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

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-ENERGÉTICA DA MADEIRA E PRODUTIVIDADE DE REFLORESTAMENTOS DE CLONES DE HÍBRIDOS DE *Eucalyptus grandis x E. urophylla*

VLADIMIR ELIODORO COSTA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2006

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

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-ENERGÉTICA DA MADEIRA E PRODUTIVIDADE DE REFLORESTAMENTOS DE CLONES DE HÍBRIDOS DE *Eucalyptus grandis x E. urophylla*

VLADIMIR ELIODORO COSTA

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Rezende

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2006

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

Costa, Vladimir Eliodoro, 1976-
C837c Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* / Vladimir Eliodoro Costa. – Botucatu : [s.n.], 2006.
xiii, 99 f. : il., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2006
Orientador: Marcos Antonio de Rezende
Inclui bibliografia

1. Eucalipto. 2. Madeira - Densidade. 3. Madeira. 4. Produtividade. 5. Raios gama. I. Rezende, Marcos Antonio de. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: **"CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-ENERGÉTICA DA MADEIRA E PRODUTIVIDADE DE REFLORESTAMENTOS DE CLONES DE HÍBRIDOS DE *Eucalyptus grandis x E. urophylla*"**

ALUNO: VLADIMIR ELIODORO COSTA

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCOS ANTONIO DE REZENDE

Aprovado pela Comissão Examinadora

PROF. DR. MARCOS ANTONIO DE REZENDE

PROF. DR. ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO

PROF. DR. ADRIANO WAGNER BALLARIN

PROFª DRª MARIANA FRAGA S. MUÇOUÇAH

PROF. DR. HELDER DE OLIVEIRA

Data da Realização: 17 de fevereiro de 2006

Ninguém nasce para ser nada
mas somos educados para ser tudo

Ninguém nasce acreditando
mas somos educados para tal

João Batista Costa

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador e colega Marcos A. de Rezende pela confiança, credibilidade e amizade demonstrada durante todo o desenvolvimento deste trabalho, e também ao amigo Edson M. Bruder que compartilhou todos os momentos no laboratório, e aos meus primeiros orientados Luciana F. Hokama e Plínio G. de Oliveira que ajudaram na execução deste trabalho.

A minha família Márcia, João, Osmarina, Tânia, Marilu, Juliano, Admilson, Rosana, Nilson (*in memória*), sobrinhos, primos, tios, etc... pelo apoio indulgente.

Aos colegas de república, trabalho, pós-graduação e de laboratório: Marcelo, Rodrigo (Flato), Geovana (Bauxita) Paulo Godoy, Jaime, Helen, Anderson (Cabeça), Otávio, Zé Luiz, Mariana, Luciana, Cilene, Roberto, Paulo, Murilo, Fontes, Ivan, Rogério, Adnilson (Macatuba), Aroni, Renan, Felipe, Serena, Pitoco, Mateus, Alexandre, Silvia, etc... que conviveram comigo durante todo ou quase todo desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Adriano W. Ballarin e Cláudio A. Sansigolo que me ensinaram muito sobre madeira e também pelas observações e sugestões feita no trabalho. Ao professor Roberto Naves Domingos que me orientou durante e depois do mestrado me ajudando a traçar um caminho a seguir.

A empresa Duratex S/A., em especial aos Engenheiros Raul Chaves e Alex P. dos Santos que além de fornecerem a matéria-prima deste trabalho deram importantes sugestões para sua execução.

A empresa Veracel Celulose S/A., em especial aos Engenheiros Marcelo Costa e Cláudio Ferreira que também forneceram matéria-prima utilizada no trabalho.

A Marilena do C. Santos, Marlene R. de Freitas e Jaqueline de M. Gonçalves que, de maneira muito eficiente, me auxiliou e orientou em todo o processo burocrático da Pós-Graduação.

Aos meus colegas professores, aos funcionários e aos alunos (curso de Biotecnologia) da UNESP de Assis onde trabalhei durante os dois primeiros anos de doutorado. Aos meus alunos (curso de Matemática, Física e Química) das Faculdades

Integradas Regionais de Avaré e aos meus alunos (curso de Física Médica, Engenharia Florestal e Biologia) da UNESP de Botucatu onde trabalho atualmente.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE TABELAS VII
LISTA DE FIGURAS IX
1 RESUMO 01
2 SUMMARY 03
3 INTRODUÇÃO 05
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 08
4.1 Variações dimensionais da madeira 08
4.2 Densidades da madeira 09
4.3 Variações da densidade da madeira 11
4.4 Métodos de determinação da densidade da madeira 13
4.5 Características físicas da madeira 17
4.6 Produtividade e energia da madeira 19
5 MATERIAL E MÉTODOS 21
5.1 Determinação das variações dimensionais da madeira de *Eucalyptus grandis* 21
5.1.1 Material 21
5.1.2 Determinação da retratibilidade em função da densidade e umidade 22
5.2 Determinação das relações das densidades a 0 %, a 12 %, básica e úmida 25
5.3 Caracterização física da madeira 27
5.3.1 Material 27
5.3.2 Determinação da densidade pontual dos discos pela TARG 28
5.3.3 Cálculo da densidade média dos discos a partir da densidade pontual 33
5.3.4 Determinação da densidade da madeira pelos métodos: direto e imersão 35
5.3.5 Cálculo da densidade média da árvore 36
5.3.6 Determinação da retratibilidade e porosidade da madeira 37
5.4 Determinação da produtividade do reflorestamento de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* 38
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 41

6.1 Variações dimensionais da madeira de *Eucalyptus grandis*..... 41
6.2 Equações de transformação da densidade 51
6.3 Variações da densidade pontual e ponderada dos discos de madeira de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*..... 54
6.4 Comparação entre métodos de determinação da densidade da madeira..... 63
6.5 Comportamento das características físicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*..... 69
6.6 Comparação da produtividade da madeira de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* 85
7 CONCLUSÕES..... 91
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93

LISTA DE TABELAS

Tabela Página

1 Grupos de amostra para apresentação dos resultados da retratibilidade linear e volumétrica 43

2 Valores das constantes R_{max} e k obtidos experimentalmente para a equação exponencial $R=R_{max}\ exp(-kU_{bs})$ da curva da retratibilidade percentual com a umidade na amostra de madeira da espécie *Eucalyptus grandis* e seu coeficiente de determinação R^2 48

3 Valores das constantes R_{vmax}, α e α/R_{vmax} da equação da reta, do tipo ($R_v = R_{vmax} - \alpha U_{bs}$) e os coeficientes de correlação R, obtidas experimentalmente pela regressão linear da retratibilidade volumétrica em função da umidade das amostras dos grupos 1, 2, 3, 4 e 5 49

4 Valores da retratibilidade volumétrica máxima percentual e das densidades determinadas e calculadas das amostras do ensaio da retratibilidade de *Eucalyptus grandis* 53

5 Comparação encontrada entre as vantagens, desvantagens e possíveis fontes de erros na determinação da densidade de discos de madeira pela técnica de atenuação da radiação gama (TARG), método direto (M. Direto) e método de imersão (M. Imersão) 63

6 Valores das densidades determinadas úmidas e básicas obtidas pelos métodos Direto, Imersão e Técnica de Atenuação da Radiação Gama (TARG) para os seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla* 65

7 Valores das densidades calculadas pelas equações deste trabalho (Costa) e pelas equações de Rezende (1997) para os tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla* 67

8 Médias das densidades a 12 % dos discos na posição relativa da árvore de cada tratamento e a densidade a 12 % média ponderada de cada tratamento: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla* 70

9 Percentual médio de casca (θ) nas árvores e suas densidades básicas com (ρ_{bcc}) e sem casca (ρ_{bsc}) para os seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla* 86

10 Incrementos médios anuais de volume, de massa e de energia com e sem casca dos seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla* 87

LISTA DE FIGURAS

Figura Página

1 Localização das amostras de retratibilidade 1 e 2 no disco a 0 % de *AC* na árvore 22
2 Fotografia do Sistema de Atenuação da Radiação Gama (TARG) de ^{241}Am 30
3 Esquema de detecção da radiação gama por cintilação sólida por uma válvula fotomultiplicadora com NaI (Tl) com 4 dinodos 31
4 Representação das cascas cilíndricas delgadas concêntricas justapostas em uma amostra de conífera em fora de disco 33
5 Divisão das seções de um tronco de árvore e amostragem dos discos 36
6 Densidade a 0 % das amostras do ensaio da retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade 42
7 Retratibilidade volumétrica máxima das amostras do ensaio da retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade 42
8 Retratibilidade volumétrica máxima nas amostras do ensaio da retratibilidade divididas em cinco grupos 43
9 Retratibilidade em função da umidade para o grupo 1 de amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade 44
10 Retratibilidade em função da umidade para o grupo 2 de amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade 45
11 Retratibilidade em função da umidade para o grupo 3 de amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade 45
12 Retratibilidade em função da umidade para o grupo 4 de amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade 46
13 Retratibilidade em função da umidade para o grupo 5 de amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade 46

14 Retratibilidade volumétrica em função da umidade até 25 % das amostras dos grupos 1, 2, 3, 4 e 5 com as suas respectivas regressões lineares para amostras de *E. grandis* 49
15 Retratibilidade volumétrica máxima percentual em função da densidade básica para *Eucalyptus grandis* 50
16 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore seminal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **S11** 56
17 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C16**..... 57
18 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C26**..... 58
19 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H17**..... 59
20 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H29**..... 60
21 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H32**..... 61
22 Resultados das densidades úmidas da madeira de seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones

1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*, obtidas pelo Método Direto e pela Técnica de Atenuação da Radiação Gama 66

23 Resultados das densidades básica da madeira de seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*, obtidas pelo Método de Imersão e pela Técnica de Atenuação da Radiação Gama 66

24 Resultados das densidades básica e a 12 % calculadas a partir das equações de transformações de densidade proposta neste trabalho e proposta por Rezende (1997) e também da densidade básica obtida pelo método de imersão 68

25 Variação da densidade a 12 % ao longo da direção axial na altura da árvore e a densidade média do tratamento para os seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla* 70

26 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore seminal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **S11** 71

27 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C16** 72

28 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C26** 73

29 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H17** 74

30 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H29** 75

31 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H32** 76

32 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore seminal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **S11** 78

33 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C16**..... 79

34 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C26**..... 80

35 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H17**..... 81

36 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H29**..... 82

37 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H32**..... 83

38 Apresentação das densidades a 0 %, a 12 % e básica do lenho para os seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*..... 85

39 Produção percentual de casca na massa da árvore dos seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*..... 86

40 Incrementos médios anuais de volume verde (*IMAV*) com e sem casca dos tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*..... 87

41 Incrementos médios anuais de massa seca (*IMAM*) com e sem casca dos tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*..... 88

42 Incrementos médios anuais de energia (*IMAE*) com e sem casca dos tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*..... 88

43 Densidade básica da madeira com casca em função do incremento médio anual de volume com casca (*IMAVcc*) dos tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla* 89

44 médio anual de massa com casca (*IMAMcc*) em função do incremento médio anual de volume com casca (*IMAVcc*) dos tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*..... 90

1 RESUMO

A produtividade e qualidade de um reflorestamento agroflorestal são parâmetros de extrema importância no âmbito da produção industrial madeireira. Estes parâmetros vem sendo estudados com o desígnio de produzir madeira de crescimento rápido e alta qualidade. Este trabalho teve como objetivo estudar as características físicas da madeira de reflorestamento da espécie *Eucalyptus grandis* em seis diferentes tratamentos: um seminal e dois clones de *E. grandis*; três clones de híbridos de *E. grandis* e *E. urophylla*; estudando sua produtividade quando plantados em mesmas condições de cultivo e enfatizando os aspectos metodológicos para a determinação de parâmetros qualitativos e quantitativos da madeira do reflorestamento. Foram estudadas as variações dimensionais em função da umidade em diferentes densidades da madeira por meio da retratibilidade, obtendo relações matemáticas de transformação das diferentes densidades da madeira. Foi aplicada a técnica de atenuação da radiação gama do ^{241}Am para determinação da densidade pontual e média, utilizando apenas quatro discos por árvore e nove árvores por tratamento. Determinou-se também o poder calorífico e a porcentagem de casca e obtiveram-se os incrementos médios anuais de volume, de massa e de energia para cada tratamento. Os clones e o seminal apresentaram menor densidade, menor variação da densidade na direção radial e diferente comportamento da densidade na direção axial do que os híbridos. Os incrementos médios anuais de volume, de massa e de energia foram maiores para os híbridos. Concluiu-se que a produtividade dos clones em comparação ao seminal não foi muito significativa, enquanto que as produtividades

dos clones híbridos foram bem superiores do que os outros tratamentos. Foi possível concluir de forma clara que a clonagem de híbridos das espécies *E. grandis* e *E. urophylla* pode ser uma alternativa viável para a obtenção de madeira de rápido crescimento, alta densidade e boa produtividade no centro-oeste do Estado de São Paulo.

