

Novembro e Dezembro de 1983

VOL. XXX

N.º 172

Viçosa — Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DOS ERROS  
ENVOLVIDOS NA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE  
DA MADEIRA POR ATENUAÇÃO DE  
RADIAÇÃO GAMA <sup>1/</sup>**

O. de Aguiar <sup>2/</sup>  
E. S. B. Ferraz <sup>3/</sup>

**1. INTRODUÇÃO**

A madeira, meio poroso altamente higroscópico, apresenta alterações em suas propriedades físico-mecânicas associadas aos fenômenos de adsorção e dessorção de umidade.

Assim, a determinação da umidade da madeira, bem como o conhecimento de sua variação na amostra e no tempo, apresenta-se como fator de fundamental importância para diversos tipos de estudos; dentre esses tipos destaca-se a otimização dos processos de secagem da madeira.

Dentre os métodos de determinação da densidade e umidade da madeira des-  
taca-se o de atenuação de radiação gama, que tem sido rápido, não-destrutivo e,  
geralmente, de boa exatidão (3, 6, 7, 10).

AGUIAR e FERRAZ (3), desenvolvendo uma metodologia para a determina-  
ção de gradientes de umidade de madeira, usando um feixe monoenergético e coli-  
mado de  $^{2\text{4}}\text{Am}$ , verificaram que o erro relativo na determinação da umidade  
varia conforme o teor de umidade da madeira.

<sup>1/</sup> Realizado no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP). Piracicaba, São Paulo.

Recebido para publicação em 14-12-1982.  
<sup>2/</sup> Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa. 36570 Viçosa, MG.

<sup>3/</sup> Departamento de Física e Meteorologia da E.S.A.L.Q. — USP e CENA-USP  
13400 Piracicaba, SP.

No presente trabalho, apresenta-se uma análise teórico-experimental dos erros envolvidos na determinação da umidade da madeira por meio da atenuação de radiação gama de baixa energia, tendo em vista a otimização das condições de medida da umidade da madeira.

## 2. TEORIA

Seja a função  $v = f(x,y,z)$ . Se os erros absolutos máximos,  $|\Delta^*x|$ ,  $|\Delta^*y|$  e  $|\Delta^*z|$ , correspondentes às medidas de  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente, forem suficientemente pequenos, pode-se determinar o erro absoluto máximo na determinação de  $v$ , como se vê abaixo (8):

$$|\Delta^*v| = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| |\Delta^*x| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| |\Delta^*y| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| |\Delta^*z| \quad (1)$$

Já o erro relativo máximo ( $|\delta^*v| = |\Delta^*v|/|v|$ ) pode ser dado por

$$|\delta^*v| = |\Delta^*1n|f|$$

AGUIAR e FERRAZ (3) propuseram duas equações para a determinação da umidade ( $U$ ) abaixo e acima do ponto de saturação de fibra da madeira ( $U_f$ ). São as seguintes:

$$U = \left\{ \frac{\ln(I_0/I)}{xd_m} - \mu_m \right\} \frac{100 d_a}{\mu_w} \dots (U \leq U_f) \quad (2)$$

$$U = \left\{ \frac{\ln(I_0/I)}{xd_m} - \mu_m \right\} \frac{100}{\mu_w} - U_f \left( \frac{1}{d_{af}} - 1 \right) \dots (U > U_f) \quad (3)$$

sendo

$I_0$  e  $I$  = intensidades (contagens por minuto) dos feixes emergentes, sem e com absorvedor, respectivamente.

$x$  = espessura da amostra (cm)

$d_m$  = densidade aparente da madeira ( $g/cm^3$ ), definida como a razão entre a massa de madeira seca e o volume do sistema para determinada umidade.

$d_{af}$  = densidade da água adsorvida na madeira ( $g/cm^3$ ), correspondente ao ponto de saturação de fibra ( $U_f$ ).

