

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA E APARENTE DA
MADEIRA DE *Eucalyptus* sp.**

EDSON MARCELO BRUDER

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia - Energia na Agricultura

BOTUCATU-SP
DEZEMBRO - 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA E APARENTE DA
MADEIRA DE *Eucalyptus sp.***

EDSON MARCELO BRUDER

Orientados: Prof. Dr. Marcos Antonio de Rezende

Co-orientador: Prof. Dr. Vladimir Eliodoro Costa

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de
Botucatu, obtenção do título de Mestre em
Agronomia - Energia na Agricultura

BOTUCATU-SP
DEZEMBRO - 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

B888m Bruder, Edson Marcelo, 1971-
Métodos de determinação da densidade básica e aparente da madeira de *Eucalyptus* sp. / Edson Marcelo Bruder. - Botucatu : [s.n.], 2012
xii, 99 f. : il. color., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2012

Orientador: Marcos Antonio de Rezende
Co-orientador: Vladimir Eliodoro Costa
Inclui bibliografia

1. Análise volumétrica. 2. Eucalipto. 3. Madeira - Densidade. 4. Madeira - Qualidade. I. Rezende, Marcos Antonio de. II. Costa, Vladimir Eliodoro. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA E DA
DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* sp.

ALUNO: EDSON MARCELO BRUDER

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCOS ANTONIO REZENDE

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. MARCOS ANTONIO REZENDE



PROF. DR. ADRIANO WAGNER BALLARIN



PROF. DR. VALDEMIR ANTONIO RODRIGUES

Data da Realização: 08 de novembro de 2012

DEDICATÓRIA

AO MEU FILHO MATHEUS,

PELO FATO QUE NO DECORRER DESTA CONQUISTA, NOS APROXIMAMOS E ESTREITAMOS O RELACIONAMENTO ENTRE PAI E FILHO.

A MINHA QUERIDA ESPOSA,

TENHO ENORME ORGULHO DE DEDICAR ESTA CONQUISTA PELO RESPEITO, CARINHO E A CONFIANÇA DEPOSITA EM MIM.

MEU, MUITO OBRIGADO !!

MOTIVAÇÃO

A MINHA ESPOSA POR ACREDITAR,
A MINHA ESPOSA POR SONHAR,
A MINHA ESPOSA POR CHORAR,
A MINHA ESPOSA POR MOTIVAR.

SEM QUERER SONHEI,
SEM PESTANEJAR LUTEI,
MOTIVADO POR TI, CONSEGUI.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador PROF. DR. MARCOS ANTONIO DE REZENDE, que simplesmente foi além do profissionalismo tornando-se um amigo nos momentos em que mais precisei, tanto na formação profissional como para a minha vida pessoal.

Ao meu Co-orientador PROF. DR. VLADIMIR E. COSTA que me auxiliou no ensaios experimentais no Laboratório de Física Aplicada do Departamento de Física e Biofísica do Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista no campus de Botucatu-SP.

Ao Curso de Pós-Graduação em Energia na Agricultura da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP – Campus de Botucatu, pela oportunidade de realizar o curso.

Aos docentes da pós-graduação, em especial: PROF. DR. ADRIANO W. BALLARIN, ao PROF. DR. ELIAS T. D. SEVERO e ao PROF. DR. VALDEMIR ANTONIO RODRIGUES, pois todos foram de extrema importância para minha boa formação profissional.

Ao Departamento de Física e Biofísica do Instituto de Biociências de Botucatu, por uma ajuda muito importante na prontidão e disposição para esclarecimento de dúvidas quanto ao trabalho e pós-graduação.

A empresa Duratex S/A do município de Agudos/SP, em especial ao Engenheiros Raul Chaves que além de fornecerem a matéria-prima para o desenvolvimento do meu trabalho.

A minha família, CELSO, MARIA DE LOURDES, MÁRCIA, MURILO e ao meu Filho MATHEUS, pelo apoio, carinho. Também ao meus sobrinhos JOSIAS E PAMELLA que tenho um grande carinho.

Um muito obrigado com muito carinho para minha esposa ADRIANA P. BRUDER, pelo carinho, apoio, incentivo, mas meu agradecimento ainda maior por ter confiado, impulsionado e acreditado em mim.

Enfim a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e sucesso desse trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTAS DE ABREVIATURAS	XII
LISTAS DE SÍMBOLOS	XIII
RESUMO	1
SUMMARY	3
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1 Umidade da madeira	9
2.1.1. Variação dimensional da madeira em função da umidade.....	11
2.2. Densidade da madeira	13
2.2.1. Densidade aparente	15
2.2.2. Densidade básica.....	16
2.3. Determinação da Densidade a 12% de umidade.....	18
2.4. Variação da densidade da madeira na árvore.....	20
2.4.1. Variação da densidade direção longitudinal	20
2.4.2. Variação da densidade no sentido radial	21
2.5. Determinação de um ponto ideal de amostragem (PIA).....	23
2.6. Métodos de determinação da densidade da madeira.....	24
2.6.1. Método de Atenuação da Radiação Gama – (TARG).....	24
2.6.2. Método de volumetria por imersão em água	26
2.6.3. Método de volumetria com o uso da balança hidrostática	26
2.6.4. Método de volumetria por equivalência de área	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. Material utilizado para determinar as propriedades da madeira	29
3.1.1. Amostra de madeira de <i>Eucalyptus</i> sp.....	29
3.1.2. Equipamentos utilizados para mensuração da massa, volume e densidade das amostras	30
3.2. Método de imersão em água para mensuração do volume das amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	30
3.2.1. Mensuração do volume e da densidade pelo método de imersão em água (MI)	30
3.2.2. Determinação do volume e de umidade em função do tempo de imersão.....	33
3.2.3. Amostras utilizadas para a correção do volume.....	35
3.2.4. Amostras utilizadas para analisar a variação de volume, umidade e densidade por três repetições de imersão	35
3.3. Método da volumetria por equivalência de área para determinação do volume das amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	36

3.3.1. Determinação do volume pelo método da volumetria por equivalência de área (VEA)	36
3.3.2. Determinação do ponto ideal de amostragem pelo método da volumetria por equivalência de área (VEA).....	38
3.4. Método de atenuação da radiação gama para determinação da densidade das amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	38
3.4.1. Calibração do equipamento utilizado pela método de atenuação da radiação gama	39
3.4.2. Procedimento de determinação da densidade pontual da madeira pelo método de atenuação da radiação gama.....	40
3.5. Determinação da densidade ponderada da árvore	42
3.6. Determinação da umidade madeira.....	42
3.7. Determinação da Densidade básica	42
3.8. Transformação da densidade por equações	43
3.9. Relação entre Densidade 0% e Densidade Aparente.....	44
3.10. Análise dos Resultados	45
4. RESULTADO E DISCUSSÃO	46
4.1. Determinação da variação do volume e da umidade em função do tempo de imersão em água de discos de madeira da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	46
4.2. Determinação da expansão volumétrica por unidade de umidade em função do tempo.	50
4.2.1. Determinação da expansão volumétrica	52
4.3. Determinação do volume e da densidade pelo método da volumetria por equivalência de área.....	55
4.4. Determinação do Coeficiente de Atenuação de massa (μ)	58
4.5. Avaliação da densidade pelo Método de Atenuação da Radiação Gama das amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	59
4.5.1 Variação da densidade na direção longitudinal das amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.....	65
4.6. Ponto Ideal de Amostragem (PIA).....	67
5. CONCLUSÃO	76
6. REFERÊNCIA	78
7. APÊNDICE	85

LISTA DE TABELAS

	Páginas
Tabela 1. Diâmetro das amostras utilizadas para determinar volume dos grupos G_1 , G_2 e G_3 pelo método de imersão em água (MI) de madeira da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	36
Tabela 2. Resultado da massa (M_{PA}) e da umidade (u) inicial, para a mensuração da variação de umidade e do volume em função do tempo de imersão em água, das amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	47
Tabela 3. Variação média da umidade (Δ_U) e da expansão volumétrica (Δ_V), pelo método de imersão, determinadas em função do tempo (t) em segundos de amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	47
Tabela 4. Resultados da variação percentual de umidade (Δ_U), umidade percentual (u), densidade a 12% (ρ_{12}), variação percentual de volume (Δ_V) e variação percentual de volume por unidade de umidade (Δ_V/Δ_U) obtidos por imersão em água de amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	50
Tabela 5. Equações polinomiais (E_p), resultado da variação da umidade (Δ_U) em 10 segundos, densidade a 12% (ρ_{12}) e umidade aparente (u) inicial de amostras G_i da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	51
Tabela 6. Resultados das equações polinomiais (E_p) da expansão volumétrica média (Δ_V) em porcentagem (%) por dez segundos de imersão em água.	52
Tabela 7. Densidade média aparente ρ_i em ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), as variação da densidade ($\Delta\rho$) desvio padrão (D_p), o coeficiente de variação (CV) e a média dos resultados de G_i , pelo método de imersão das amostras G_i da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	54
Tabela 8. Análise de variância referente às determinações de densidade das amostras G_i , nas três repetições ρ_i pelo método de imersão	54
Tabela 9. Variação volumétrica entre os métodos de imersão (MI) e da volumetria por equivalência de área (VEA), sem correção (Δ_V), e com correção (Δ_{Vc}) de volume, e variação percentual (%) das amostras G_1 , G_2 e de G_3 da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	55
Tabela 10. Intervalo de confiança da densidade básica determinada pelo método volumetria por equivalência de área (VEA) e o método de imersão (MI) referente as amostras do grupos G_i da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	57
Tabela 11. Análise variância de volume determinado pelo Método imersão (MI) e pelo Método da volumetria por equivalência de área (VEA) das amostras G_i da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	58
Tabela 12. Resultados da variação do coeficiente de atenuação de massa experimental (μ_e) da água, valores de radiação de fundo (BG), radiação sem material (I_0) e com o material (I)	59

LISTA DE TABELAS

	Páginas
Tabela 13. Variação da densidade aritmética média (ρ_{AR}), densidade média ponderada 12% (ρ_{12}), densidade básica ponderada (ρ_b) e (ρ_{b_POND}) em ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), na direção longitudinal, amplitude de variação mínima (<i>Mín</i>) e máxima (<i>Máx</i>) pelo Método de atenuação da radiação gama e pelo Método de imersão das amostras do grupo G_i da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	60
Tabela 14. Resultado de intervalo de confiança da densidade básica determinada pelo Método de atenuação da radiação gama e o Método de imersão em água referente à altura comercial de determinado das amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	64
Tabela 15. Equações Polinomiais de terceiro grau obtidas na direção longitudinal de amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	69
Tabela 16. Variação da densidade a 12% ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) na direção longitudinal determinados pelo método da volumetria por equivalência de área (VEA), de discos coletados a cada metro das árvores A_i , B_i , C_i , D_i , E_i e F_i da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	70
Tabela 17. Resultados das variáveis estatísticas do valor máximo (<i>V. Max.</i>), valor mínimo (<i>V. Min</i>), amplitude, média em ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), o desvio padrão (D_p) e coeficiente de variação (CV) da densidade a 12% (g) das amostras A_i , B_i , C_i , D_i , E_i e F_i analisadas na direção longitudinal da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	70
Tabela 18. Volume total da árvore em (m^3), densidade ponderada (ρ_b), massa total (M) e altura em metros determinados pelo método da volumetria por equivalência de área (VEA), de discos coletados a cada metro da altura de árvores da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	71
Tabela 19. Valores médios de densidade ponderada a 12%, altura comercial, ponto ideal de amostragem (PIA) para retirada dos discos na árvore.	73
Tabela 20. Variação da densidade a 12% na posição de 40 e 50% da altura comercial e no ponto ideal de amostragem (PIA)	74

LISTA DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1. Procedimento para mensurar o volume das amostras por imersão em água para amostras com densidade do fluido maior que o densidade do corpo ($\rho_c > \rho_f$)	32
Figura 2. Esquema da metodologia para mensurar o volume das amostras por imersão em água para amostras com densidade menor que a do fluido	32
Figura 3. Contorno dos discos da base em uma folha de A4 de amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	37
Figura 4. Contorno do disco da base na folha A4 para determinação da área das amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	37
Figura 5. Recipiente para a calibração do aparelho utilizado para determinar o coeficiente de atenuação de massa (μ) pelo Método de atenuação da radiação gama	39
Figura 6. Linha radial no sentido medula-casca, por onde o feixe de radiação incide perpendicularmente, para mensuração da densidade das amostras.....	41
Figura 7. Variação média de umidade (Δ_U) e da variação volumétrica (Δ_V) determinados pelo método de imersão em função do tempo em segundos	48
Figura 8. Variação do volume (cm ³) em consecutivas imersões em água, primeira (I_1) e a segunda (I_2), pelo método de imersão de amostras de <i>Eucalyptus</i> sp.	49
Figura 9. Gráfico de correlação do volume (V) determinado, pelo método de imersão (MI) e método da volumetria por equivalência de área (VEA), das amostras G_i da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	56
Figura 10. Gráfico de intervalo de confiança (IC) entre os métodos de determinação de densidade pelo método de imersão (MI) e pela Método da volumetria por equivalência de área (VEA), para as amostras do grupos G_i da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	57
Figura 11. Comparação da densidade básica determinada pelo Método de imersão e o Método de atenuação da radiação gama das amostras da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	62
Figura 12. Gráfico de intervalo de confiança (IC) entre as determinações da densidade básica pelo Método de atenuação da radiação gama e o Método de imersão em água, para as amostras selecionadas por região a cada quatro metros.	63
Figura 13. Variações da densidade aparente a 12% em (kg.m ⁻³) na direção longitudinal no sentido base-topo em função da altura (m) da árvore A_i , B_i , C_i , D_i da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	65

LISTA DE FIGURAS

	Páginas
Figura 14. Variação média da densidade aparente a 12% em (kg.m^{-3}) das amostras A_i , B_i , C_i , e D_i na direção longitudinal em função da altura (m) da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	66
Figura 15. Variação da densidade aparente a 12% em (kg.m^{-3}) na direção longitudinal no sentido base-topo, A_i , B_i , C_i , D_i , E_i e F_i em função da altura (m) das árvores da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	68
Figura 16. Variação média de densidade (kg.m^{-3}) a 12%, 0% e básica de discos coletados a cada metro da altura de árvores da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp.	72

LISTAS DE ABREVIATURAS**Abreviaturas**

Técnica de Atenuação da Radiação Gama - ^{241}Am	<i>TARG</i>
Método de imersão em água	MI
Volume	V
Método de volumetria por equivalência de área	VEA
Ponto ideal de amostragem	PIA
Radiação de fundo	BG
Unidade de medida padrão do Sistema CGS de unidades para a representação de força (10^{-5} N, onde N = Newton).	dyn

LISTAS DE SÍMBOLOS

	Símbolos
Aceleração da gravidade (expresso em itálico)	<i>g</i>
Gramas	<i>g</i>
Unidade muitas vezes expressa em porcentagem.....	<i>u</i>
Isótopo radioativo de baixa energia utilizado para análise laboratorial	²⁴¹ Am
Contagem de fótons de radiação por minuto (cpm)	<i>I, I₀</i>
Coeficiente de atenuação de massa (cm ² .g ⁻¹)	<i>μ_m</i>
Logaritmo natural	<i>ln</i>
Indicação de uma espécie de um gênero.....	<i>sp.</i>
Indicação de várias espécie do gênero.....	<i>spp.</i>
Densidade básica	<i>ρ_b</i>
Volume verde, completamente saturado ou máxima expansão volumétrica	<i>V_V</i>
Volume a zero (%) de umidade	<i>V₀</i>
Metro cúbico.....	<i>m³</i>
Massa a zero (%) de umidade.....	<i>M₀</i>
Varição volumétrica.....	<i>Δ_V</i>
Varição de umidade	<i>Δ_U</i>
Varição de volume por unidade de umidade	<i>Δ_V/Δ_U</i>
Imersão em água.....	<i>I</i>
Referência a um grupo de amostras.....	<i>G_i, A_i</i>
Varição de massa	<i>Δ_M</i>
Densidade ponderada a 12% de umidade	<i>ρ_{12(POND)}</i>
Densidade média ou densidade ponderada.....	<i>ρ_m</i>
Representa a área determinada em cada posição da árvore.....	<i>A_i</i>
Tempo	<i>t</i>
Equação polinomial	<i>Ep</i>
Volume aparente determinado e corrigido por equações	<i>V_{Real}</i>
Volume corrigido.....	<i>V_{Cor}</i>

RESUMO

Nos reflorestamentos brasileiros o gênero *Eucalyptus* é o mais utilizado, devido sobretudo às suas características de rápido crescimento, capacidade de adaptação aos diversos sítios e condições edafoclimáticas e pelo potencial econômico de sua madeira. O seu uso é intensivo e crescente nos segmentos industriais para a produção de celulose, pasta de celulose, painéis de fibras e para a produção de madeira serrada. O objetivo deste trabalho foi avaliar a densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. por três métodos: o Método de imersão em água (*MI*), o Método da atenuação da radiação gama (*TARG*) e o Método da volumetria por equivalência de área (*VEA*). Foram determinadas as variações de umidade e de volume em função do tempo, de discos de madeira submersos em água. A partir dos valores médios de densidade dos discos foi obtido o perfil longitudinal da densidade e também um ponto de amostragem, que caracterizou a densidade média da árvore. O método de imersão em água também foi utilizado para mensurar as variações de volume, umidade e da densidade em amostras com umidade abaixo do ponto de saturação das fibras. Os resultados mostraram que a variação da densidade a 12% mensurada, pelos métodos de imersão e da volumetria por equivalência de área de 1,72%. A variação da densidade básica entre os

métodos de imersão e o método de atenuação da radiação gama foi de 1,3%. A absorção de água, durante o experimento de imersão, promoveu um acréscimo de umidade e de volume, respectivamente de 1,68% e de 0,287% em um período de 10 segundos de imersão. O ponto ideal de amostragem, mensurado pela variação da densidade na direção longitudinal, possibilitou mensurar a densidade média da árvore a 45% da altura comercial. Os resultados permitiram concluir que a variação da densidade básica e da aparente entre os métodos não apresentam diferenças significativas, tornando viável o método de imersão como uma alternativa para mensuração do volume e densidade. A variação da umidade e variação volumétrica, em um período de 10 segundos de imersão para determinar o volume, não afetou significativamente a densidade da amostra. A análise do perfil longitudinal possibilitou determinar um ponto ideal de amostragem entre 40 e 50% da altura comercial, o qual poderá ser utilizado como alternativa para a estimar da densidade média da árvore. A densidade mensurada por equações utilizada pelo Método de atenuação da radiação gama apresentou resultados com boa precisão, minimizando o tempo gasto com determinações experimentais. A vantagem do método de imersão está na facilidade de sua aplicação para mensuração da densidade básica e também aplicável para densidade aparente, inclusive para densidade na umidade de equilíbrio.

Palavras-chave: Eucalipto, massa específica, qualidade, volumétrica, ponderada.

BASIC AND APPARENT DENSITY OF *Eucalyptus* sp. WOOD DETERMINED BY DIFFERENT METHODS. Botucatu, 2012. 99p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author : EDSON MARCELO BRUDER

Adviser : PROF. MARCOS ANTONIO DE REZENDE

Adviser- Co: PROF. DR VLADIMIR ELIODORO COSTA

SUMMARY

The genus *Eucalyptus* is the most widely used in reforestation in Brazil, mainly due to its rapid growth, its ability to adapt to different sites and environmental conditions; and the economic potential of its timber. Its use is intensive and growing in the industrial segments for production of cellulose pulp, fibreboard and timber. The objective of this study was to evaluate the density of *Eucalyptus* sp. wood by three methods: The Method of Water Immersion in Water Method (MI); The Gamma Attenuation Method (TARG); Volumetric Conversion by Equivalence of Area Method (VEA). First, it was determined the variations of humidity and volume as a function of time, in discs of wood submerged in water. From the average density values of the tree wood discs, it was obtained the longitudinal profile of density and also the sampling point which characterizes the average density of the tree. The method of water immersion was used to measure the volumetric variation, the moisture and the density below the fiber saturation point. The variation of density at 12% measured by the method of water immersion and by volumetric conversion by equivalence of area method showed an equivalence of 1.72%. The basic density variation between the water immersion

and the gamma attenuation methods was 1.3%. The absorption of water during 10 seconds of the experiment of immersion, promoted an average increase in the moisture and in the volume of 1.68% and 0.287%, respectively. The obtained ideal point of sampling in order to measure the average density of the tree was in 45% of the commercial height. The results allowed to conclude that the variation of basic and apparent densities between the methods are not significantly different, making the immersion in water as an alternative and viable method in order to measure volume and density. The moisture and volume variations in a period of ten seconds of immersion to determine the volume, did not significantly affect the density of the samples. From the analysis of the longitudinal profile, it was possible to establish the ideal sampling point between 40 and 50% of the commercial height, which can be used as an alternative to estimate the average density of the tree. The measured density by equations by the gamma attenuation method showed results with good precision, minimizing the time spent with experimental determination. The main advantage of the method of immersion is the facility of its application for the measurement of the densities basic and in equilibrium moisture content.

Keywords: density, quality, immersion, mass specific, gravity.

1. INTRODUÇÃO

A primeira referência a utilização da madeira de *Eucalyptus* para a produção de celulose provém de Portugal, em 1906 a partir de *Eucalyptus globulus*. A produção de celulose de sulfito branqueada, com madeira de *Eucalyptus*, iniciou-se comercialmente em Portugal em 1919, (FOELKEL; BARRICHELO; MILANEZ, 1975) a partir deste período, muitas espécies vêm ganhando importância econômica e tornando-se expressiva mundialmente. Uma substancial parte da celulose de espécies folhosas, utilizadas para a fabricação de papel, é produzida de plantações do gênero *Eucalyptus* originárias dos maiores produtores mundiais, principalmente Brasil, Índia, África do Sul, Portugal, Angola, Espanha, China, França e Japão. A tendência do comércio internacional de celulose motiva cada vez mais a plantação deste gênero no mundo (PINTO JUNIOR; GARLIPP; DAMAS, 2008)

As espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais utilizadas, nos reflorestamentos brasileiros, devido as suas características de rápido crescimento, capacidade de adaptação às diversas regiões ecológicas e pelo potencial econômico. Dentre as principais

espécies utilizadas, o *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e seus híbridos interespecíficos, principalmente com a espécie *E. urophylla* S. T. Blake, continuam como as mais importantes, em face do seu uso intensivo e crescente nos segmentos industriais e, mais recentemente, para a produção de madeira serrada (PINTO JUNIOR; GARLIPP; DAMAS, 2008).

Segundo Gonçalves et al., (2009) a madeira por ser um elemento orgânico heterogêneo e composto basicamente de hemicelulose, lignina, celulose e extrativos, apresenta uma enorme versatilidade de usos para obtenção de uma série de produtos. Panshin e Zeeuw (1970) mencionaram que as espécies de madeira possuem variações naturais em suas características, que são provenientes de diferenças genotípicas, como também de diferentes respostas às condições ambientais e manejo a qual a árvore está se desenvolvendo. Poucos são os trabalhos que relacionam todas as características exigidas pelo mercado consumidor às propriedades inerentes à madeira, como, por exemplo, a densidade. Alguns autores como Oliveira (1998), Vale, Martins e Araújo (1992), Trugilho, Lima e Mendes (1996), Latorraca e Albuquerque (2000) e Cruz, Lima e Muniz (2003) mencionaram que a densidade é a propriedade que melhor se relaciona com as demais propriedades da madeira. Esta característica é mais utilizada em pesquisas relacionadas à qualidade, podendo ser um fator limitante do uso da madeira.

Na década de 1990, a clonagem intensiva e a utilização de híbridos em escala comercial eram aspectos que estavam despertando a atenção dos silvicultores nacionais. A prática tornou-se rotineira nos programas de melhoramentos florestais das principais empresas nacionais, sendo a principal responsáveis pelo sucesso da eucaliptocultura nacional. Os pesquisadores já alertavam para o fato de que, apesar dos clones apresentarem alta produtividade volumétrica, seriam necessários maiores estudos quanto à sua qualidade (BATISTA; KLITZKE; SANTOS, 2010)

Segundo Shimoyama e Barrichello (1991) citados por Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005) a densidade básica da madeira é reconhecida como um dos mais importantes parâmetros para avaliação da sua qualidade, por ser de fácil determinação e estar relacionada às suas demais características. Batista, Klitzke e Santos, (2010) mencionam que dentre as diversas propriedades da madeira, a densidade é a mais

utilizada, pela facilidade da determinação e por correlacionar-se diretamente com as propriedades físicas e mecânicas da madeira e com a composição celular.