Palavras-chave: densidade, madeira, produtividade, eucalyptus, radiação gama

PHISICAL-POWER CARACTERIZACION OF WOOD AND PRODUCTIVITY OF REFORESTAION OF CLONES OF HYBRIDS OF (EUCALYPTUS GRANDIS) X (E. UROPHYLLA). Botucatu, 2005. 00p. Tese (Doutorado em Agronomia (Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: VLADIMIR ELIODORO COSTA

Adviser: MARCOS ANTONIO DE REZENDE

2 SUMMARY

The productivity and quality of an agroflorestal reforestation are parameters of extreme importance in the scope of the lumber industrial production. These parameters have being studied with the design to produce wood of high growth and fast and quality. This work had as objective to study the physical characteristics of the wood of reforestation of the *Eucalyptus grandis* species in six different treatments: one seminal and two clones of *Eucalyptus grandis*; three clones of hybrids of *E. grandis* and *E. urophylla*, studying its planted productivity when in same conditions of culture and emphasizing the methodology aspects for the determination of qualitative and quantitative parameters of the wood of the reforestation. The dimensional variations in function of the humidity in different densities of the wood by means of the retratibilidade had been studied, getting mathematical relations of transformation of the different densities of the wood. The gamma-ray attenuation technique of the ^{241}Am was applied it for determination of the prompt and average density, using only four disc for tree and nine trees for treatment. It was also determined the calorific power and the percentage of rind and had gotten the annual average increments of volume, mass and energy for each treatment. Clones and the seminal one had presented minor density, minor variation of the density in the radial direction and different behavior of the density in the axial direction of that the hybrids. The annual average increments of volume, mass and energy had been bigger for the hybrids. It was concluded that the productivity of clones in comparison to the seminal one was not very significant, while that the hybrid productivity of

clones had been well superior of that the other treatments. It was possible to conclude of clear form that the clonagem of hybrids of the species *E. grandis* and *E. urophylla* can be a viable alternative for the wooden attainment of fast growth, high density and good productivity in the center-west of the State of São Paulo.

Key-words: density, wood, productivity, eucalyptus, ray-gama.

3 INTRODUÇÃO

O Brasil possui a maior floresta tropical do planeta, produz madeira, principalmente do gênero *Eucalyptus,* como nenhum outro país e reúne inúmeras espécies vegetais. Mesmo assim, face ao consumo crescente de madeira, principalmente das espécies de reflorestamento, sua oferta de matéria-prima pode estar comprometida se não houver uma política correta para novos plantios e para a produção sustentável.

A silvicultura é um setor muito promissor, devido o aumento da demanda nos últimos anos ser muito maior do que a oferta. Não apenas as grandes empresas de reflorestamento, como também o pequeno produtor, têm saldos positivos com o plantio de florestas. Para o pequeno produtor a silvicultura representa uma poupança verde, porque ao contrário da produção agrícola, não tem data certa para colheita e o que não for vendido, não será perdido. Além disso, as espécies florestais são mais resistentes às oscilações climáticas.

Outro aspecto importante na expansão da silvicultura é que, na falta de florestas comercialmente disponíveis, aumenta a devastação de florestas nativas. Não para a produção de papel e celulose ou chapas de fibra, que exige espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, mas para fabricação de móveis, cogeração de energia e na construção civil, sobre tudo.

Atualmente existe uma crescente preocupação com a determinação da qualidade da madeira, que está cada vez mais sendo utilizada na construção civil e na

confecção de móveis, principalmente devido a sua facilidade de adaptação climática, boa produtividade e capacidade de se produzir painéis e chapas de fibras.

Quando se deseja avaliar a qualidade de uma determinada madeira, deve-se conhecer primeiramente os valores médios de sua massa específica e também as variações desse parâmetro ao longo das direções radial e axial. Assim deve-se considerar também a importância da homogeneidade em termos de massa específica (REZENDE et al., 1998).

A determinação correta do valor médio da massa específica da madeira de uma árvore, que há alguns anos atrás se pensava ser relativamente simples, exige cuidados especiais sob o ponto de vista tecnológico principalmente com relação à amostragem (REZENDE, 1997). Além das variações da massa específica em relação a gênero, espécie, idade da árvore, produtividade, manejo florestal e posição pontual na árvore, existe também uma grande variação desse parâmetro com a umidade (VALE et al., 1995).

Segundo Jozsa e Middleton (1994 apud Palermo, 2003), a determinação da qualidade da madeira exige o conhecimento das características químicas, físicas e estruturais exigidas para produção de um determinado produto, que por sua vez irá atender a um fim específico. Por exemplo, quando se quer utilizar a madeira para produzir forro de teto e revestimento com painéis, as características visuais são as mais importantes. No entanto, para a produção de assoalhos, coberturas, escadas e esquadrias, além de boa aparência a madeira deve ter boa estabilidade dimensional.

Desta forma, propriedades como densidade, retratibilidade, poder calorífico, umidade, Incremento Médio Anual de Volume (*IMAV*), massa (*IMAM*), energia (*IMAE*) e outras servem para avaliar a produção e utilidade final específica da madeira.

Entre as propriedades da madeira, a massa específica ou a densidade, que apesar de serem grandezas distintas estão intimamente ligadas, são os índices mais utilizados na determinação da qualidade da madeira, pois correlacionam diretamente o rendimento em massa, a umidade e as propriedades físicas da madeira. Por esta razão este trabalho avaliou a densidade da madeira.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a produtividade da madeira de reflorestamento com seis diferentes tratamentos, sendo eles: um seminal e dois clones de *Eucalyptus grandis* e três clones de híbridos de *E. grandis* e *E. urophylla*, obtendo as características físicas e energéticas da madeira para avaliação qualitativa e propor contribuições para facilitar e otimizar o procedimento metodológico de caracterização física da madeira pela técnica de atenuação da radiação gama do ^{241}Am.

A execução deste trabalho foi realizada em etapas que permitiram o alcance do objetivo proposto. No total foram seis etapas divididas em três objetivos específicos: um metodológico com a primeira e a segunda etapa; outro de caracterização física da madeira com a terceira, quarta e quinta etapa; e o ultimo de produtividade dos tratamentos com a sexta etapa. As etapas foram planejadas de forma que a execução de uma etapa depende do resultado da etapa anterior, com exceção da primeira. As etapas ou objetivos específicos são mostrados a seguir.

Objetivos específicos metodológicos:

1- Estudar as variações dimensionais da madeira durante a perda de umidade por meio da retratibilidade e propor uma equação que relacione a retratibilidade volumétrica da madeira com a densidade básica e a umidade;
2- Relacionar a densidade básica, a densidade úmida e a umidade da madeira e deduzir equações que relacione as densidades da madeira.

Objetivos específicos da caracterização física da madeira:

3- Determinar a densidade pontual e ponderada dos discos de madeira por meio da Técnica de Atenuação da Radiação Gama do ^{241}Am;
4- Comparar métodos de determinação da densidade dos discos e minimizar erros e amostragem de discos da árvore para a determinação da densidade da árvore;
5- Estudar o comportamento das características físicas da madeira;

Objetivo específico da produtividade dos tratamentos:

6- Determinação da produtividade dos tratamentos estudados.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Variações dimensionais da madeira

A madeira possui inúmeras aplicações, dentre elas a utilização da madeira como matéria sólida para a fabricação de portas, moveis, etc... Muitas destas aplicações não suportam grandes variações dimensionais, estas variações ocasionam alterações na densidade da madeira, que por sua vez, alteram outras propriedades físicas. Por esses motivos é imprescindível o estudo das variações dimensionais da madeira para uma caracterização física completa.

A contração e a expansão higroscópica da madeira são dois dos mais importantes problemas práticos que ocorrem durante a sua utilização, como conseqüência da variação do teor de umidade. A magnitude das variações dimensionais depende de inúmeros fatores, como o teor de umidade, a direção estrutural (radial, tangencial ou longitudinal), a posição na árvore, a densidade da madeira, a temperatura, o grau de estresse de secagem causada pelo gradiente de umidade dentre outros (OLIVEIRA; SILVA, 2003).

Rezende (2003) estudou o comportamento da retratibilidade volumétrica em função da umidade para as espécies *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* e concluiu que os dois comportamentos obedecem a uma função exponencial dependente da retratibilidade volumétrica máxima e da umidade. Concluiu também que as retratibilidades máximas podem ser consideradas exclusivamente dependentes da densidade básica ou da densidade a 0 % de umidade independente da espécie.

A retratibilidade é uma propriedade física de grande importância, principalmente para se avaliar o potencial de utilização para a indústria madeireira. De acordo

com Cruz et al. (2003), as contrações volumétricas, radial e tangencial em *Eucalyptus sp.* estão correlacionadas com a densidade básica da madeira.

4.2. Densidade da madeira

Souza et al. (1986) mostram a existência de uma relação direta entre a densidade e várias áreas da ciência florestal. Na tecnologia está ligada às características do produto final como rendimento em celulose, rendimento em massa, resistências físico-mecânicas e produção de carvão vegetal. No melhoramento florestal evidencia o potencial de seleção das espécies. No manejo determina o tipo de prática a ser aplicada em função do produto final e no inventário florestal está ligada à produtividade da floresta em termos de quantidade de madeira seca por hectare.

Com relação à terminologia utilizada para a densidade da madeira existem discordâncias entre autores, os termos massa específica e densidade representam a mesma característica física quando se trabalha com madeira.

Apesar dos termos densidade e massa específica serem usados alternadamente, eles apresentam definições diferentes Haygreen e Bowyer (1996) definem 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 água, isto é, massa verde e volume verde, massa seca e volume seco e massa a 12% e volume a 12% de água. Já a massa específica é a razão entre a densidade do material com a densidade da água e o resultado é adimensional. A massa específica é sempre calculada usando a massa seca em estufa e seu volume, a massa especifica 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.

Macedo (1976) e Aguiar (1980) definem densidade de um corpo como sendo a relação entre a sua massa específica e a massa específica da água pura. A massa específica de um corpo é a relação entre sua massa e seu volume. Para a água pura esta relação

é aproximadamente igual a 1,0 g/cm^3, permitindo concluir que os termos densidade e massa específica são idênticos em termos de valores numéricos, porém, diferentes dimensionalmente.

Do ponto de vista estritamente físico, Esalq (1984 apud Thiersch, 2002) considera que a densidade da madeira resulta da proporção de sólidos e dos espaços vazios. Os primeiros são representados pelas paredes das fibras e os outros elementos anatômicos, enquanto pelos segundos respondem lume, vasos, células do parênquima, pontuações, perfurações e outras aberturas naturais. Esta fração sólida é quimicamente representada pelos componentes fundamentais (celulose, lignina e hemiceluloses) e componentes acidentais (extrativos e outros).

Segundo Vital (1984), a madeira é um material poroso e o valor numérico da densidade depende da inclusão ou não do volume dos poros, portanto, as determinações de densidade da madeira podem ser feitas de duas formas distintas: na primeira forma, determina-se o volume de uma forma global, incluindo-se o volume dos poros e obtendo-se a densidade aparente. A densidade da madeira é geralmente expressa desta maneira. Na segunda forma, o volume da amostra é determinado sem a inclusão do volume dos poros, obtendo-se a densidade real ou densidade da parede celular, cujo valor médio é igual a 1,53 g/cm^3, independentemente da espécie (PANSHIN, 1982, citado por VITAL, 1984) e (FOELKEL et al., 1971).

Foelkel et al. (1971) relatam que dentre as várias maneiras de expressar a densidade aparente da madeira, uma das mais práticas é por meio da densidade básica, que é a relação entre a massa absolutamente seca da madeira, e o seu volume, quando completamente saturado de água.

A utilização da densidade básica, dentre outros fatores, é muito difundida por todo o mundo, visto que a madeira é uma substância higroscópica que, sob diferentes condições de umidade relativa e temperatura, adquire diferentes teores de água, levando a mesma amostra a diferentes massas e volumes. Assim em condições absolutamente secas, a madeira apresenta a sua massa real sem a água e no máximo teor de umidade, também denominado “saturado” apresenta o seu máximo volume. Acima do “ponto de saturação das fibras”, a água ocorre na forma livre, não contribuindo para a variação dimensional da madeira (VITAL, 1984).

Segundo Foelkel et al. (1992), a densidade básica, ao longo dos anos, firmou-se como o mais universal dos índices para expressar a qualidade da madeira. Porém, tal universalidade chegou a ultrapassar os limites do científico para, em muitas situações, se constituir em parâmetro de comparação entre não comparáveis, sendo que os principais erros são: a) uso da densidade básica no nível do *DAP* (Diâmetro a Altura do Peito), como densidade da árvore, para obter a massa seco do povoamento; b) dentro da mesma espécie, acreditar que os mesmos valores de densidade básica signifiquem a mesma coisa em termos de qualidade da madeira; c) comparações de espécies diferentes com base nos valores de densidade básica; d) comparações de gêneros diferentes. Estes mesmos autores afirmam que a densidade básica é um bom índice de qualidade desde que aplicado para uma mesma espécie de madeira, respeitando-se as diferenças existentes e evitando comparações amplas.

