

## DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DA MADEIRA DE *Pinus elliottii* ENGELM, ATRAVÉS DE ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO GAMA COMPARADA A MÉTODOS TRADICIONAIS

Gilmara Pires de Moura Palermo<sup>1</sup>  
João Vicente de Figueiredo Latorraca<sup>1</sup>  
Elias Taylor Durgante Severo<sup>2</sup>  
Marcos Antônio de Rezende<sup>3</sup>  
Heber dos Santos Abreu<sup>1</sup>

### RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi avaliar três métodos de determinação da densidade da madeira a 12 % e densidade básica. Os métodos usados foram: estereometria por imersão e por medição direta e o método de atenuação por radiação gama. Para tal, foram coletados discos de árvores de *Pinus elliottii*, oriundos de reflorestamento submetidas ou não ao processo de resinagem, com idade de 8, 15, 25 e 35, nas posições da base, DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial. Os resultados obtidos mostraram que os métodos empregados não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Entretanto, o método de atenuação da radiação gama permitiu determinar a densidade no sentido medula-casca, de milímetro em milímetro e transformar a densidade obtida na umidade de equilíbrio, em torno de 12% em densidade básica e densidade anidra, sem saturação e secagem total da amostra, respectivamente.

**Palavras-chaves:** densidade madeira, *Pinus elliottii*, radiação gama

### ABSTRACT

## DETERMINATION OF WOOD DENSITY OF *Pinus elliottii* ENGELM BY ATTENUATION OF GAMA RAY COMPARED WITH THE TRADITIONAL METHODS

The objective of this research was to evaluate three methods of density determination (12% moisture content and basic density). The methods applied were: Stereometry for immersion, and stereometry for direct measurement and gamma ray. Tree of *Pinus elliottii* of 8, 15, 25 e 35 age, from reforestation submitted or not drawing resin process, were harvested and then sectioned at the DBH, base, 25%, 50%, 75% and 100% of commercial height. The obtained results showed that the applied methods did not present statistic significant differences. However, the method by gamma ray allowed to determine the density of millimeter by millimeter according to direction pith-bark and to transform the density to 12% of moisture content in basic density and density to 0% of moisture content, without saturation and total drying of sample, respectively.

**Key words:** wood density, *Pinus elliottii*, gama ray

<sup>1</sup> Departamento de Produtos Florestais / UFRRJ / BR 465, Km 7, CEP: 23851-970, Seropédica - RJ, gilpalermo@ufrrj.br ou @bol.com.br, latorraca@ufrrj.br, abreu@ufrrj.br

<sup>2</sup> FCA / IF / UNESP / Faz. Experimental, Lageado, CEP: 18603-970, Botucatu - SP, severo@fca.unesp.br

<sup>3</sup> DFB / IB / UNESP / Distrito Rubião Junior S/N, CEP: 18618-000, Botucatu - SP, rezende@ibb.unesp.br

Recebido para publicação em 2004

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem se verificado uma grande preocupação das indústrias madeireiras, no que diz respeito a qualidade e aceitação de seu produto pelo mercado consumidor. Este fato pode ser observado pelos inúmeros investimentos na área de tecnologia da madeira, em especial na aquisição de novos equipamentos, em busca da melhor qualidade e do baixo custo de produção.

Para melhorar a qualidade da madeira é importante conhecer a multiplicidade e as interações das propriedades que fazem com que uma determinada madeira seja a matéria-prima ideal para uma determinada aplicação. Por exemplo, uma peça de madeira utilizada para fabricação de piso, deve apresentar resistência a compressão, dureza, resistência a abrasão, boa estabilidade dimensional, bom aspecto estético, eficiência na absorção de som e sensibilidade térmica. Desta forma, propriedades anatômicas, físicas e químicas, tais como: densidade, comprimento de fibras, espessura da parede celular, presença de lenho juvenil/adulto, contribuem para avaliar a adaptabilidade de uma madeira para um uso final específico.