$d_a$  = densidade da água adsorvida na madeira ( $g/cm^3$ )

$\mu_m$  e  $\mu_w$  = coeficientes de atenuação de massa ( $cm^2/g$ ) da substância-madeira e água, respectivamente.

$U$  = umidade (%) da madeira, definida como (massa de água x 100)/massa de madeira seca.

$U_f$  = umidade (%) da madeira, correspondente ao ponto de saturação de fibra.

Assim, o erro na determinação da umidade da madeira pode ser obtido mediante as derivadas parciais das funções descritas nas equações (2) e (3), uma vez conhecidos os erros absolutos máximos das medidas efetuadas. Para  $U < U_f$ , por exemplo, como  $U = f(A, x, d_m, d_a, \mu_m, \mu_w)$ , tem-se

$$\begin{aligned} |\Delta^*U| &= \left| \frac{\partial f}{\partial A} \right| |\Delta^*A| + \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| |\Delta^*x| + \left| \frac{\partial f}{\partial (d_m)} \right| |\Delta^*d_m| + \left| \frac{\partial f}{\partial (d_a)} \right| |\Delta^*d_a| + \\ &\quad \left| \frac{\partial f}{\partial \mu_m} \right| |\Delta^*\mu_m| + \left| \frac{\partial f}{\partial \mu_w} \right| |\Delta^*\mu_w| \end{aligned} \quad (4)$$

em que

$$A = \ln(I_0/I)$$

Por outro lado, FERRAZ e MANSELL (5), estudando os erros envolvidos na determinação da densidade e umidade de solos por atenuação de radiação gama de baixa energia, verificaram que a exatidão do método utilizado é limitada predominantemente pelos erros resultantes das medidas de  $I_0$  e  $I$ , em razão da aleatoriedade da desintegração radioativa. No entanto, por causa da complexidade da interação água-madeira, não se têm encontrado na literatura estudos referentes aos erros envolvidos na determinação da umidade da madeira pelo método de atenuação gama.

Assim, em condições ótimas de medidas, quando os erros devidos às medidas das demais grandezas são desprezíveis, pode-se escrever

$$dU = \frac{\partial f}{\partial A} dA \quad (5)$$

Diferenciando a equação (2), obtém-se

$$\frac{dI}{dU} = -xI \frac{\mu_w}{100} \frac{d_m}{d_a} \quad (6)$$

Segundo WANG *et alii* (9), se a estabilidade do aparelho de detecção de radiação for boa, o erro  $dI/I$  poderá ser atribuído unicamente à aleatoriedade da desintegração radioativa e considerado igual a  $1/\sqrt{I}$ . Assim:

$$\frac{1}{\sqrt{I}} = -\frac{x\mu_w d_m}{100 d_a} dU \quad (7)$$

O erro absoluto e relativo da medida de umidade pelo método gama pode, então, ser expresso do seguinte modo:

$$|dU| = \frac{100 d_a}{x d_m \mu_w \sqrt{I_0}} \exp \left[ \frac{x d_m}{2} (\mu_m + \frac{U \mu_w}{100 d_a}) \right] \quad (8)$$

$$|\delta U| = \frac{100 d_a}{x d_m \mu_w \sqrt{I_0 U}} \exp \left[ \frac{x d_m}{2} (\mu_m + \frac{U \mu_w}{100 d_a}) \right] \quad (9)$$

A partir da equação (3), e por procedimento análogo, tem-se, para  $U > U_f$ :

$$|\delta U| = \frac{100 \exp \frac{x d_m}{-2} \left\{ \mu_m + \frac{\mu_w}{100} \left[ U_f \left( \frac{1}{d_{af}} - 1 \right) + U \right] \right\}}{x d_m \mu_w U \sqrt{I_0}} \quad (10)$$

A Figura 1 ilustra o erro relativo teórico na determinação da umidade, conforme a umidade da madeira.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Utilizaram-se cinco amostras de *Pinus oocarpa*, de 4 cm, 6 cm e 13 cm, que permaneceram, inicialmente, na água, com vácuo intermitente (4), até saturação completa.