A densidade básica é característica importante para o melhoramento florestal, pois é passível de seleção por existir grande variação entre árvores. Apresenta alta herdabilidade, baixa interação genótipo x ambiente, é de fácil determinação e correlaciona positiva e fortemente a produção e a qualidade da madeira (BRASIL et al., 1980) e (ZOBEL; TALBERT, 1984).

Rezende et al. (1988), Rezende (1997) e Rezende et al. (1998) apresentaram duas equações de transformação das densidades, uma que relacionava a densidade básica com a densidade a 0 % de umidade e outra que relacionava a densidade a 0 % de umidade com a densidade aparente e a sua umidade entre 0 % e 25 % para obter densidades diferentes a partir da determinação de uma única densidade, concluiram que estas relações eram válidas para os gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*.

As equações experimentais de transformação são muito úteis na caracterização física da madeira porque a partir de apenas uma densidade podem-se determinar outras densidades úteis na caracterização física, desde que as equações forneçam precisão e facilitam o procedimento.

4.3 Variações da densidade da madeira

Quando se busca caracterizar a madeira para avaliar sua qualidade, além de obter as características físicas médias, é importante o conhecimento das suas

variações na madeira, estas podem elucidar algumas características peculiares ocultadas pelos valores médios.

A variação na densidade básica da madeira é devido a diferenças na estrutura e a presença de substâncias extrativas na madeira, sendo que, a estrutura é caracterizada pela quantidade proporcional de diferentes tipos de células, tais como fibras, traqueídeos, vasos, canais resiníferos, raios da madeira, e suas dimensões, especialmente a espessura das paredes celulares (KOLLMANN; COTÉ, 1968).

Panshin e Zeeuw (1970) sintetizaram os padrões de variação longitudinal, como segue: 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 desuniformemente.

Por sua vez, Brasil et al. (1977) trabalhando com *Eucalyptus propinqua* de cinco anos de idade, observou que a densidade tem um crescimento até um ponto de máximo próximo à metade da altura comercial da árvore, e depois decresce em direção à copa. Concluiu que a região de máxima densidade parece estar relacionada à formação de madeira de reação, pois nesse ponto as tensões atuantes resultantes da força do vento, são máximas.

Segundo Souza et al. (1986), a literatura mostra que não existe um modelo definido da variação da densidade básica da madeira no sentido base-topo da árvore, havendo, na verdade, informações contrastantes

Alzate et al. (2005) mostrou outro padrão de comportamento da densidade na direção longitudinal para a espécie híbrida de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, onde a densidade cresce no sentido base-topo.

Panshin e De Zeeuw (1970) destacam como principais modelos de variação radial (medula-casca): a) crescente da medula para a casca; b) decrescente nos primeiros anos e crescente nos anos subseqüentes; c) crescente no início, próximo à medula, permanecendo a seguir, relativamente constante, ou podendo decrescer nas porções mais próximas à casca; d) decrescente da medula para a casca.

Segundo ESALQ (1984a apud Thiersch, 2002), para a maioria das coníferas há uma alternância, mais ou menos definida de densidades altas e baixas em função

das diferentes características dos lenhos. Por sua vez, para o gênero *Eucalyptus* não se observa um padrão definido de variação medula-casca. Por não se divisar os limites entre os diferentes tipos de madeira, é bastante difícil se estabelecer qualquer correlação macroscópica entre as densidades do disco como um todo e as diferentes frações que o compõe no sentido radial. Ainda, segundo ESALQ (1984a apud Thiersch, 2002), independente destes fatos, na média, há tendência da densidade da madeira aumentar no sentido medula-casca.

Silva et al. (2004b) mostraram que a densidade da espécie *Eucalyptus grandis* cresce na direção radial no sentido medula-casca.

4.4. Métodos de determinação da densidade da madeira

A determinação da densidade básica da madeira é um dos principais ensaios tecnológicos realizados nas plantações comerciais do gênero *Eucalyptus,* sendo reconhecida como um dos mais importantes índices para análises econômicas da floresta, podendo, para fins práticos, determinar o uso final da madeira.

Os métodos usados para a obtenção de amostras para a determinação da densidade básica da madeira se dividem em métodos destrutivos e não-destrutivos. No método destrutivo para a retirada das amostras é necessária a derrubada das árvores, seja para retirada de discos ou para retirada de cavacos. Por sua vez, no método não destrutivo apenas pequenas inserções e, ou, pequenas quantidades de amostras são retiradas da árvore sem a necessidade de abate das mesmas.

Como exemplo de método não-destrutivo para a determinação da densidade da madeira, tem-se o método de impacto utilizando o Pilodyn descrito por (THIERSCH, 2002).

Amaral et al. (1977) utilizaram um método não-destrutivo com auxílio da sonda Pressler em amostras ao *DAP* e constataram diferenças significantes no valor da densidade média quando comparada com a amostragem destrutiva utilizando um disco na mesma posição.

O método destrutivo pode ser:

a) **método de imersão**:

Este método baseia-se no princípio de Arquimedes, em que a perda aparente de peso de um corpo imerso em líquido é igual a massa do líquido deslocado. Este

método é considerado um dos mais precisos e pode ser usado para amostras com formato irregular, sendo o volume determinado pela variação de peso do líquido, em virtude da imersão da amostra de madeira.

b) **método do máximo teor de umidade**:

Neste método a densidade básica é determinada sem a determinação do volume da amostra, através da relação existente entre a densidade e o máximo teor de umidade da madeira (FOELKEL et al., 1971).

c) **método de medição direta do volume**:

É empregado em amostras com forma cúbica bem definida, nas quais é possível determinar o volume através de medições diretas, sendo normalmente utilizado o paquímetro para efetuar as medições.

d) **método da flutuação**:

É uma forma empírica, porém rápida de determinação da densidade básica. Consiste em submergir uma amostra de secção uniforme em água e em seguida determinar a densidade a partir da divisão do comprimento da parte submersa pelo comprimento total da amostra. Este método só pode ser aplicado em madeiras com densidade básica máxima de 1,0 g/cm^3 (THIERSCH, 2002).

e) **método de raios-x**:

A densitometria de raios-x é um método de avaliação da massa específica da madeira a partir de filmes radiográficos de amostras finas, obtidas de baguetas ou de discos do tronco de árvores. A densidade ótica do filme é obtida em um microdensitômetro e depois transformada em massa específica da madeira, sendo representada na forma de gráfico segundo (KAENNEL; SCHWEINGRUBER, 1995).

Os raios-x foram aplicados inicialmente na medicina e a sua utilização em madeiras apresenta registros do início do século XX, quando foram publicados resultados de raios-x da madeira de hélices de avião, conforme Renton et al. (1974 apud LISI, 2000). A densitometria de raios-x na madeira teve grande avanço a partir dos trabalhos realizados na França por POLGE (1963, 1964, 1965, 1978 apud LISI, 2000).

No Canadá, Parker e Kennedy (1973 apud Lisi, 2000) apresentaram uma extensa revisão sobre a densitometria de raios-x, detalhando as suas aplicações práticas. Dentre estas salientaram as áreas de silvicultura (avaliação das práticas silviculturais como

desbaste, fertilização, qualidade da madeira, produção de biomassa), na área de climatologia (avaliação de climas passados, anomalias climáticas, etc.), tecnologia de madeira e de produtos florestais (medições e avaliações da qualidade dos produtos florestais), dendrocronologia (datação e contagem dos anéis de crescimento, etc.), geologia (datação de eventos geológicos passados, como erupção vulcânicas, terremotos, movimento de dunas, formação de terraços de rios, etc.).

Schweingruber (1988) apresentou os conceitos básicos da metodologia de densitometria de raios-x com todos os procedimentos de preparo de amostras, exposição ao raios-x e determinação da massa específica da madeira. Apresentou ainda os principais equipamentos como os de preparo das amostras de madeira, equipamentos de raios-x, microdensitômetro, além das técnicas de calibração e aplicações.

No Brasil a densitometria de raios-x têm sido utilizada no Laboratório de Anéis de Crescimento, Anatomia e Identificação de Madeiras do Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP, em Piracicaba. Os princípios básicos da metodologia de densitometria são apresentados juntamente com a aplicação na análise da madeira juvenil e adulta e da massa específica dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* L.

Palermo et al. (2002) analisaram vários métodos e técnicas de diagnose de identificação de anéis de crescimento de árvores tropicais e concluiu que para a obtenção de informações detalhadas sobre a qualidade da madeira ao longo da amostra, ou seja, obtenções de medidas pontuais ou milimétricas, os métodos nucleares de densitometria de raios-x e raio gama são mais indicados.

f) **método de atenuação da radiação gama do ^{241}Am**:

Dentre os métodos utilizados para determinação da densidade da madeira, pode-se destacar o método nuclear que utiliza feixe de radiação gama, partícula beta ou raios-x. Quando se quer apenas obter o valor médio da densidade da amostra, os métodos tradicionais mais simples são utilizados até com certa vantagem em relação aos métodos nucleares. Porém, quando se deseja maiores informações ao longo da amostra, ou seja, medidas pontuais ou milimétricas da densidade faz-se necessário o uso de métodos nucleares (REZENDE et al., 1999).

Os métodos de determinação da densidade da madeira, pelo uso de raios-x ou partículas beta, apesar de apresentarem boa precisão, tem sua aplicação limitadas

pela espessura da amostra. Para que haja sensibilidade nas determinações, a espessura média das amostras não deve exceder a 1,0 cm para raios-x e 2,0 cm para partículas beta do ^{90}Sr.

Em várias situações é necessário trabalhar com amostras mais espessas. Nestes casos, o uso da radiação gama tem-se mostrado adequado, permitindo trabalhar com amostra variando de 1,0 a 40,0 cm de espessura (FERRAZ, 1976). Segundo o mesmo autor, os isótopos radioativos podem ser utilizados para várias finalidades. Através da radiação gama do ^{137}Cs vários pesquisadores conseguiram localizar pontos de podridão interna em árvores em pé, defeitos internos, além da determinação da densidade, umidade e qualidade da madeira.

De acordo com Ferraz e Aguiar (1985), os primeiros estudos da densidade e umidade da madeira através do uso da técnica de radiação gama foram recomendados por muitos investigadores nos anos 1950 e depois exposto por (LOSS, 1961 apud FERRAZ, 1976). Posteriormente, Parrish (1961 apud Ferraz, 1976) aperfeiçoou o método com o uso de energia da radiação gama. Os trabalhos mais importantes da época foram os de Loss, Phillips e Woods (1965 apud Ferraz; Aguiar, 1985). No Brasil, a técnica foi introduzida na década de 70 e entre os trabalhos desenvolvidos destaca-se o de (FERRAZ, 1976).

Segundo o mesmo autor a maioria dos autores citados anteriormente, usaram como fonte de radiação gama o ^{137}Cs, com um fotopico de 662 KeV e que devido a baixa densidade do material (madeira) e os baixos valores de seus coeficientes de atenuação de massa, a interação de fótons desta faixa de energia não proporcionaram boa sensibilidade, até mesmo em grandes amostras. Em muitos casos, foram exigidas amostras ao redor de 50 cm de espessura para se ter boa interação entre a radiação e a madeira.

Parrish (1961 apud Ferraz, 1976), estudando tal limitação, testou vários radioisótopos com radiação gama de energias diferentes e recomendou aqueles cujas energias variam de 23 KeV a 135 KeV.

Ferraz (1974), ao estudar a determinação simultânea de densidade e umidade do solo, trabalhou com fontes de ^{241}Am, cuja energia que é de 60 KeV e percebeu as vantagens de sua utilização na determinação da densidade de madeiras. Em 1976 introduziu a técnica de atenuação da radiação gama por ^{241}Am para mensurar o fluxo de água na madeira

devido sua boa sensibilidade, simplicidade e indestrutibilidade. Rezende (1984), no estudo da biomassa de *Eucalyptus grandis,* faz uma descrição da técnica.

São vários os trabalhos que empregam a técnica da atenuação da radiação gama nos estudos dos perfis radiais de densidade, na identificação dos anéis de crescimento, na determinação de incrementos anuais de massa e volume, dentre outros.

Karsulovic et al. (1999) utilizaram a técnica de atenuação da radiação gama do ^{241}Am para identificação e localização de nós na madeira da espécie *Pinus radiata*.

Rezende et al. (1999) destacaram que a análise dos anéis de crescimento de *Pinus oocarpa* auxiliado pela técnica de atenuação da radiação gama de ^{241}Am, mostrou-se prática e vantajosa em relação às variações da massa específica em função da idade. O uso da técnica foi muito utilizada nos estudos de densidade anual da madeira de *Eucalyptus grandis,* de retratibilidade volumétrica, de densidade aparente de *Pinus sp*. e *Eucalyptus sp*. e de variação da massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* aos 8 anos de idade em função de diferentes níveis de produtividade.