Dentre tais propriedades, a densidade é a mais utilizada, pois se correlaciona diretamente com o peso, com as propriedades físico-mecânicas da madeira, com a composição celular e pode ser facilmente determinada. Segundo Silva (1984), apud por Trugilho et al. (1990), além de indicadora da qualidade da madeira, a densidade básica, pode ser um importante subsídio para avaliação econômica da floresta, podendo, para fins práticos, tonar um indicativo do uso final da madeira. Sua determinação permite a obtenção da estimativa do peso da madeira por metro cúbico sólido, por metro cúbico empilhado (estéreo) ou permite expressar a produtividade da floresta em termos de matéria seca por unidade de área, que é importante em termos de transporte, armazenamento e outras operações de controle da matéria-prima, podendo ser aplicados vários métodos para determinação da densidade. Dentre eles destacam-se os métodos estereométricos de imersão e medição direta e métodos nucleares, os quais utilizam feixes de radiação gama, partícula b e raio-X.

Desta forma, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a eficiência dos métodos de estereometria por imersão e por medição direta e o método de atenuação por radiação gama na determinação da densidade básica e densidade a 12% de madeira de *Pinus elliottii* de reflorestamentos com ou sem extração da resina.

2

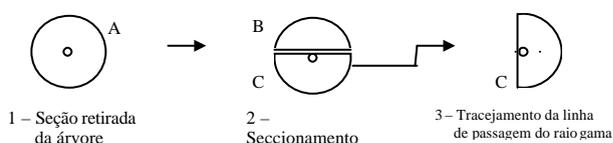
## MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de madeira utilizadas no experimento foram retiradas de árvores de *Pinus elliottii*, provenientes de plantações da Estação Experimental de Itapetininga, do Instituto Florestal de São Paulo. As árvores foram amostradas ao acaso, em quatro diferentes talhões, sendo que cada talhão apresentava uma determinada idade (8, 15, 25 e 35 anos) e passaram pelo processo de resinagem, exceto as árvores de 8 anos. As árvores foram divididas em quatro faces de resinagem. Os indivíduos com 15 e 25 anos tiveram duas faces laterais resinadas da base à altura de 1,4m e uma terceira face do painel resinado até a altura de 0,22 m. As árvores com 35 anos que já haviam sido anteriormente resinadas nas suas quatro faces, estavam sendo novamente resinada até 0,70 m de altura.

De cada talhão, foram coletadas três árvores e de cada árvore foram retiradas seções (discos) de aproximadamente 5,0 cm de espessura, extraídos, de acordo com a altura comercial, das seguintes posições da árvore: da base, a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial e o outro a 1,30m do solo.

As amostras (discos) foram mergulhadas em um tanque com água para adquirirem completa saturação. Em seguida, foram seccionadas ao meio ( Figura 1, letras B e C), sendo a parte C destinada para determinação das densidades.

Como as amostras estavam completamente saturadas, determinou-se prontamente seu volume verde pela variação do peso da amostra, conforme descrito pela norma ASTM D-2395 (1999) e Vital (1984). Posteriormente, foram colocadas em estufa a 60°C, para retirada da água de capilaridade e parte da resina e utilizadas para determinação da densidade pelo método de radiação gama.



**Figura 1.** Preparo das amostras para determinação da densidade por atenuação de radiação gama.

**Figure 1.** Sample of preparation to density determination by attenuation of gama ray.

### Métodos Aplicados

Neste trabalho utilizou-se os métodos de atenuação da radiação gama, estereometria por imersão e por medição direta.

V. 11, n.1, p. 01 - 06, ago./dez. 2004

### Método de atenuação da radiação gama

O radioisótopo utilizado como fonte de radiação gama foi  $^{241}\text{Am}$  (200 mCi), com meia vida de 458 anos, que decai por meio de partícula alfa.