Para a caracterização da madeira são necessárias análises de rotina, que devem ser rápidas, precisas e de baixo custo, visando à melhoria de qualidade da matéria prima e do produto final. Os métodos laboratoriais disponíveis atualmente são demorados, o que os tornam inviáveis para análises de grande número de amostras, impossibilitando, assim, um controle detalhado e preciso do processo (SANTOS; GOMIDE; SOUSA, 2009).

Panshin e Zeeuw (1970) afirmaram que as variações dimensionais na madeira atuam de forma diferenciada ao longo das três direções estruturais, devido ao seu fator anisotrópico. Em geral, observa-se que a contração na direção tangencial é aproximadamente duas vezes maior que na sentido radial. Os autores afirmaram que a utilização da madeira para obtenção de produtos finais de alta estabilidade requer um baixo fator anisotrópico. Existe uma situação em que a madeira não perde nem absorve água do ambiente, ou seja, a umidade da madeira está em equilíbrio com o ambiente. Ainda segundo os autores, a madeira deverá sempre ser utilizada com uma umidade próxima ao teor de umidade de equilíbrio higroscópico. Uma vez seca a uma condição de umidade de equilíbrio com as condições ambientais, a madeira não irá mais apresentar problemas associados à retratibilidade, como empenamentos e fendilhamentos.

Segundo Oliveira (1998), o conhecimento das propriedades higroscópicas é, sem dúvida, a chave para a utilização bem-sucedida da madeira. Sabe-se que a madeira em um teor de umidade igual ou próximo àquele de equilíbrio com as condições de uso da madeira, poderá ter seus problemas referentes à umidade minimizados ou eliminados.

Devido a necessidade de um estudo mais detalhado sobre a absorção de água na madeira para determinação do volume na umidade de equilíbrio, o objetivo geral do trabalho foi:

- ✓ estudar diferentes metodologias de determinação do volume e da densidade da madeira, visando a confrontação de seus resultados e a discussão de suas limitações.

Os objetivos específicos foram:

- ✓ mensurar o volume das amostras, em um período de imersão em água e avaliar as variações de umidade e volume ao longo desse período;
- ✓ comparar os resultados de densidade mensurados pelos Método de atenuação da radiação gama e o Método da volumetria por equivalência de área com o Método de imersão.
- ✓ determinar a variação longitudinal utilizando a densidade aparente a 12% e determinar um ponto de amostragem que caracterize a densidade média da árvore.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Umidade da madeira

As variações dimensionais da madeira causadas principalmente pela interação com a água em qualquer estado, aliadas às suas características anisotrópicas, são indesejáveis do ponto de vista prático. Vários pesquisadores têm tentado minimizá-las, através de tratamentos químicos ou físicos.

A densidade da madeira está intimamente ligada a sua umidade, devido às variações de massa e de volume. Portanto, para determinar esta característica física, é necessário também o conhecimento da retratibilidade e da expansão volumétrica da madeira. Costa (2006), analisando as propriedades anisotrópicas de amostras de clones de *Eucalyptus*, concluiu que a umidade é uma das características físicas da madeira que analisada em função da espécie, variedade, povoamento, idade, árvore e até mesmo dentro de uma mesma amostra ou disco, apresenta diferentes valores (REZENDE, 1987; HERRERA, 1989; BRASIL; VEIGA; SANSÍGOLO, 1991; OLIVEIRA; HELLMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005, COSTA, 2006).

A água presente na madeira pode ser entendida tomando por base alguns aspectos fisiológicos. A entrada de água na planta ocorre por meio da absorção. As plantas absorvem água em toda a sua superfície, mas a maior parte do suprimento de água vem do solo (TAIZ; ZEIGER, 2004). É pelas raízes que a planta absorve água e sais minerais que compõe a denominada seiva bruta. A absorção é possível ao longo de toda a raiz, mas no entanto, é através dos pêlos radiculares que a absorção é maior. A existência de pêlos radiculares aumenta consideravelmente a superfície de absorção (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Toda esta explicação tem a finalidade de deixar clara a importância da água na madeira, sendo que em madeira verde chega a atingir a porcentagem maior que 60%. Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005), apresentaram valores de umidade para o gênero *Eucalyptus* maior de 100%. Para a espécie *Eucalyptus grandis* o maior teor de água médio determinado na direção longitudinal foi de próximo a 120% de umidade na região da medula.

O que geralmente ocorre numa peça de madeira durante o processo de secagem é que, enquanto alguns pontos já tenham atingido a umidade no limite de estabilidade, em 28%, outros pontos, localizados próximos ao interior da peça, ainda não atingiram este limite e ainda não iniciaram a retração. Isto demonstra que a retratibilidade para pontos diferentes na madeira ocorrem em tempos diferentes. Este aspecto será tanto mais evidente quanto maior forem os gradientes de umidade durante a secagem, sendo estes, diretamente proporcionais à densidade e dimensões da peça de madeira, (REZENDE; SAGLIETTI; MARTINEZ, 1993; REZENDE; GUERRINI; SAGLIETTI, 1995).

A análise da umidade na direção longitudinal foi determinada por Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005) em árvores recém abatidas e apresentaram maior umidade na base, diminuindo por volta da metade da altura comercial, e um aumento partir do terço superior e no topo apresentaram a umidade próxima a mensurada na base.

Em árvores plantadas e recém abatidas apresentam-se com alto índice de umidade. Nestas condições as moléculas de água se encontram por todo o interior das árvores, no interior dos elementos anatômicos e no interior das respectivas paredes. Com estas condições é promovida a saturação, ou seja, a quantidade máxima de água dentro da madeira,

e com tal concentração de umidade usualmente a madeira é denominada como madeira saturada ou “verde”.

O Ponto de Saturação da Fibras (PSF) é um valor limitante de umidade em que toda a água livre ou de capilaridade foi retirada da madeira, ficando apenas a água de adesão. Normalmente o PSF situa-se numa faixa entre 22 e 30% de umidade, variando de espécie para espécie. Panshin e Zeeuw (1970), citam que o PSF para madeiras com densidade aproximadamente de $1,18 \text{ kg.m}^{-3}$, foi determinado à 26% da umidade de saturação. O PSF é importante pois é a partir deste ponto ocorrem as alterações do comportamento da madeira.

A madeira por ser um material orgânico, de estrutura complexa e heterogênea é altamente higroscópica. A umidade não é considerada uma característica intrínseca da madeira, e a variação do teor de umidade afeta seu comportamento, quanto a trabalhabilidade, estabilidade dimensional, resistência mecânica e durabilidade natural. (SILVA; OLIVEIRA, 2003)

2.1.1. Variação dimensional da madeira em função da umidade

A madeira é um material poroso e altamente higroscópio, que está sempre interagindo com o meio ambiente absorvendo ou cedendo água e conseqüentemente sujeitas a alterações de volume. A interação com a água faz com que a umidade influencie na variação do volume e conseqüentemente a alteração da densidade (REZENDE, 1997).

O aumento de volume na madeira causada pela absorção de água se processa quase que totalmente para umidades inferiores a 28%, sendo que, acima desse valor, a madeira torna-se dimensionalmente estável, mesmo aumentando sua umidade (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; SKAAR, 1971; COSTA, 2006).

O estudo do comportamento das variações dimensionais da madeira é essencial para a sua utilização industrial, tanto na construção civil como na produção de móveis. As relações existentes entre densidade, umidade, retratibilidade e expansão volumétrica da madeira são de fundamental importância para a sua correta utilização. (OLIVEIRA; LUCIA; VITAL, 1990; GARCIA, 1990).

A umidade não é uma característica intrínseca da madeira, entretanto o estudo desta variável é indispensável por tratar-se de um parâmetro que afeta o comportamento da madeira, durante as fases de processamento, secagem e preservação (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A possibilidade de generalizar um comportamento para a umidade é difícil, pois há variação dentro e entre as espécies e ainda, dentro da mesma árvore (OLIVEIRA; HELLMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005). Este fato também foi observado por Aguiar (1980) durante a secagem de uma tora de madeira.

A variação da umidade é grande durante o processo de secagem da madeira, recentemente abatidas ou depositadas em um pátio de secagem até a umidade de equilíbrio. Segundo Silva e Oliveira, (2003) a variação de umidade na madeira promove alterações dimensionais e não possuem uniformidade de variação, ou seja, são desiguais ao longo das três dimensões estruturais. Tais afirmações são confirmadas mais recentemente por Rezende (1997) e Costa (2006) e estas alterações devem ser monitoradas pelos principais defeitos no processo de secagem.

Alguns trabalhos encontrados na literatura (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985), demonstram que a retratibilidade máxima da madeira está diretamente correlacionada com a sua densidade. Esses autores destacam a importância em estabelecer correlações gerais e específicas entre essas duas variáveis. E mais atualmente Rezende (2003) e Costa (2006) estudando tais variações e suas correlações também sugeriram equações gerais de transformações.

A interação entre água e madeira promovida pelas condições ambientais, faz com que ocorra variações tanto na sua massa como em seu volume. A variação porcentual em massa será sempre maior que a variação do volume, mesmo para umidades abaixo e acima do ponto de saturação das fibras. (GALVÃO; JANKOVSKY, 1985; REZENDE, 1997). A análise da retratibilidade realizada por Costa (2006), conclui que a variação é maior para umidades menores que 20%, concordando com a discussão dos autores citados acima.

2.2. Densidade da madeira

A densidade é reconhecida como uma importante propriedades para avaliação da qualidade da madeira, por estar associada as suas demais características. Em função de sua importância e facilidade de determinação, frente aos outros parâmetros de qualidade, a densidade básica tomou-se a característica mais estudada e difundida (RIBEIRO; ZANIN FILHO, 1993)

A densidade possui uma variação significativa entre espécies, dentro das espécies e mesmo dentro da árvore nas direções longitudinais e nos sentidos radiais. De uma forma geral, pode-se dizer que a densidade é mais baixa em povoamentos jovens do que em árvores maduras, ou seja, que aumenta em função da idade (PANSIN; ZEEUW, 1970; JAMMAL FILHO, 2011).

A característica da madeira, a densidade, perante a sua vasta aplicação fez com que a busca por análises de medição fossem cada vez mais dinâmicas. Gouvêa et al. (2011), estudando a densidade básica do gênero *Eucalyptus* por diferente métodos, apresentou o aparelho resistógrafo como o mais adequados para predição da densidade. Os resultados foram comparados com densidade básica determinada pelo método convencional (Balança hidrostática).

A discussão ao longo do tempo tem mostrado dificuldades com relação à terminologia utilizada para propriedade densidade. Existem discordâncias entre autores que utilizam a mesma metodologia com terminologia diferente. Os termos massa específica e densidade representam a mesma característica física quando se trabalha com madeira.

O termo densidade e massa específica são usados alternadamente, e apresentam definições diferentes. Haygreen e Bowyer (1996), definiram a densidade como a massa de qualquer substância por unidade de volume e geralmente é expressa em g.cm^{-3} ou kg.m^{-3} , sendo, portanto, uma grandeza dimensional. Apesar do termo “densidade” não ser aceito universalmente, a forma adequada para a determinação da densidade é obter a massa e o volume no mesmo teor de umidade. Já a massa específica é a razão entre a densidade do material e a densidade da água e o resultado é adimensional. A densidade também pode ser

determinada a qualquer conteúdo de umidade, porém, o teor de umidade deve ser especificado, a fim de evitar dúvidas quanto ao procedimento usado para o cálculo.

A densidade é estudada de forma geral e a determinação desta propriedade é realizada de várias maneiras. Esta propriedade é muito utilizada na forma de densidade básica, na caracterização da madeira de *Pinus* e *Eucalyptus* e nas aplicações de equações para conversões de uma densidade em outra. Ainda Rezende (1997) determinou as variações entre as densidades determinadas experimentalmente e as estimadas por equações, tais resultados apresentaram uma variação inferior a 1%.

A característica densidade é utilizada para diversos fins e foi o parâmetro utilizado por Andrade (2007), para a diversificação da madeira utilizada no cultivo do cogumelo, avaliou as características bromatológicas do *shiitake* em madeiras de espécies e clones *Eucalyptus* com densidade entre 500 e 700 kg.m⁻³, por tratar-se de uma matéria prima comum no mercado.

O método de imersão em água é precisa na obtenção do volume deslocado este método foi utilizado por Rezende (1997), Jammal Filho (2011). Costa (2006) determinou a densidade básica de seis tratamentos, sendo, seminal de *Eucalyptus grandis*; clones de *E. grandis* e de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla* a média destes tratamentos foi de 472 kg.m⁻³. Sendo a menor densidade determinada para o tratamento clonal e as maiores densidades determinada para o tratamento híbrido. Para o tratamento clonal de *Eucalyptus* a densidade básica determinada foi de 425 kg.m⁻³ e para o tratamento híbrido foi de 524 kg.m⁻³. Tais amostras foram retiradas de florestas de ciclo curto.

O ¹Método de atenuação da radiação gama é utilizado na caracterização do perfil de densidade de discos de madeira no sentido radial medula casca, fornecendo densidade a cada milímetro. Costa (2006) na caracterização do gênero *Eucalyptus* determinou a densidade básica de 479±51 kg.m⁻³ e obteve um desvio médio de 1,5% na comparação com a densidade determinada pelo método de imersão.

¹ A Técnica de Atenuação da Radiação Gama (TARG), com o isótopo radioativo - ²⁴¹Am é utilizada para determinar a densidade da madeira, neste trabalho foi denominada como - Método de atenuação da radiação gama ou método de atenuação (REZENDE, 1997; COSTA, 2006; JAMMAL FILHO, 2011).

A técnica do Pilodyn é caracterizada como uma análise não destrutiva para obtenção da densidade. Para a calibração do aparelho Bison et al. (2009) utilizou 142 árvores de diferentes espécies de *Eucalyptus*, e determinou a densidade básica média de 430 kg.m⁻³.

A densidade é obtida por vários métodos: balança hidrostática (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971; ANDRADE, 2007) também conhecida como o Máximo teor de água; O método do Pilodyn (BISON et al., 2009); método de imersão em água (REZENDE, 1997, COSTA, 2006, ARONI, 2005); imersão em mercúrio líquido (REZENDE, 1997); Técnica de atenuação da radiação gama - TARG (REZENDE, 1997, LIMA; REZENDE, 2003; ARONI, 2005; COSTA, 2006); método nuclear utilizando o Raio-x (KAENNEL; SCHWEINGRUBER, 1995).

2.2.1. Densidade aparente

A grande vantagem da densidade aparente é a facilidade de ser determinada, pois refere-se à umidade e volume no momento da determinação. Não importando se a amostra está ou não na umidade de equilíbrio. Por meio da densidade aparente é possível monitorar a perda de água para o ambiente por meio da massa e volume ao longo do tempo, até a amostra apresentar a massa na umidade de equilíbrio.

A densidade aparente foi utilizada por Costa (2006) com o intuito de caracterizar a qualidade da madeira de um povoamento comercial para fabricação de chapas e painéis. Rezende (1997) enfatiza a importância em conhecer a umidade das amostras no momento da determinação da densidade aparente, pois isto torna possível obter outra relação entre massa e volume e torna possível a comparação de resultados determinados por outros laboratórios.

A densidade é considerada uma variável importante e influente no processamento de transformação da matéria prima. A produção de painéis e de celulose com madeiras de alta densidade requer maior energia em seu processamento, ou seja, no transporte, na secagem e no processo de transformação para o fim planejado.

O interesse em determinar a densidade de uma forma prática e precisa está necessitando cada vez mais de pesquisas de aprimoramento técnico e investimentos de recursos financeiros em laboratórios. A densidade aparente determinada na umidade de equilíbrio expressa de maneira real a característica da madeira, e principalmente por evidenciar a forma de utilização em construções civis, confecções de móveis, etc. (REZENDE, 1997).

A ênfase quanto à importância em transformar por meio de equações a densidade obtida em outra, é quanto a sua praticidade, e os erros experimentais foram obtidos dentro do esperado (REZENDE, 1997).

2.2.2. Densidade básica

A relação entre massa seca e volume verde ou saturado, também tem sido bastante empregada, devido à sua importância nos inventários florestais e a caracterização da madeira para a uniformidade e comparação dos resultados. Esta é uma relação imaginária, que obviamente não representa uma característica física real da madeira. Entretanto, ela é muito utilizada como parâmetro de qualidade, e por ser de fácil determinação, embora possa produzir achatamento nas suas próprias variações (REZENDE, 1997).

Quanto à facilidade de determinação é questionável, por necessitar de duas condições de umidade da madeira: uma no estado totalmente saturado e o outro no estado completamente seco. A maior preocupação em mensurar esta densidade está na demanda do tempo, exigido para o estado completamente saturado e outro gasto de tempo e de energia para o estado completamente seco.

Batista, Klitzke e Santos (2010) afirmam que a densidade básica é uma das propriedades físicas mais importantes, por se relacionar diretamente com outras propriedades da madeira, inclusive a anisotropia de contração. Ainda o mesmo autor avaliando plantios clonais de 11 anos, de *Eucalyptus saligna* Smith, *Eucalyptus grandis* W. Hillex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden, respectivamente determinou a densidade básica média de 460, 450 e 560 kg.m⁻³. Foi avaliada a diferença entre árvores do mesmo clone com um teste de

análise variância e não foi determinado para este conjunto de dados uma diferença significativa.

Rezende (1997) e Costa (2006) utilizaram também a densidade para caracterizar a madeira de *Eucalyptus*, Rezende (1997) obteve uma densidade básica média para de 482 kg.m^{-3} e Costa (2006) a média de 472 kg.m^{-3} , ambos os autores avaliando árvores entre seis e sete anos.

Gava e Gonçalves (2008) estudando qualidade da madeira, em diversos tipos de solo, na produção de celulose em plantações clonais de *Eucalyptus grandis*, com idade de seis a sete anos, determinou a densidade básica entre 440 a 450 kg.m^{-3} , não encontrando diferença significativa entres os clones, ou seja, a densidade para este conjunto de amostras apresentou-se homogênea.

Gouvêa et al. (2009) estudaram a produção de celulose de baixo custo e alta qualidade em clones de *Eucalyptus* proveniente de quatro regiões. Foi observado que a produção de celulose de alta qualidade requer madeira adequada e selecionada. A seleção de clones foi realizada com base em critérios como densidade básica, rendimento gravimétrico da polpação e composição química da madeira. A média da densidade básica apresentada foi de 420 a 440 kg.m^{-3} e para a altura do peito ficou entre 420 a 470 kg.m^{-3} .

Belini et al. (2008) avaliando a estrutura anatômica, densidade básica e morfologia de cavacos de *Eucalyptus grandis* para produção de painéis de MDF determinou a densidade básica média de 432 kg.m^{-3} e não apresentaram diferença entre as amostras coletadas, demonstrando a homogeneização do lote de cavacos no silo em relação às variações de densidade da madeira existentes ao longo do fuste das árvores. A densidade utilizada para qualificar a madeira é importante, pois influência diretamente na conversão de madeira por metros cúbicos. Isto significa que madeira com maior densidade resulta em um menor consumo de madeira para a mesma finalidade.

Vital, Maciel e Della Lucia (2006) avaliaram a qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. O gênero *Eucalyptus* apresentou a idade de 40 anos e o gênero *Pinus* a idade de 50 anos. Foi determinada a densidade básica média respectivamente de 590 , 640 e 470 kg.m^{-3} , com 45 repetições para cada clone. As amostras do gênero *Eucalyptus* apresentaram densidade básica acima de 500 kg.m^{-3} , devido à

idade destas árvores. Segundo Vital (1984) e Kollmann; Kuenzi e Stamm (1975) relataram que, quanto maior a idade da árvore, maior é a sua densidade básica, devido ao espessamento das paredes celulares dos elementos estruturais.

Gomide, Fantuzzi Neto e Regazzi (2010) analisaram critérios de qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de celulose *Kraft*, com o objetivo de caracterização básica da madeira e correlacioná-las com o rendimento de polpação. A densidade básica é citada como uma provável característica de qualidade mais utilizada em programas de seleção de clones no melhoramento florestal, que é justificado pela alta correlação com consumo específico.

Bison et al. (2009) identificou dialelos entre clones de *Eucalyptus camaldulensis*, Clones de *E. urophylla*, *E. grandis* e *E. saligna*, nos cruzamentos entres clones elite de *Eucalyptus urophylla*, *E. grandise* *E. saligna* com clones elites de *Eucalyptus camaldulensis* da empresa Aracruz Celulose, por meio do cruzamento dialelo parcial. Dois anos após o plantio foram avaliadas as circunferências a altura do peito e a densidade básica. Os dados foram submetidos à análise dialética. O cruzamento envolvendo clones elites demonstrou promissores na obtenção de ganho de volume e na qualidade da madeira. Tal trabalho apresentou um fator favorável ao controle das características, expressão gênica, especialmente no caso da densidade da madeira.

A densidade de uma forma geral, apresenta-se como um dos principais parâmetros de correlação com as variáveis de interesse na área florestal. A literatura apresenta um grande número de artigos utilizando a densidade correlacionando com a produção de celulose, propriedades físico mecânicas, o teores de lignina e análise dialética.

2.3. Determinação da Densidade a 12% de umidade

A interação entre água e madeira promovida pelas condições ambientais, faz com que esta sofra variações. A madeira armazenada e exposta a curto, médio e longo prazo, sujeita aos fatores climáticos, umidade e temperatura, está sempre sujeita a

alterações de umidade, de forma sutil e gradual, e as variações de curto prazo tendem a influenciar somente a superfície da madeira.

A densidade é considerada como um fator influente no processamento de transformação desta matéria prima, se tratando da produção de painéis e na produção de celulose, madeiras de alta densidade, entre 650 a 900 kg.m⁻³, requerem maior energia em seu processamento. A densidade média a 12% de umidade, entre 400 a 600 kg.m⁻³, proporciona melhor manuseio deste material e alguns ensaios não destrutivos utilizam a madeira com umidade em torno de 12% pela facilidade no manuseio e apresentar condições estáveis.

Existe uma dificuldade em determinar corretamente a densidade da madeira, pois é dependente das interações ambientais. Uma exemplificação: a umidade 0%, onde a densidade é determinada nas condições de massa seca e volume seco. Também é bastante comum e muito estudada a umidade de 12%, esta umidade refere-se a um valor médio da umidade de equilíbrio universal e adaptável perfeitamente às condições brasileiras. O valor da umidade a 15% também é adotado em alguns países europeus e pode ser utilizado também no Brasil (REZENDE, 1997).

Lima e Garcia (2010) estudaram a variação da densidade aparente (12%) e a resistência à compressão paralela às fibras em função de desbastes e adubação, em floresta de *Eucalyptus grandis* com 21 anos de idade. Esses autores verificaram que a densidade aparente e a resistência à compressão aumentaram no sentido medula casca, e concluíram também que a resistência a compressão das fibras está diretamente correlacionada com a densidade.

Geralmente a apresentação dos resultados apresentados em trabalhos científicos se diferencia principalmente por não ter uniformidade na relação massa, volume e densidade. Trabalhos apresentaram os resultados apenas citações de densidade aparente sem conhecimento da umidade no momento da determinação. Perante este cenário torna-se difícil uma comparação entre resultados determinados por laboratórios diferentes.

2.4. Variação da densidade da madeira na árvore

2.4.1. Variação da densidade direção longitudinal

Na busca pela caracterização da madeira para avaliar sua qualidade é imprescindível determinar suas características físicas. É necessário o conhecimento das variações da densidade, seja no sentido radial ou na direção longitudinal. A avaliação da densidade na direção longitudinal é uma característica que avalia a homogeneidade e da qualidade da madeira, principalmente para obter a densidade ponderada, que resulta em uma tomada de decisão para o destino do produto final.

O perfil longitudinal foi descrito por Panshin e Zeeuw (1970) que descreveram alguns padrões de variação longitudinal, como: a) a densidade decresce uniformemente no sentido base-topo; b) a densidade decresce até certo ponto e, então, se torna crescente até o topo, podendo, às vezes, decrescer levemente na parte superior; c) a densidade cresce da base para o topo, embora de forma não uniforme. Esta afirmação foi comprovada por Rezende (1997), Costa (2006) e Jammal Filho (2011) utilizando amostras do gênero *Eucalyptus*.

Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005) analisando o perfil de densidade pelo método da balança hidrostática, concluíram que a amplitude de variação da densidade na direção longitudinal foi menor que as outras variações estudadas. Entre as espécies estudadas o *Eucalyptus grandis*, com idade de 16 anos, não apresentou um decréscimo de densidade no topo das amostras. A amplitude determinada na direção longitudinal foi de 10 kg.m^{-3} .

Costa (2006) caracterizou árvores de seis anos do gênero seminal e de clone de *Eucalyptus grandis* e também de clone de híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, e apresentou um perfil médio longitudinal para as amostras de clones e híbridos *Eucalyptus*, com uma queda de densidade (12%) na posição da base até o DAP, e depois do DAP a densidade cresce até o topo. A variação média estimada da amplitude na direção longitudinal foi de $70 \pm 13 \text{ kg.m}^{-3}$.

2.4.2. Variação da densidade no sentido radial

A relevância em analisar a variação radial e determinar as variações de densidade é devido a correlação direta com a propriedade anisotrópica, que proporciona defeitos na secagem e conseqüentemente afeta a qualidade da madeira.

Na avaliação realizada de umidade e densidade básica das espécies de *Eucalyptus*, por Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005) observaram que a madeira mais homogênea, ou seja, de menor variação de densidade no sentido radial e na direção longitudinal, poderá comportar-se melhor nas operações de processamento e refletir melhor uniformidade nas propriedades tecnológicas. A relevância deste estudo ao longo do sentido radial e na direção longitudinal foi determinar a amplitude de variação para as espécies estudadas e possível destino final da matéria prima.

O estudo da variação radial é muito difundido, Vale et al. (2002), Gonçalves et al. (2010), Oliveira, Tomazello Filho e Fiedler (2010) estudaram esta variação com intuito de caracterizar o perfil da densidade pelo método de imersão utilizando a balança hidrostática. Esta metodologia apresenta a densidade média por região de coleta dos discos. Foram coletados blocos de amostras no sentido radial obtendo a média da densidade por região.

A variação radial de densidade também foi estudada por Rezende (1997), Aroni (2005) e Costa (2006), que utilizaram a Técnica de Atenuação da Radiação Gama. A variação da madeira a cada milímetro no sentido radial, evidenciou de uma forma geral um aumento de densidade para o gênero *Eucalyptus* e a diminuição para o gênero *Pinus*.

De acordo com Aroni (2005), Lima e Garcia (2010), Gonçalves et al. (2010) e Jammal Filho (2011) a densidade a 12%, 0% e a básica, cresceram no sentido medula-casca em todas as posições ao longo do fuste, porém, algumas árvores têm comportamentos diferenciados.

Lima e Garcia (2010) analisaram a densidade aparente e resistência a compressão paralela às fibras em função das intensidades de desbastes e da adubação. O resultado apresentou uma diminuição da densidade influenciada pelo fator adubo e da classe de DAP, em quase todas as posições radiais. Esses autores observaram também um aumento

da densidade e da resistência mecânica no sentido radial. A determinação das propriedades neste sentido demonstra-se complexas perante as variações determinadas por Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005), Costa (2006) e Jammal Filho (2011).

Para as espécies de *Eucalyptus*, Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005) obtiveram a amplitude de variação média da densidade (diferença entre valor máximo e mínimo) de 400 kg.m^{-3} , e para amostras do gênero *Pinus* a amplitude de variação pode ser ainda maior (ARONI, 2005).

Aroni (2005) relata a grande variabilidade entre árvores dentro do mesmo tratamento, analisando o perfil radial dos discos do gênero *Pinus*. Algumas amostras apresentaram não ter sofrido tantas variações climáticas quanto outras. A variação da densidade foi crescente no sentido radial para a maioria das árvores. A explicação para este fato talvez esteja relacionado com a localização da árvore no povoamento, estando estas mais favorecidas em termo de fatores climáticos e edáficos, ou seja, maior luminosidade, menor competição e fatores de solo favorável.

A avaliação do perfil radial é importante também para a quantificação da proporção de cerne e de alburno, pois esta característica é diretamente correlacionada com a qualidade da madeira. Gonçalves et al. (2010) analisaram a proporção de 15 árvores do gênero híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*, obteve a proporção de alburno crescente na direção longitudinal, não uniformemente. O resultado apresentado de alburno foi de 35% para a base e 65% no topo para árvores com idade de 7 e 14 anos.

A homogeneidade da densidade da madeira pode ser um fator de qualidade, além de sua densidade média. Grandes variações de densidades são geralmente indesejáveis, do ponto de vista de qualidade.

A média da densidade dos discos nas posições de coleta não representa a real condição da amostra coletada, mascaram a variabilidade da densidade no sentido radial.

2.5. Determinação de um ponto ideal de amostragem (PIA)

Atualmente a prática para a mensuração da densidade ponderada de árvores é realizada com uma coleta de discos na direção longitudinal. Na estimativa com a coleta de apenas uma amostra, torna-se importante analisar a densidade na direção longitudinal e a melhor posição no tronco que corresponda à densidade ponderada da árvore.

A densidade básica é aceita com um dos principais parâmetros de qualidade da madeira. A densidade determinada à altura do peito foi utilizada como um estimador da densidade média visando um ponto ideal de amostragem (REZENDE; SAGLIETTI; CHAVES, 1998; MENDES et al., 1999).

No estudo longitudinal da densidade em amostras do gênero *Pinus*, a estimativa do ponto ideal de amostragem foi mensurada a 50% da altura comercial, seguido do DAP. Para a realização da análise foram coletadas a 0, DAP, 25, 50, 75 e 100% (MENDES et al., 1999).

Na tentativa de estimar um ponto ideal de amostragem Benjamim (2002) utilizou amostras coletadas no DAP e a 0, 25 e 50% da altura comercial do gênero *Eucalyptus*. As amostras determinadas para mensurar o ponto ideal (0, DAP e 25%), foram escolhidas por apresentar menores dificuldades nas coletas. As amostragens que forneceram a melhor precisão na estimativa da densidade básica ponderada foram aquelas à 25% da altura comercial de amostras do gênero *E. grandis*, *E. saligna* e *E. híbrido*.

A empresa Duratex S/A e o laboratório de Física Aplicada do Instituto de Biociências (REZENDE et al., 2008), sugerem a amostragem nas posições: 12,5; 37,5; 62,5 e 87,5% da altura comercial. Costa (2006) na tentativa de identificar um ponto de amostragem em árvores de clones de *E. grandis*; seminal de *E. grandis*; e de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*, utilizou essa amostragem de coleta na direção longitudinal. A partir de equações de variações de densidade, mensurou o ponto que melhor representou a densidade média ponderada a 50% da altura comercial.

2.6. Métodos de determinação da densidade da madeira

2.6.1. Método de Atenuação da Radiação Gama – (TARG)

A análise de madeira pelos métodos nucleares foi introduzida na década de 70 no Brasil e entre os trabalhos desenvolvidos destaca-se o de Ferraz (1976), iniciando os primeiros estudos com radiação gama, investigando a densidade e umidade da madeira (FERRAZ; AGUIAR, 1985). Esta análise foi recomendada por muitos investigadores na década de 1950 e depois exposto por Loss (1961) apud Ferraz, (1976). Posteriormente, Parrish (1961 apud Ferraz, 1976 e Rezende, (1997), aperfeiçoaram o método com o uso de energia da radiação gama.

Conforme Rezende (1997) o Método de atenuação da radiação gama é determinada pela quantidade de radiação atenuada quando o feixe de radiação gama atravessa o material absorvedor. A relação entre radiação emitida pela fonte e a radiação atenuada proporciona a densidade de material absorvedor.

O método nuclear está dentre os métodos utilizados para determinação da densidade da madeira, que utiliza feixe de radiação gama, partícula beta ou raios-X. A utilização deste método oferece maiores informações da amostra, quando deseja-se medidas pontuais ou milimétricas da densidade ao longo do sentido radial (REZENDE; SEVERO; QUINTANA, 1999).

Os métodos de determinação da densidade da madeira que utilizam o raios-X ou partículas beta, apesar de apresentarem boa precisão, tem sua aplicação limitada pela espessura da amostra (COSTA, 2006).

O método de atenuação permite determinar a densidade aparente pontual ao longo do sentido radial e também estimar a densidade média e ponderada por meio de equações. Essa metodologia permite mensurar a densidade no sentido radial evidenciando os picos de alta e de baixa densidade da madeira. Um exemplo claro é o gênero *Pinus*, pois é bastante sensível às variações climáticas, sofrendo alterações na sua composição química e física na época de baixas temperaturas e baixa umidade do solo. O método de atenuação

permite observar e quantificar essas variações que não podem ser determinados com os métodos tradicionais (REZENDE, 1997).

A procura pela qualidade da madeira está presente em todo o setor florestal e quando o interesse é apenas a obtenção do valor médio da densidade, os métodos tradicionais mais simples, geralmente podem ser utilizados com certa vantagem em relação aos métodos nucleares (REZENDE; SEVERO; QUINTANA, 1999; ARONI, 2005; COSTA, 2006; JAMMAL FILHO, 2011).

Ferraz (1974), ao estudar a determinação simultânea de densidade e umidade do solo com fontes radioativas de baixa energia de ^{241}Am , cuja energia que é de 60 KeV, percebeu as vantagens de usar baixa energia para determinar a densidade de madeiras. A metodologia utilizando a radiação gama pelo isótopo de ^{241}Am foi utilizada para mensurar o fluxo de água na madeira devido sua boa sensibilidade, simplicidade e por conseguir utilizar a mesma amostra para vários teste quando necessário. Mais recentemente Rezende (1984), no estudo da biomassa de *Eucalyptus grandis*, faz uma descrição do uso técnico da metodologia.

O uso da radiação gama apresenta-se adequado permitindo trabalhar com amostras variando de 1,0 até 40 cm de espessura (FERRAZ, 1976; REZENDE, 1997; COSTA, 2006). O uso deste método por Aroni (2005) abordou a variação radial da densidade e a produtividade do gênero *Pinus*. Costa (2006) identificou a variação radial de densidade, a produtividade e estabeleceu equações de transformações com amostras da espécie de *Eucalyptus*. Ambos autores utilizaram amostras com espessura entre dois e meio a três centímetros. Também analisando a variação radial das amostras de clones de *Eucalyptus* originárias duas regiões diferentes, Jammal Filho (2011), utilizou o perfil radial e o diâmetro das amostras para obter funções *taper* para estimar o volume de amostras entre as idades de dois e seis anos e trabalhou com amostras mais espessas entre três e cinco centímetros.

Para calcular a densidade de um material pelo Método de atenuação da radiação gama é necessário determinar ou conhecer o coeficiente de atenuação de massa (μ). Este coeficiente é expresso em $\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$, desta forma depende somente das características químicas e físicas do material com exceção da densidade.

Bucur (2003) determinou o coeficiente de atenuação de massa da água de 0,205 o resultado foi muito próximo ao determinado por Ferraz (1974) de 0,2034 $\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$. O

coeficiente de atenuação de uma mistura de um material pode ser previsto teoricamente, desde que conhecidos os coeficientes de atenuação de massa de seus constituintes.

O resultado determinado por Bucur (2003) do coeficiente de atenuação teórico da água, também proporcionou determinar o coeficiente de atenuação da madeira com vários níveis de umidade de 0 a 100% e obteve um valor de μ gradual de 0,192 à 0,198.

2.6.2. Método de volumetria por imersão em água

Este método baseia-se no princípio de Arquimedes, em que a perda aparente de peso de um corpo imerso em líquido é igual à massa do líquido deslocado. Este método é considerado um dos mais precisos, sendo o volume determinado pela variação de peso do líquido, em virtude da imersão da amostra de madeira. (PALERMO, 2003; ARONI, 2005; COSTA, 2006; JAMMAL FILHO, 2011; SANTOS, 2011). Também proporciona mensurar a densidade da madeira, por meio de uma imersão em água, obtendo o volume deslocado saturado ou a 12% de umidade de amostras.

Para amostras do gênero *Pinus* foi determinada a densidade básica por imersão, que segundo Aroni (2005) a diferença média apresentada entre os métodos de imersão e o método de atenuação não foram discrepantes e apresentaram uma variação próximas a 2,7%.

Para as amostras de *Eucalyptus* sp., Jammal Filho (2011) utilizou a metodologia para determinar a densidade em três momentos, plantios de dois, quatro e seis anos de idade, e Costa (2006) para comparar com o método de atenuação.

2.6.3. Método de volumetria com o uso da balança hidrostática

Este método também utiliza a água para imersão para mensurar o volume das amostras.

A mensuração do volume é obtida pelo método da balança hidrostática. Esta metodologia é a mais utilizada e difundida para qualificar a madeira de um

modo geral. O método é preciso e muito utilizado para caracterização da madeira e regida pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 11941:2003.

A densidade (ρ_b) é calculada por meio da relação entre a massa 0% de umidade (M_0) e volume saturado (V_{SAT}), expressa em g.cm^{-3} , conforme Equação 1.

$$\rho_b = \frac{M_0}{V_{SAT}} \quad (1)$$

Na Equação 1, o volume saturado (V_{SAT}) é obtido pelas Equações 2 e 3.

$$| E | = | P_{SA} - P_{SAP} | \quad (2)$$

$$| V_{SAT} | = | P_{SA} - P_{SAP} | \quad (3)$$

onde:

E : Empuxo (gf);

P_{SA} : Peso saturado ao ar (gf);

P_{SAP} : Peso saturado aparente (gf);

2.6.4 Método de volumetria por equivalência de área

Um método muito utilizado para determinar a área limitada em uma folha de papel, por um contorno fechado, é conhecido como método do planímetro ou denominada como planimetria.

A sua maior aplicação é a medição de parcelas de terreno em cartas topográficas e cadastrais, podendo também possibilitar a medição de áreas de perfis transversais em estradas e ferrovias, dentre outras aplicações científicas envolvendo a propriedade área.

O planímetro é constituído por duas hastes articuladas. Uma delas, a haste graduada, possui na extremidade livre uma lente com que é percorrido o contorno da superfície a ser medida. A outra haste, a haste polar, possui há uma agulha que se fixa no papel onde está figurada a superfície.

A metodologia do planímetro (REZENDE, 1997) assemelha-se ao método denominado de planimetria computacional, que utiliza dos mesmos instrumentos para obtenção da área, ou seja, um contorno em uma folha de papel. Por meio de *softwares* é realizada a digitalização e a mensuração da área do contorno. Este método foi utilizado para mensurar áreas de lesões, avaliar os efeitos da irradiação ultra-sônica de baixa intensidade sobre a cicatrização cutânea em ratos (FALCÃO et al., 2001; FERREIRA et al., 2008).

O método da volumetria por equivalência de área (*VEA*) para determinar o volume, utiliza a área da amostra, assemelha-se ao da determinação da área do planímetro que utiliza contornos. A partir da área conhecida o *VEA* estima a área de interesse, por uma regra matemática de três simples. Este procedimento utiliza uma folha de sulfite (A4) de área e massa conhecida. A partir destes dados qualquer porção coletada da folha de sulfite pode-se conhecer a área em (cm²). Conhecida a área desejada da porção coletada em centímetros quadrados e obtendo a espessura média da amostras em centímetros, é obtido o volume das amostras pela relação entre área e espessura em centímetros cúbicos (REZENDE, 1997).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de Física Aplicada do Departamento de Física e Biofísica do Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista no campus de Botucatu-SP.

3.1. Material utilizado para determinar as propriedades da madeira

3.1.1. Amostra de madeira de *Eucalyptus* sp.

As árvores de *Eucalyptus* sp. utilizadas no ensaio foram plantadas na Fazenda Pitangueiras da Empresa Duratex S.A. no município de Botucatu - SP.

As árvores foram retiradas de um mesmo talhão de 2280 árvores com aproximadamente 1,03 hectare, com espaçamento único de 3,0 x 1,5 m com seis anos de idade, coletada em fevereiro de 2010. As árvores foram cultivadas sob as mesmas condições

edáficas e climáticas em latossolo vermelho distrófico típico, textura argilosa, relevo ondulado.

3.1.2. Equipamentos utilizados para mensuração da massa, volume e densidade das amostras

Os equipamentos utilizados na determinação da densidade pelos métodos apresentados foram:

- ✓ um paquímetro digital da marca Mitutoyo com resolução de 0,01 mm e precisão de $\pm 0,005$ mm.
- ✓ uma balança eletrônica de precisão da marca Gehara, modelo “BG 1000”, com resolução de 0,01 g e precisão de $\pm 0,005$ g;
- ✓ uma haste de metal perfurante;
- ✓ um recipiente contendo um volume de três litros de água para imersão das amostras contendo um volume médio de 600 cm³;
- ✓ uma tesoura e uma fita métrica de 1,5 m;
- ✓ folha de sulfite A4 , com dimensões de 210 x 297 mm
- ✓ lápis preto.

3.2. Método de imersão em água para mensuração do volume das amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

3.2.1. Mensuração do volume e da densidade pelo método de imersão em água (MI)

O método de imersão em água foi utilizado por Rezende (1997) e Costa (2006). Consiste em imergir as amostras por cerca de 10 segundos e determinar a massa do volume de água deslocado por meio do empuxo.

Neste experimento a densidade foi determinada pela Equação 4. A massa foi determinada por meio de pesagem convencional, em uma balança de precisão. O

volume foi determinado pelo empuxo da água no corpo de prova imerso, conforme a ilustrado na Figura 1.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (4)$$

$$E = \rho_f \cdot V_c \cdot g \quad (5)$$

Sendo:

- ρ : densidade (g.cm^{-3});
- ρ_f : densidade do fluido (água = 1 g.cm^{-3});
- M : massa da amostra (g);
- V_c : volume do corpo (cm^3);
- E : empuxo (gf);
- g : aceleração da gravidade (1.0 gf.g^{-1});

No experimento foi utilizando o sistema CGS* que é uma adaptação do CGS, em que o empuxo é dado em gramas-força, tal que $1 \text{ gf} = 980^2 \text{ dyn}$. A Equação 6 foi determinada substituindo a densidade do fluido por 1 g.cm^{-3} ; e da aceleração da gravidade por 1.0 gf.g^{-1} na Equação 5, e obtém-se:

$$|E| = |V_c| \quad (6)$$

Neste procedimento é necessário que a balança esteja "tarada", ou seja, zerada com o recipiente contendo o fluido (água) conforme Figura 1A.

O corpo de prova possui densidade menor que o fluido, portanto é necessário exercer uma força para baixo para que o corpo de prova fique totalmente imerso no fluido (Figura 1B). Nesta situação existem três forças atuando, o Empuxo (E), a Força peso (W) e a Força (F) conforme mostra a Figura 2. Com o sistema em equilíbrio o empuxo foi determinado pela Equação 7.

$$E = F + W \quad (7)$$

² dyn = é uma unidade de medida padrão do Sistema CGS de unidades para a representação de força (10^{-5} N , onde N = Newton).

Para maior precisão dos resultados, foi inserida uma marca na haste para que o volume da haste imersa seja quantificado e possa ser descontada do volume da amostra.

O procedimento utilizado é ilustrado nas Figuras 1 e 2, para corpos de prova com densidade menor que a da água. No experimento a balança forneceu o resultado da massa em gramas e o peso em gramas força, portanto optou-se por utilizar o sistema de unidades CGS*.

O esquema de força que atuaram sobre o corpo no momento da imersão é apresentado na Figura 2.



Figura 1A

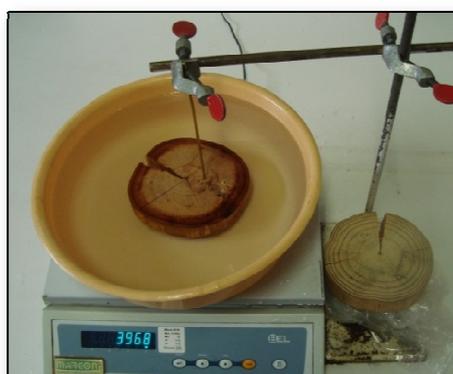


Figura 1B

Figura 1. Procedimento para mensurar o volume das amostras por imersão em água para amostras com densidade do fluido maior que o densidade do corpo ($\rho_C > \rho_f$)

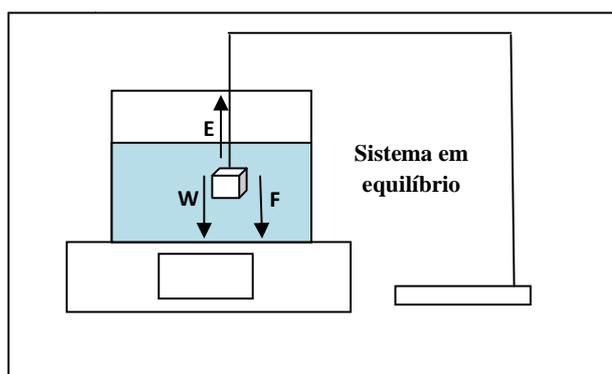


Figura 2. Esquema da metodologia para mensurar o volume das amostras por imersão em água para amostras com densidade menor que a do fluido

A densidade a 12% foi obtida pela Equação 8, utilizando amostras com a massa a 12% de umidade obtida por pesagem comum e o volume foi obtido pela Equação 6.

$$\rho_{12} = \frac{M_{12}}{V_{12}} \quad (8)$$

Sendo:

M_{12} : massa do disco a 12% (g);

ρ_{12} : densidade amostra a 12% (g.cm^{-3});

V_{12} : volume da amostra a 12% (cm^3).

3.2.2. Determinação do volume e de umidade em função do tempo de imersão

Foram selecionadas 11 amostras com valores de umidade entre 1 e 19% e densidade entre 400 e 700 kg.m^{-3} .

Para a determinação da variação volumétrica e da umidade em função do tempo de imersão, foram realizadas cinco repetições de imersão por 10 segundos para mensuração do volume das amostras. Entre as determinações de volume as amostras foram submersas em água, por mais 15 segundos, para quantificação das variações da umidade em função do tempo.

O procedimento utilizado foi:

- proc. 1. mensurar a massa das amostras, antes da primeira imersão;
- proc. 2. imergir as amostras em água para mensuração do volume por 10 segundos;
- proc. 3. secar a amostra com um papel toalha, para retirar o excesso de água superficial;
- proc. 4. mensurar a massa da amostra;
- proc. 5. imergir a amostra por 15 segundos, para obter a variação de umidade;
- proc. 6. secar a amostra.

Este procedimento para mensuração da variação de umidade e de volume foi realizado por cinco vezes.

No procedimento, proc. 2, a imersão das amostras para obtenção do volume, foram imersas em água por 10 segundos em média. Para mensurar o volume houve a necessidade de esperar um período de estabilização do meio, onde a amostra foi imersa, ou seja, até que a balança pare de oscilar.

A Equação 9 possibilitou mensurar a variação de umidade após tomar como base a massa inicial. A massa final foi substituída pelo valor determinado a cada imersão para obter a variação de umidade em função do tempo.

Por meio das imersões em água dos discos de madeira, foi determinado o volume a cada imersão por um determinado período, que possibilitou determinar as variações volumétricas em função do tempo pela Equação 10.

$$\Delta_U = \left(\frac{M_f - M_i}{M_i} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

$$\Delta_V = \left(\frac{V_f - V_i}{V_i} \right) \cdot 100 \quad (10)$$

Sendo:

- Δ_U = variação da umidade a partir da umidade inicial (%);
- M_f = massa final obtido após cada imersão (g);
- M_i = massa inicial da amostra, obtido antes de iniciar o processo de imersão(g);
- Δ_V = variação volumétrica a partir da umidade inicial (%);
- V_f = volume final obtido após cada imersão (cm³);
- V_i = volume inicial da amostra, obtido antes de iniciar o processo de imersão (cm³).

Para confirmar a variação da umidade e da variação do volume das amostras no momento de imersão foram elaborados gráficos que proporcionaram visualizar a variação da umidade. A Equação 11 possibilitou efetuar cálculos para determinar a variação de volume por unidade de umidade (Δ_V/Δ_U).

$$\frac{\Delta_V}{\Delta_U} = \frac{V_f - V_i}{U_f - U_i} \quad (11)$$

3.2.3. Amostras utilizadas para a correção do volume

Na mensuração do volume obtido pelo método de imersão em água, em amostras a 12% de umidade, a água é absorvida aumentando a umidade da amostra, esta absorção promove a diminuição do volume da água deslocada, ocasionando um erro na mensuração do volume das amostras.

Para a correção desta diminuição do volume foram selecionadas 29 amostras de *Eucalyptus sp.*, classificadas pela classe de diâmetro, para a determinação do volume aparente a 12% pelo método de imersão. Na correção do volume foram utilizadas as Equações 9 e 10 obtidas pela variação de volume e de umidade, determinadas no item 3.2.2.