Coutinho e Ferraz (1988) empregando a técnica de atenuação da radiação gama do ^{241}Am na determinação da densidade do carvão vegetal conclui que, devido às amostras de carvão vegetal apresentarem irregularidades superficiais e volumétricas ocasionadas por rachaduras provenientes do colapso sofrido nos processos de perda de água, aliados a grandes espaços vazios, a mesma não pode fornecer resultados confiáveis, porém, a técnica apresentou uma série de vantagens em relação aos métodos gravimétricos.

Aguiar (1980), utilizou o método de atenuação da radiação gama do ^{241}Am, na determinação de gradientes de umidade na madeira.

4.5. Características físicas da madeira

Considerando a física uma ciência, a física da madeira é a ciência que estuda a matéria lenhosa e suas interações com o meio. As características físicas macroscópicas que podem definir o grau das interações da matéria lenhosa com o meio são: a porosidade, que define a porcentagem de vazio dentro do volume aparente; a retratibilidade, que define a variação volumétrica aparente quando alterada a umidade do meio; a densidade real da substância madeira, que define a razão da massa pelo volume real e a densidade aparente, que quantifica a matéria lenhosa por unidade de volume aparente.

A revisão bibliográfica permite concluir que a densidade real da substância madeira não apresenta diferenças significativas, entre espécies de madeira, portanto foi objetivada a sua determinação neste trabalho.

Palermo (2003), assim como outros autores destacam três tipos de variação na estrutura da madeira que influenciam na qualidade. A primeira é a variação existente entre espécie, gênero e famílias, a segunda é a variação observada dentro da mesma espécie entre indivíduos e a terceira é a variação encontrada em árvores velhas na direção base-topo e medula-casca. As dimensões, proporção e arranjo de vários tipos de formas de células da madeira são responsáveis pela variação entre espécies e dentro da espécie e determinam a qualidade da madeira. Entre as espécies, embora o modelo geral seja similar e característico, existe apreciável variação entre árvores devido às diferenças na hereditariedade da constituição das características celulares e também nas condições ambientais do local e manejo que influenciam na dimensão de células, na proporção e no arranjo de alguns tipos de elementos e tecidos.

Tanto as propriedades físicas quanto as propriedades mecânicas apresentam maiores variações na direção da medula para a casca do que na direção da base para o topo das árvores, mostrando a importância do conhecimento das variações radiais na tora, para a classificação de madeira serrada e conseqüente homogeneização de lotes segundo (CRUZ et al., 2003).

Rezende e Ferraz (1985) concluíram que a análise anual da densidade é um aspecto importante do ponto de vista econômico, tanto para aquisição de madeira como também para auxiliar na determinação de rotação ideal da floresta.

Shimoyama e Barrichelo (1989) apontaram que a grande importância para o melhoramento da madeira é conhecer as correlações entre as características a serem melhoradas e as demais características da árvore, como por exemplo, a densidade básica que define a massa seca pelo volume verde e as características de crescimento.

Devido à característica anisotrópica, as mudanças dimensionais observadas na madeira são diferentes ao longo das três direções estruturais. Em geral, a contração na direção tangencial é, aproximadamente, duas vezes maior do que na direção radial; a razão entre a contração tangencial e radial (relação T/R), comumente chamada de fator de anisotropia, varia de 1,5 a 2,5 (OLIVEIRA; SILVA, 2003).

A porosidade é uma característica física muito importante na análise de parâmetros silviculturais, principalmente ao ataque de fungos e cupim. Segundo Silva et al. (2004a) a espécie *Eucalyptus grandis,* independentemente da idade, mostrou-se altamente suscetível ao ataque por *Cryptotermes brevis*, apresentando resultados bastante semelhantes aos encontrados na madeira de *Pinus elliottii.*

4.6 Produtividade e enrgia da madeira

Bacha e Barros (2004) alertam que o estoque total de área reflorestada no Brasil diminuiu de 1995 a 2000, após ter aumentado de 1970 a 1995. Conforme os mesmos autores, no período de 1998 a 2001 houve aumento da área anualmente reflorestada. A perspectiva é que essa área atinja 220 a 230 mil hectares por ano no período de 2003 a 2010, este crescimento deverá ser comandado pelas empresas de papel e celulose, as quais ampliará o seu poder de mercado na oferta de madeira de reflorestamento.

Segundo Haselein et al. (2004) o Brasil detém a maior área de floresta plantada de eucalipto do planeta, cerca de 2,97 milhões de hectares, e recebe os méritos de ser um dos líderes mundiais no desenvolvimento científico do gênero *Eucalyptus*. Destaca-se dentre as espécies o *E. grandis* como uma das mais plantadas no Brasil e no mundo, é considerada uma das espécies de madeira mais versáteis e indicadas para uso múltiplo.

A evolução do melhoramento genético do eucalipto é indiscutível. Porém, seus primórdios baseiam-se nos fatores dendrométricos para maior produção de madeira por hectare de floresta plantada e no fator massa específica básica para homogeneização da qualidade na indústria de celulose e papel e na indústria energética de (HASELEIN et al., 2004).

Para fins energéticos, o poder calorífico da madeira é a característica mais utilizada na avaliação. O poder calorífico de um combustível é definido como o calor desprendido na combustão completa na unidade de massa ou volume de combustível. Em geral é expresso em kcal/kg ou cal/g no caso dos combustíveis sólidos e líquidos, já no caso de combustíveis gasosos é expresso em kcal/m^3. Este tipo de unidade usada para combustíveis gasosos também é aplicada para combustíveis sólidos e líquidos (LIMA; REZENDE, 2003).

Rezende e Ferraz (1986) destacam a importância de se determinar os incrementos médios anuais de volume e massa para estimar a produtividade de um reflorestamento. Destacam também a importância dos incrementos correntes anuais de massa e volume para a determinação da idade ideal de corte para um reflorestamento de *Eucalyptus grandis*.

Andrade e Carvalho (1998) afirmam que o conhecimento de alguns aspectos físicos da madeira como, por exemplo, a sua densidade básica, é fundamental para a avaliação das suas qualidades para a produção de insumos energéticos, sobretudo de carvão vegetal.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Todo o ensaio experimental deste trabalho 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

5.1 Determinação das variações dimensionais da madeira de *Eucalyptus grandis*

5.1.1 Material

Neste ensaio foram utilizadas quinze árvores clonais de *E. grandis* de nove anos de idade cultivadas na Fazenda Brasilândia no município de Eunápolis-BA pertencente à Empresa Veracel Celulose S/A. A seleção das quinze árvores foi realizada, buscando a representatividade média do tratamento com relação a altura comercial (*AC*) e o Diâmetro a Altura do Peito (*DAP*). A altura comercial é até o diâmetro de 4,0 cm com casca e o *DAP* é a aproximadamente 1,3 m de altura a partir da base.

As árvores cedidas pela Empresa foram derrubadas e depois retirados dois discos de cada árvore com 6,0 cm de espessura cada. Os discos estavam dispostos ao longo do fuste da árvore e localizados a 0 % e a 25 % da *AC* (altura comercial). Depois de cortados os discos foram hermeticamente embalados com plásticos e colocados em duas caixas térmicas de 250 L com gelo seco para não perder umidade. Depois foram enviados por meio de uma transportadora para o Laboratório de Física Aplicada do Departamento de Física e Biofísica do Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista no campus de Botucatu-SP.

5.1.2 Determinação da retratibilidade em função da densidade e umidade

Com os discos ainda úmidos foram retiradas três amostras em forma paralelepípedica de cada árvore, sendo duas no disco a 0 % de *AC*, uma próxima à medula (localização "1") e outra próxima da casca (localização "2") como mostra a figura 1, e a terceira foi retirada do disco a 25 % de *AC* (localização "3") no centro radial.

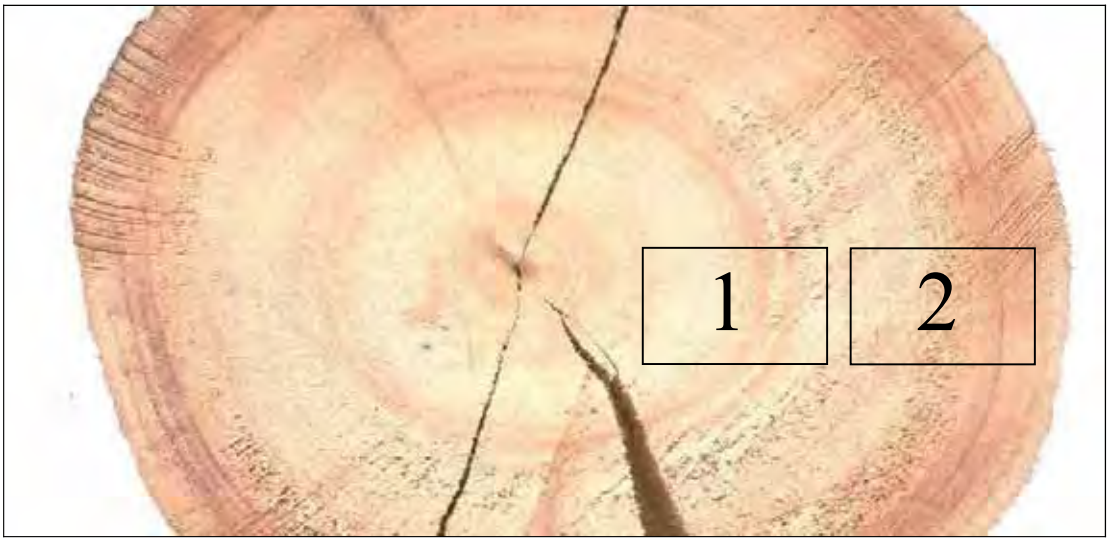


Figura 1 Localização das amostras de retratibilidade 1 e 2 no disco a 0 % de *AC* na árvore

As dimensões das amostras foram de 2,0 x 3,0 x 5,0 cm nas direções tangencial, radial e axial respectivamente segundo as normas da NBR 7190/97 (ABNT, 1997). A identificação das 45 amostras foi realizada com números inteiros crescente, sendo as três primeiras amostras da árvore 1 e as três últimas da árvore 15.

Com as amostras devidamente serradas e lixadas, elas foram colocadas submersas em água por um período de aproximadamente 20 dias, ou seja, até a sua massa permanecer constante, para a saturação completa. Depois foram retiradas da água e enxugadas com uma toalha de pano para retirar o excesso de água e colocadas sobre uma superfície vítrea em ambiente aberto para que ocorresse a secagem naturalmente. Durante todo o tempo de secagem natural foram monitoradas, as três dimensões e a massa de cada amostras, com intervalos de 24 horas até o décimo dia e depois com intervalo de 48 horas até sua massa

permanecer constante, ou seja, até as amostras entrarem em equilíbrio com a umidade ambiente e em condições laboratoriais.

A medição de cada uma das três dimensões das amostras foi obtida pela média das quatro medidas dos cantos da dimensão da amostra, utilizando um paquímetro digital da marca Mitutoyo com resolução de 0,01 mm e precisão de ± 0,005 mm. Para a medição das massas das amostras foi utilizada uma balança eletrônica de precisão da marca Gehara, modelo "BG 1000", com resolução de 0,01 g e precisão de ± 0,005 g.

Depois de verificada a estabilidade dimensional das amostras, elas foram colocadas em uma estufa inicialmente a 50 ºC, que iniciou o processo de aquecimento com um acréscimo de temperatura à taxa de 5 ºC/hora até o limite de 105 ºC. Durante o processo de secagem forçada foram realizadas medições com intervalos de 1 hora até verificada a estabilidade da massa, ou seja, até a secagem completa da amostra conforme (REZENDE, 2003).

A partir dos dados obtidos das amostras foi calculada, para cada medição, as retratibilidades lineares (R_l) percentual por meio da equação 1 nas direções tangencial, radial e axial e a retratibilidade volumétrica (R_v) percentual por meio da equação 2, estabelecidas pelas normas da NBR 7190/97 (ABNT, 1997). A retratibilidade volumétrica máxima (R_{vmax}) percentual da cada amostra foi determinada pela equação 3, onde V_0, em cm^3 é o volume da madeira seca ou volume seco.

$$R_l = \left(\frac{D_v - D_u}{D_v} \right) 100 \qquad (1)$$

$$R_v = \left(\frac{V_v - V_u}{V_v} \right) 100 \qquad (2)$$

$$R_{v\max} = \left(\frac{V_v - V_0}{V_v} \right) 100 \qquad (3)$$

Na equação 1 D_v e D_u em cm são as dimensões lineares, da amostra saturada e da amostra com teor de água desejado respectivamente, na equação 2 V_v e V_u em cm^3 são os volumes, da amostra saturada e da amostra com teor de água desejado respectivamente.