As análises de detecção da radiação gama foram feitas no laboratório de biofísica da UNESP de Botucatu - SP, por um sistema de colimação feito com peças de chumbo, revestido com aço inox, permitindo uma abertura de 6 mm por 0,5 mm na saída da fonte e também na entrada do detector. Entre a fonte e o detector, montados sobre um plano de nível e distanciados 0,10 m, existe um sistema móvel, com dois posicionadores x e y, acoplados a um motor e uma fonte reguladora de voltagem, que permite que as amostras de madeiras sejam deslocadas horizontalmente e verticalmente. A detecção da radiação gama foi feita através de um cintilador sólido de duas polegadas na forma cilíndrica de NaI(Tl). O cintilador fica acoplado a uma fotomultiplicadora e os impulsos produzidos são analisados por um monocanal. O diagrama esquemático da geometria utilizada na atenuação da radiação gama, foi descrito por Trovati (1982).

Para determinação da densidade pelo método de atenuação da radiação gama as amostras saturadas foram secas em estufa a uma temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ , para perderem a água de capilaridade e parte da resina. Em seguida, foram aplainadas e lixadas até adquirir espessura uniforme em torno de 2,0 cm, sendo posteriormente colocadas em sala climatizada, até obter-se um teor de umidade de aproximadamente 12%. Para verificação da umidade, retirou-se cubos de  $3,0 \times 3,0 \times 3,0$  cm de algumas amostras de madeira e fez-se a determinação da umidade pelo método da estufa a uma temperatura de  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Após alcançarem a umidade de equilíbrio (12%), obteve-se inicialmente o raio médio e a espessura média da amostra. Pelo raio médio traçou-se uma linha, sobre a qual foi efetuada a leitura da densidade pelo método de atenuação da radiação gama (Figura 1, letra C).

A densidade foi determinada pela absorção diferenciada da radiação gama pela amostra de madeira. Quanto maior a densidade, maior foi a absorção e tanto menor a quantidade de radiação que atravessou o meio absorvedor (amostra de madeira).

Para o cálculo da densidade foi utilizada a equação 1, que é uma adaptação feita a lei de Beer-Lambert, com correções previstas devido ao tempo morto do sistema eletrônico através das equações 2 e 3 (Rezende et al, 1998).

$$(1) \quad \rho_{12} = \left( \frac{\ln(I_{oc} - BG) - (I_C - BG)}{\mu_m \cdot \chi_m} \right)$$

$$(2) \quad I_{oc} = \frac{I_0}{1 - \tau I_0}$$

$$(3) \quad I_C = \frac{I}{1 - \tau I}$$

Sendo:

$r_{12}$ : Densidade da madeira na umidade de equilíbrio a 12% em  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$m_m$ : Coeficiente de atenuação de massa da madeira na umidade 12% em  $\text{cm}^2/\text{g}$ ;

$c_m$ : Espessura da madeira em cm, a 12 % de umidade;

BG: Radiação de fundo em contagens por minuto;

$I_0$ : Taxa de contagem (contagens/minuto), obtida experimentalmente sem material absorvedor;

$I$ : Taxa de contagem (contagens por minuto), obtida experimentalmente após passagem através do absorvedor ou da madeira;

$I_{oc}$ : Valor de  $I_0$  corrigido devido ao tempo morto do sistema eletrônico através da equação 2;

$I_C$ : Valor de  $I$  corrigido devido ao tempo morto do sistema eletrônico através da equação 3;

$t$ : Tempo morto do sistema eletrônico ( $1,0 \times 10^{-7}$  minutos).