Em seguida, as amostras foram dispostas numa câmara climatizada, com umidade relativa e temperatura em torno de 50% e 25°C, respectivamente.

Durante o processo de secagem na câmara, a umidade das amostras foi determinada periodicamente, com o uso do método gravimétrico e do método de atenuação de um feixe colimado de radiação  $\gamma$ . As dimensões das amostras foram determinadas com paquímetro *Mitutoyo*, de 0,002 cm de precisão, utilizando-se balança *Mettler* (P163), com 0,001g de precisão.

Para a detecção da radiação  $\gamma$ , utilizou-se um espectrômetro  $\gamma$  monocanal *Ortec*. Foi montada uma geometria linear de boa colimação, tanto na fonte radioativa como no detector de cristal de NaI (T1) de (2 x 1/4)'', que foi acoplado a uma fotomultiplicadora *Harshaw*. Os colimadores de chumbo, do lado da fonte e do lado do detector, eram distanciados de 120 mm e tinham diâmetro de 4 mm. Foi utilizada fonte radioativa de  $^{241}\text{Am}$ , de aproximadamente 100mCi, obtendo-se taxas de contagem de 100000 cpm e 210000 cpm, com e sem absorvedor, respectivamente. Essas taxas foram corrigidas, devido ao tempo morto do sistema eletrônico. As umidades das amostras, pelo método de atenuação, foram determinadas a partir das equações (2) e (3).

Os coeficientes  $\mu_m$ ,  $\mu_w$  e  $U_f$  já tinham sido determinados previamente, com o emprego do método descrito por AGUIAR (1), com o que foram obtidos

$$\begin{aligned} \mu_m &= (0,1855 \pm 0,0005) \text{ cm}^2/\text{g} \\ \mu_w &= (0,2034 \pm 0,0003) \text{ cm}^2/\text{g} \\ U_f &= 31,1\% \end{aligned}$$

O relacionamento considerado entre a densidade da água adsorvida e o teor de umidade foi o proposto por AGUIAR *et alii* (2).

Tomando como referência as umidades determinadas gravimetricamente, foram obtidos os erros relativos do método de atenuação de radiação gama. Esses erros foram, então, comparados com os previstos teoricamente.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1 vêem-se as umidades de cinco amostras, determinadas em 15 instantes diferentes e com o uso de dois métodos, gravimétrico e de atenuação de radiação gama, bem como o erro relativo experimental de cada medida.