As amostras foram classificadas de acordo com suas dimensões diamétricas, da seguinte forma;

Para as amostras G_1 foram selecionadas amostras com o diâmetro de $7,8 \pm 2,1$ cm, para as amostras G_2 de $10,8 \pm 1,2$ cm e para as amostras G_3 de $13,5 \pm 1,6$ cm.

3.2.4. Amostras utilizadas para analisar a variação de volume, umidade e densidade por três repetições de imersão

Foram selecionadas 60 amostras de *Eucalyptus sp.* para a determinação do volume, massa e densidade pelo método de imersão. Foram mensurados os diâmetros; Pequeno (G_1), Médio (G_2) e Grande (G_3), conforme descrito no item anterior.

Para realizar este procedimento foram utilizadas amostras na umidade entre 12 e 14% e forneceram os valores de volume (V), massa (M) e densidade (ρ). Para calcular a variação de umidade foram efetuadas três repetições de imersões consecutivas, em média de 14 segundos com um intervalo de 30 segundos entre as repetições.

As amostras para determinação das variações de volume, massa e densidade foram classificadas de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Diâmetro das amostras utilizadas para determinar volume dos grupos G_1 , G_2 e G_3 pelo método de imersão em água (MI) de madeira da espécie de *Eucalyptus* sp.

Grupos	Diâmetros (cm)	Nº de Amostras
G_{1i}	5 – 8	20
G_{2i}	8 – 12	20
G_{3i}	12 – 15	20

3.3. Método da volumetria por equivalência de área para determinação do volume das amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

Foram selecionadas 29 amostras de *Eucalyptus* sp. para a determinação do volume, massa e densidade. Foram selecionadas priorizando os diâmetros; Pequeno (G_1), Médio (G_2) e Grande (G_3), conforme descrito no item 3.2.4.

3.3.1. Determinação do volume pelo método da volumetria por equivalência de área (VEA)

O método consistiu em contornar os discos, com lápis preto, sob uma folha de papel A4, conforme Figuras 3 e 4 e o contorno inclui as rachaduras. Estes contornos foram recortados, obtendo seis recortes da área da amostra, sendo três recortes de um lado e três do outro. Foi determinada também a massa média da folha de A4, utilizando-se 10 repetições e também a sua área média. Estas médias proporcionaram a área da amostra, conforme a Equação 12.

$$A_{rec} = \frac{M_{rec} \cdot A_{A4}}{M_{A4}} \quad (12)$$

Sendo:

- A_{rec} : área média da amostra (cm²);
- A_{A4} : área da folha A4 (cm²);
- M_{rec} : massa média do recorte (g);
- M_{A4} : massa média da folha A4 (g).

Em seguida foi determinado o volume da amostra a 12%, utilizando-se a Equação 13. Para realizar este procedimento foi necessário determinar a espessura média das amostras utilizando um paquímetro de precisão, com a precisão de quatro algarismos significativos.

$$V_{12} = A_{rec} \cdot h \quad (13)$$

Sendo:

h : espessura média da amostra (cm);

V_{12} : volume amostra (cm³).



Figura 3. Contorno dos discos da base em uma folha de A4 de amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.



Figura 4. Contorno do disco da base na folha A4 para determinação da área das amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

3.3.2. Determinação do ponto ideal de amostragem pelo método da volumetria por equivalência de área (VEA)

As árvores utilizadas no ensaio foram retiradas de um mesmo talhão de 2210 árvores com aproximadamente 1,0 hectare, com espaçamento único de 3,0 x 1,5 m e idade de seis anos, coletada em março de 2006.

Foram selecionadas seis árvores para a determinação do ponto ideal de amostragem (PIA), foram retiradas amostras a cada metro até a altura comercial em forma de disco por árvores, com espessura de aproximadamente 5,0 cm.

Na preparação dos discos após adquirirem umidade próxima a de equilíbrio, com a umidade ambiente, foram aplainadas, lixadas a fim de obter suas faces lisas e paralelas.

Para a mensuração do volume, massa e densidade foi utilizado o método da volumetria por equivalência de área.

3.4. Método de atenuação da radiação gama para determinação da densidade das amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

As árvores utilizadas no ensaio foram retiradas de um mesmo talhão de 2180 árvores com aproximadamente 1,0 hectare, com espaçamento único de 3,0 x 1,5 m e idade de seis anos, coletada em fevereiro de 2010.

Foram selecionadas quatro árvores de *Eucalyptus* sp. para a avaliação da densidade na direção longitudinal. Foram retiradas seis amostras em forma de disco por árvores, a cada quatro metros da base até a altura comercial, com espessura de aproximadamente 5,0 cm, totalizando 24 discos.

O Método de atenuação foi utilizado para determinar a densidade média ponderada básica e a 12% de umidade.

O procedimento na preparação dos discos foi o mesmo utilizado no item 3.3.2, após adquirirem umidade próxima a de equilíbrio com a umidade ambiente.

3.4.1. Calibração do equipamento utilizado pela método de atenuação da radiação gama

A calibração do aparelho foi realizada para mensurar a densidade do material utilizado como teste por meio dos parâmetros conhecidos do material calibrador, como o coeficiente atenuação de massa (μ) e a sua densidade.

O material calibrador utilizado foi a água pura na temperatura ambiente. Essa calibração inclui determinações da radiação de fundo (BG), quantidade de fótons não atenuados (I_0) e os fótons atenuados (I).

O coeficiente de atenuação de massa de um sistema é obtido a partir da Lei de Beer - Lambert conforme Equação 15, o valor médio foi mensurado por uma série de medidas efetuadas perpendicularmente à espessura da amostra. O material utilizado foi a água por apresentar características de homogeneidade e de fácil acesso em temperatura ambiente à 25° C.

Para a calibração foi confeccionado um recipiente de acrílico, com espessura de parede em torno de 2 milímetros, para inserção da água e para a incidência do feixe de radiação. As dimensões do recipiente foram de 3,5, 3,0 e 3,3 cm, conforme Figura 5. Foram efetuadas coletas de dados ao longo da profundidade que apresentou a dimensão de 3,3 cm.

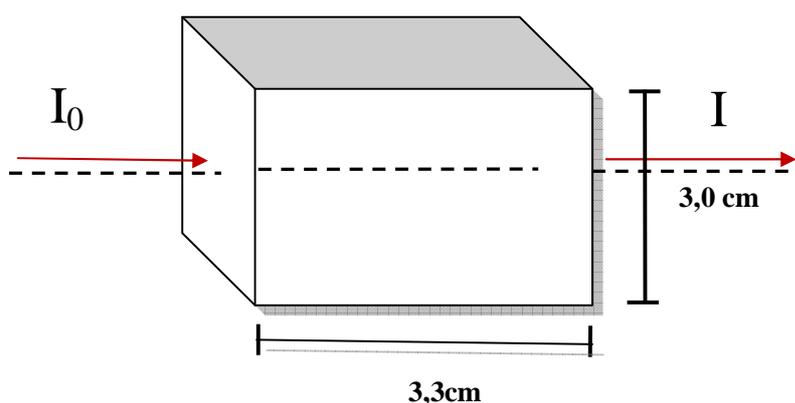


Figura 5. Recipiente para a calibração do aparelho utilizado para determinar o coeficiente de atenuação de massa (μ) pelo Método de atenuação da radiação gama

Para efetuar o cálculo e a calibragem foram mensuradas as variáveis I_0 , I , BG . Com os resultados da densidade da água e do seu coeficiente de atenuação de massa, foi possível checar a calibragem utilizando a Equação 15, do item 3.4.2. Foram realizadas 30 repetições de I_0 e I , por cerca de 60 segundos por milímetro.

Na Equação 15 foi utilizada a espessura da água conhecida ($x = 3,3$ cm, Figura 5) e o valor de I_0 e de I determinado pelo aparelho. Sabendo-se que densidade (ρ) da água é de $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ e que o coeficiente de da água (μ) é de $0,204 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$, a calibragem do aparelho só estará correta se um destes valores considerado como incógnita for encontrado pela equação.

3.4.2. Procedimento de determinação da densidade pontual da madeira pelo método de atenuação da radiação gama

Antes da aquisição de dados foi realizada uma coleta de radiação de fundo - BG , depois desta coleta foi obtido, por cerca de 8 minutos, outra coleta de I_0 , esta coleta foi realizada antes e depois da passagem da amostra pelo aparato de atenuação da radiação gama. Logo após a coleta inicial de I_0 a amostra foi inserida perpendicularmente ao feixe, na linha radial no ponto de início da medula e foi coletado I a cada milímetro no sentido radial medula casca.

A partir dos dados da radiação gama coletados de cada amostra foi separado os resultados de I_0 e I para cada amostra. Estes resultados foram corrigidos devido ao tempo morto do sistema de contagem eletrônica (τ), ou seja, tempo mínimo que pode separar dois consecutivos registros de fótons. Este fator é um dos responsáveis pelo número de contagens registradas serem menores que a quantia de eventos que alcançam o detector. A Equação 14, promove a correção do tempo morto citada por Costa (2006) e Rezende (1997).

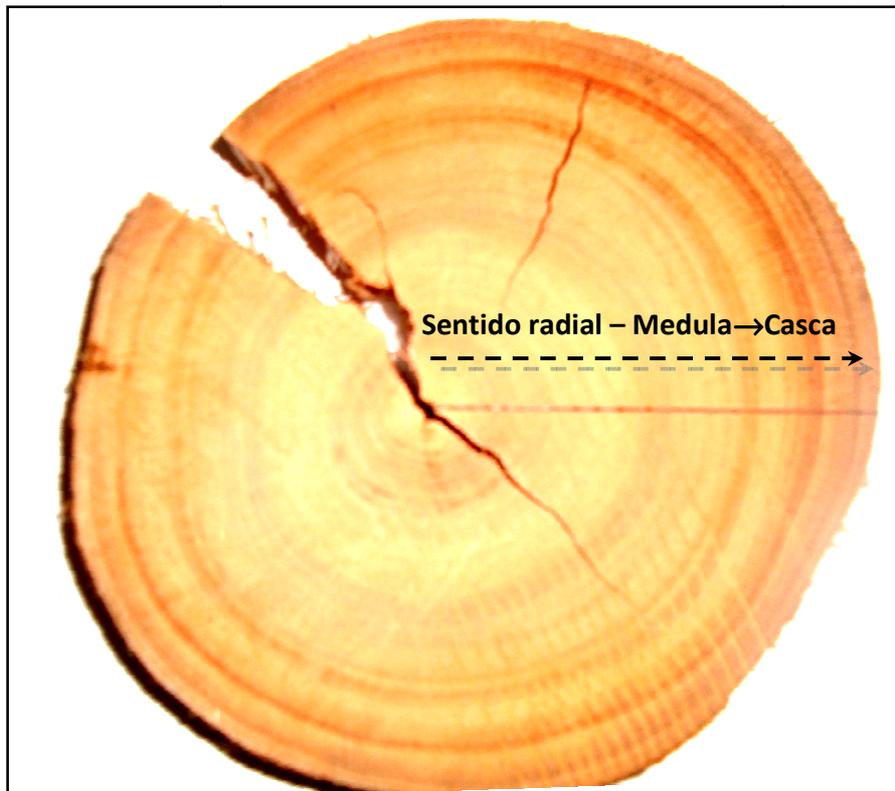


Figura 6. Linha radial no sentido medula-casca, por onde o feixe de radiação incide perpendicularmente, para mensuração da densidade das amostras

$$I_c = \frac{I}{1 - \tau I} \quad (14)$$

Onde I_c é a radiação gama, em cpm, corrigida com a constante de tempo morto τ que corresponde à 10^{-7} min. Aplicando as correções de tempo morto e subtraindo a radiação de fundo na Equação 15.

$$\rho = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{1 - \tau I_0} - BG\right) - \ln\left(\frac{I}{1 - \tau I} - BG\right)}{\mu_m \cdot x} \quad (15)$$

Para efetuar a determinação da densidade pontual ou aparente 12% foi utilizada a Equação 15, e depois foi transformada em densidade 0% pela Equação 20 e logo após em densidade básica pela Equação 21.

Para realizar este procedimento foi determinado um coeficiente de atenuação de massa médio para as amostras de *Eucalyptus* sp. de 0,175cm²/g. Este procedimento foi efetuado utilizando duas amostras de cada árvore e conferindo com o método da volumetria por equivalência de área.

3.5. Determinação da densidade ponderada da árvore

A densidade ponderada da árvore $\rho_{12(POND)}$ foi determinada utilizando a Equação 16. Onde A_i é a área na posição i , e ρ_i é a densidade de cada disco na posição i , onde i corresponde a altura da árvore em metros ($i= 1, 2, 3, 4...n$), no sentido base-topo até a altura comercial.

$$\rho_{12(POND)} = \frac{A_1\rho_1 + A_2\rho_2 + A_3\rho_3 + A_4\rho_4 \dots A_n(\rho_n)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \dots A_n} \quad (16)$$

3.6. Determinação da umidade madeira

A umidade base seca da madeira foi determinada pela Equação 17, onde a massa aparente (M_{AP}) e a massa seca a 0% de umidade (M_0) são representadas em gramas (g). Toda umidade utilizada e mencionada neste trabalho será com base em massa seca.

$$U_{bs} = \left(\frac{M_{AP} - M_0}{M_0} \right) 100 \quad (17)$$

3.7. Determinação da Densidade básica

Com os dados de volume completamente saturado ou com os valores da expansão volumétrica máxima e massa completamente seca da amostra, foi mensurada a densidade básica dada pela Equação 18.

$$\rho_b = \frac{M_0}{V_v} \quad (18)$$

Sendo:

ρ_b : densidade básica (g.cm⁻³);
 M_0 : massa da madeira seca (g);
 V_V : volume verde (cm³).

3.8. Transformação da densidade por equações

As equações abaixo são utilizadas de forma convencional para transformar uma densidade em outra. A Equação 8 proporcionou a determinação da densidade aparente (ρ_{12}) da amostras. Por convenção, as amostras antes de serem utilizados pelo método de atenuação são condicionadas ao laboratório até apresentarem a umidade de equilíbrio em 12%.

As Equações 19 a 20 expressam a relação existente entre a densidade 0%, densidade básica e a densidade parente a 12%, estas equações foram proposta por Rezende (1997). Deve-se ressaltar que as equações não são exatas, pois dependem de uma relação experimental. A precisão e exatidão dos resultados fornecidos nesta transformação dependem desta relação empírica.

$$\rho_0 = \frac{\rho_b}{1 + 0,28\rho_b} \quad (19)$$

ou

$$\rho_0 = \frac{1,104 - \sqrt{1,219 - 0,268\rho_{12}}}{0,134} \quad (20)$$

$$\rho_b = \frac{0,98\rho_0}{1 + 0,24\rho_0} \quad (21)$$

As Equações de transformações na prática oferecem boa precisão e podem ser aplicadas para qualquer espécie de madeira.

Entretanto verifica-se que este tipo de conversão não tem sido realizado com frequência. Com isso as comparações dos resultados fornecidos para densidade através dos diferentes laboratórios, geralmente não são realizadas.

3.9. Relação entre Densidade 0% e Densidade Aparente

A massa seca (M_0) da madeira foi mensurada pelo resultado da variação entre massa de água contida na madeira (M_{AP}) e a massa aparente umidade (M_u), obtida para $u\% = 0$, pode ser dada por:

$$M_0 = M_u - M_{AP} \quad (22)$$

A umidade pode ser dada por:

$$u\% = \frac{M_{AP}}{M_0} \cdot 100 \quad (23)$$

Explicitando M_{AP} na Equação 23, e substituindo em 24 obtém-se que:

$$M_0 = M_u - u\% \frac{M_0}{100} \quad M_0 = \frac{M_u}{1 + 0,01 \cdot u\%} \quad (24)$$

A Equação 24 transforma certa umidade conhecida ($u\%$) em massa de madeira seca. Esta é uma equação exata simples e bastante conhecida em literatura. Esta relação foi muito importante e estudada por Rezende (1997) para conversões de densidades, que promoveu a simplificação das equações aqui citadas.

3.10. Análise dos Resultados

Foi utilizado software para obtenção dos gráficos e ajuste das equações foi o *MICROCAL SOFTWARE, INC. Data analysis and technical graphics software. Origin Professional Version 7.0*. Este software forneceu também os valores da derivada da função ajustada para cada árvore, permitindo a obtenção dos pontos de máximos e mínimos da função.

Para comparar as variáveis; massa, volume e densidade das amostras G_i , foram efetuadas análises de variância, após confirmação da homogeneidade das variâncias dos resíduos pelo teste de Bartlett, e da distribuição normal com a aplicação do teste de normalidade pelo teste de Lilliefors. Estes testes foram realizados para todas as amostras que foram submetidas a uma análise de variância e apresentando resultados significativos foi efetuado o teste de Tukey.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1. Determinação da variação do volume e da umidade em função do tempo de imersão em água de discos de madeira da espécie de *Eucalyptus* sp.

Esse procedimento teve como objetivo mensurar o volume e a densidade da madeira com amostras não saturadas, por imersão em água. A absorção de água durante o experimento não afetou significativamente os resultados.

A Tabela 2 apresenta as 11 amostras, de *Eucalyptus* sp., a umidade (u) e a massa inicial (M_{AP}), coletadas para a mensuração da variação de umidade e de volume.

Na Tabela 3 os dados mostram que método de imersão em água na mensuração do volume, para amostras com umidade inicial inferior a 19%, promoveu um pequeno aumento da umidade. Os resultados médios da variação de umidade e da expansão volumétrica em função do tempo em segundos, foram determinados a partir dos Apêndices 1 e 2.

Tabela 2. Resultado da massa (M_{PA}) e da umidade (u) inicial, para a mensuração da variação de umidade e do volume em função do tempo de imersão em água, das amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostra	u (%)	M_{AP} (g)
1	18,7	184
2	19,0	346
3	16,6	44,2
4	12,7	178
5	14,9	116
6	9,80	156
7	10,3	166
8	9,96	72,2
9	3,40	85,4
10	1,01	92,2
11	11,4	312

Na Tabela 3 são apresentados os resultados médios da variação de umidade (Δ_U) e da expansão volumétrica (Δ_V), para amostras com umidade inferiores a 18% em função do tempo. O tempo (T_I) gasto na primeira imersão foi de 9,0 segundos e a variação de umidade foi de 1,65%.

Tabela 3. Variação média da umidade (Δ_U) e da expansão volumétrica (Δ_V), pelo método de imersão, determinadas em função do tempo (t) em segundos de amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

Variação			
Imersão (I_m)	Tempo Total (segundos)	Umidade % (Δ_U)	Volumétrica % (Δ_V)
1	9,0	1,65	0,0
2	33	2,71	0,226
3	57	3,87	0,366
4	82	4,49	0,474
5	97	4,91	0,603

No período total de imersão de 97 segundos foi observada uma variação de 4,91% de umidade, que corresponde ao valor percentual da expansão volumétrica de 0,603%, portanto, em apenas uma única imersão por um período de 33 segundos a variação volumétrica foi de 0,226%.

A preocupação com a aplicação do método de imersão neste caso é a absorção de água durante o experimento, que registraram em média um aumento de umidade em torno de 3% depois de 33 segundos. Entretanto para um tempo de imersão de dez segundos (tempo suficiente para realização do experimento) esta variação será em média inferior a 2%.

Na mensuração do volume com amostras com umidade inferior a 28% é aconselhável confirmar o resultado com uma nova imersão, que pode ser realizada após 20 a 30 segundos, retirando o excesso de água superficial.

A Figura 7 apresenta a variação da umidade e do volume médio, em função do tempo, a maior taxa de absorção de água, determinada pela variação de umidade, foi até a imersão 4 com um tempo de 57 segundos de imersão, fornecendo uma variação de umidade (Δ_u) de 3,87% (Tabela 3), este resultado pode ser confirmado pela curva de absorção nos Apêndice de 3 a 8.

A Figura 7 foi elaborada a partir dos Apêndices 1 e 2 que apresentam a variação de umidade e de volume.

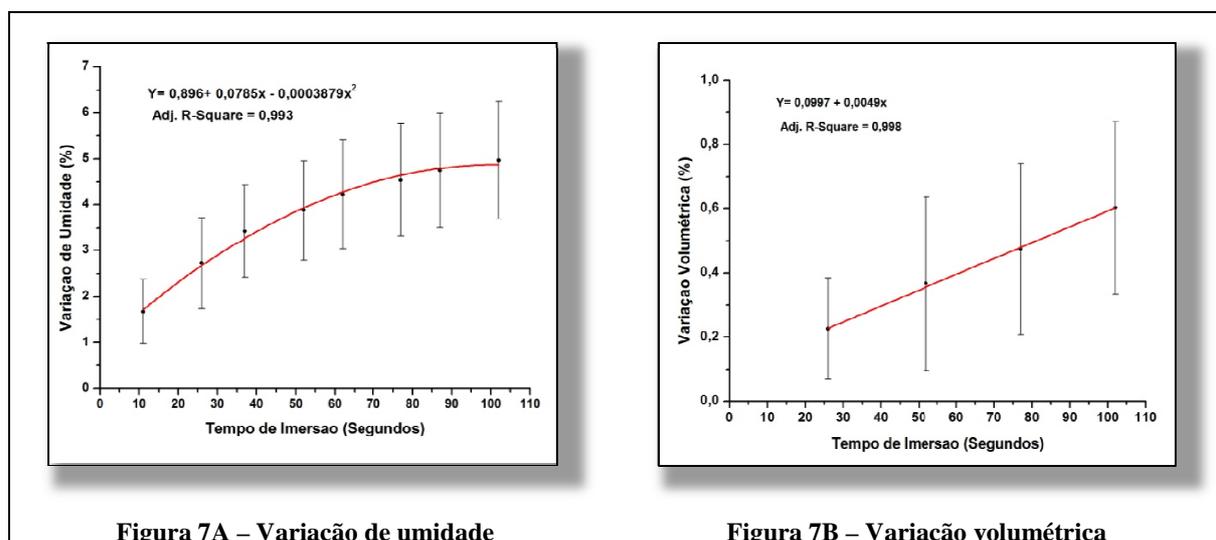


Figura 7. Variação média de umidade (Δ_U) e da variação volumétrica (Δ_V) determinados pelo método de imersão em função do tempo em segundos

$$Y = 0,896 + 0,0785x - 0,0003879x^2 \quad \therefore R^2 = 0,993 \quad (A) \quad (25)$$

$$Y = 0,0997 + 0,0049x \quad \therefore R^2 = 0,998 \quad (B) \quad (26)$$

O gráfico apresenta uma curva polinomial de segundo grau. As Equações 25 e 26 apresentaram altos valores de R^2 . Isto foi devido as curvas serem elaboradas com os valores médios da variação de umidade.

Na Figura 8 são apresentados os dados de correlação entre as duas imersões. O intervalo entre as imersões foi de 20 segundos. O período de imersão das amostras foi de 14 segundos, portanto maior que o estimado na Tabela 3, certificando-se que as amostras imersas e todo o sistema permaneciam em equilíbrio.

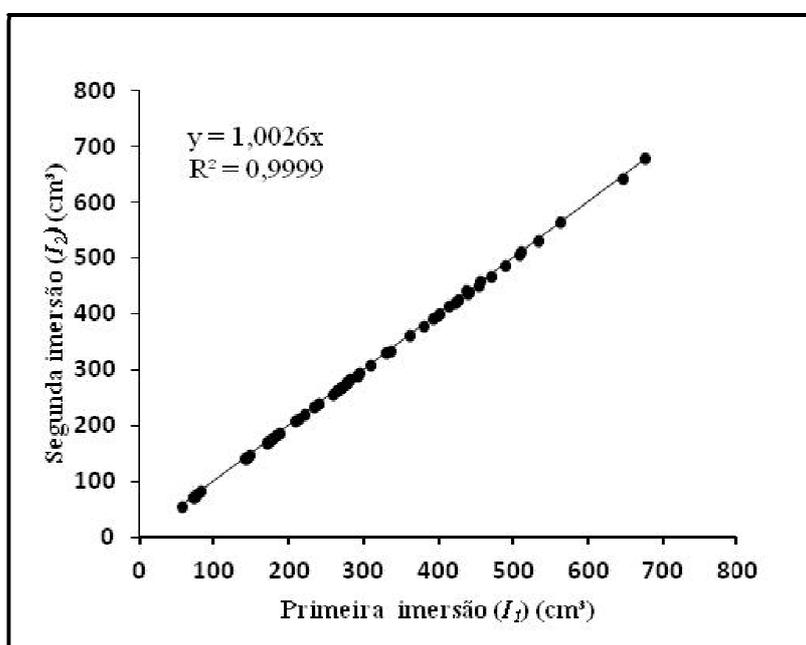


Figura 8. Variação do volume (cm^3) em consecutivas imersões em água, primeira (I_1) e a segunda (I_2), pelo método de imersão de amostras de *Eucalyptus* sp.

$$Y = 1,0026X \quad \text{ou} \quad I_2 = 1,0026.I_1 \quad (27)$$

O coeficiente de determinação R^2 foi de 0,999 o que indica que a segunda imersão foi praticamente igual a primeira.