Para determinação da densidade básica pelo método de atenuação da radiação gama, tornou-se necessário a conversão da densidade a 12% (teor de umidade na qual a densidade havia sido determinada), em densidade a 0% e posteriormente, em densidade básica, utilizando as equações 4 e 5 (Rezende, 1997).

$$(4) \quad \rho_0 = 1 - \frac{\sqrt{1 - 0,2208\rho_{12}}}{0,1218}$$

$$(5) \quad \rho_b = \frac{0,98\rho_0}{1 + 0,24\rho_0}$$

sendo,

$r_0$  = densidade da madeira a 0% de umidade em  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

$r_{12}$  = densidade da madeira a 12% em  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

$r_b$  = densidade básica da madeira em  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

No método de atenuação da radiação gama, devido a leitura da densidade ser feita sobre um raio médio, foi necessário a ponderação da mesma. Assim, a partir dos valores obtidos da densidade pontual no sentido medula-casca, foi possível determinar a densidade média

ponderada de cada disco. As equações utilizadas para determinação da densidade ponderada foram descritas por Palermo (2003).

Utilizando-se os programas Origin 6.0 e Excel os valores da densidade pontual e densidade ponderada, foram tabelados e relacionados em função da distância radial em centímetros, obtendo-se assim, o perfil de densidade de cada amostra de madeira no sentido medula-casca.

Após efetuadas a leitura da densidade pelo método de atenuação da radiação gama, as mesmas amostras foram utilizadas para se determinar a densidade a 12% e a densidade básica pelos métodos estereométricos de imersão e medição direta.

### Estereometria por medição direta

Neste método, para determinação do volume da madeira, primeiro obtêm-se a área de uma amostra de superfície irregular baseado no princípio descrito por Filho (1964) e posteriormente multiplica o valor obtido por sua espessura. Neste princípio a área é medida através da massa do contorno da amostra em papel, usando-se uma balança, papel e uma regra de três para os cálculos.

Para obtenção da área e posteriormente o volume da amostra, utilizou-se uma folha de um lote de papel ofício e determinou-se sua área e sua massa. A área foi obtida pela medição da folha com paquímetro e a massa através da pesagem a folha em balança com precisão de 0,01g.

Posteriormente, com quatro folhas de papel ofício, fez-se o contorno da amostra de madeira. Em duas, das quatro folhas desenhou-se um lado da amostra e nas outras duas o outro lado. Isso se fez necessário, porque dependendo da amostra analisada, existe irregularidade no seu formato, ou seja, um lado pode ser maior que o outro. Quando a amostra era pequena utilizou-se mais folhas, obtendo-se assim uma maior precisão.

Depois de desenhada a amostra, o desenho foi recortado, obtendo-se quatro recortes ou mais, dependendo do tamanho da amostra.

A área de cada amostra foi obtida correlacionando a área e a massa da folha do papel ofício, com a massa de cada recorte. Posteriormente, multiplicou-se a área da amostra por sua espessura, para determinação do seu volume. A massa da amostra foi obtida através da pesagem da mesma em balança.

A densidade foi obtida dividindo-se a massa pelo volume, ambos a 12% de umidade, em função do acondicionamento das amostras.

### Estereometria por imersão

Para determinação da densidade a 12%, o peso

da amostra, foi obtido por meio de pesagem em uma balança de precisão e o seu volume, foi determinado pela variação de peso do líquido, em virtude da imersão da amostra de madeira na água, conforme descrito por Vital (1984) e ASTM D-2395 (1999).

Inicialmente, as amostras passaram por um banho de parafina, cujo objetivo foi o de impermeabilizá-la e garantir o total impedimento de absorção de água.

### Determinação da Densidade Ponderada por Árvore

Segundo Rezende et al (1998) é importante se estabelecer critérios corretos e seguros de amostragem no momento da determinação da densidade, tomando medidas em diversas posições relativas na árvore, assim como, efetuando uma média ponderada dos resultados para cada amostra. Para uma correta determinação da densidade de um certo povoamento florestal deve-se tomar médias ponderadas de valores obtidos entre amostras, árvores e parcelas, sendo que médias aritméticas podem, dependendo da espécie, proporcionar erros consideráveis nessas determinações.