A umidade base seca (U_{bs}) percentual da madeira foi determinado pela equação 4, onde m_u e m_0, em g, são as massas da madeira úmida e seca respectivamente. Toda umidade mencionada neste trabalho será na base seca, sendo desnecessária a utilização do adjetivo base seca.

$$U_{bs} = \left(\frac{m_u - m_0}{m_0} \right) 100 \qquad (4)$$

Também foi determinada para cada amostra a densidade ρ_u em (g/cm^3) nos diferentes umidades da madeira pela equação 5. A densidade a 0 % em (g/cm^3) foi determinada para cada amostra pela equação 6 e também determinou-se a densidade básica em (g/cm^3) para cada amostra pela equação 7.

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \qquad (5)$$

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \qquad (6)$$

$$\rho_b = \frac{m_0}{V_v} \qquad (7)$$

Com os resultados da densidade a 0 % e da retratibilidade volumétrica máxima as amostras foram divididas em grupos de mesma densidade e retratibilidade. Depois foi construída, para cada grupo, uma figura gráfica da retratibilidade em função da umidade para mostrar seu comportamento nos diferentes grupos.

Para cada grupo foram determinadas quatro equações para o comportamento das retratibilidades volumétrica, tangencial, radial e axial em função da umidade. Segundo Rezende (1997, 2003) a equação empírica que melhor se ajustam nestes casos são funções exponenciais como mostra a equação 8 para qualquer retratibilidade, onde k é a constante empírica e R a retratibilidade percentual.

$$R = R_{\max} \exp\left(-kU_{bs}\right) \qquad (8)$$

Com o propósito de estudar as variações volumétricas da madeira quando em equilíbrio com a umidade ambiente para obter relações da densidade úmida com as densidades básica, 0 % e a 12 %, optou-se por enfatizar as variações de umidade entre 0 e 25 %, onde as variações da retratibilidade com a umidade são praticamente lineares como

apresentado por (REZENDE, 1997, 2003). Então foi obtida uma regressão linear para a retratibilidade volumétrica em função da umidade entre 0 e 25 % para cada grupo.

Como a retratibilidade é inversamente proporcional a umidade o coeficiente angular α da reta gerada pela regressão foi negativo e o intercepto da abscissa foi a retratibilidade máxima como mostra a equação 9.

$$R_v = R_{v\max} - \alpha U_{bs} \tag{9}$$

Sabendo que a retratibilidade diminui três pontos percentuais do seu valor máximo quando a umidade aumenta um ponto percentual (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968), o coeficiente angular α não poderia ser o mesmo para os diferentes grupos. Como a variação da retratibilidade dependia do valor máximo, foi obtida neste trabalho, uma razão constante (ψ) do coeficiente angular dividido pela retratibilidade máxima, transformando a equação 9 na equação 10.

$$R_v = R_{v\max}\left(1 - \psi U_{bs}\right) \tag{10}$$

Para a determinação da retratibilidade volumétrica máxima foi obtida regressão da retratibilidade volumétrica em função da densidade básica obtendo uma equação conforme a equação 11, onde *a* e *b* são as constantes da equação de regressão.

$$R_{v\max} = a + b\rho_b \tag{11}$$

Substituindo a equação 11 na equação 10 obtém-se a equação de que determina a retratibilidade volumétrica em função da densidade básica e da umidade como mostra a equação 12.

$$R_v = \left(a + b\rho_b\right)\left(1 - \psi U_{bs}\right) \tag{12}$$

5.2 Determinação das relações das densidades a 0 %, a 12 %, básica e úmida

Primeiro foi relacionada à densidade úmida com a densidade básica como mostra a equação 13.

$$\frac{\rho_u}{\rho_b} = \frac{m_u}{m_0}\frac{V_v}{V_u} \tag{13}$$

A partir da equação 4 foi obtida a razão das massas úmida e seca como mostra a equação 14.

$$\frac{m_u}{m_0} = \frac{100 + U_{bs}}{100} \tag{14}$$

A razão dos volumes verde e úmido foi obtida a partir da equação 2 como mostra e equação 15.

$$\frac{V_v}{V_u} = \frac{100}{100 - R_v} \tag{15}$$

Substituindo as equações 14 e 15 na equação 13 obtemos a equação 16.

$$\frac{\rho_u}{\rho_b} = \frac{100 + U_{bs}}{100 - R_v} \tag{16}$$

Substituindo a equação 12 na equação 16 e isolando ρ_b obtém-se a equação 17 que relaciona a densidade básica com a densidade úmida e a umidade, isolando ρ_u obtém-se a equação 18 que relaciona a densidade úmida com a densidade básica e a umidade.

$$\rho_b = \frac{(100 - a + a\psi U_{bs})\rho_u}{100 + U_{bs} + b\rho_u - b\psi U_{bs}\rho_u} \tag{17}$$

$$\rho_u = \frac{(100 + U_{bs})\rho_b}{100 - a + a\psi U_{bs} - b\rho_b + b\psi U_{bs}\rho_b} \tag{18}$$

Substituindo o valor de 12 na umidade U_{bs} da equação 18 a densidade úmida se transforma em densidade a 12 % como mostra a equação 19. Esta equação define a densidade a 12 % a partir da densidade básica.

$$\rho_{12} = \frac{112\rho_b}{100 - a + 12a\psi - b\rho_b + 12b\psi\rho_b} \tag{19}$$

Substituindo o valor de zero na umidade U_{bs} da equação 18 a densidade úmida se transforma em densidade 0 % como mostra a equação 20. Esta equação define a densidade a 0 % a partir da densidade básica.

$$\rho_0 = \frac{100\rho_b}{100 - a - b\rho_b} \tag{20}$$

Vale salientar que as equações 17, 18, 19 e 20 somente são indicadas para madeira com umidade menor que 25 %.

Para o teste das equações com suas constantes *a*, *b* e ψ pré determinadas foram usadas as densidades a 0 % das amostras do ensaio da retratibilidade para comparar com a densidade a 0 % calculada a partir da densidade básica também determinada.

5.3 Caracterização física da madeira

5.3.1 Material

As árvores utilizadas no ensaio foram plantadas na Fazenda Pitangueiras da Empresa Duratex S.A. no município de Botucatu - SP. No total foram cinqüenta e quatro árvores divididas em seis diferentes tratamentos com nove árvores, sendo eles: um seminal de *Eucalyptus grandis*; dois clones de *Eucalyptus grandis*; três clones de híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. De cada tratamento foram selecionadas visualmente nove árvores, buscando a representatividade média do povoamento com relação ao *DAP* e altura comercial e evitando as árvores da borda.

Todas as árvores utilizadas no ensaio foram retiradas de um mesmo talhão de 2280 árvores com aproximadamente 1,03 há, com espaçamento único de 3,0 x 1,5 m e idade de 6,16 anos. As árvores foram cultivadas proporcionando mesmas condições edáficas e climáticas em latossolo vermelho distrófico típico, a moderado, álico, textura argilosa, relevo ondulado. O talhão estava dividido em 152 blocos de 15 árvores de mesmo tratamento, no total existiam 19 tratamentos dentro deste talhão com 120 árvores por tratamento. Os blocos estavam distribuídos aleatoriamente dentro do talhão.

De todas as árvores derrubadas foram retiradas seis amostras em forma de disco com espessura de aproximadamente 5,0 cm. Um disco foi no *DAP*, outro na base e os outros quatros seguiram a distribuição percentual da altura comercial: 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 %, totalizando 324 discos. As amostras foram levadas para o Laboratório de Física Aplicada do Departamento de Física e Biofísica do Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista no campus de Botucatu-SP, onde foram realizados os ensaios.

Os discos foram identificados com quatro algarismos alfanuméricos, sendo os dois primeiros *S1*, *C1*, *C2*, *H1*, *H2* e *H3* correspondente ao tratamento, o número seguinte de *1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8* e *9* correspondente as noves repetições de árvore do tratamento e a última letra que variava de *a, b, c, d, e* e *f* correspondendo aos discos da base, *DAP*, 12,5

%, 37,5 %, 62,5 %, e 87,5 % respectivamente. Depois os discos foram submetidos ao processo de secagem natural mencionado anteriormente.

Após os discos adquirirem estabilidade na umidade, ou seja, equilíbrio com a umidade ambiente, então foram aplainadas e lixadas suas faces a fim de obter faces lisas e paralelas, e conseqüentemente, uniformidade da espessura x em (cm) que foi medida utilizando um paquímetro digital da marca Mitutoyo com resolução de 0,01 mm e precisão de ± 0,005 mm. Em seguida todos os discos foram descascados medindo a sua massa com e sem casca utilizando uma balança eletrônica de precisão da marca Gehara, modelo "BG 1000", com resolução de 0,01 g e precisão de ± 0,005 g

5.3.2 Determinação da densidade pontual dos discos pela TARG

A densidade pontual nos discos foi determinada ao longo de uma linha radial no disco com um equipamento desenvolvido no Laboratório de Física Aplicada que utiliza a Técnica de Atenuação da Radiação Gama (TARG).

A linha radial dos discos foi determinada a partir do raio médio e da presença de nós e rachaduras. O raio médio foi obtido a partir da circunferência do disco, medida com uma fita métrica flexível com resolução de 0,1 cm e precisão de 0,05 cm, depois dividiu a circunferência por 2π (6,284), obtendo assim o raio médio da amostra. Nas amostras que apresentaram rachaduras não foram medidos os espaços gerados na circunferência. Com a medida do raio médio, foi localizada e depois riscada na amostra, uma linha radial com essa distância que não possuía imperfeições, isto é, rachaduras e nós.

A TARG do ^{241}Am consiste em determinar a radiação gama atenuada que atravessa uma amostra de madeira, pela diferença da radiação da fonte e da radiação que atravessou a amostra, a partir da radiação atenuada, calcula-se a densidade que é proporcional a radiação atenuada da amostra naquele ponto. A densidade ρ, em g/cm^3, ponto a ponto na linha radial do disco foi calculada a partir da espessura x (cm), do coeficiente de atenuação de massa μ_m (cm^2/g) e da atenuação da radiação gama que atravessa a amostra naquele ponto conforme a equação 21 de Beer-Lambert, onde I_0 em cpm (contagens por minuto) é a radiação sem a amostra e I, em cpm, é a radiação com a amostra.

$$\rho = \frac{\ln I_0 - \ln I}{\mu_m x} \qquad (21)$$

Montagem do equipamento da TARG

Os componentes do equipamento que utiliza a TARG no ensaio não foi adquirido comercializado, ele foi desenvolvido e confeccionado no laboratório. Este sistema possui basicamente os seguintes componentes:

- Uma fonte de radiação gama selada e blindada com o radioisótopo ^{241}Am com meia vida de 474 anos, atividade de 200 mCi e fotopico de 59,6 keV com intensidade de emissão de 35,9 % (REZENDE et al., 1999);
- Um sistema de detecção por cintilação sólida com um cristal de iodeto de sódio com traços de tálio NaI (Tl) inserido em uma válvula fotomultiplicadora acoplada a uma fonte de alta tensão da marca GDM e ligada a um amplificador de sinal da marca GDM;
- Uma placa de conversão de sinal A/D (Analógico/Digital), instalada em um microcomputador para o fornecimento dos valores de I e I_0 por meio de um programa específico do sistema de detecção da marca GDM, que funciona na plataforma Windows®;
- Um aparato eletromecânico para a movimentação automática da amostra.

No equipamento a fonte é fixada de forma que o feixe seja emitido horizontalmente a aproximadamente 30,0 cm de altura da plataforma da mesa onde foi montado, o sistema de detecção foi fixado frontalmente ao feixe a 10,0 cm da saída da fonte e o aparato eletromecânico está montado entre a fonte e o sistema de detecção.

O aparato eletromecânico funciona de forma que a amostra, fixada em uma base horizontal, possa transladar horizontalmente e perpendicularmente ao feixe de radiação, movimentando-se sobre um parafuso com rosca sem fim que gira por meio de uma transmissão de polia-correia ligada a um motor elétrico de potência variável, permitindo o deslocamento da base com a amostra, através do feixe de radiação, em várias velocidades. A figura 2 apresenta uma foto do equipamento.



Figura 2 Fotografia do Sistema de Atenuação da Radiação Gama de ^{241}Am

A colimação do feixe de radiação emitida pela fonte é feita por uma fenda de 0,5 mm de largura por 6,0 mm de altura em um anteparo de chumbo fixado na saída da fonte. Após atravessar uma amostra o feixe colimado e contínuo é novamente colimado na entrada do detector que possui um anteparo de chumbo com uma fenda de mesmas dimensões.

Sistema de detecção do equipamento da TARG

A detecção por cintilação sólida acontece dentro de uma válvula fotomultiplicadora, quando a radiação gama atinge o cristal de NaI (Tl) ele absorve a radiação e emite luz. A luz é direcionada opticamente para um fotocatodo localizado após o cristal, que absorve a luz e emite elétrons. Os elétrons são acelerados para um dinodo, de forma côncava, e localizado após o fotocatodo, que possui um potencial elétrico mais baixo que o fotocatodo.