4.2. Determinação da expansão volumétrica por unidade de umidade em função do tempo.

A partir dos resultados da variação volumétrica e de umidade foram determinadas as variações de volume por unidade de umidade. As amostras apresentaram a variação de umidade entre 3,07 a 7,07% e a variação volumétrica média determinada foi de 0,618% conforme Tabela 4.

Tabela 4. Resultados da variação percentual de umidade (Δ_U), umidade percentual (u), densidade a 12% (ρ_{12}), variação percentual de volume (Δ_V) e variação percentual de volume por unidade de umidade (Δ_V/Δ_U) obtidos por imersão em água de amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostra	$\Delta_U\%$	U	ρ_{12} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\Delta_V\%$	Δ_V/Δ_U
1	4,60	18,7	681	0,788	0,171
2	4,34	19,1	582	0,466	0,098
3	7,07	16,6	597	0,816	0,115
4	5,16	12,7	656	1,06	0,205
5	5,01	14,9	639	0,122	0,029
6	5,68	9,80	500	0,446	0,078
7	4,10	10,3	538	0,421	0,103
8	6,71	9,96	554	0,840	0,125
9	3,07	3,40	631	0,155	0,087
10	3,53	1,01	649	0,628	0,143
11	4,47	11,4	663	1,06	0,236
Média				0,618	0,126

Foram utilizadas as equações obtidas pela variação de umidade para estimar a variação em um período de dez segundos de imersão (Apêndice 3 a 8). Na Tabela 5, a mensuração da variação média de umidade foi de 1,68%, que proporcionou estimar a Equação 28, e a correção do volume determinado por imersão.

Como no momento da imersão ocorreu uma absorção de água pela amostra. Esta interação entre madeira e água diminuiu em 1,68% o volume de água deslocado pela amostra, ou seja, diminuiu o empuxo. Portanto a Equação 28 foi utilizada para a correção do volume.

Tabela 5. Equações polinomiais (E_p), resultado da variação da umidade (Δ_U) em 10 segundos, densidade a 12% (ρ_{12}) e umidade aparente (u) inicial de amostras G_i da espécie de *Eucalyptus* sp.

Gráfico	Equações (E_p)	Δ_U	ρ_{12} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	u (%)
1	$Y = 0,687 + 0,0876x - 0,0004934x^2$	1,51	660	18,7
2	$Y = 0,73952 + 0,08106x - 0,00046339x^2$	1,50	582	19,7
3	$Y = 0,7623 + 0,111x - 0,0004828x^2$	1,82	570	16,6
4	$Y = 0,3262 + 0,1066x - 0,0005937x^2$	1,33	646	12,7
5	$Y = 1,1864 + 0,0573x - 0,00021043x^2$	1,78	639	14,9
6	$Y = 1,80294 + 0,0631x - 0,0002673x^2$	2,41	487	9,80
7	$Y = 0,9691 + 0,06562x - 0,00034186x^2$	1,59	527	10,3
8	$Y = 2,047 + 0,0887x - 0,0004344x^2$	2,89	548	9,97
9	$Y = 0,01981 + 0,04421x - 0,00013697x^2$	0,45	653	3,40
10	$Y = 0,436 + 0,0488x - 0,000182x^2$	0,91	675	1,01
11	$Y = 1,567 + 0,0733x - 0,0004388x^2$	2,26	656	11,4
Média		1,68		

$$V_{Real} = V_{AP} \cdot 1,0168 \quad (1) \quad (28)$$

$$V_{Real} = V_{AP} + V_{\Delta M} \quad (2) \quad (29)$$

Sendo:

V_{Real} : volume da amostra corrigido;

V_{AP} : volume da amostra;

M_f : massa depois da imersão (final);

M_i : massa antes da imersão (inicial);

$V_{\Delta M}$ ou $V_{\Delta M}$: volume obtido pela diferença da variação de massa individual ($(M_f - M_i) \cdot \rho_{\text{água}}$).

A equação é direcionada para amostras que possuem a umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, acima deste ponto a madeira torna-se mais estável e menos sujeita a alterações de volume em um período breve de imersão, dispensando a correção pela Equação 28.

A Equação 29 corrigiu o volume pela variação da umidade de uma forma individualizada. Para a obtenção da variação de umidade por meio de uma pesagem convencional, retirou-se o excesso de água das amostras logo após a imersão. A água absorvida foi quantificada pela variação da massa (Δ_M). Esta variação é a diminuição do volume do fluido deslocado, uma pequena parte do meio imerso foi absorvido e quantificado pela variação de massa. O resultado foi acrescido no volume determinado por imersão.

A Equação 28 pode ser utilizada para corrigir o volume da amostra com uma umidade inferior a 28%.

4.2.1. Determinação da expansão volumétrica

O objetivo foi verificar se o método de imersão, para a mensuração do volume, causa a expansão volumétrica devido à absorção de água no momento da imersão.

As equações utilizadas para a correção do volume foram determinadas a partir das curvas experimentais de expansão volumétrica dos Apêndices de 3 a 8, determinadas em um período de imersão de 10 segundos, conforme a Tabela 6.

Tabela 6. Resultados das equações polinomiais (E_p) da expansão volumétrica média (Δ_V) em porcentagem (%) por dez segundos de imersão em água

Gráfico	Equações Polinomiais (E_p)	Variação Volume Δ_V (%)
1	$Y=0,1722+0,00056x^2$	0,228
2	$Y= 0,21961+ 0,00199x - 0,000004919x^2$	0,239
3	$Y=0,2174+0,01347x-0,00003445x^2$	0,349
4	$Y=0,1424+0,0301x-0,0001806x^2$	0,425
5	$Y=0,09484-0,00536x+0,00007424x^2$	0,049
6	$Y=0,1262+0,00296x+0,000006047x^2$	0,156
7	$Y=0,0235+0,00126x+0,00002805x^2$	0,036
8	$Y=0,276+0,0227x+0,0001159x^2$	0,503
9	$Y=0,04807+0,00348x-0,000014085x^2$	0,083
10	$Y=0,327+0,0025x-0,000014426x^2$	0,352
11	$Y=0,716+0,0028x+0,00001283x^2$	0,744
Média		0,287

O resultado da variação volumétrica determinada por equações apresentaram baixa variação (Apêndices de 3 a 8). Como o resultado da expansão volumétrica, foi praticamente desprezível, a correção do volume pela Equação 30, pode ser omitida.

$$V_{Cor} = V_{AP} \cdot 1,00287 \quad (30)$$

Na Tabela 7 são apresentados os resultados das variações da densidade utilizando a massa aparente antes das imersões. O resultado médio das repetições (ρ_i) foi de $632 \pm 47,1 \text{ kg.m}^{-3}$ e a variação média entre ρ_1 e ρ_3 de G_i foi de $1,87 \pm 1,1\%$.

Para comprovação dos resultados foram realizadas três mensurações sucessivas de densidade e os resultados são apresentados nas Tabelas 7.

As variações entre as mensurações de densidade ρ_1 e ρ_2 para o grupo G_1 foi de 0,9% e entre ρ_2 e ρ_3 foi de apenas 0,3%. Para as amostras G_2 a variação da entre ρ_1 e ρ_2 foi de 0,5% e entre ρ_2 e ρ_3 , foi de 0,2%. Para as amostras G_3 a variação entre ρ_1 e ρ_2 foi de 0,5% e entre ρ_2 e ρ_3 , foi de 0,2%.

As variáveis ρ_1 e ρ_2 apresentaram sempre variações maiores que as variações entre ρ_2 e ρ_3 .

De um modo geral pode-se constatar que resultados de densidade apresentados para primeira, segunda e terceira imersão foram estatisticamente iguais, conforme Tabela 7 e 8. Entretanto, pode-se fazer uma pequena correção e aproximar ainda mais esses resultados.

Tabela 7. Densidade média aparente ρ_i em (kg.m⁻³), as variação da densidade ($\Delta\rho$) desvio padrão (D_p), o coeficiente de variação (CV) e a média dos resultados de G_i , pelo método de imersão das amostras G_i da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostras	Densidade (kg.m ⁻³)											
	G ₁				G ₂				G ₃			
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	$\Delta\rho$	ρ_1	ρ_2	ρ_3	$\Delta\rho$	ρ_1	ρ_2	ρ_3	$\Delta\rho$
1	603	614	620	2,96	548	562	569	3,87	616	628	629	2,21
2	677	695	693	2,61	567	575	577	1,67	593	600	605	2,07
3	552	570	575	4,21	651	661	664	2,10	612	622	626	2,25
4	539	555	558	3,52	563	580	588	4,40	615	627	629	2,39
5	533	551	555	4,11	542	554	559	3,09	599	610	612	2,08
6	548	566	572	4,47	660	668	676	2,43	589	596	600	1,86
7	687	703	706	2,69	609	619	620	1,84	594	601	604	1,68
8	698	711	712	1,88	663	674	678	2,34	532	546	550	3,46
9	679	689	695	2,29	657	669	671	2,11	534	541	545	2,10
10	599	616	621	3,68	691	695	695	0,62	604	613	616	1,96
11	614	613	619	0,77	656	662	667	1,54	636	640	638	0,44
12	670	674	680	1,44	655	663	668	1,97	648	649	651	0,45
13	662	670	675	1,93	637	633	636	0,76	665	671	672	1,02
14	682	688	692	1,60	674	679	680	0,87	627	627	628	0,23
15	636	642	646	1,64	669	675	677	1,23	633	638	642	1,46
16	670	675	679	1,38	673	676	676	0,47	669	675	677	1,15
17	655	666	670	2,30	684	688	689	0,69	631	629	632	0,05
18	626	647	650	3,77	641	642	643	0,32	641	646	648	0,95
19	556	560	562	1,10	674	679	681	1,07	640	644	647	1,12
20	541	546	546	0,91	650	654	655	0,74	681	680	682	0,17
Média	621	633	636	2,46	638	645	648	1,71	618	624	627	1,46
D_p	58	57	57	1,17	46	44	43	1,13	39	36	36	0,90
CV%		09				07				06		

Tabela 8. Análise de variância referente às determinações de densidade das amostras G_i , nas três repetições ρ_i pelo método de imersão

Fontes de Variação	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	Significância
Imersões - (ρ_i)	2	0.4091691E-02	0.2045845E-02	0.925	*****
Dimensões - (G_i)	2	0.1372702E-01	0.6863512E-02	5.105	0.04738
Densidade x Dimensões	4	0.2362775E-03	0.5906938E-04	0.027	*****
Resíduo	171	0.3780348	0.2210730E-02		

Coeficiente de Variação= 7.436

*Valores não significativos a 5% de probabilidade

4.3. Determinação do volume e da densidade pelo método da volumetria por equivalência de área

Na Tabela 9 são apresentados os resultados de volume mensurados pelos métodos de imersão (*MI*) e o método da volumetria por equivalência de área (*VEA*) (Apêndice 12). A variação média entre os métodos foi de 1,72% que está próximo a determinada no item 4.2, com valor de 1,68%.

Tabela 9. Variação volumétrica entre os métodos de imersão (*MI*) e da volumetria por equivalência de área (*VEA*), sem correção (Δ_V), e com correção (Δ_{Vc}) de volume, e variação percentual (%) das amostras G_1 , G_2 e de G_3 da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostra	Volume		Variação volumétrica			
	(cm ³)		Variação (cm ³)	Percentual	Variação (cm ³)	Percentual
	<i>VEA</i>	<i>MI</i>	Δ_V	%	Δ_{Vc}	%
G₁	183	179	3,7	2,14	1,90	1,04
G₂	293	288	4,9	1,68	1,09	0,35
G₃	434	428	5,8	1,34	3,10	0,69
Média	303	298	4,8	1,72	2,03	0,70

A variação volumétrica (Δ_{Vc}) apresentada na Tabela 9 é menor quando corrigidos os resultados determinados pelo método de imersão pela Equação 28 ou 29. O ajuste do método de imersão proporcionou uma variação percentual entre os métodos de aproximadamente 1%, o que pode constatar a boa aplicabilidade do método de imersão.

A variação volumétrica entre os métodos foi de 1,5% conforme observado na Equação 31. Este valor foi muito próximo ao determinado no item 4.2.

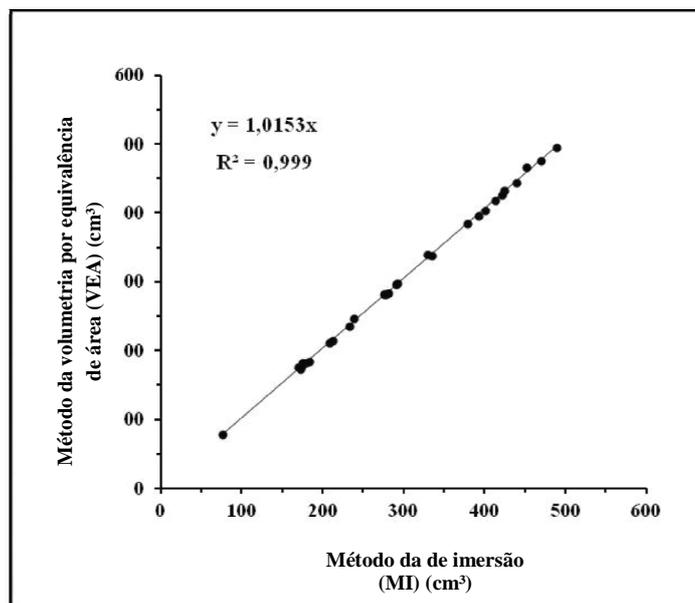


Figura 9. Gráfico de correlação do volume (V) determinado, pelo método de imersão (MI) e método da volumetria por equivalência de área (VEA), das amostras G_i da espécie de *Eucalyptus* sp.

$$Y = 1,0153X \quad \text{ou} \quad V_{(VEA)} = 1,0153 \cdot V_{(MI)} \quad (31)$$

Na Figura 9 é apresentado o gráfico de correlação obtida entre esses métodos e o seu coeficiente de determinação foi de 0,99. Este resultado indica baixa variação entre os métodos, enfatizando que ambos, podem ser utilizados na mensuração do volume.

Na Figura 10 são apresentados os resultados do intervalo de confiança (IC) obtidos entre os métodos.



Figura 10. Gráfico de intervalo de confiança (IC) entre os métodos de determinação de densidade pelo método de imersão (MI) e pela Método da volumetria por equivalência de área (VEA), para as amostras do grupos G_i da espécie de *Eucalyptus* sp.

O gráfico foi elaborado a partir de um modelo de regressão linear simples, passando pela origem, em que a variável "y" representa o método da volumetria por equivalência de área e a variável "x" o método de imersão.

O gráfico apresenta a amplitude de variação dos limites inferior (L_i) e o superior (L_s) que indica a precisão e a exatidão entre os métodos. A maior precisão foi determinada para os grupos G_2 , pois tem uma menor amplitude de variação entre L_i e L_s e a menor precisão foi determinada para o grupo G_1 que apresenta maior amplitude de variação.

Os dados do grupo G_3 estão situados mais próximos ao eixo X apresentando melhor ajuste, conforme Tabela 10.

Tabela 10. Intervalo de confiança da densidade básica determinada pelo método volumetria por equivalência de área (VEA) e o método de imersão (MI) referente as amostras do grupos G_i da espécie de *Eucalyptus* sp.

Altura (M)	Equação de regressão	Coeficiente de determinação (R^2)	Limites		Variação do coeficiente angular
			Inferior	Superior	
G_1	$Y = 0,9780x$	0,999	$L_i: 0,968$	$L_s: 0,988$	0,0000133
G_2	$Y = 0,9835x$	1,000	$L_i: 0,979$	$L_s: 0,988$	0,0000024
G_3	$Y = 0,9870x$	0,999	$L_i: 0,980$	$L_s: 0,994$	0,0000057

Na Tabela 10 os resultados dos limites L_i e L_s foram determinados com o nível de significância de 1% de probabilidade. A mesma metodologia foi utilizada por

Pereira (2000), para comparar a umidade em amostras de solo por dois métodos e obteve um resultado semelhante não contendo diferenças significativas.

Na Tabela 11 são apresentados os dados da análise de variância entre os métodos da volumetria por equivalência de área (VEA) e do método de imersão (MI).

Tabela 11. Análise variância de volume determinado pelo Método imersão (MI) e pelo Método da volumetria por equivalência de área (VEA) das amostras G_i da espécie de *Eucalyptus* sp.

Fontes de Variação	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	Significância
Método	1	310	310	0,2259	0,6365
Dimensão	1	628004	628004	458,2461	$2e^{-16}$ *
Método x Dimensão	1	10	10	0,0073	0,9322
Resíduo	54	74004	1370		

*Valores significativos a 5% de probabilidade

Não foram observadas diferenças entre os métodos, portanto esta metodologia (Método de imersão) poderá ser aplicada de forma rotineira em determinações de volume para obtenção da densidade da madeira abaixo dos 28% de umidade. Além disso, tem a vantagem de apresentar simplicidade e a utilização de equipamentos disponíveis e não onerosos.

4.4. Determinação do Coeficiente de Atenuação de massa (μ)

O aparato utilizado na determinação da densidade pelo método de atenuação da radiação gama pode trazer dificuldades quanto à calibragem. Utilizando o coeficiente de atenuação da água foi possível validar o aparato para determinação da densidade.

Na Tabela 12 são apresentados os valores médios de BG, I_0 , I e μ .

Tabela 12. Resultados da variação do coeficiente de atenuação de massa experimental (μ_e) da água, valores de radiação de fundo (BG), radiação sem material (I_0) e com o material (I)

	BG	I_0	I	μ_e
Média	243±13	14178±108	7527±82	0,197±0,003
CV	0,05	0,007	0,01	0,01

O coeficiente de atenuação experimental médio determinado foi de $0,197\pm 0,003$ com a amplitude de variação de $0,13 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. O resultado determinado foi muito próximo ao determinado por Bucur (2003) e Ferraz, (1976) que pode variar entre 0,195 e 0,203. Este valor possibilitou certificar que o aparelho estava devidamente calibrado.

4.5. Avaliação da densidade pelo Método de Atenuação da Radiação Gama das amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

Na Tabela 13 são apresentados os dados da densidade aritmética média a amplitude de variação, a densidade a 12% e básica e a média das respectivas variáveis pelo método de atenuação e pelo método de imersão.

Tabela 13. Variação da densidade aritmética média (ρ_{AR}), densidade média ponderada 12% (ρ_{12}), densidade básica ponderada (ρ_b) e (ρ_{b_POND}) em ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), na direção longitudinal, amplitude de variação mínima (*Mín*) e máxima (*Máx*) pelo Método de atenuação da radiação gama e pelo Método de imersão das amostras do grupo G_i da espécie de *Eucalyptus* sp.

Árvore		Método de Atenuação - TARG				Método Imersão		
Amostra G_i	Altura (m)	ρ_{AR}	Amplitude Variação		ρ_{12}	ρ_b	ρ_b	ρ_{b_POND}
			<i>Mín</i>	<i>Máx</i>				
A	2	595±88(15)	389	860	620	501	515	
	6	636±86(14)	318	781	666	534	527	
	10	685±100(15)	455	984	656	527	527	
	14	622±77(12)	453	821	636	512	523	
	18	588±71(12)	422	767	593	480	523	
	22	604±70(12)	494	791	607	492	500	
Média		610±82	422	830	630±28	508±21	519±10	521
B	1	610±90(15)	355	862	594	481	483	
	5	563±76(13)	395	831	582	472	511	
	9	609±77(13)	419	890	610	493	497	
	14	636±84(13)	450	893	620	500	509	
	18	637±63(10)	509	814	642	511	512	
	22	526±75(14)	343	739	537	517	516	
Média		593±77	425	805	598±36	496±25	505±12	500
C	2	557±100(18)	337	857	599	485	505	
	6	656±96(14)	444	1120	681	545	524	
	10	616±80(14)	417	908	628	506	513	
	14	592±80(14)	407	811	599	485	532	
	18	578±71(12)	441	770	569	462	535	
	22	614±77(13)	448	776	611	494	524	
Média	Média	597±84	416	834	609±38	496±28	522±11	519
D	1	572±98(17)	372	902	611	494	494	
	5	615±114(19)	408	903	665	533	513	
	9	669±97(15)	378	967	673	539	515	
	13	657±79(12)	482	885	677	542	534	
	17	664±90(14)	432	904	649	522	521	
	21	585±75(13)	416	763	591	479	497	
Média		627±75	415	887	644±35	518±26	512±15	510

Na Tabela 13 a variação do resultado entre a densidade aritmética à 12% e a ponderada a 12% foi de 2,22%. A densidade aritmética média por disco foi determinada a cada milímetro no sentido radial. Em alguns casos o valor da densidade aritmética média coincide com o valor da densidade média ponderada.

Com a determinação da densidade pontual foi possível obter a densidade aritmética e o desvio padrão. A amplitude de variação de $442 \pm 234 \text{ kg.m}^{-3}$. Lima e Garcia (2010) demonstraram aumento significativo da densidade aparente, no sentido da medula para a casca de *Eucalyptus grandis* de 21 anos de idade e apresentou uma amplitude de variação de 250 kg.m^{-3} . Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005) avaliaram a densidade básica de sete espécie do gênero *Eucalyptus* apresentaram a amplitude média entre as espécies de 320 kg.m^{-3} . Silva e Oliveira (2003) apresentaram a amplitude de variação radial média de 150 kg.m^{-3} .

Na avaliação da densidade os autores apresentaram a amplitude de variação inferior a determinada pelo método de atenuação foi de 442 kg.m^{-3} . A variação foi devido a sensibilidade do método de atenuação e os métodos utilizados pelos autores obtém a densidade média por região (blocos) no sentido radial.

A variação da densidade básica entre os métodos foi de 1,97%. A variação da densidade básica ponderada (ρ_{b_POND}) entre os métodos foi de 1,56% possibilitando utilizar ambos os métodos para a qualificação da madeira, conforme Tabela 13.

Na Figura 11 são apresentados os resultados da comparação da densidade básica determinada pelo método de imersão e o método de atenuação.

O método de atenuação subestimou os valores de densidade em relação ao método de imersão em 1,3% de acordo com a Equação 32. A comparação entre os métodos foi por meio de uma regressão linear passando pela origem.

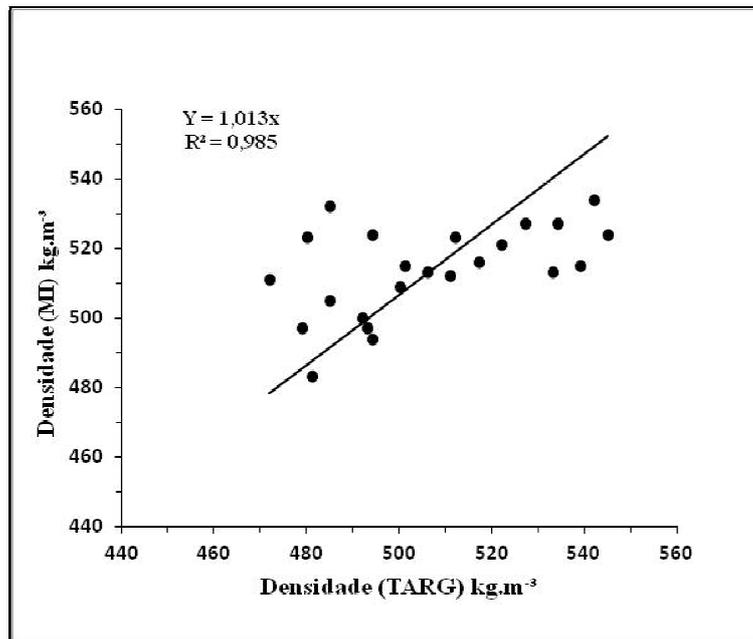


Figura 11. Comparação da densidade básica determinada pelo Método de imersão e o Método de atenuação da radiação gama das amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

$$\rho_{(MI)} = 1,013 * \rho_{(TARG)} \quad (32)$$

Na Tabela 13 os resultados de densidade básica entre os métodos apresentaram uma variação de 1,97% e a variação das amostras A_i , B_i , C_i e D_i , foram de 2,2; 1,8; 4,9 e 1,0% respectivamente.