Para ponderação da densidade por árvore foi utilizada a equação 6 descrita por Sansígolo (2000):

(6)

$$\overline{DB} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(db_0 + db_{25})(d_0^2 + d_{25}^2) + \dots + (db_{75} + db_{100})(d_{75}^2 + d_{100}^2)}{d_0^2 + d_{100}^2 + 2(d_{25}^2 + d_{50}^2 + d_{75}^2)} \right\}$$

Onde:

$\overline{DB}$  = Densidade ponderada em g/cm<sup>3</sup>

$db_0$  a  $db_{100}$  = Densidade do disco da base a 100% da altura comercial em g/cm<sup>3</sup>

$d_0$  a  $d_{100}$  = Diâmetro do disco da base a 100% da altura comercial em cm

Essa expressão foi usada para ponderar os resultados de densidade a 12% e densidade básica entre árvores de mesma idade.

### Equivalência Entre os Métodos Aplicados

As mesmas equações 4 e 5 usadas na atenuação da radiação gama para transformar a densidade a 12% em densidade a 0% e, posteriormente, em densidade básica, também foram utilizadas na transformação das densidades, pelo método estereométrico de imersão e de medição direta. Para comprovação da equivalência entre os métodos de determinação da densidade, apenas valores de densidade a 12% e densidade básica foram utilizados, devido os

V. 11, n.1, p. 01 - 06, ago./dez. 2004

mesmos terem sido expressamente calculados e não apenas transformados através das equações propostas por Rezende (1997).

Para efeito de comparação entre os métodos, os valores de densidade foram analisados por meio de análise de variância, adotando-se o nível de 5% de significância.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1, são apresentados os valores obtidos para a densidade das árvores amostradas, com base nos três métodos estudados.

**Tabela 1.** Valores médios de densidade a 12% e densidade básica de *Pinus elliottii*, obtidos pelos três métodos de determinação de densidade.

**Table 1.** Average density values at 12% of moisture content and basic density of *Pinus elliottii*, obtained by three methods of density determination.

Idade (anos)	Umidade da Amostra	Médias de densidade g/cm <sup>3</sup>		
		Métodos		
		Imersão	Medição Direta	Radiação Gama
8	12%	0,479 <sup>A</sup>	0,455 <sup>A</sup>	0,467 <sup>A</sup>
	Básica	0,389 <sup>A</sup>	0,376 <sup>A</sup>	0,385 <sup>A</sup>
15	12%	0,579 <sup>A</sup>	0,553 <sup>A</sup>	0,554 <sup>A</sup>
	Básica	0,472 <sup>A</sup>	0,451 <sup>A</sup>	0,451 <sup>A</sup>
25	12%	0,594 <sup>A</sup>	0,576 <sup>A</sup>	0,582 <sup>A</sup>
	Básica	0,481 <sup>A</sup>	0,468 <sup>A</sup>	0,472 <sup>A</sup>
35	12%	0,634 <sup>A</sup>	0,634 <sup>A</sup>	0,616 <sup>A</sup>
	Básica	0,519 <sup>A</sup>	0,510 <sup>A</sup>	0,498 <sup>A</sup>

Letras iguais na mesma linha denota igualdade estatística ao nível de 5% de significância; \*média estimada a partir das equações 4 e 5.

As análises de variância realizadas, para densidade a 12% e densidade básica, mostraram que não houve diferença estatística entre os três métodos de determinação da densidade, em todas as idades estudadas.

A aplicação do teste de Tukey ao nível de 5%, conforme apresentado na tabela 1, permitiu comparar as médias das densidades e demonstrar a equivalência entre os métodos aplicados, ou seja, qualquer um dos métodos pode ser utilizado na determinação da densidade básica e densidade a 12%. A partir desta análise foi possível verificar a eficiência do modelo matemático, descrito por Rezende (1997), para estimar a densidade básica a partir da densidade a 12%.

V. 11, n.1, p. 01 - 06, ago./dez. 2004

Dentre os métodos aplicados, o método de atenuação da radiação gama, mostrou ser de grande importância na determinação da qualidade da madeira, uma vez que forneceu dados de densidades pontuais e permitiu determinar a variação da densidade no sentido medula-casca, o que já não aconteceu com o método estereométrico de imersão e o de medição direta. Outra vantagem é que o mesmo permite transformar a densidade obtida na umidade de equilíbrio em densidade básica, sem a necessidade de saturação da amostra.