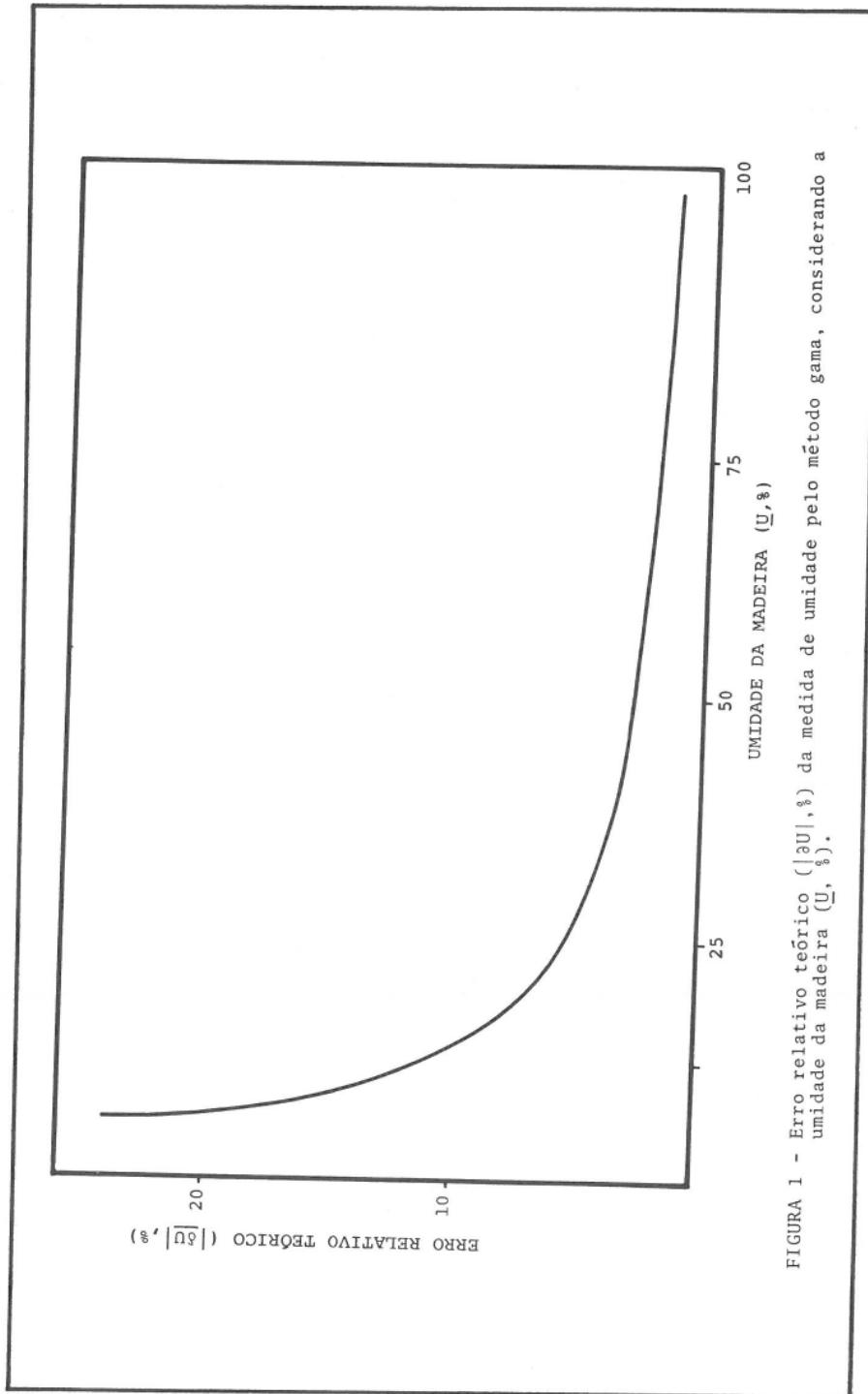


FIGURA 1 - Erro relativo teórico ( $|\delta U|, \%$ ) da medida de umidade pelo método gama, considerando a umidade da madeira ( $U, \%$ ).

QUADRO 1 - Umidade de madeira obtida pelo método gama ( $\underline{U}_g$ , %) e gravimétrico ( $\underline{U}_{grav.}$ , %) em diferentes instantes da secagem (t, dia)