Não foi possível determinar diferenças significativas entre métodos para a determinação da densidade básica.

Na Figura 12 são apresentados os resultados do intervalo de confiança entre o método de atenuação e o método de imersão.

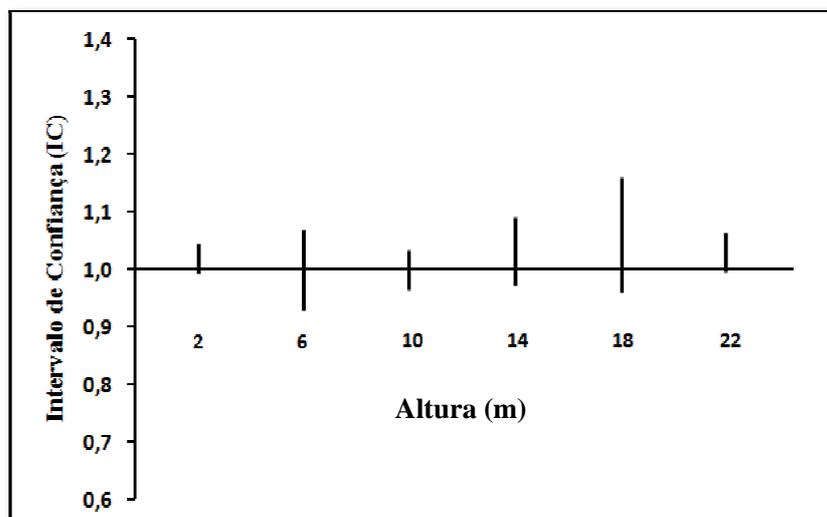


Figura 12. Gráfico de intervalo de confiança (*IC*) entre as determinações da densidade básica pelo Método de atenuação da radiação gama e o Método de imersão em água, para as amostras selecionadas por região a cada quatro metros.

O resultado do intervalo de confiança (*IC*) foi estimado a 1% de probabilidade. A análise entre os métodos foi realizada aos pares, ou seja, utilizando a densidade determinada por região de coleta, retiradas da Tabela 13. O resultado foi mensurado utilizando o modelo de regressão linear simples, passando pela origem em que a variável "y" representa o método de atenuação e a variável "x" o método de imersão.

Não foram observadas diferenças entre os métodos, portanto o método de imersão poderá ser aplicado de forma cotidiana em determinações de volume para obtenção da densidade da madeira abaixo dos 28% de umidade.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados dos limites inferiores (L_i) e superiores (L_s) com o nível de significância de 1% de probabilidade. A diferença foi pequena e a análise de variação enfatiza a semelhança entre os métodos. O intervalo de confiança obteve o coeficiente de determinação (R^2) médio de 0,998.

Ambos os métodos estão próximos da densidade média determinada. O intervalo de confiança indica que nas secções da madeira localizada a 6 e 18 m do fuste das árvores, foram as que apresentaram as maiores variações entre os métodos.

Tabela 14. Resultado de intervalo de confiança da densidade básica determinada pelo Método de atenuação da radiação gama e o Método de imersão em água referente à altura comercial de determinado das amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

Altura (M)	Equação de regressão	Coeficiente de determinação (R ²)	Limites		Variação do coeficiente angular
			Inferior	Superior	
2	Y=1,0184x	0,9997	Li:0,993	Ls:1,043	0,0000954
6	Y=0,9932x	0,9978	Li:0,924	Ls:1,062	0,0007224
10	Y=0,9930x	0,9994	Li:0,958	Ls:1,028	0,0001841
14	Y=1,0275x	0,9985	Li:0,968	Ls:1,087	0,0005410
18	Y=1,0556x	0,9962	Li:0,959	Ls:1,152	0,0014178
22	Y=1,0273x	0,9995	Li:0,992	Ls:1,063	0,0001882

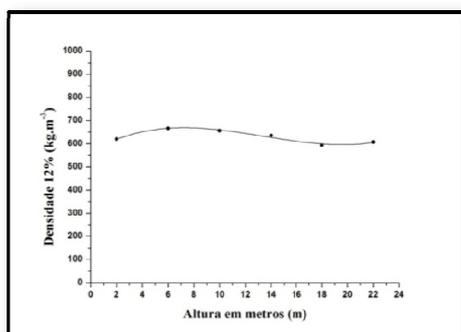
O método de atenuação apresentou uma maior variação, e isso pode ser explicado por vários fatores: erro na calibragem do aparelho, erro na determinação densidade pelo no método de imersão, imperfeições na madeira, na variação do coeficiente de massa, mesmo após a calibração e outros. A causa mais provável da variação entre os métodos foi quanto a obtenção do coeficiente de atenuação de massa, mesmo checando antes a calibração do aparelho e conferindo a densidade por outro método.

A amplitude obtida entre os limites inferior L_i e o superior L_s indica a precisão e a exatidão do método de atenuação. A região de 10 metros de altura obteve a melhor combinação entre exatidão e precisão. As regiões de 6 e 18 metros apresentaram com menor precisão e as regiões 2, 14 e 22 metros foram as amostras que apresentaram resultados intermediários.

O método de atenuação possui a vantagem de fornecer informações detalhadas ao longo do sentido radial e tem como desvantagens a exigência de equipamentos mais sofisticados e onerosos, além de um apoio técnico especializado. A determinação da densidade pela metodologia em questão apresentou-se como uma forma viável e uma ferramenta no estudo da densidade no sentido radial dos discos de madeira.

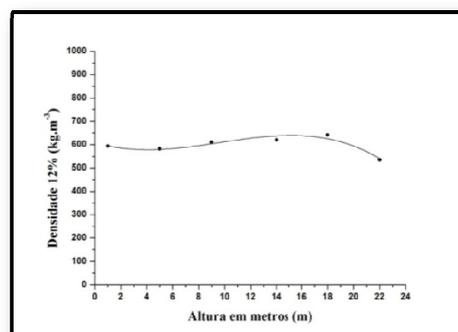
4.5.1 Variação da densidade na direção longitudinal das amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

Na Figura 13 são observadas as variações da densidade dos discos na direção longitudinal das amostras A_i , B_i , C_i e D_i . As curvas que melhores se ajustaram as variações foram as polinomiais de terceiro grau. Os coeficiente de determinação (R^2) foram de 0,917, 0,755, 0,807 e 0,977 respectivamente.



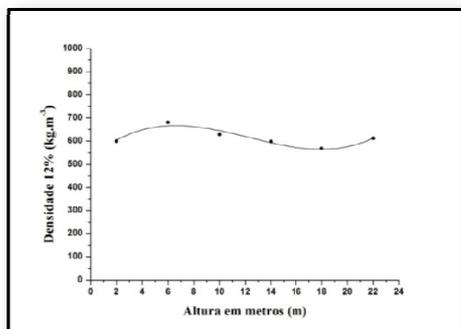
Amostra - A_i

$$Y = 556,28 + 32,376x - 3,065x^2 + 0,0761x^3 \quad \therefore R^2 = 0,917$$



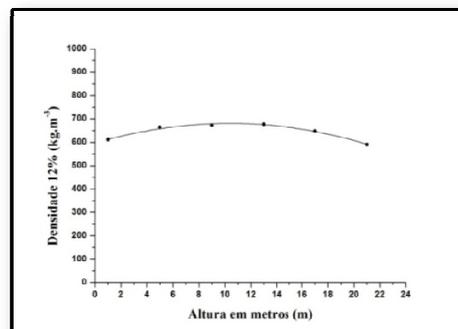
Amostra - B_i

$$Y = 610,014 - 16,844x + 2,6122x^2 - 0,0945x^3 \quad \therefore R^2 = 0,755$$



Amostra - C_i

$$Y = 522,923 + 49,888x - 5,1722x^2 + 0,1405x^3 \quad \therefore R^2 = 0,807$$



Amostra - D_i

$$Y = 597,84 + 15,839x - 0,7431x^2 - 0,00116x^3 \quad \therefore R^2 = 0,955$$

Figura 13. Variações da densidade aparente a 12% em (kg.m^{-3}) na direção longitudinal no sentido base-topo em função da altura (m) da árvore A_i , B_i , C_i , D_i da espécie de *Eucalyptus* sp.

Na amostra A_i a variação da densidade foi crescente até a altura de seis metros, seguido de um decréscimo até a altura de 18 metros e novo crescimento até a altura comercial.

Na amostra B_i a variação da densidade foi decrescente até a altura de quatro metros, a partir desta altura um acréscimo na densidade até a altura de 14 metros, não de uma forma acentuada e após esta altura um decréscimo até a altura comercial.

Na amostra C_i a variação longitudinal apresentou-se semelhante a variação da amostra A_i de uma forma mais acentuada.

Na amostra D_i a variação da densidade foi crescente até a altura de nove metros e um decréscimo até a altura comercial.

Os padrões de variação longitudinal das amostras estão concordantes com Rezende (1997), Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005) e Costa (2006).

Na Figura 14 são observados a variação da densidade aparente a 12% na direção longitudinal das árvores A, B, C e D.

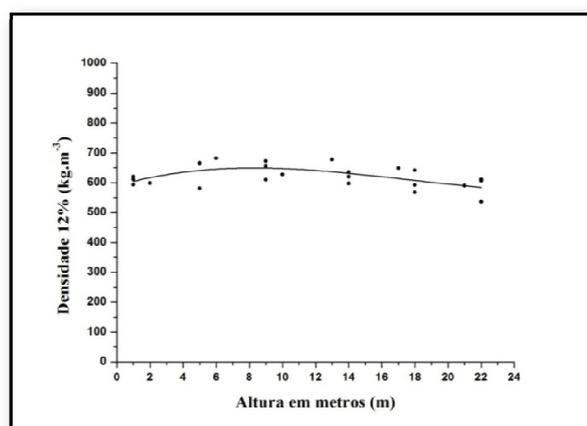


Figura 14. Variação média da densidade aparente a 12% em (kg.m^{-3}) das amostras A_i , B_i , C_i , e D_i na direção longitudinal em função da altura (m) da espécie de *Eucalyptus* sp.

$$Y = 590,115 + 15,943x - 1,258x^2 + 0,02375x^3 \quad \therefore R^2 = 0,278 \quad (33)$$

O coeficiente de determinação foi baixo devido à grande variabilidade das amostras. Mattos et al. (2011) avaliando a variação longitudinal da densidade em três espécies de gimnospermas encontrou alta variabilidade não determinando um padrão.

A curva polinomial de terceiro grau foi a que melhor ajustou-se às amostras. Foi obtido um padrão de variação longitudinal, em que até a altura de seis metros há um crescimento de densidade e a partir deste ponto há um decréscimo uniforme e pouco acentuado até a altura de 22 metros.

As amostras A_i , B_i , C_i , D_i apresentaram a amplitude média da densidade na direção longitudinal de 94 kg.m^{-3} . A variação da amplitude no sentido radial média foi de 4,5 vezes superiores à variação na direção longitudinal.

A densidade média da madeira a 12 % e as transformações para outras densidades apresentaram-se como uma alternativa eficiente e proporcionou a análises na direção longitudinal.

4.6. Ponto Ideal de Amostragem (PIA)

Atualmente a prática para a mensuração da densidade ponderada da árvores é realizada com uma coleta de discos na direção longitudinal. A identificação do ponto ideal de amostragem promoveu a redução no número de amostras coletadas e a caracterização da densidade média possibilitando o dinamismo nas análises.

Para determinar o ponto ideal de amostragem foi determinada a densidade 12% pela volumetria por equivalência de área.

Na Figura 15 são observadas as variações da densidade 12% na direção longitudinal das árvores de *Eucalyptus* sp. Foram identificadas como A_i , B_i , C_i , D_i , E_i e F_i .

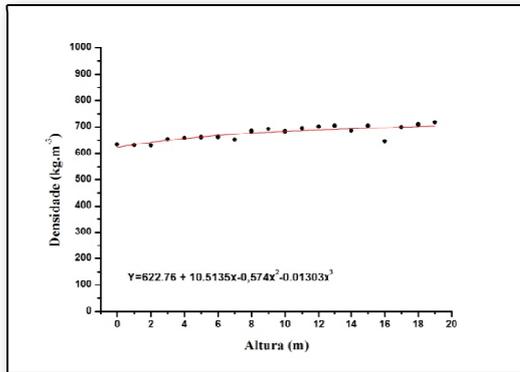
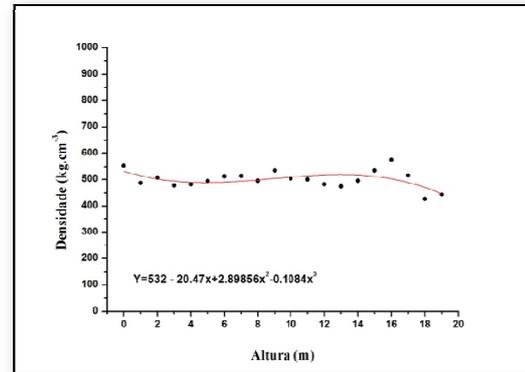
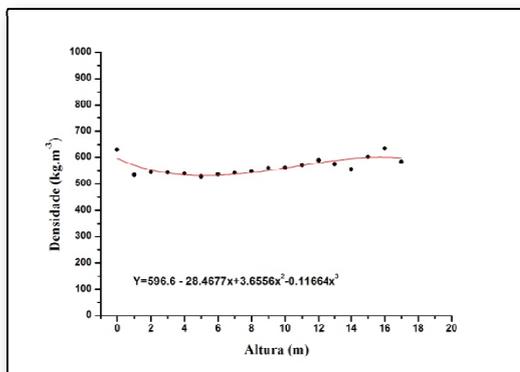
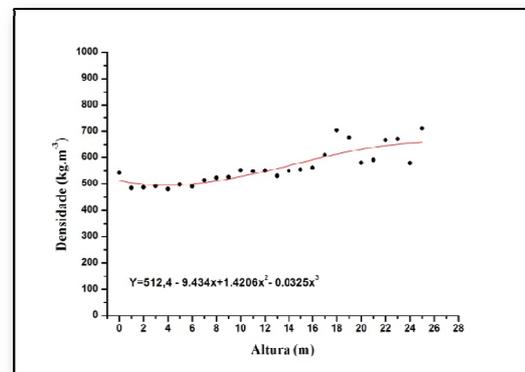
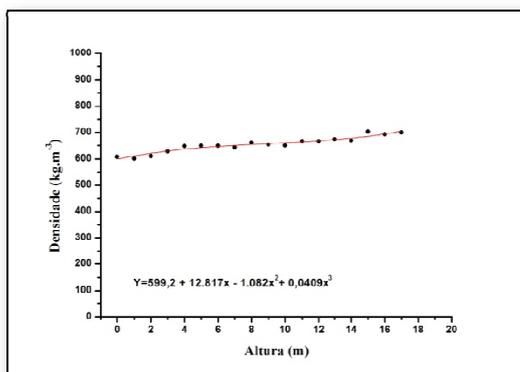
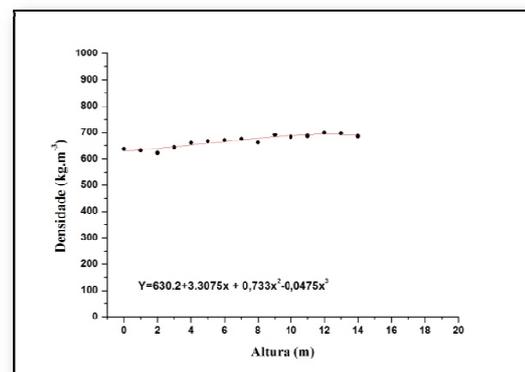
A_iB_iC_iD_iE_iF_i

Figura 15. Variação da densidade aparente a 12% em (kg.m⁻³) na direção longitudinal no sentido base-topo, A_i, B_i, C_i, D_i, E_i e F_i em função da altura (m) das árvores da espécie de *Eucalyptus* sp.

O perfil longitudinal previsto para o gênero *Eucalyptus* não apresenta um padrão clássico definido, sendo muito variável entre árvores (BENJAMIM, 2002, PALERMO et al., 2003; REZENDE, 1997; COSTA, 2006). O padrão de variação para as amostras C_i e D_i da Figura 16 evidenciaram este comportamento. As amostras A_i , E_i e F_i apresentaram densidade crescente no sentido base-topo (REZENDE, 1997; BENJAMIN, 2002). A amostra B_2 apresentou um padrão com uma leve diminuição no DAP e manteve a variação mínima na direção longitudinal e uma diminuição no topo. Este comportamento foi apresentado por Rezende (1997) e identificado nas amostras do gênero híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*) por Benjamin (2002).

Na Tabela 15 são apresentadas as equações ajustadas para cada um das amostras estudadas na Figura 15:

Tabela 15. Equações Polinomiais de terceiro grau obtidas na direção longitudinal de amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostras	Equações	Nº
A_i	$\rho_{12} = 622,76 + 10,5135x - 0,574x^2 + 0,01303x^3$	(34)
B_i	$\rho_{12} = 532 - 20,47x + 2,89856x^2 - 0,1084x^3$	(35)
C_i	$\rho_{12} = 596,6 - 28,4677x + 3,6556x^2 - 0,11664x^3$	(36)
D_i	$\rho_{12} = 512,4 - 9,434x + 1,4206x^2 - 0,0325x^3$	(37)
E_i	$\rho_{12} = 599,2 + 12,817x - 1,082x^2 + 0,0409x^3$	(38)
F_i	$\rho_{12} = 630,2 + 3,3075x + 0,733x^2 + 0,0475x^3$	(39)

As amostras A_i , E_i e F_i não apresentaram um decréscimo da densidade no topo das amostras.

Na Tabela 16 as variações da densidade na direção longitudinal foram analisadas a cada metro.

O maior desvio padrão determinado foi para a mostra D_i de 69 e o menor foi para a amostra F_i de 24. A maior amplitude foi para a amostra D_i e a menor para a amostra F_i de 229 e 77 kg.m⁻³ respectivamente. A variação foi baixa e consequentemente o resultado do coeficiente de variação também, devido à baixa variação na direção longitudinal. A amostra D_i apresentou o maior coeficiente de variação, isto ocorreu devido à maior altura e o segundo maior volume basal.

Tabela 16. Variação da densidade a 12% (kg.m^{-3}) na direção longitudinal determinados pelo método da volumetria por equivalência de área (VEA), de discos coletados a cada metro das árvores A_i , B_i , C_i , D_i , E_i e F_i da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostras	Densidade (kg.m^{-3})					
	A_i	B_i	C_i	D_i	E_i	F_i
0	633	553	629	541	608	637
1	631	487	533	485	601	633
2	630	507	544	487	611	623
3	653	478	543	492	628	644
4	657	483	539	482	648	661
5	661	495	528	498	648	668
6	663	511	535	491	649	672
7	652	513	542	514	642	676
8	685	496	547	523	660	662
9	693	535	561	526	653	692
10	683	503	562	552	649	684
11	695	500	572	548	668	688
12	701	482	589	551	667	700
13	704	475	576	531	674	698
14	687	495	555	550	670	686
15	705	535	603	554	703	-
16	646	575	636	562	693	-
17	699	515	584	609	700	-
18	709	425	-	704	-	-
19	717	442	-	675	-	-
20	-	-	-	580	-	-
21	-	-	-	590	-	-
22	-	-	-	667	-	-
23	-	-	-	670	-	-
24	-	-	-	578	-	-
25	-	-	-	710	-	-

Tabela 17. Resultados das variáveis estatísticas do valor máximo (*V. Máx.*), valor mínimo (*V. Mín.*), amplitude, média em (kg.m^{-3}), o desvio padrão (D_p) e coeficiente de variação (CV) da densidade a 12% (g) das amostras A_i , B_i , C_i , D_i , E_i e F_i analisadas na direção longitudinal da espécie de *Eucalyptus* sp.

Variável	A_i	B_i	C_i	D_i	E_i	F_i	Média
V. Máx	717	575	636	710	703	700	674
V. Mín	630	425	528	482	601	623	548
Amplitude	088	150	108	229	102	77	126
Média	675	500	565	564	654	671	605
Dp	28	34	32	69	30	24	36
CV (%)	4,2	6,9	5,7	12,3	4,6	3,6	6,7

A amplitude média determinada na direção longitudinal foi de 126 kg.m^{-3} , conforme a Tabela 17, a variação na direção longitudinal foi pequena e necessita de estudos cada vez mais detalhados. O coeficiente de variação médio determinado foi de 6,7%, tornando a densidade homogenia na direção longitudinal. A maior variação individual foi da amostra D_i que apresentou o resultado maior da amplitude e do coeficiente de variação conforme a Figura 15. A menor variação longitudinal foi para a amostra F_i que apresentou um coeficiente de 3,6%.

Na Tabela 18 são apresentados os resultados de volume total, densidade básica, massa e altura das árvores. As amostras D_i e E_i e apresentaram o maior e o menor volume total respectivamente. A amostra D_i apresentou a densidade ponderada de 525 kg.m^{-3} com a massa total de 110,1 kg e amostra E_i a densidade ponderada de 640 kg.m^{-3} e a massa total de 48,0 kg.

Tabela 18. Volume total da árvore em (m^3), densidade ponderada (ρ_b), massa total (M) e altura em metros determinados pelo método da volumetria por equivalência de área (VEA), de discos coletados a cada metro da altura de árvores da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostras	Amostras						Média
	A_i	B_i	C_i	D_i	E_i	F_i	
Volume (m^3)	0,15227	0,16166	0,09951	0,20978	0,075	0,13637	0,138
ρ_b (kg.m^{-3})	666	537	559	525	640	661	598
M (kg)	101,4	86,8	55,6	110,1	48,0	90,1	81,4
Altura (m)	19	19	17	25	17	14	18,5

Na Figura 16 é apresentado o gráfico da densidade a 12%, a 0% e básica construído a partir do Apêndice 14, verificou-se a diminuição da densidade até a posição de dois metros e um aumento não uniforme até a altura de 18 metros aproximadamente, sendo estes os pontos de mínima e de máxima densidade, determinados por auxílio de equações de derivadas.

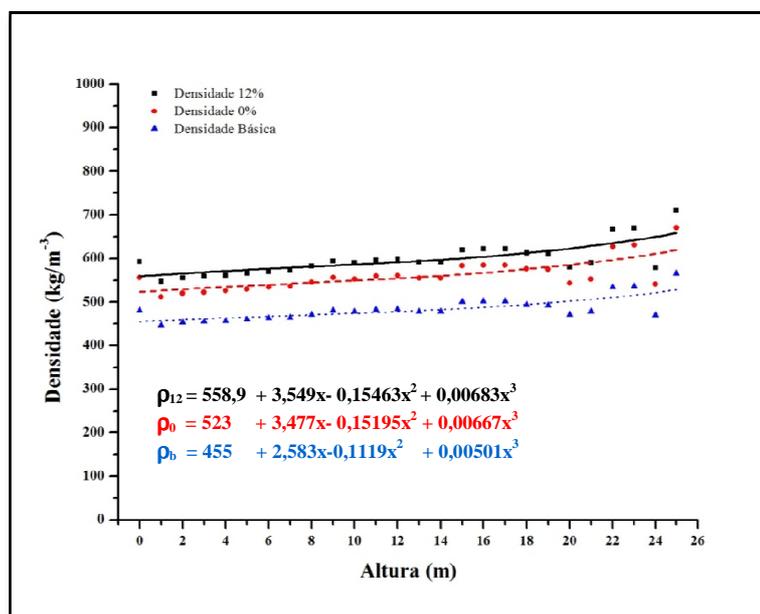


Figura 16. Variação média de densidade (kg.m⁻³) a 12%, 0% e básica de discos coletados a cada metro da altura de árvores da espécie de *Eucalyptus* sp.

As equações ajustadas foram:

$$\rho_{12} = 558,9 + 3,549x - 0,15463x^2 + 0,00683x^3 \quad R^2 \text{ :. } 0,491 \quad (40)$$

$$\rho_0 = 523 + 3,477x - 0,15195x^2 + 0,00667x^3 \quad R^2 \text{ :. } 0,489 \quad (41)$$

$$\rho_b = 455 + 2,583x - 0,1119x^2 + 0,00501x^3 \quad R^2 \text{ :. } 0,494 \quad (42)$$

Atualmente a prática na análise da variação da densidade na direção longitudinal é feita com a retirada de cinco amostras (DAP; 12,5; 37,5; 62,5 e 87,5%), ao longo da árvore na direção longitudinal para análise, no entanto existe um desejo por parte das empresas e das instituições de pesquisa em diminuir a retirada de números de discos, ou seja, de cinco para apenas um ou dois. Com este objetivo foi construída a Tabela 19, a partir dos dados da Figura 16.