Quando se quer obter o valor médio da densidade da amostra, os métodos tradicionais, tal como, os métodos de imersão e de medição direta são utilizados até com certa vantagem em relação aos métodos nucleares. Porém, quando se deseja maiores informações ao longo da amostra, ou seja, quando se quer avaliar a qualidade da madeira ponto a ponto, torna-se interessante o uso de métodos nucleares. No entanto, são exigidos equipamentos mais sofisticados e onerosos.

Outra questão a ser levada em consideração no método de atenuação da radiação gama são as equações propostas por Rezende (1997), que podem ser utilizadas como ferramentas para se obter a partir da densidade a 12% a densidade a 0% e densidade básica, ou vice-versa e comparar os resultados obtidos com outros realizados em outras pesquisas, para a mesma espécie estudada.

## CONCLUSÃO

- Os três métodos foram eficientes na determinação da densidade;
- Não houve diferença estatística entre os métodos;
- O método de imersão por não requerer equipamentos sofisticados e apresentar resultados rápidos e de fácil obtenção, pode ser indicado como o mais adequado na determinação da densidade;
- O método de radiação gama por fornecer valores de densidade pontuais, ou seja, de milímetro a milímetro é indicado em estudos de qualidade da madeira, pois quando comparado com outras propriedades utilizadas para mesma finalidade (como comprimento de fibrotraqueídeos), este, apresenta uma maior agilidade na aquisição dos dados.

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Estadual de Florestas do Estado de São Paulo - Campo Experimental de Itapetininga, pelo fornecimento do material botânico para o estudo.

Ao Departamento de Física, Biofísica e a Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus de Botucatu, pela permissão de utilização do equipamento de radiação gama, usado na determinação da densidade pelo método de atenuação da radiação gama.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM Standards. Section - Construction**. V. 04.10 - **Wood**, 1999. 676p. D-2395: Standard test methods for specific gravity of wood and wood based materials, p. 350-357.
- FILHO, F. A. G. **Física para o primeiro ano do curso colegial**. São Paulo. Companhia Editora Nacional, 1964. 348 p.
- PALERMO, G.P.M. **Parâmetros de Qualidade da Madeira de *Pinus elliottii* Engelm. de Diferentes Idades**. Rio de Janeiro: UFRRJ, 2003. 128 p. (Dissertação - Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais).
- REZENDE, M.A. **Uma abordagem não convencional sobre as principais características físicas da madeira, com ênfase para retratibilidade, massa específica e técnica de atenuação da radiação gama**. Botucatu: Instituto de Biociências – UNESP, 1997. 138 p. (Tese de Livre-Docência em Física e Biofísica).
- REZENDE, M.A.; SAGLIETTI J. R. C.; CHAVES, R. Variação da massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* 8 anos de idade em função de diferentes níveis de produtividade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, V. 53, n. 6, p. 71 – 78, jun.1998.
- SANSÍGOLO, C. A. **Seleção de árvores matrizes para produção de polpa Kraft-AQ**. Botucatu: UNESP, 2000. (Tese de livre docência em Ciências Agrônômica).
- TROVATI, L. R. **Resposta da densidade dos anéis de crescimento de *Pinus oocarpa* schiede aos fatores climáticos**. Piracicaba, 1982. 107p. (Dissertação Mestrado em Agrometeorologia).
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A.; FRAZÃO, F. J. L.; MATOS, J. L. M. Comparação de métodos de determinação da densidade básica em madeira. **ACTA Amazônica**, Manaus - Amazonas, V. 20, p. 307-319, mar./dez. 1990.
- VITAL, B. R. Métodos de determinação da densidade da madeira. **Boletim Técnico-SIF**, n. 1, 21p. 1984.