t (dias)	Amostra nº 1			Amostra nº 2			Amostra nº 3			Amostra nº 4			Amostra nº 5		
	$\underline{U}_{grav.}$ (%)	$\underline{U}$ (%)	Erro relativo (%)												
0,0	144,21	139,73	3,11	135,35	129,00	4,69	133,09	130,59	1,86	158,20	155,05	1,99	151,49	145,17	4,17
0,8	64,10	64,36	0,40	76,50	75,44	1,39	69,27	69,38	0,15	83,17	82,81	0,44	79,85	82,76	3,64
2,0	42,73	44,74	4,49	38,46	38,92	1,20	41,47	41,10	6,34	52,88	55,44	4,62	43,02	44,13	2,58
3,0	30,62	32,95	7,61	30,82	36,08	17,07	32,47	32,35	0,37	36,01	39,12	8,64	27,13	29,77	9,73
4,0	24,39	24,94	2,26	23,45	26,62	13,52	26,21	27,32	4,24	27,94	26,20	6,23	21,46	21,86	1,86
5,0	20,91	24,55	17,41	20,20	27,22	34,75	22,72	28,63	26,01	23,29	31,54	35,42	18,35	23,82	29,81
7,0	15,10	16,54	9,54	14,76	17,53	18,77	16,46	17,93	8,95	15,88	17,69	11,40	13,42	12,10	9,84
9,0	13,32	12,61	5,33	13,16	13,91	5,70	14,09	12,19	15,48	13,37	12,65	5,39	12,17	14,30	17,50
11,0	11,93	12,22	2,43	11,92	13,73	15,18	12,37	9,62	22,23	11,81	10,90	7,71	11,19	13,51	20,73
14,0	10,96	10,17	7,21	10,97	10,11	7,84	11,03	10,62	7,89	10,71	10,08	5,88	10,38	11,11	7,05
18,0	10,62	11,37	7,06	10,71	10,45	2,42	10,60	12,11	14,25	10,45	11,40	9,09	10,21	6,58	35,55
24,0	10,07	9,15	9,14	10,15	11,71	15,37	10,01	8,16	18,48	9,83	10,15	3,26	9,65	10,75	11,40
30,0	9,25	9,13	1,30	9,35	11,36	21,50	9,18	7,33	20,15	9,00	9,51	5,67	8,81	9,93	12,71
44,0	9,28	8,57	7,65	9,54	11,15	16,88	9,19	5,65	38,15	9,05	6,94	23,31	8,83	10,81	22,42
53,0	9,36	8,32	11,11	9,46	10,20	7,82	9,25	7,15	22,70	9,15	9,90	8,20	8,91	9,47	6,29

A fim de comparar os erros relativos percentuais teóricos, ilustrados no Quadro 1, com os experimentais, apresentados na Figura 1, fez-se uma análise de correlação linear e obteve-se

$$|\delta U|_{\text{teórr.}} = 6,78 + 0,18 |\delta U|_{\text{exp.}} \quad (11)$$

$$r = 0,602^{***}$$

Assim, verifica-se que os erros previstos teoricamente estão em excelente concordância com os erros obtidos experimentalmente.

O fato de os erros experimentais terem, em média, superado os valores teóricos é justificável, em razão de terem sido determinados considerando apenas a imprecisão das medidas de  $I_0$  e  $I$ , em decorrência da aleatoriedade da desintegração radioativa. No entanto, a contribuição dos erros de medida das outras grandezas pode não ser desprezível, como ilustrado no Quadro 2. Nessa tabela é apresentada a contribuição de cada medida para o erro relativo na determinação da umidade. Esses dados referem-se a teor de umidade de 25,0%.

A exatidão do método de determinação de umidade por atenuação de radiação gama pode ser melhorada pelo uso de amostras cuja espessura se aproxime da espessura ideal de trabalho,  $x^*$ , valor de  $x$  que satisfaz a relação

$$\frac{d|\delta U|}{dx} = 0. \quad (12)$$

Assim, tem-se, para  $U \leq U_f$  e  $U > U_f$ , respectivamente:

$$x^* = \frac{2}{d_m (\mu_m + \frac{U \mu_m}{100 d_a})} \quad (13)$$

$$x^* = \frac{2}{d_m \left\{ \mu_m + \frac{\mu_w}{100} \left[ U_f \left( \frac{1}{d_{af}} - 1 \right) + U \right] \right\}} \quad (14)$$

## 5. RESUMO

Foram discutidas as possíveis causas de erros na determinação da umidade da madeira por atenuação de radiação gama. Foram propostas equações para a determinação dos erros e da espessura ótima da amostra, para umidades abaixo e acima do ponto de saturação de fibra da madeira.