Quando os elétrons acelerados, pela diferença de potencial elétrico, atingem o dinodo eles arrancam elétrons da superfície do dinodo e são refletidos e novamente acelerados por diferença de potencial elétrico para outro dinodo, depois para outro dinodo e assim por diante até passar por dinodos e chegar no anodo. A fonte de alta tensão, na ordem de 900 V, alimenta o fotocatodo e os dinodos subseqüentes.

A colisão dos elétrons com a superfície dos dinodos produzem uma multiplicação dos elétrons conduzidos do fotocatodo até o anodo (coletor de elétrons),

aumentando assim a intensidade do pulso de corrente elétrica gerado pela radiação gama incidente no cristal de NaI (Tl). O pulso gerado na válvula fotomultiplicadora é amplificado, medido e depois convertido em digital no microcomputador. A figura 3 ilustra o funcionamento no interior da fotomultiplicadora.

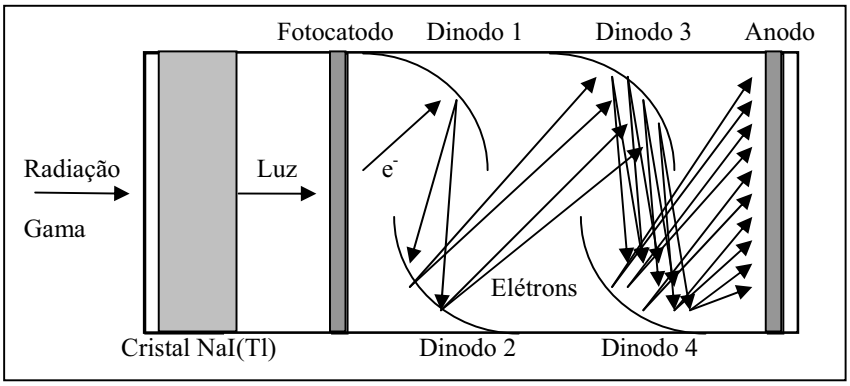


Figura 3 Esquema de detecção da radiação gama por cintilação sólida por uma válvula fotomultiplicadora com NaI (Tl) com 4 dinodos

Calibração do equipamento da TARG

O equipamento de detecção fornece um espectro da contagem de radiação versos os canais. Cada um dos 1024 canais do espectro detectam pulsos em diferentes intervalos de intensidades subseqüentes, a largura dos canais é igual à janela do discriminador que detecta apenas os pulsos neste intervalo (MONTANHEIRO et al., 1977).

Com o equipamento em funcionamento foi obtido um espectro de energia da fonte. Diminuindo a tensão na válvula fotomultiplicadora deslocamos o fotopico característico do ^{241}Am para os canais mais baixos do espectro, livres de interferências detectadas com a tensão mais alta. No amplificador foram cortados os ruídos de baixa intensidade, limitando a amplificação para canais mais altos que os ruídos e mais baixos que o fotopico, ficando nítido apenas o fotopico de 59,6 keV do ^{241}Am.

A partir do espectro foi definida uma janela de aproximadamente 10 canais que compreendia apenas o fotopico principal. Neste radioisótopo existem outros dois fotopicos de menor energia que podiam ser visualizados no espectro, mas não foram considerados na largura da janela. Depois de delimitada as janelas foram obtidas as I_0

praticamente estáveis de aproximadamente 40000 cpm, então o sistema foi programado para realizar medições a cada 7,0 s.

Procedimento de determinação da densidade pontual pela TARG

Primeiro foram colocadas duas hastes metálicas de 1,0 mm de diâmetro, uma em cada limite da linha radial, uma na medula e outra na casca, sendo ambas perpendiculares à linha radial. Depois a amostra foi encaixada com massa mole (massa de vedação de conexão hidráulica) na base móvel, certificando-se que a linha radial ficou exatamente na horizontal e perpendicular à propagação do feixe.

Depois o motor elétrico foi ajustado pelo potenciômetro para movimentar 1,0 mm a amostra a cada 20 s, a fim de obter uma média de três pontos por milímetro ao longo da linha radial da amostra. Também foi obtida a distância de 303 ± 3 mm da base do equipamento até a altura do feixe para centralização da amostra.

Enquanto eram realizados os ajustes o equipamento foi registrando a radiação de fundo *BG*, em cpm, no local, depois a amostra foi colocada na frente do feixe com a linha radial exatamente na altura do feixe e a aproximadamente 5,0 mm antes do inicio da linha no centro, com o objetivo de obter ponto antes da linha radial passando pelas hastes limitadoras para que posteriormente fosse confirmado o início da linha, também foram obtidos pontos após a passagem da amostra para a determinação de I_0. Este procedimento foi adotado para todos os discos.

A partir dos dados da radiação gama de cada amostra foi separado os valores de I_0 e I para cada amostra. As hastes densas proporcionavam contagens baixas, fáceis de serem observadas e imprescindível na separação de I.

Os I e I_0 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 ser menor que a quantia de eventos que alcançam o detector. A equação 22 mostra a correção do tempo morto dada por (STROOSNIDJER et al., 1974).

$$I_c = \frac{I}{1 - \tau I} \qquad (22)$$

Onde I_c é a radiação gama, em cpm, corrigida com a constante de tempo morto τ que vale 10^{-7} min. Aplicando as correções de tempo morto e subtraindo a radiação de fundo na equação 21, obtemos a equação 23 para a determinação da densidade pontual ao longo da direção radial divergente de uma amostra de madeira em forma de disco.

$$\rho = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{1-\tau I_0} - BG\right) - \ln\left(\frac{I}{1-\tau I} - BG\right)}{\mu_m . x} \qquad (23)$$

A densidade pontual foi obtida na umidade da amostra, determinado pela equação 4, depois transformada em densidade básica pela equação 17 e depois em densidade a 12 % pela equação 19. Os resultados estão apresentados no próximo capítulo em figura gráfica da distância radial em função da densidade a 12 % pontual.

5.3.3 Cálculo da densidade média dos discos a partir da densidade pontual

A densidade media dos discos ρ_m, em g/cm^3, foi calculada a partir da densidade pontual. Considerando que a velocidade em que a amostra atravessa o feixe de radiação gama é constante, e que o sistema de detecção faz sucessivas medidas no mesmo intervalo de tempo, então a distância entre um ponto e outro é sempre a mesma. Para o cálculo da densidade, a amostra foi considerada como sendo formada por várias cascas cilíndricas, delgadas e concêntricas com mesma espessura e justapostas uma dentro da outra, onde cada densidade pontual estaria no centro radial de cada uma das supostas cascas como mostra a figura 4.



Figura 4 Representação das cascas cilíndricas delgadas concêntricas justapostas em uma amostra de conífera em fora de disco

O cálculo da densidade média dos discos foi realizado ponderando cada anel a partir do centro da amostra, isto é, dividindo a soma das massas de cada anel pela soma dos volumes de cada anel, onde M_{ac}, em g, é a massa acumulada dos anéis concêntricos de massa m_i a partir do centro; V_{ac} (cm^3) é o volume acumulado dos anéis concêntricos de volume v_i a partir do centro; i é o enésimo anel concêntrico e n o número de anéis concêntricos como mostra a equação 24.

$$\rho_m = \frac{M_{ac}}{V_{ac}} = \frac{m_1 + m_2 + \cdots + m_i + \cdots + m_n}{v_1 + v_2 + \cdots + v_i + \cdots + v_n} = \frac{v_1\rho_1 + v_2\rho_2 + \cdots + v_n\rho_n}{v_1 + v_2 + \cdots + v_n} \qquad (24)$$

Como pode ser observado na equação 24, a massa pode ser representada pelo produto da multiplicação do volume pela a densidade, como mostra as equações 5, 6 e 7. Para determinar o volume de cada anel concêntrico foi necessário encontrar primeiro uma expressão para a sua área. Considerando a mesma distância radial r dos anéis e r_i os raios externos dos anéis, onde $r_1 = r$, $r_2 = 2r$, $r_3 = 3r$, etc... A área dos anéis A_i está representada na equação 25.

$$\begin{aligned}
A_1 &= r_1^2\pi = r^2\pi \\
A_2 &= r_2^2\pi - r_1^2\pi = 4r^2\pi - r^2\pi = 3r^2\pi \\
A_3 &= r_3^2\pi - r_2^2\pi = 9r^2\pi - 4r^2\pi = 5r^2\pi \\
A_4 &= r_4^2\pi - r_3^2\pi = 16r^2\pi - 9r^2\pi = 7r^2\pi \\
&\vdots \\
A_i &= r_i^2\pi - r_{i-1}^2\pi = (2i-1)r^2\pi
\end{aligned} \qquad (25)$$

Como a espessura x se mantém constante em toda distância radial, o V_{ac} pode ser representado pela equação 26, onde se utiliza a identidade matemática que diz que a somatória de uma série finita da seqüência dos números naturais ímpares, é igual à quantidade de números da série elevada ao quadrado.

$$V_{ac} = \sum_{i=1}^{n} v_i = r^2\pi x \sum_{i=1}^{n} (2i-1) = r^2\pi x n^2 \qquad (26)$$

Sabendo que a massa de um anel (m_i) é o volume (v_i) vezes a densidade (ρ_i), a M_{ac} pode ser representada pela equação 27.

$$M_{ac} = \sum_{i=1}^{n} v_i\rho_i = r^2\pi x \sum_{i=1}^{n} [(2i-1)\rho_i] \qquad (27)$$

Substituindo as equações 26 e 27 na equação 24 obtemos a expressão da densidade média ponderada do disco a partir da medula até a casca da amostra representada pela equação 28.

$$\rho_m = \frac{r^2\pi.x\sum_{i=1}^{n}(2i-1)\rho_i}{r^2\pi x n^2} = n^{-2}\sum_{i=1}^{n}(2i-1)\rho_i \qquad (28)$$

A densidade média ponderada do disco foi calculada na umidade da amostra obtida pela equação 4 e posteriormente transformada em densidade básica pela equação 17 e em densidade a 12 % pela equação 19. Os resultados estão apresentados no próximo capítulo em figura gráfica da distância radial em função das densidades básica e a 12 % ponderada.

5.3.4 Determinação da densidade da madeira pelos métodos: direto e imersão

Com o objetivo de comparar os métodos e os resultados das densidades dos discos obtidos pela TARG foram determinadas as densidades úmida e básica pelos métodos: direto e imersão.

O método direto é simples e rápido e consiste em realizar medidas diretas nos discos para determinar a sua densidade úmida pela equação 29, utilizando o raio médio, a espessura e a massa dos discos que já tinham sido determinados anteriormente.

$$\rho_u = \frac{m}{r^2\pi x} \qquad (29)$$

O método de imersão em água consiste em saturar a amostra com água até seu volume verde e depois determiná-lo através do empuxo. Neste experimento os discos ficaram mergulhados em água em um tanque de 1000 litros, após quatro semanas obteve-se o inchamento máximo, ou seja, seu maior volume. Estes discos, devidamente enxutos com uma toalha de pano para retirar a película de água formada na sua superfície, foram colocados separadamente em um recipiente com 3 litros de água e capacidade para 5 litros, sobre balança tarada antes da imersão da amostra, depois foi determinada a massa indicada na balança após a imersão da amostra, sem que ocorresse o contato das mesmas com o fundo ou as laterais do recipiente.

Nos discos que insistiam em boiar, mesmo depois de saturados, foi utilizada uma vareta fina de aço para mantê-los imersos no recipiente, devido a sua densidade ainda não ser maior do que a da água. Nos outros discos que afundaram durante a saturação foi utilizado um fio de nylon para mantê-los imersos sem que houvesse o contato com o fundo do recipiente, devido a sua densidade ser maior que a da água.

Em seguida as amostras foram colocados em uma estufa a 105 ºC e consideradas completamente secas quando não foi identificada variação nas suas massas, em sucessivas medições feitas durante o processo de secagem. A partir da massa seca e do volume verde, foi determinada a densidade básica utilizando a equação 7 e também a umidade de cada disco utilizando a equação 4 para a transformação da densidade determinada pela TARG.

5.3.5 Cálculo da densidade média da árvore

Primeiro a árvore foi dividida em quatro partes ou seção de mesma altura *h*, onde *h = (AC/4)*, e retirado um disco no meio de cada seção como ilustra a figura 5.