O valor médio do ponto ideal de amostragem na Tabela 19 foi de 7,97 metros. Desta maneira foi possível determinar a densidade média da árvore, utilizando-se apenas uma amostra retirada na forma de disco a 45% da altura comercial.

A altura máxima média das árvores foi de 18,8 metros conforme apresentada pela Tabela 19. Com esses dados foi possível deduzir a Equação 43, que

determina a porcentagem da altura da árvore na qual deve ser retirado o disco, a 45% da altura comercial.

Tabela 19. Valores médios de densidade ponderada a 12%, altura comercial, ponto ideal de amostragem (*PIA*) para retirada dos discos na árvore.

Árvore	Código	Densidade 12%	PIA (m)	Altura Comercial (m)	PIA (%)	Posição de mínima ρ (m)	Posição de máxima ρ (m)
1	A _i	663	6,14	19	-	-	-
2	B _i	507	9,90	19	-	-	-
3	C _i	559	9,81	17	-	-	-
4	D _i	525	10,1	25	-	-	-
5	E _i	640	5,92	17	-	-	-
6	F _i	661	6,00	14	-	-	-
Média		593	7,97	18,8	45	2,0	18,0

$$PIA = 0,45.H_C \quad (43)$$

Como as variações longitudinais da densidade foram baixas, uma pequena variação do PIA não causará problema na determinação de densidade, ou seja, a amostra deve ser retirada em uma região entre 40 a 50% da altura comercial.

Benjamin (2002) utilizou árvores do gênero *Eucalyptus* com 8 anos de idade e correlacionou a densidade ponderada da árvore e as altura de coleta a 0, DAP e 25% descartando as demais, de 50 a 100% por motivos operacionais. Obteve para árvores o ponto ideal de amostragem a 25% da altura comercial.

Uma das preocupações na coleta de amostras para representar a densidade ponderada é quanto à coleta realizada na posição de 0% da altura comercial e no DAP, por apresentar valores diferenciados de densidades (REZENDE, 1997). O perfil obtido para a variação longitudinal de densidade para o gênero *E. grandis* apresentou uma diminuição até aproximadamente 25% da altura do tronco, aumentando desse ponto em diante. Esse resultado enfatiza os cuidados que se deve tomar para amostragens somente na posição a 25% da altura comercial (BENJAMIN, 2002).

Rezende, Saglietti e Chaves (1998) na caracterização do gênero de *Eucalyptus* utilizou amostras coletadas na região de 0, 25, 50, 75, 100% da altura comercial e

o DAP. Os autores comentaram que se o DAP fosse utilizado como uma alternativa para coleta de uma única amostra representativa da árvore, o valor real seria subestimado em 8%.

Na Tabela 20 são apresentados os dados da variação da densidade a 12% e o ponto ideal de amostragem.

A densidade média determinada nos pontos de coleta a 40 e 50 % da altura comercial foram próximos aos determinados na posição ideal de amostragem (PIA). Os resultados estão de acordo com Costa (2006) determinou um ponto de coleta a 50% a altura comercial estudando amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

A variação entre os valores médios da densidade estimada entre 40 e 50% da altura comercial foi 2,3%. A justificativa para a retirada de uma amostra em um ponto qualquer entre as alturas citadas, foi devido à baixa variação da densidade na direção longitudinal.

Tabela 20. Variação da densidade a 12% na posição de 40 e 50% da altura comercial e no ponto ideal de amostragem (PIA)

	Densidade 12%		
	40%	50%	PIA
A_i	676	682	663
B_i	498	507	507
C_i	535	546	559
D_i	529	556	525
E_i	658	669	640
F_i	662	671	661
Média	593±80	605±77	593±71

Deve-se ressaltar ainda que o resultado apesar de permitir certa flexibilidade, somente é válido para gênero *Eucalyptus* nas condições determinadas de idade, altura comercial, aspectos edáficos e climáticos. Qualquer extrapolação dos resultados para outras situações exige cuidados especiais e apenas pode ser realizada com embasamento científico experimental.

A mudança do número de amostras de cinco para apenas um disco, facilita a obtenção dos resultados, no entanto aumenta a chance de erros experimentais. Caso haja receio em diminuir o número de amostras pode-se utilizar três amostras 12,5%; 37,5% e

62,5% e descartar o disco de 87,5% da altura comercial, que o resultado será praticamente o mesmo, não interferindo na média ponderada da árvore.

A amostra para caracterização da densidade média da árvore poderá ser retirada um pouco acima ou abaixo do ponto ideal de amostragem. O ponto ideal de amostragem está muito próximo da altura de coletas de 37,5%, proposto nos intervalos das coletas tradicionais de 0, 25, 50, 75 e 100% e pode ser tratado como referência para amostragem ponderada de densidade em casos especiais.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, nas discussões apresentadas e nas condições em que foi realizado o trabalho, são apresentadas as seguintes conclusões.

O método de imersão pode ser utilizado também para amostras não saturadas e com umidade abaixo do PSF, podendo assim ser aplicável nas determinações de densidade para amostras na umidade de equilíbrio. Pois a absorção de água, nos 10 primeiros segundos de imersão não afeta significativamente os resultados obtidos para a densidade da amostra.

A determinação da densidade por equações apresentou bons resultados, com boa precisão minimizando o tempo empregado com determinações experimentais.

A análise do perfil longitudinal das amostras possibilitou determinar um ponto de amostragem em 45% da altura comercial, para ser utilizada uma única amostra como alternativa de amostragem para a determinação da densidade média da árvore.

Na comparação entre os métodos de imersão (*MI*) e do método de atenuação (*TARG*), os resultados obtidos de densidade por ambos os métodos não apresentam diferenças significativas.

Na comparação entre os métodos de imersão (*MI*) e do Método de volumetria por equivalência de área (*VEA*), os resultados obtidos para a densidade por ambos os métodos não apresentam diferenças significativas.

Considerando o que foi realizado neste trabalho, salienta-se que, todos os métodos apresentaram resultados confiáveis, entretanto o Método de imersão (*MI*) tem a vantagem de ser simples e aplicável para amostras com formato irregular, diferentemente dos outros dois métodos, apesar da aplicação deste método proporcionar um aumento às vezes indevido da umidade das amostras.

O Método de atenuação da radiação gama (*TARG*) apesar de ser mais oneroso e mais sofisticado, é bastante útil quando se deseja maiores detalhes nas variações de densidade. O que não é possível obter com os outros métodos

6. REFERÊNCIA

AGUIAR, O. **Determinação de gradientes de umidade em madeira por atenuação de radiação gama do ^{241}Am** . 1980. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia Nuclear na Agricultura) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1980.

ANDRADE, M. C. N. **Crescimento micelial, produção e características bromatológicas do shiitake em função de linhagens e de propriedades físicas e químicas de espécies e clones de eucalipto**. 2007. 195 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

ARONI, A. S. **Avaliação da biomassa e qualidade da madeira do híbrido *Pinus tecunumanni* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* pela técnica de atenuação da radiação gama do ^{241}Am** . Botucatu. 2005. 137 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2002. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da Abraf 2011 ano base 2010**. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF11/ABRAF11-BR.zip>>. Acesso em: 17 mar. 2012.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Basic density and retractibility of wood clones of three *Eucalyptus* species. **Ciênc. Florest.**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BELINI, U. L. et al. Caracterização da estrutura anatômica, densidade básica e morfologia de cavacos da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de painéis MDF. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 707-713, 2008.

BENJAMIN, C. A. **Comparação entre três critérios de amostragem para a avaliação da densidade básica da madeira de florestas implantadas de eucaliptos**. Botucatu. 2002. 131f.

Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

BISON, O. et al. Half-diallel between *Eucalyptus camaldulensis* clones and *E. grandis* *E. urophylla*, and *E. saligna* clones. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 395-402, 2009.

BRASIL, M. A. M.; VEIGA, R. A. A.; SANSÍGOLO, C. A. Correlação entre densidade básica e variáveis dendrométricas de *Pinus elliottii engelm var. Elliotti*. **Científica**, São Paulo, v. 19, p. 181-188, 1991.

BUCUR, V. *Nondestructive characterization and imaging of wood*. Syracuse: Springer, 2003. p. 324.

COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E.urophylla***. 2006. 99 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

CRUZ, C. R.; LIMA, J. T.; MUNIZ, G. I. B. Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de *Eucalyptus*. **Sci. For.**, Piracicaba, n. 64, p. 33-37, 2003.

FALCAO, S. C. et al. Processo modificado de reprodução e amplificação de imagem para mensuração de área por planimetria: Aplicação em feridas planas produzidas em cães, tratadas por curativos oclusivos de pele de rã. **Braz. J. Vet. Res. Anim. Sci**, São Paulo, v. 38, n. 4, p. 165-169, 2001.

FERRAZ, E. S. B. **Determinação simultânea de densidade e umidade de solos por atenuação de raios gama do ^{137}Cs e ^{241}Am** . 1974. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1974.

FERRAZ, E. S. B. Determinação de densidade de madeiras por atenuação de radiação gama de baixa energia. **IPEF**, Piracicaba, n. 12, p. 61-68, 1976.

FERRAZ, E. S. B.; AGUIAR, O. Gamma-ray attenuation technique for determining density and water content of wood samples. **IPEF**, Piracicaba, n. 30, p. 9-12, 1985.

FERREIRA A. S. et al. C. Mensuração de área de cicatrização por planimetria após aplicação do ultra-som de baixa intensidade em pele de rato. **Rev. Bras. Fisioter.**, São Carlos, v. 12, n. 5, p. 351-358, 2008.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos de determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, Piracicaba, n. 2-3, p. 65-74, 1971.

FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G.; MILANEZ, A. F. Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus saligna*, *E. paniculata*, *E. citriodora*, *E. maculata* e *E. tereticornis* para produção de celulose sulfato. **IPFE**, Piracicaba, n.10, p.17-37, 1975.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOVSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 112 p.

GARCIA, J. N. Tecnologia de produtos florestais. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6. 1990, Campos do Jordão. **Anais...** São Paulo: SBS, 1990. p. 685-689.

GAVA, J. L.; GONCALVES, J. L. M. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantations of *Eucalyptus grandis* clone. **Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)**, Piracicaba, v. 65, n. 3, p. 306-313, 2008.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. Analysis of wood quality criteria of *Eucalyptus* wood for kraft pulp production. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 339-344, 2010.

GONÇALVES, F. G. et al. Densidade básica e variação dimensional de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 2, 2009.

GONÇALVES, F. G. et al. Parâmetros dendrométricos e correlações com propriedades tecnológicas em um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 947-959, 2010.

GOUVÊA, A. F. G. et al. Avaliação da madeira e da polpação kraft em clones de eucaliptos. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1175-1185, 2009.

GOUVÊA, A. F. G. et al. Determinação da densidade básica da madeiras de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011.

HAYGREEN, J. G.; BOWYER, J. L. **Forest product and wood science**. 3. ed. Ames: Iowa State University Press, 1996. 495 p.

HERRERA, M. E. F. **Densidade básica e equações de peso de madeira seca de povoamentos de *Eucalyptus* de acordo com a idade local, espécie e método de**

regeneração. 1989. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agronomia de Lavras, Lavras, 1989.

JAMMAL FILHO, F. A. **Determinação da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus spp.* a idades passadas com uso da técnica de atenuação de radiação gama.** 2011. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

KAENNEL, M.; SCHWEINGRUBER, F. H. **Multilingual glossary of dendrochronology.** Birmensdorf: Swiss Federal Institute for Forest, 1995.

KOLLMANN, F.; COTÉ, W.A. **Principles of wood science and technology.** Berlin: Springer-Verlag, 1968. v. 1, 592p.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of wood science and technology.** Berlin: Springer-Verlag, 1975. v. 2, p. 154-283.

LATORROCA, J. V.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta Ambient.**, Seropedica, v. 7, n. 1, p. 279-291, 2000.

LIMA, A. B.; REZENDE, M. A. Incrementos médios anuais de volume, massa, e energia do *Liquidambar styraciflua* na região de Agudos/SP. **Energ. Agric.**, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 38-47, 2003.

LIMA, I. L.; GARCIA, J. N. Variação da densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras em função da intensidade de desbaste, adubação e posição radial em *Eucalyptus grandis* hill ex-maiden. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 551-559, 2010.

MATTOS, B. D.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; MELO, R. R.; SANTINI, E. J. Variação axial da densidade básica da madeira de três espécies de gimnospermas. **Rev. Bras. Ciênc. Agrár.**, Recife, v. 6, n. 1, p. 121-126, 2011.

MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F., LIMA, J. T. Variação da massa específica da madeira de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. no sentido longitudinal dos caules. **Cerne**, Lavras, v. 5, n. 1, p. 1-7, 1999.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil.** 1998. 429 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, J. T. S., LUCIA, R. M. D., VITAL, B. R. Estudos das propriedades físicas e tecnológicas da madeira da pindaíba (*Xylopiia-lericea-It. Hill*): densidade, umidade e secagem da madeira. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 14, p. 139-54, 1990.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Rev. Árvore**, Viçosa, v.29, n. 1, p. 115-127, 2005.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus* . **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 929-936, 2010.

PALERMO, G. P. M. **Qualidade da Madeira de árvores resinadas de *Pinus elliottii* Engelm.** 2003. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais / Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2003.

PALERMO, G. P. M. et al. Análise da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm por meio de radiação gama de acordo com as direções estruturais (longitudinal e radial) e a idade de crescimento. **Floresta Ambient.** Seropedica, v. 10, p. 47-57, 2003.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology.** 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1970. 705 p.

PEREIRA, J. R. A. **Comparação de metodologias na obtenção da densidade do solo sob diferentes manejos e curva de retenção de água do solo.** 2000. 99f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

PINTO JUNIOR, J. E.; GARLIPP, R. C. DAMAS; Florestas cultivadas. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações institucionais e políticas.** Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v. 1, p. 799-823.

REZENDE, M. A. **Estudo dos anéis de crescimento de duas variedades de *Pinus caribaea* cultivadas na Bahia para avaliação da produtividade, massa específica e nutrição mineral.** 1987. 144 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

REZENDE, M. A. **Uso da técnica de atenuação da radiação gama no estudo da biomassa de *Eucalyptus grandis*.** 1984. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

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.** 1997. 138f. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

REZENDE, M. A. Wood shrinkage of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and *Eucalyptus grandis* and their relationships with moisture content and specific gravity. **Sci. For.**, Piracicaba, n. 64, p. 120-127, 2003.

REZENDE, M. A.; SAGLIETTI, J. R. C.; MARTINEZ, J. C. Estudo das variações da Massa Específica e Retratabilidade da Madeira do *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7. Curitiba, 1993. **Anais...** Curitiba: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1993. p. 629-635.

REZENDE, M. A.; GUERRINI, I. A.; SAGLIETTI, J. R. C. Estudo das interrelações entre massa específica, retratabilidade e umidade da madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 49, p. 133-141, 1995.

REZENDE, M. A.; SAGLIETTI, J. R. C.; CHAVES, R.; Specific gravity variation of *Eucalyptus grandis* wood at 8 years old in function of a different productivity indexes. **Sci. For.**, Piracicaba, n. 53, p. 71-78, 1998.

REZENDE, M. A.; SEVERO, E. T. D.; QUINTANA, I. R. Estudo das variações da massa específica em *Pinus oocarpa* através da técnica de atenuação da radiação gama. **Floresta**, Curitiba, v. 29, n. 1/2, p. 67-84, 1999.

REZENDE, M. A. et al. Densidade e produtividade da madeira de híbrido e seminal de *Pinus caribaea*. **Floresta Ambient.**, Seropedica, v. 15. n. 2, p. 8-17, 2008.

RIBEIRO, A. F.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus spp.* **IPFE**, Piracicaba, n.46, p.76-85, 1993.

SANTOS, M. D. **Efeito do espaçamento de plantio na biomassa do fuste de um clone híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*.** Botucatu. 2011. 140f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

SANTOS, R. B.; GOMIDE, J. L.; SOUSA, L. C. Predição de qualidade da madeira e da polpa celulósica por técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS). **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 759-769, 2009.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 233-239, 2003.

SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 218 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TRUGILHO, F. P.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

VALE, A. T.; MARTINS, I. S.; ARAÚJO, W. O. Estudo da densidade básica de três espécies do cerrado. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 16, n. 2, p. 209-217, 1992.

VALE, R. S. et al. Efeito da desrama artificial na qualidade da madeira de clones de eucalipto em sistema agrossilvipastoril. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 285-297, 2002.

VITAL, B. R. Método de determinação da densidade da madeira. **Bol. Téc. SIF**, Viçosa, n. 1, p. 1-21, 1984.

VITAL, B. R.; MACIEL, A. S.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 637-644, 2006.

7. APÊNDICE

Apêndice 1. Variação percentual de umidade (ΔU) em função do tempo (t_i), de imersão em segundos (t) para as amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostras	Imersão	Tempo total	Massa	Volume	Variação umidade	Variação volume	
1	1°	T ₁	11	191	284	-	-
	2°	T ₁ + T ₂ + T _P	37	197	285	2,94	0,338
	3°	T ₁ + T ₂ + T ₃ + 2T _P	62	198	286	4,00	0,468
	4°	T ₁ + + T ₄ + 3T _P	87	199	286	4,44	0,559
	5°	T ₁ + + T ₅ + 4T _P	102	199	286	4,62	0,788
2	1°	T ₁	10	346	537	-	-
	2°	T ₁ + T ₂ + T _P	35	355	538	2,50	0,279
	3°	T ₁ + T ₂ + T ₃ + 2T _P	60	359	538	3,78	0,317
	4°	T ₁ + + T ₄ + 3T _P	86	360	539	4,02	0,410
	5°	T ₁ + + T ₅ + 4T _P	101	361	539	4,34	0,466
3	1°	T ₁	10	44,2	73	-	-
	2°	T ₁ + T ₂ + T _P	34	45,7	73	3,25	0,0953
	3°	T ₁ + T ₂ + T ₃ + 2T _P	60	46,5	74	5,11	0,435
	4°	T ₁ + + T ₄ + 3T _P	87	47,0	74	6,26	0,571
	5°	T ₁ + + T ₅ + 4T _P	102	47,4	74	7,07	0,816
4	1°	T ₁	12	174	270	-	-
	2°	T ₁ + T ₂ + T _P	37	179	271	2,84	0,504
	3°	T ₁ + T ₂ + T ₃ + 2T _P	61	182	273	4,24	0,974
	4°	T ₁ + + T ₄ + 3T _P	85	183	273	4,83	1,059
	5°	T ₁ + + T ₅ + 4T _P	100	184	273	5,16	1,059
5	1°	T ₁	10	116	180	-	-
	2°	T ₁ + T ₂ + T _P	34	120	180	2,66	0,005
	3°	T ₁ + T ₂ + T ₃ + 2T _P	58	121	180	3,55	0,0166
	4°	T ₁ + + T ₄ + 3T _P	83	121	181	4,14	0,122
	5°	T ₁ + + T ₅ + 4T _P	98	122		5,01	
6	1°	T ₁	8	153	314	-	-
	2°	T ₁ + T ₂ + T _P	32	159	314	3,48	0,191
	3°	T ₁ + T ₂ + T ₃ + 2T _P	58	160	315	4,34	0,319
	4°	T ₁ + + T ₄ + 3T _P	84	161	315	5,52	0,319
	5°	T ₁ + + T ₅ + 4T _P	99	162	315	5,68	0,446

* T_i = T1, T2, T3, T4, T5, tempo referente a cada imersão durante o experimento.

* T_P = 15 (segundos), tempo de permanência da amostra submersas fora do experimento.

(Continuação) Apêndice 1. Variação percentual de umidade (ΔU) em função do tempo (t_i), de imersão em segundos (t) para as amostras da espécie de *Eucalyptus* sp..

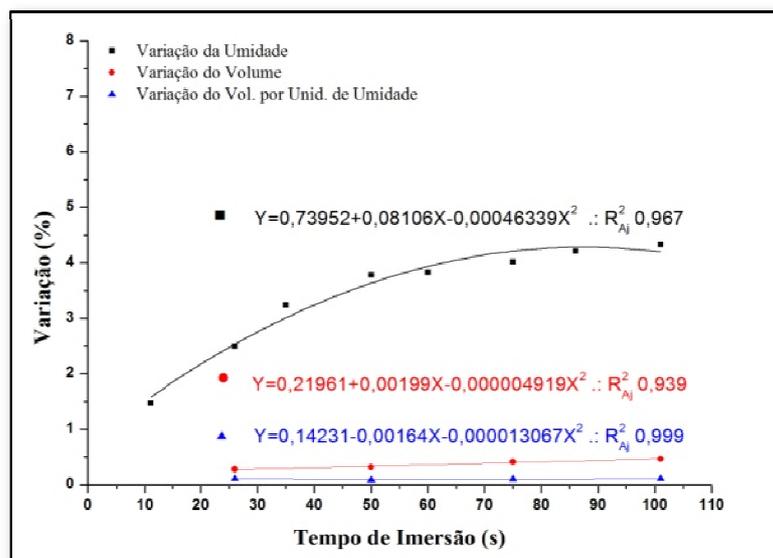
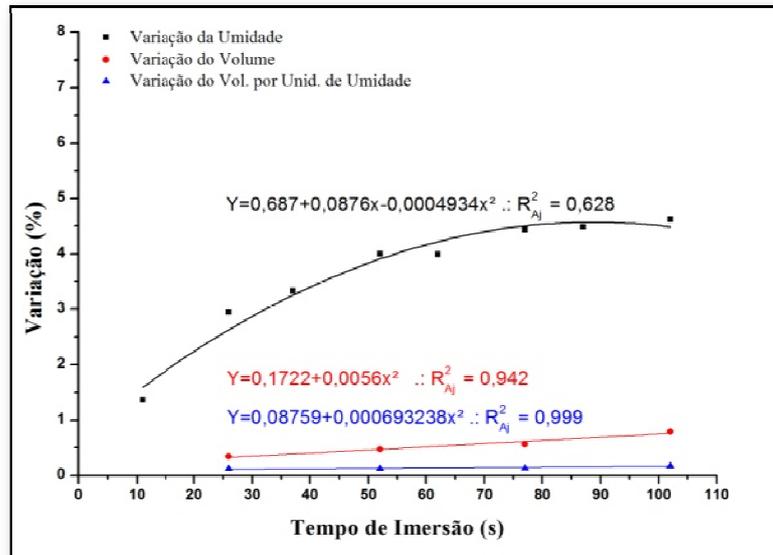
Amostras	Imersão	Tempo total		Massa	Volume	Variação umidade	Variação Volume
7	1°	T ₁	10	163	309	-	-
	2°	T ₁ + T ₂ + T _P	34	166	309	1,93	0,120
	3°	T ₁ + T ₂ + T ₃ + 2T _P	60	169	309	3,46	0,842
	4°	T ₁ + + T ₄ + 3T _P	85	170	310	4,01	1,203
	5°	T ₁ + + T ₅ + 4T _P	100	169	310	4,10	1,444
8	1°	T ₁	8	70	131	-	-
	2°	T ₁ + T ₂ + T _P	32	73	131	4,12	0,229
	3°	T ₁ + T ₂ + T ₃ + 2T _P	56	74	132	5,50	0,611
	4°	T ₁ + + T ₄ + 3T _P	80	75	132	6,22	0,763
	5°	T ₁ + + T ₅ + 4T _P	95	75	132	6,71	0,840
9	1°	T ₁	6	78	129	-	-
	2°	T ₁ + T ₂ + T _P	27	79	129	1,01	0,039
	3°	T ₁ + T ₂ + T ₃ + 2T _P	49	80	129	1,93	0,077
	4°	T ₁ + + T ₄ + 3T _P	72	80	130	2,55	0,154
	5°	T ₁ + + T ₅ + 4T _P	96	80	130	3,07	0,155
10	1°	T ₁	8	83	134	-	-
	2°	T ₁ + T ₂ + T _P	29	84	134	1,60	0,389
	3°	T ₁ + T ₂ + T ₃ + 2T _P	50	85	134	2,49	0,389
	4°	T ₁ + + T ₄ + 3T _P	74	85	134	3,08	0,434
	5°	T ₁ + + T ₅ + 4T _P	89	86	134	3,53	0,434
11	1°	T ₁	7	298	453	-	-
	2°	T ₁ + T ₂ + T _P	31	309	457	3,61	0,792
	3°	T ₁ + T ₂ + T ₃ + 2T _P	54	310	457	4,12	0,850
	4°	T ₁ + + T ₄ + 3T _P	78	311	457	4,35	0,931
	5°	T ₁ + + T ₅ + 4T _P	93	312	458	4,75	1,05

* T_i = T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, tempo referente a cada imersão durante o experimento.