\*\*\* Significância a 0,1%.

QUADRO 2 - Erros das medidas envolvidas na determinação da umidade da madeira pelo método gráfico

$y$	$\left  \frac{\partial f}{\partial y} \right  \left  \Delta^* y \right $	$\left  \frac{\partial f}{\partial y} \right  \left  \Delta^* y \right $	$\times 100$
		$\sum_{i=1}^6 \left  \frac{\partial f}{\partial y} \right _i \left  \Delta^* y \right _i$	
$a/A$	$1,160 \times 10^{-2}$	$3,05$	$\%$
$x$	$2 \times 10^{-3} \text{ cm}$	$4,04 \times 10^{-2}$	$68,5$
$d_m$	$5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$	$1,48 \times 10^{-2}$	$0,9$
$d_a$	$7,37 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$	$1,98 \times 10^{-1}$	$0,3$
$\mu_m$	$2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{g}$	$1,04$	$4,5$
$\mu_a$	$8 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{g}$	$1,12 \times 10^{-1}$	$23,3$
			$2,5$
$a/A = \ln (I_o/I)$			

Fez-se uma série de medidas de umidade em amostras de *Pinus oocarpa*, e os erros relativos experimentais foram comparados com os previstos teoricamente, obtendo-se, com isso, boa correlação.

## 6. SUMMARY

The sources of errors in wood moisture determination by gamma-ray attenuation were sought. Equations were proposed for determining errors and for ideal sample thickness.

A series of measurements of moisture content in wood samples of *Pinus oocarpa* was made and the experimental errors were compared with the theoretical errors.

## 7. LITERATURA CITADA

1. AGUIAR, O. *Determinação de gradientes de umidade em madeira por atenuação de radiação gama do  $^{241}\text{Am}$ .* Piracicaba — ESALQ/USP, 1980. 84 p. (Dissertação de Mestrado).
2. AGUIAR, O.; FERRAZ, E.S.B. & ESCOBEDO, J.F. Determination of the density of the water adsorbed by wood using gamma-ray attenuation technique. In: INTERNATIONAL UNION OF FORESTRY RESEARCH ORGANIZATIONS, 5.<sup>o</sup>, Oxford, 1980. Anais, Oxford, 1980. 1.<sup>o</sup> Vol., p. 32.
3. AGUIAR, O. & FERRAZ, E.S.B. Uso de radiação gama na determinação de gradientes de umidade em madeira. *Energia Nuclear e Agricultura* 3(2): 87-99. 1981.
4. BARRICHELO, L.E.G. *Celulose Kraft de madeiras de pinheiros tropicais para fabricação de papel.* Piracicaba, Departamento de Silvicultura da ESALQ/USP. 1979. 39 p. (Boletim Informativo n.<sup>o</sup> 5).
5. FERRAZ, E.S.B. & MANSELL, R.S. *Determining water content and bulk density of soil by gamma-ray attenuation methods.* Gainesville, University of Florida, 1979. 51 p. (Technical Bulletin n.<sup>o</sup> 807).
6. LOOS, W.E. The relationship between gamma-ray absorption and wood moisture content and density. *Forest Products Journal* 11:145-149. 1961.
7. PINTO, F.A. *Determinação de densidade de madeira por atenuação de radiação  $\gamma$  do  $^{241}\text{Am}$ .* Piracicaba, ESALQ/USP, 1978. 112 p. (Dissertação de Mestrado).
8. PISKUNOV, N. *Cálculo Diferencial e Integral.* São Paulo, Edições Cardoso, 1955. 967 p.
9. WANG, C.H.; D.L. WILLIS & W.D. LOVELAND. *Radiotracer methodology in the biological environmental and physical sciences.* New Jersey, Prentice-Hall, 1975. 480 p.
10. WOODS, F.W. W.T. LAWHOW. Gamma densitometry of increment cores. *Forest Science* 20:269-271. 1974.