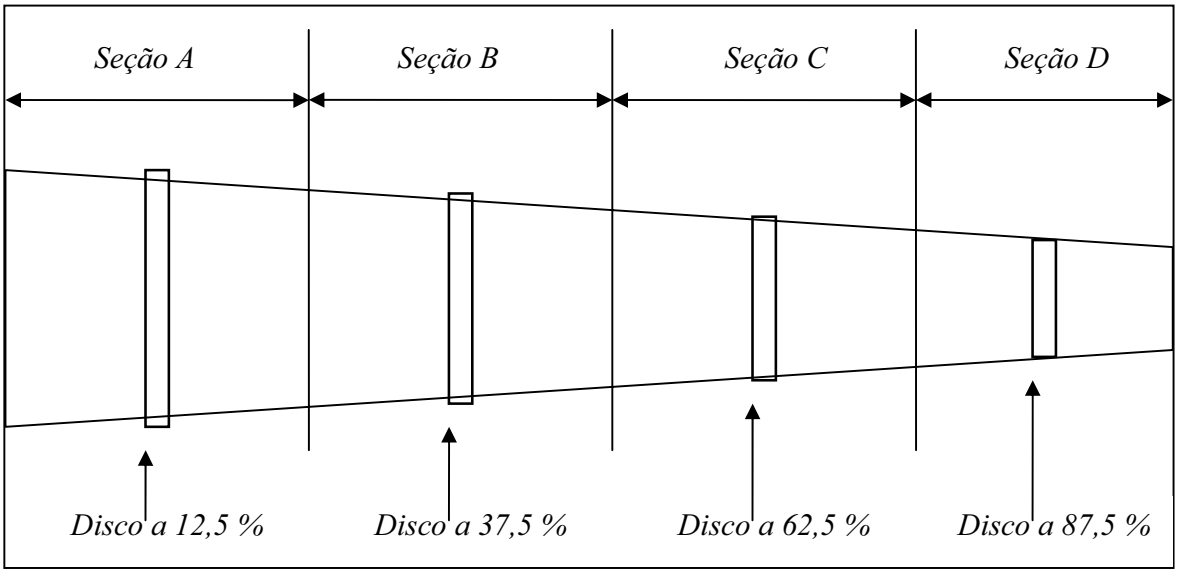


Figura 5 Divisão das seções de um tronco de árvore e amostragem dos discos

A densidade média da árvore ρ_m em (g/cm^3) foi calculada utilizando a equação 30, onde m_i é massa, v_i o volume e ρ_i a densidade de cada seção $i = A$, B, C e D são as seções de baixo para cima na árvore respectivamente.

$$\rho_m = \frac{m_A + m_B + m_C + m_D}{v_A + v_B + v_C + v_D} = \frac{v_A\rho_A + v_B\rho_B + v_C\rho_C + v_D\rho_D}{v_{1A} + v_B + v_C + v_D} \qquad (30)$$

O valor da densidade de cada seção da árvore foi considerado como sendo o valor da densidade de cada disco localizado no meio da altura de cada parte, isto é, a densidade da seção *A*, *B*, *C* e *D* é a densidade do disco a 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % de *AC* respectivamente.

O volume de cada seção da árvore foi determinado considerando cada seção, um cilindro reto de raio igual ao raio médio de cada disco. Utilizando o volume do cilindro reto ($v = \pi r^2 h$) na equação 30, onde a altura é igual em todas as seções (*A, B, C* e *D*) e π é constante, podemos simplificar os termos, transformando a equação 30 na equação 31.

$$\rho_m = \frac{r_A^2\rho_A + r_B^2\rho_B + r_C^2\rho_C + r_D^2\rho_D}{r_A^2 + r_B^2 + r_C^2 + r_D^2} \qquad (31)$$

A equação 31 pode também ser apresentada em termos de diâmetro *D* dos discos como mostra a equação 32.

$$\rho_m = \frac{D_A^2\rho_A + D_B^2\rho_B + D_C^2\rho_C + D_D^2\rho_D}{D_A^2 + D_B^2 + D_C^2 + D_D^2} \qquad (32)$$

A densidade média ponderada da árvore úmida foi calculada a partir das densidades úmidas dos discos e do raio médio quando passou pela TARG. A densidade média ponderada da árvore 12 % foi calculada a partir das densidades 12 % dos discos e do raio médio quando passou pela TARG. A densidade básica média ponderada da árvore foi calculada a partir das densidades básicas dos discos e do raio médio quando passou pela TARG.

As densidades dos tratamentos foram obtidas pelas médias aritmética das nove árvores amostradas para cada tratamento.

5.3.6 Determinação da retratibilidade e porosidade da madeira

A retratibilidade volumétrica máxima percentual (R_{vmax}), pontual e ponderada, foi calculada a partir dos valores de densidade básica utilizando a equação 11 com as constantes *a* e *b* da equação determinadas empiricamente no capítulo de resultados neste trabalho.

A porosidade percentual (δ), pontual e ponderada, da madeira seca foi calculada a partir da densidade a 0 % e da densidade da substância madeira ρ_{sm} (g/cm^3), utilizando a equação 33, onde ρ_{sm} vale aproximadamente 1,53 g/cm^3 (PANSHIN, 1982, apud VITAL, 1984) ou 1,50 g/cm^3 (HAYGREEN; BOWYER, 1996 p. 196)

$$\delta = \left(\frac{\rho_{sm} - \rho_0}{\rho_{sm}} \right) 100 \qquad (33)$$

5.4 Determinação da produtividade do reflorestamento de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*

A produtividade do reflorestamento foi definida em termos de porcentagem de casca, rendimento em volume com e sem casca, rendimento em massa com e sem casca e rendimento em energia com e sem casca.

A produtividade de casca, ou seja, a porcentagem de casca (θ) na massa da árvore de cada tratamento foi calculada utilizando a equação 34, onde m_{cc} e m_{sc} são as massas do disco com e sem casca respectivamente, que por sua vez, já foram determinadas anteriormente neste trabalho.

$$\theta = \left(\frac{m_{cc} - m_{sc}}{m_{cc}} \right) 100 \qquad (34)$$

A produtividade em volume verde, ou seja, o Incremento Médio Anual de Volume (*IMAV*), em m^3/ha.ano, foi determinado para cada tratamento utilizando todas as árvores do tratamento, para isso foi calculado o volume da árvore com casca utilizando as equações 35 e 36 com o fator de forma para as espécies *E. grandis* e híbrido *E. grandis x E. urophylla* respectivamente, a partir do *DAP* com casca (cm) e da altura comercial *AC* (m).

$$V_G = \frac{0{,}125957 DAP^{2{,}02469} H^{0{,}54262}}{1000} \qquad (35)$$

$$V_{GU} = \frac{0{,}125957 DAP^{2{,}02469} H^{0{,}54262}}{2000} + \frac{0{,}0341051 DAP^{1{,}732209097} H^{1{,}25303352}}{2000} \qquad (36)$$

As equações 35 e 36 e os valores do *DAP* e *AC* de todas as árvores de cada tratamento foram fornecidas pela Empresa Duratex S.A.

O *IMAVcc* com casca, em m^3/ha.ano para cada árvore foi calculado por meio da equação 37, onde *Vcc* (m^3) é o volume da árvore com casca, *A* (ha) é a área ocupada pela árvore e *Idade* em (anos) a idade da árvore. O *IMAVcc* de tratamentos foram obtidos a partir da média aritmética dos *IMAVcc* de cada árvore do tratamento.

$$IMAVcc = \frac{Vcc}{A.Idade} \tag{37}$$

O *IMAVsc* sem casca (m^3/ha.ano) de cada tratamento foi estimado multiplicando o *IMAVcc* e o quadrado da razão dos *DAP* médios sem e com casca $(DAPsc/DAPcc)^2$ de cada tratamento.

A produtividade em massa de cada tratamento foi definida pelo Incremento Médio Anual de Massa seca (*IMAM*), em ton/ha.ano, para obtenção do *IMAM* com casca foi determinada a densidade básica da madeira com casca de cada tratamento. Para determinar a densidade básica da casca utilizou-se a definição proposta por Rezende e Costa (2006), que constataram que a densidade básica da casca é 65 % da densidade básica do lenho para a espécie *E. grandis* independente do tratamento.

A densidade básica da madeira com casca ρ_{bcc} (kg/m^3) de cada tratamento foi determinada pela equação 38 que pondera a porcentagem de casca θ e usa a proporção da densidade básica da casca e do lenho.

$$\rho_{bcc} = \rho_b\left(1 - 0{,}0035\theta\right) \tag{38}$$

Os *IMAMcc* com casca e *IMAMsc* sem casca (ton/ha.ano) para cada tratamento foram calculados utilizando a equação 39, utilizando *IMAVcc* e ρ_{bcc} para *IMAMcc* e *IMAVsc* e ρ_b para *IMAMsc*.

$$IMAM = \frac{IMAV\rho_b}{1000} \tag{39}$$

A produtividade em energia de cada tratamento foi definida pelo Incremento Médio Anual de Energia (*IMAE*), em Gcal/ha.ano, antes foi determinado o Poder Calorífico Superior (*PCS*), em cal/g, do lenho e da casca dos seis tratamentos utilizando um Calorímetro da marca: PARR, modelo: 1201. Todo o procedimento de determinação do *PCS* foi realizado seguindo o manual do instrumento.

O *PCScc* foi estimado considerando a porcentagem de casca θ de cada tratamento. A equação 40 foi utilizada para determinação dos *IMAEcc* com casca e *IMAEsc* sem casca (Gcal/ha.ano).

$$IMAE = \frac{IMAM.PCS}{1000} \qquad (40)$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Variações dimensionais da madeira de *Eucalyptus grandis*

Considerando as 45 amostras ensaiadas para a retratibilidade com 18 medições, sendo de massa e 3 dimensões para cada medida e ainda 4 repetições por dimensão, isso totaliza 10.530 números determinados e 21.060 números calculados apresentados em 45 tabelas, inviabilizando toda apresentação deste universo numérico.

Durante o processo de secagem 10 amostras apresentaram rachaduras, sendo elas as amostras: 4, 5, 6, 38, 40, 41, 42, 43, 44 e 45. Estas amostras foram descartadas como pode ser observado nas figuras 6 e 7.

As figuras 6 e 7 exibem a densidade a 0 % e a retratibilidade volumétrica máxima percentual das amostras do ensaio de retratibilidade respectivamente. Os valores da densidade a 0 % e da retratibilidade foram apresentados na tabela 4.

A tabela 1 apresenta a divisão das amostras em cinco grupos em relação aos valores da retratibilidade volumétrica máxima para melhor visualização dos resultados.

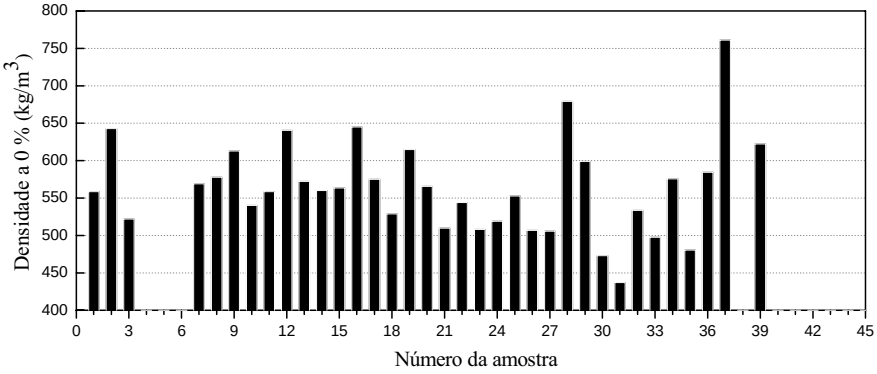


Figura 6 Densidade a 0 % das amostras do ensaio da retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade

A figura 6 apresenta a densidade a 0 % das amostras, nela pode ser observado o comportamento da densidade a 0 % na localização, descrita anteriormente na amostragem, dentro da árvore e nos diferentes tratamentos. Este comportamento sem nenhuma relação aparente com os resultados da densidade a 0 % nas amostras de retratibilidade não representa a densidade da árvore e muito menos à densidade do tratamento porque a amostragem não é representativa.

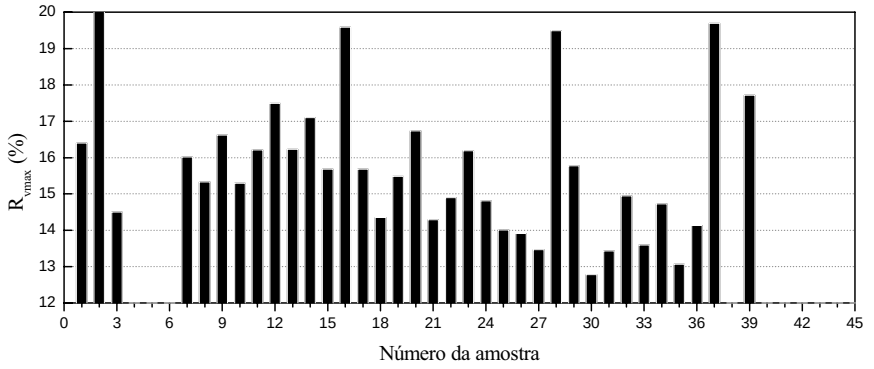


Figura 7 Retratibilidade volumétrica máxima das amostras do ensaio da retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade

A figura 7 foi utilizada para separar as amostras em grupos para apresentação dos resultados da retratibilidade volumétrica. Então as amostras foram agrupadas de acordo com a retratibilidade volumétrica máxima conforme apresenta a tabela 1.

