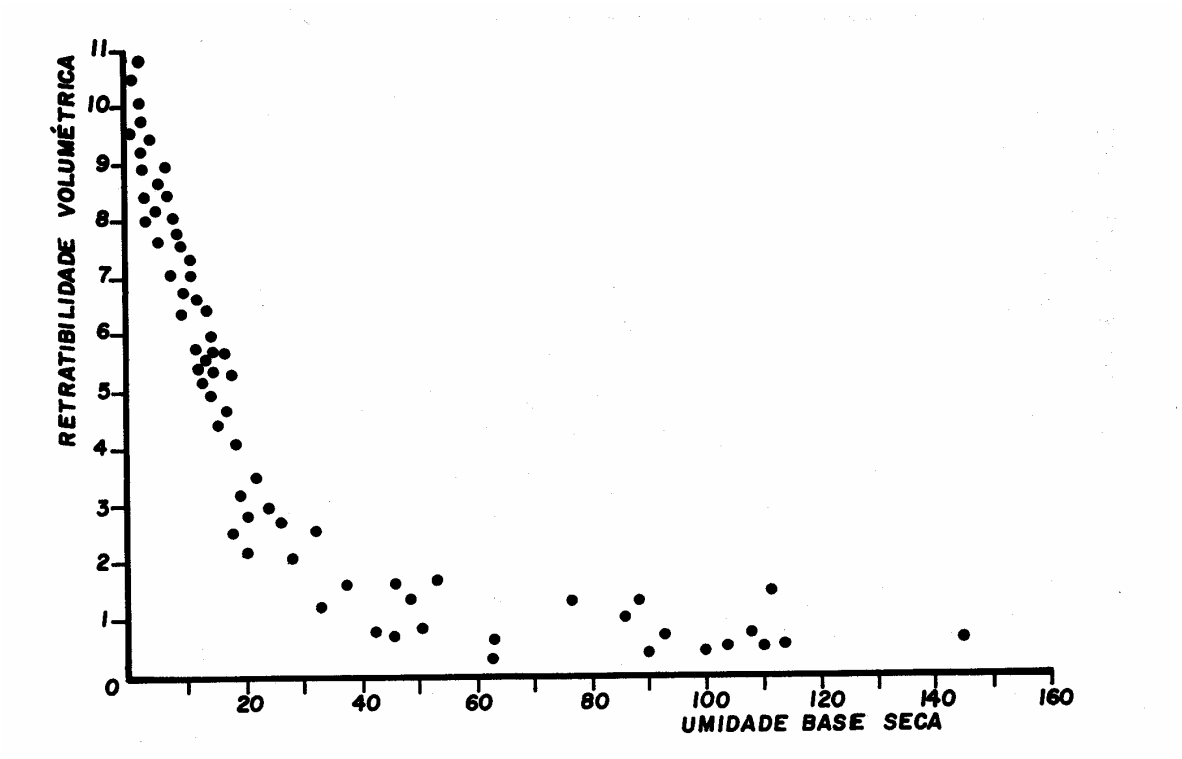

Figura 2: Curva de retratibilidade volumétrica em função da umidade da madeira, obtida experimentalmente em *Pinus* (2x3x3 cm).

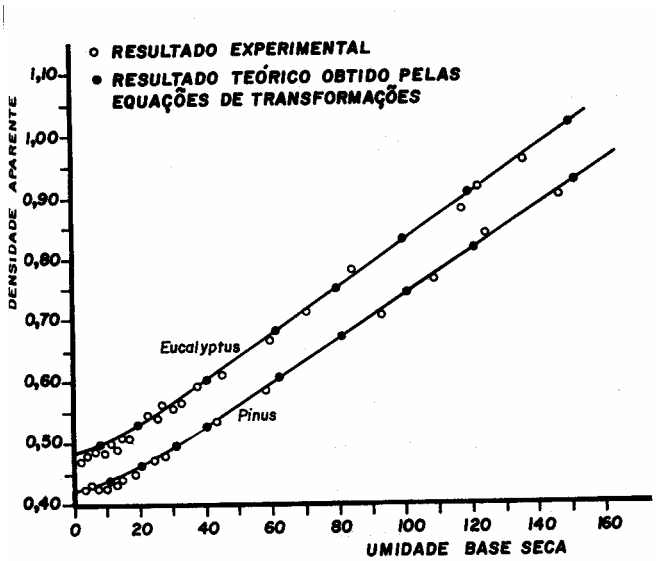

Figura 3: Comprovação experimental dos resultados obtidos para amostras de *Pinus* e *Eucalyptus* através das equações de transformações, para densidade aparente em função da umidade.