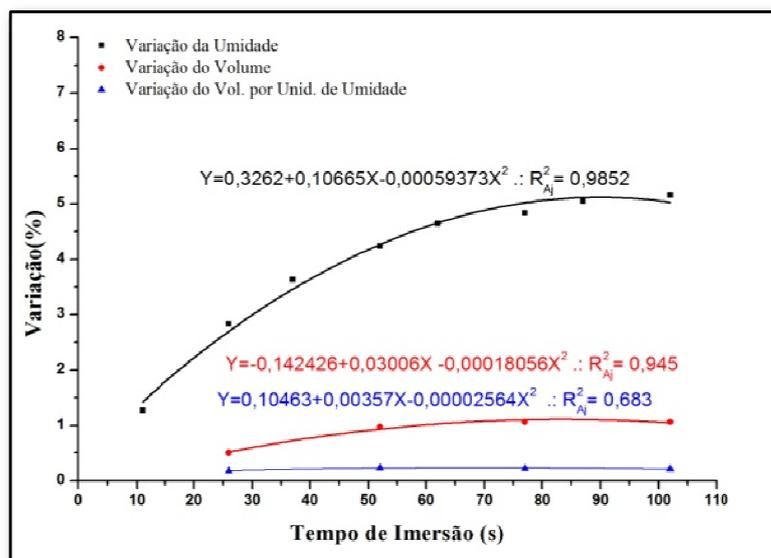
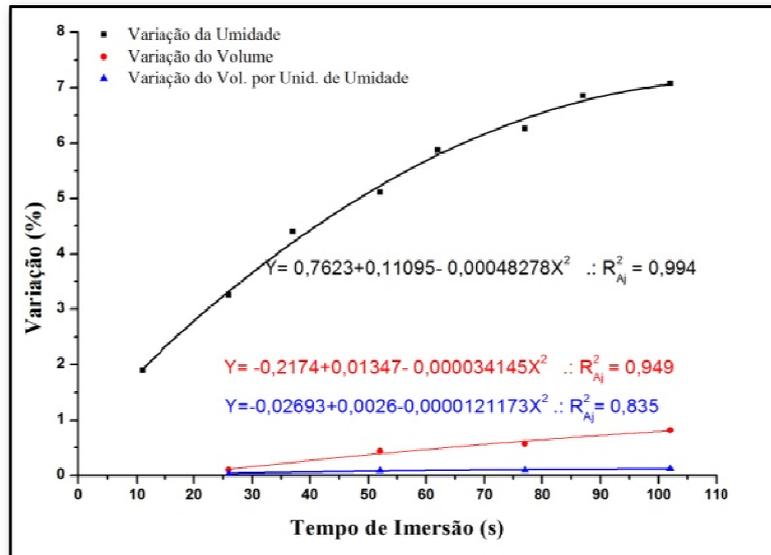
* T_P = 15 (segundos), tempo de permanência da amostra submersas fora do experimento.

Apêndice 2. Expansão volumétrica (Δ_V) em função do tempo (t_i) de imersão em segundos (t) para as amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

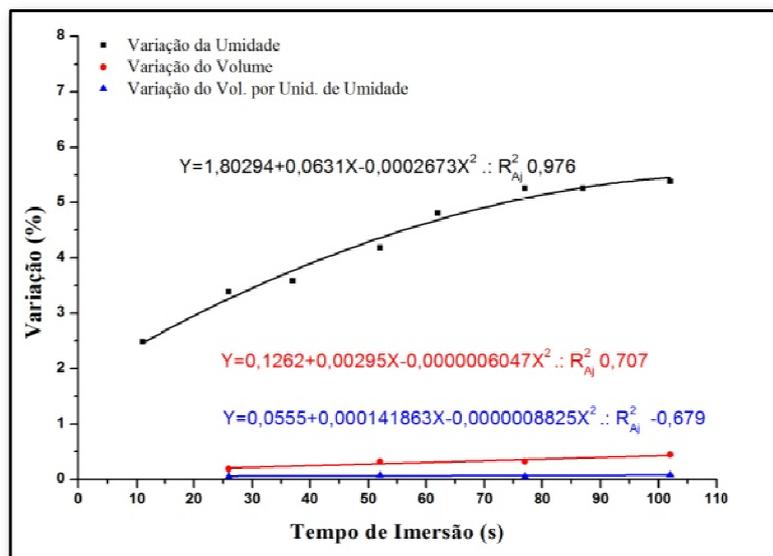
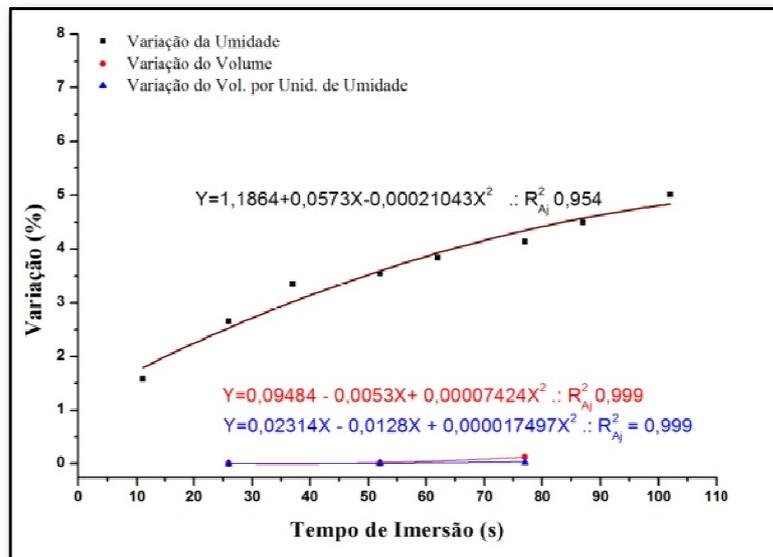
Expansão volumétrica (Δ_V)												
Imersão (I)	Tempo (t) Segundos	Amostras										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	22±1,9	0,338	0,280	0,095	0,504	0,006	0,191	0,097	0,229	0,039	0,389	0,322
2	48±3,1	0,468	0,317	0,435	0,974	0,017	0,319	0,097	0,611	0,077	0,389	0,322
3	72±4,4	0,559	0,410	0,572	1,059	0,122	0,319	0,356	0,763	0,155	0,434	0,469
4	97±5,2	0,788	0,466	0,817	1,059		0,446	0,421	0,840	0,155	0,434	0,601
Amplitude		0,450	0,186	0,721	0,555	0,116	0,255	0,324	0,611	0,116	0,045	0,278
Média		0,538	0,368	0,480	0,899	0,048	0,319	0,243	0,611	0,106	0,411	0,429
CV		35	23	63	30	75	33	70	44	55	6	31



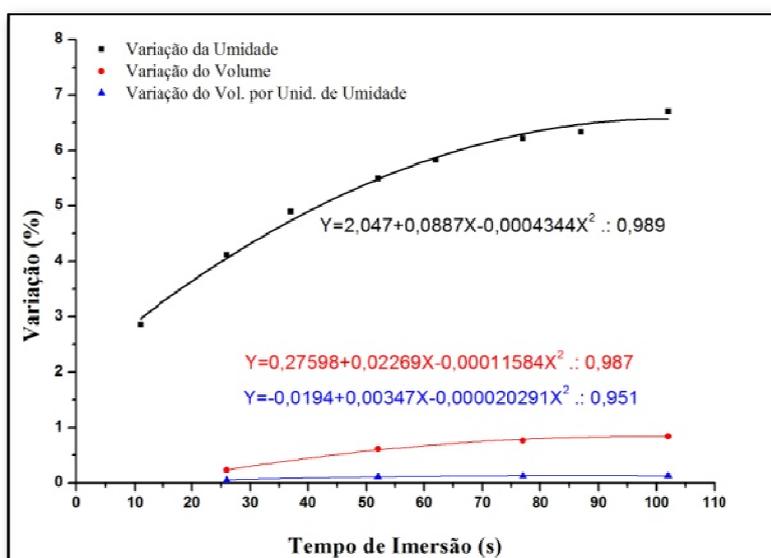
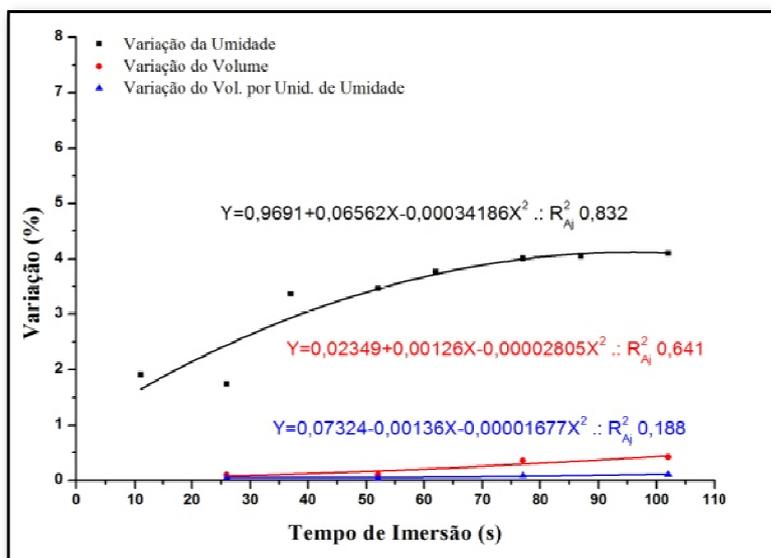
Apêndice 3. Equações de regressão polinomial da variação de umidade (Δ_U), variação volumétrica (Δ_V) e a variação do volume por unidade de umidade (Δ_V/Δ_U) determinada pelo método de imersão (MI) das amostras de 1 - 2 da espécie de *Eucalyptus* sp.



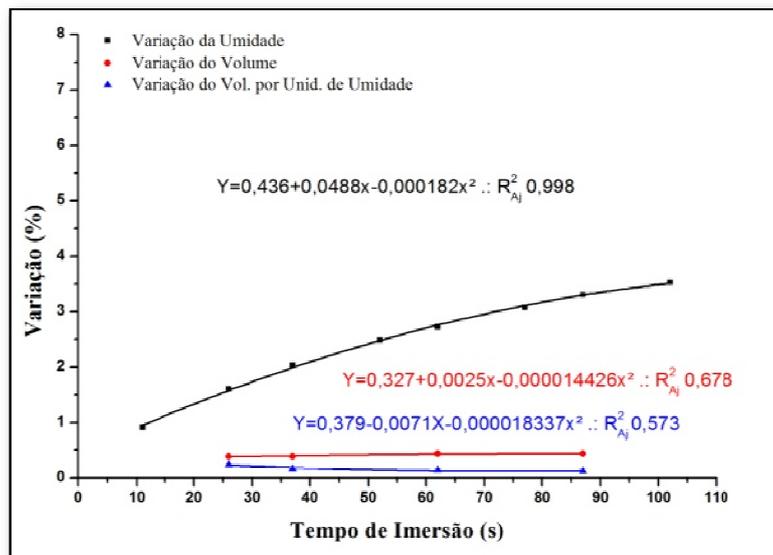
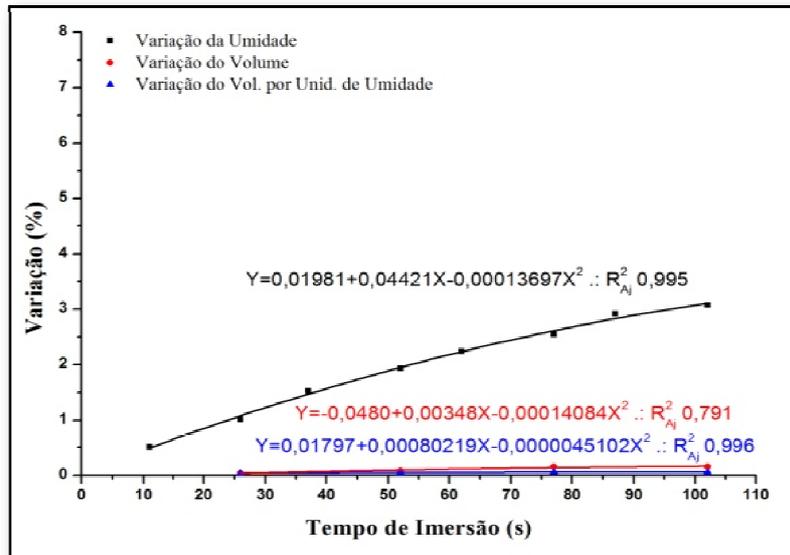
Apêndice 4. Equações de regressão polinomial da variação de umidade (Δ_U), variação volumétrica (Δ_V) e a variação do volume por unidade de umidade (Δ_V/Δ_U) determinada pelo método de imersão (MI) das amostras de 3 - 4 da espécie de *Eucalyptus* sp.



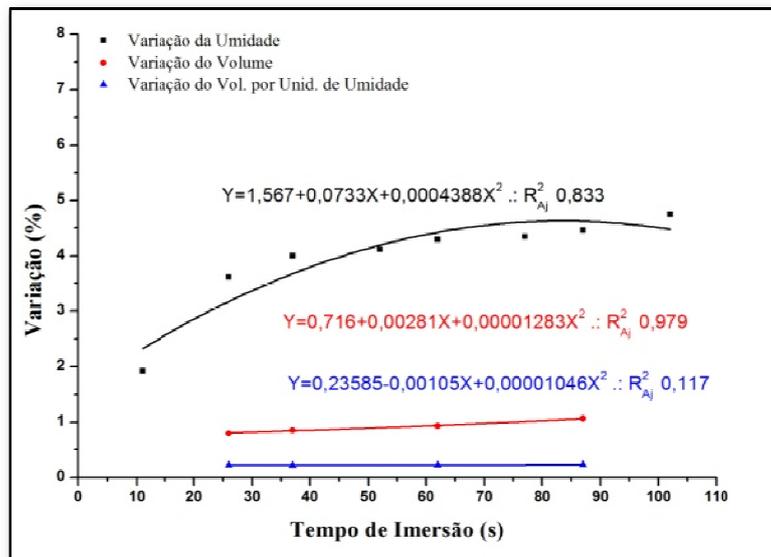
Apêndice 5. Equações de regressão polinomial da variação de umidade (Δ_U), variação volumétrica (Δ_V) e a variação do volume por unidade de umidade (Δ_V/Δ_U) determinada pelo método de imersão (MI) das amostras de 5 - 6 da espécie de *Eucalyptus* sp.



Apêndice 6. Equações de regressão polinomial da variação de umidade (Δ_U), variação volumétrica (Δ_V) e a variação do volume por unidade de umidade (Δ_V/Δ_U) determinada pelo método de imersão (MI) das amostras de 7 - 8 da espécie de *Eucalyptus* sp.



Apêndice 7. Equações de regressão polinomial da variação de umidade (Δ_U), variação volumétrica (Δ_V) e a variação do volume por unidade de umidade (Δ_V/Δ_U) determinada pelo método de imersão (MI) das amostras de 9 - 10 da espécie de *Eucalyptus* sp.



Apêndice 8. Equações de regressão polinomial da variação de umidade (Δ_U), variação volumétrica (Δ_V) e a variação do volume por unidade de umidade (Δ_V/Δ_U) determinada pelo método de imersão (*MI*) das amostras de 11 da espécie de *Eucalyptus* sp.

Apêndice 9. Resultados da média do volume (m^3), desvio padrão e coeficiente de variação (CV) das amostras submetidas a três estimativas de volume aparente (V_{AP}), volume por variação de umidade ($V_{Real(2)}$) e volume por equação ($V_{Real(1)}$) da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostras	Volume (m^3)			Média	$(V_{real(1)} - V_{AP})$	$(V_{real(2)} - V_{AP})$
	V_{AP}	$V_{REAL(2)}$	$V_{REAL(1)}$			
G ₁	209	212	212	211		
	175	178	178	177		
	184	187	187	186		
	212	216	215	214		
	238	243	242	241		
	172	176	175	174		
	174	177	176	175		
	179	181	182	181		
	170	173	173	172		
	76	77	77	77		
G ₂	293	298	298	296		
	278	280	282	280		
	277	281	281	279		
	330	337	335	334		
	281	286	286	284		
	233	235	236	235		
	335	339	340	338		
	291	295	296	294		
276	279	281	279			
G ₃	401	405	408	405		
	440	444	447	444		
	393	397	399	396		
	414	419	421	418		
	470	474	478	474		
	379	382	385	382		
	452	455	460	456		
	422	428	429	426		
	425	428	432	428		
489	493	497	493			
Média	299	303	304	302		
Desvio padrão	111	112	113	112	1,69	1,29
CV%	37	37	37	37		

Apêndice 10. Volume aparente determinado pelo método de imersão (I_i) em água em três repetições, variação do volume aparente (ΔV), o desvio padrão da amplitude (D_p) o coeficiente de variação (CV) e a média dos resultados de G_i , das imersões (I_i) de amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostra	Volume (cm ³)											
	G ₁				G ₂				G ₃			
	I_1	I_2	I_3	ΔV	I_1	I_2	I_3	ΔV	I_1	I_2	I_3	ΔV
1	209	210	209	0,642	293	295	294	0,581	401	400	402	0,325
2	175	175	177	0,856	278	279	280	0,684	440	441	441	0,321
3	184	184	184	0,327	277	279	278	0,723	393	393	393	0,178
4	212	213	214	0,897	330	332	333	0,879	414	414	414	0,097
5	238	240	240	0,629	281	283	283	0,747	470	469	470	0,299
6	172	173	174	0,930	233	234	233	0,516	379	379	379	0,132
7	174	174	174	0,288	335	336	337	0,628	452	453	453	0,199
8	179	179	179	0,392	291	292	292	0,240	422	422	422	0,071
9	170	172	172	1,117	276	276	277	0,217	425	426	425	0,283
10	76	76	77	0,921	221	221	222	0,771	489	489	489	0,061
11	71	72	72	0,561	268	269	269	0,224	398	399	402	0,879
12	73	74	74	0,681	264	264	264	0,152	510	513	513	0,686
13	170	170	171	0,176	436	443	442	1,561	362	362	363	0,221
14	142	142	141	0,778	271	272	272	0,480	562	565	566	0,758
15	83	83	83	0,120	263	264	265	0,456	506	506	506	0,020
16	147	147	147	0,341	258	258	258	0,116	439	439	440	0,160
17	188	187	187	0,160	239	239	239	0,168	676	681	682	0,888
18	57	56	57	1,423	309	309	309	0,194	645	645	647	0,310
19	144	144	144	0,139	270	270	270	0,260	533	533	533	0,000
20	143	143	144	0,280	291	291	291	0,069	456	459	460	0,878
Média	150	151	151	0,58	284	285	285	0,48	469	469	469	0,34
D_p	52	53	52	0,37	46	47	47	0,36	84	85	85	0,30
CV%		35				16				18		

Apêndice 11. Massa aparente determinada em (g), em três repetições, variação de umidade (ΔU), desvio padrão (Dp) o coeficiente de variação (CV) e a média dos resultados de G_i , das imersões (I_i) de amostras da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostras	Massa (g) ou (kg.m ⁻³)											
	G ₁				G ₂				G ₃			
	I_1	I_2	I_3	ΔU	I_1	I_2	I_3	ΔU	I_1	I_2	I_3	ΔU
1	129	130	130	1,16	166	167	168	1,69	251	253	254	1,00
2	122	123	123	0,89	160	161	162	1,24	265	267	267	1,07
3	105	106	107	1,77	184	185	185	0,49	245	246	246	0,78
4	118	119	120	1,28	193	196	197	2,12	260	261	262	0,97
5	132	133	134	1,33	157	158	159	1,40	286	287	288	0,76
6	98	99	99	1,28	156	158	157	0,53	226	227	229	1,17
7	122	123	123	0,75	208	209	209	0,77	272	273	275	1,21
8	128	128	128	0,55	197	198	198	0,59	230	232	233	1,45
9	118	119	119	0,90	185	186	186	0,83	230	232	233	1,21
10	47	48	48	1,96	152	154	154	1,39	300	302	302	0,90
11	44	44	44	1,05	176	178	179	1,77	253	255	256	1,33
12	49	50	50	1,85	173	175	177	2,05	330	333	334	1,14
13	113	114	115	2,11	278	280	281	1,24	240	243	243	1,25
14	96	98	98	1,45	183	184	185	1,36	352	354	356	0,99
15	53	53	54	1,76	176	178	179	1,69	321	323	325	1,48
16	98	99	100	1,52	174	174	174	0,51	294	296	297	1,29
17	123	124	125	2,13	164	164	165	0,73	427	429	431	0,94
18	36	36	37	2,86	198	198	198	0,35	414	417	419	1,26
19	80	81	81	1,17	182	183	184	0,96	341	343	345	1,12
20	77	78	78	1,19	189	190	190	0,71	310	312	314	1,05
Média	94	95	96	1,45	183	184	184	1,12	292	294	295	1,12
Dp	33	33	33	0,56	27	27	27	0,55	58	58	59	0,20
CV%		34				15				20		

Apêndice 12. Volume aparente, volume médio (*Média*) em (cm³) e desvio padrão (D_p) determinado pelo método de imersão (*MI*) em água e pelo método da volumetria por equivalência de área (*VEA*) das amostras G_i da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostra	Método (cm ³)		
	MI	VEA	Δ_v
G ₁₁	209	212	1,62
G ₁₂	175	182	3,72
G ₁₃	184	184	0,08
G ₁₄	212	214	1,18
G ₁₅	238	246	3,22
G ₁₆	172	173	0,79
G ₁₇	174	177	1,99
G ₁₈	179	183	2,25
G ₁₉	170	176	3,69
G ₁₁₀	76	78	2,84
Média	179±42	183±43	2,14±1,2
G ₂₁	293	298	1,80
G ₂₂	278	282	1,37
G ₂₃	277	281	1,66
G ₂₄	330	339	2,71
G ₂₅	281	284	1,10
G ₂₆	233	236	1,59
G ₂₇	335	338	1,05
G ₂₈	291	296	1,75
G ₂₉	276	282	2,05
Média	288±73	293±74	1,68±0,6
G ₃₁	401	403	0,29
G ₃₂	440	444	0,93
G ₃₃	393	396	0,95
G ₃₄	414	418	1,00
G ₃₅	470	475	1,14
G ₃₆	379	385	1,77
G ₃₇	452	466	3,08
G ₃₈	422	426	0,92
G ₃₉	425	433	1,99
G ₃₁₀	489	495	1,30
Média	428±35	434±36	1,34±0,8

Apêndice 13. Volume total da árvore em (m³), densidade ponderada (ρ_b), massa total (M) e altura em metros determinados pelo método da volumetria por equivalência de área (VEA), de discos coletados a cada metro da altura de árvores da espécie de *Eucalyptus* sp.

Amostras	Volume (m ³)						Média
	A _i	B _i	C _i	D _i	E _i	F _i	
Volume	0,15227	0,16166	0,09951	0,20978	0,075	0,13637	0,138
ρ_b	666	537	559	525	640	661	598
M	101,4	86,8	55,6	110,1	48,0	90,1	81,4
Altura	19	19	17	25	17	14	18,5

Apêndice 14. Variação média de densidade (kg.m⁻³) a 12%, 0% e básica das amostras determinados pelo Volumetria por equivalência de área (VEA) de discos coletados a cada metro da altura de árvores da espécie de *Eucalyptus* sp.

Posição	Densidade kg.m ⁻³		
	12%	0%	Básica
0	593	556	480
1	547	512	446
2	556	520	453
3	559	523	455
4	562	526	457
5	549	514	448
6	572	535	464
7	581	544	471
8	599	562	485
9	593	556	480
10	608	571	492
11	610	572	493
12	608	571	491
13	609	572	492
14	608	571	492
15	628	590	506
16	631	593	508
17	662	624	531
18	729	689	579
19	670	631	537
20	580	544	471
21	590	553	478
22	667	628	535
23	670	631	537
25	578	542	470
25	710	671	566