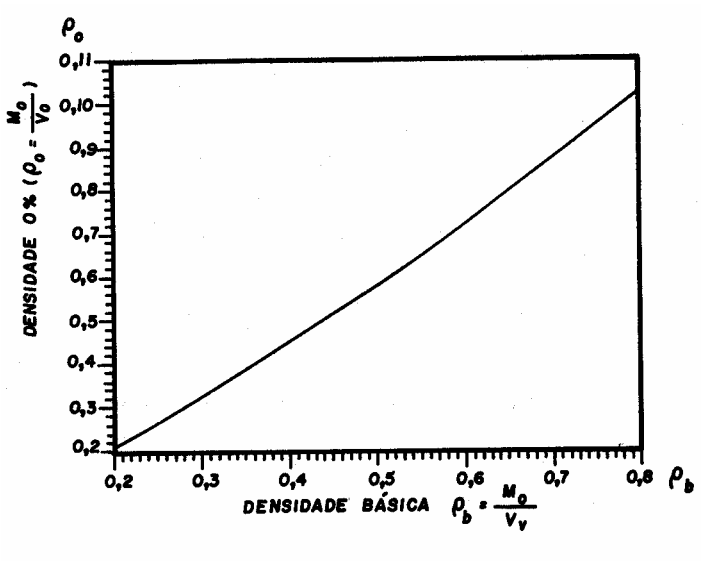

Figura 4: Curva correspondente à conversão entre densidade básica e densidade a 0% obtida através da equação (12).

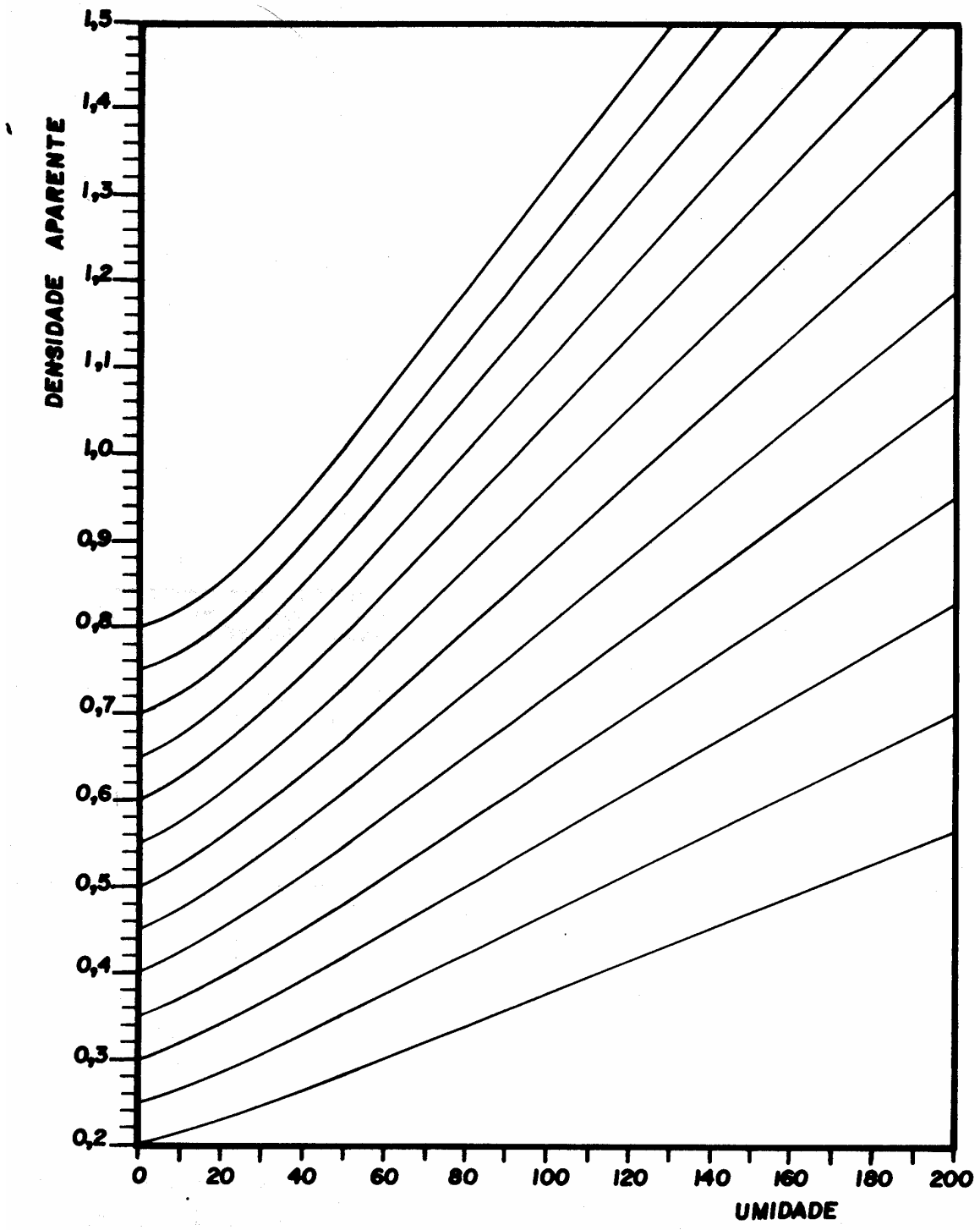

Figura 5: Variação da densidade aparente, ou massa específica aparente em (g/cm^3), com a umidade (base seca). Resultados obtidos através das equações de transformações (28, 34, 40).