Tabela 1 Grupos de amostra para apresentação dos resultados da retratibilidade linear e volumétrica

Grupo	R_{vmax}(%)	Amostras
1	< 14	25; 26; 27; 30; 31; 33; 35
2	14 – 15	03; 18; 21; 22; 24; 32; 34; 36
3	15 – 16	08; 10; 15; 17; 19; 29
4	16 – 17	01; 07; 09; 11; 13; 20; 23
5	> 17	02; 12; 14; 16; 28; 37; 39

A figura 8 expõe as amostras agrupadas e com os seus números de identificação alterados.

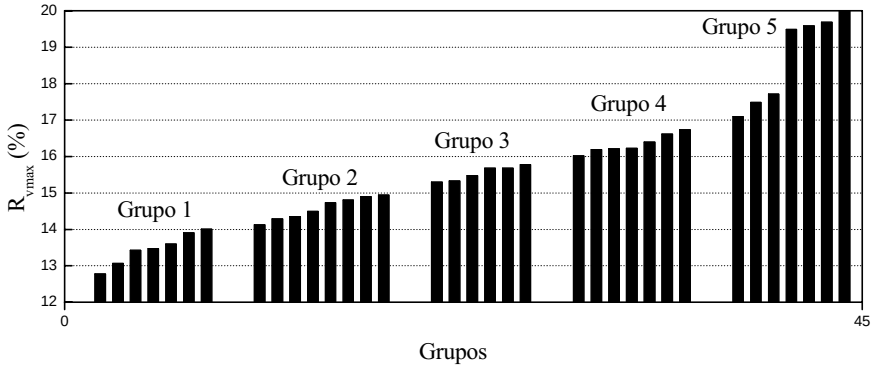


Figura 8 Retratibilidade volumétrica máxima das amostras do ensaio da retratibilidade divididas em cinco grupos

Na figura 8 estão exibidas as amostras agrupadas conforme a tabela 1, pode-se notar que as quatros últimas amostras do grupo 5 apresentaram retratibilidade volumétrica máxima muito superior, observando estas quatro amostras nas figuras 6 e 7, conclui-se que o comportamento era esperado nas amostras de número 37 e 28, porque

também apresentaram densidades superiores, mas as amostras de número 2 e 16 não mostram esta proporcionalidade direta da retratibilidade com a densidade proposta por (REZENDE, 1997, 2003) e (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968), caracterizando um comportamento não convencional das amostras de números 2 e 16, que foram posteriormente excluídas.

As figuras 9, 10, 11, 12 e 13 apresentam retratibilidade volumétrica e linear nas direções tangencial, radial e axial em função da umidade para os cinco grupos.

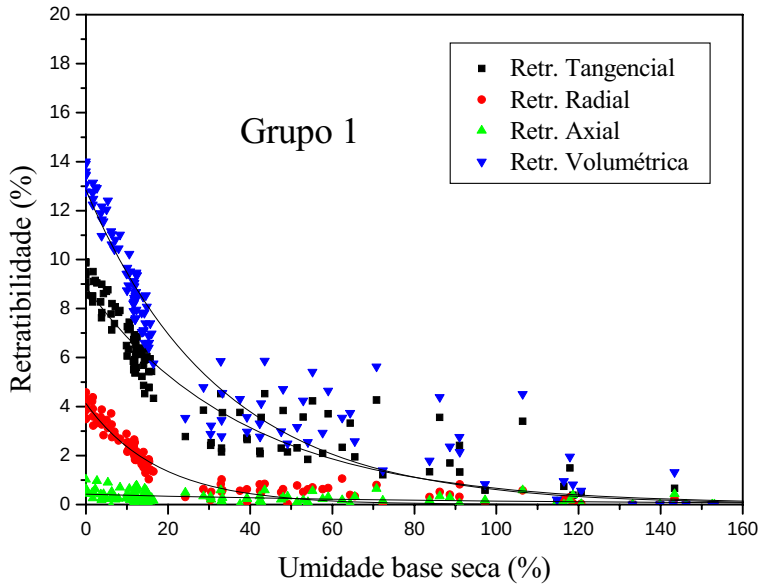


Figura 9 Retratibilidade em função da umidade para o grupo 1 de amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade

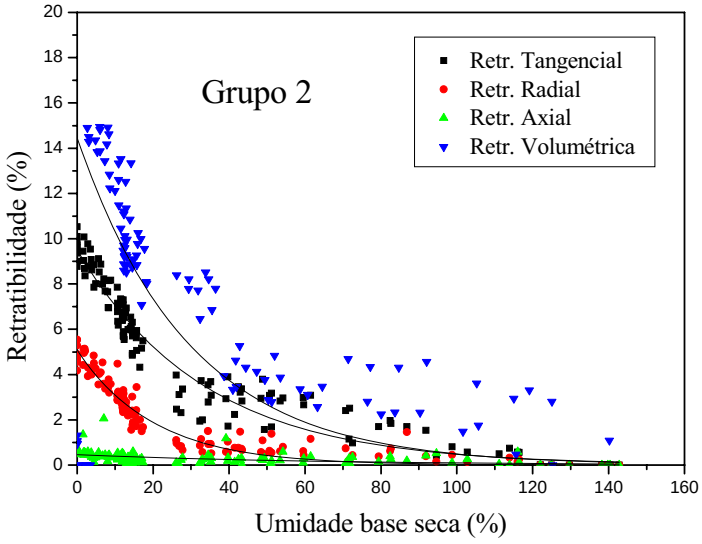


Figura 10 Retratibilidade em função da umidade para o grupo 2 de amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade

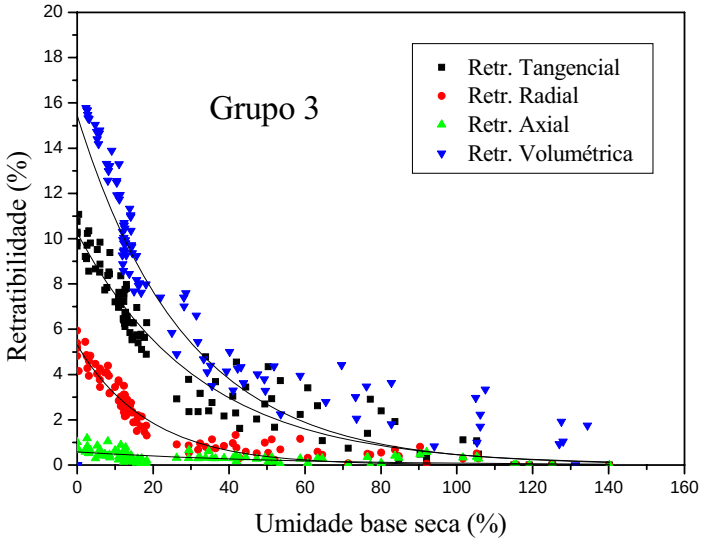


Figura 11 Retratibilidade em função da umidade para o grupo 3 de amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade

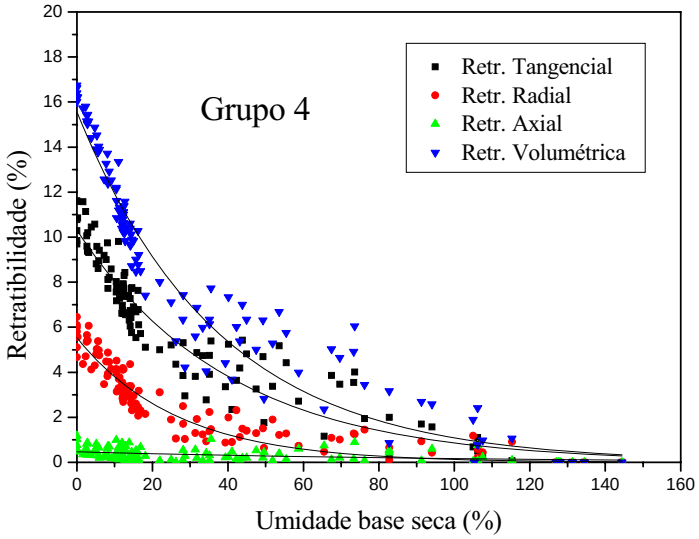


Figura 12 Retratibilidade em função da umidade para o grupo 4 de amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade

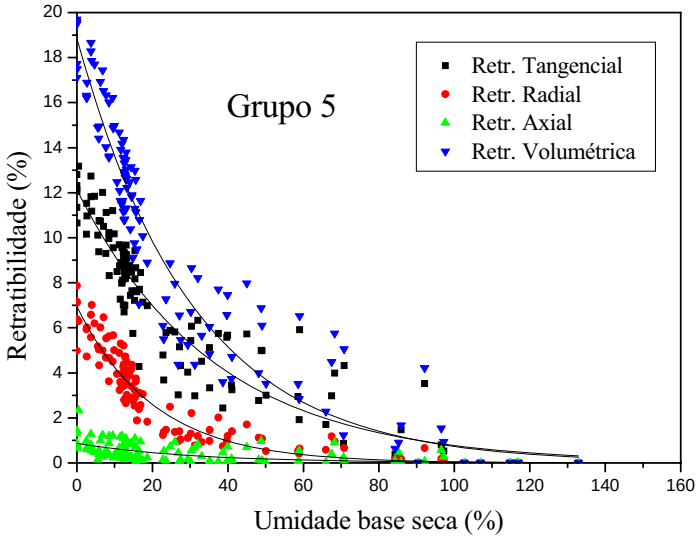


Figura 13 Retratibilidade em função da umidade para o grupo 5 de amostras de madeira de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade

A divisão em grupos de amostras facilitou a visualização do comportamento das retratibilidades lineares e volumétricas como observado nas figuras 9, 10, 11, 12 e 13. As amostras de cada grupo apresentam apenas o vínculo do valor da retratibilidade volumétrica máxima, aparentemente não mostra outro tipo de relação inter grupos. Entre os grupos observou o mesmo comportamento exponencial da retratibilidade com a umidade.

A escolha da função exponencial para os pontos da retratibilidade em função da umidade foi baseada nos trabalhos de Rezende (1997, 2003) e Kollmann e Côtè (1968) que também relacionaram a retratibilidade com a umidade.

Analisando os grupos nas figuras 9, 10, 11, 12 e 13 pode-se observar menor dispersão dos valores da retratibilidade linear e volumétrica para umidades menores que 25 %. As dispersões dos pontos acima de 25 % de umidade nas figuras 9, 10, 11, 12 e 13 podem ter origem no procedimento experimental de medição das dimensões lineares das amostras. Considerando as dimensões lineares das amostras na ordem de 20,0 a 40,0 mm, variações menores que 5 % estão na ordem de 1,0 a 2,0 mm, estes valores facilmente produzem erros mesmo quando são aferidos com um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, até porque as faces das amostras não são perfeitamente regulares.

As constantes *k* das equações das curvas das figuras 9 e 12 apresentadas na tabela 2 ficaram bem abaixo das demais por causa da maior dispersão dos pontos acima de 25 % que tenderam a um arqueamento menor da curva, proporcionando menores valores para as constantes *k*, porque quanto menor o valor de *k* mais tendência a uma reta a curva apresenta, como pode ser comprovado pelos baixos valores de *k* para as equações da retratibilidade linear na direção axial.

A tabela 2 apresenta os dados e valores das constantes das equações exponenciais de acordo com a equação 8 para cada um dos cinco grupos.

Tabela 2 Valores das constantes R_{max} e k obtidos experimentalmente para a equação exponencial $R=R_{max}\ exp(-kU_{bs})$ da curva da retratibilidade percentual com a umidade em amostras de madeira da espécie *Eucalyptus grandis* e seu coeficiente de determinação R^2

Grupo	Retratibilidade	R_{max}	k	Coef. R^2
1	Tangencial	8,87	0,0260	0,901
2	Tangencial	9,50	0,0299	0,941
3	Tangencial	10,26	0,0310	0,935
4	Tangencial	10,31	0,0249	0,913
5	Tangencial	12,13	0,0276	0,893
	Média	**10,21**	**0,0279**	**0,917**
	Desv. Padrão		**0,0026**	**0,209**
1	Radial	4,12	0,0557	0,934
2	Radial	5,08	0,0497	0,930
3	Radial	5,31	0,0529	0,936
4	Radial	5,53	0,0376	0,894
5	Radial	6,94	0,0492	0,902
	Média	**5,40**	**0,0490**	**0,919**
	Desv. Padrão		**0,0069**	**0,0197**
1	Axial	0,42567	0,0111	0,2136
2	Axial	0,45886	0,0157	0,1818
3	Axial	0,58485	0,0195	0,3207
4	Axial	0,47581	0,0106	0,1323
5	Axial	0,86341	0,0318	0,2719
	Média	**0,56172**	**0,0177**	**0,2240**
	Desv. Padrão		**0,0087**	**0,0741**
1	Volumétrica	12,84	0,0305	0,916
2	Volumétrica	14,44	0,0338	0,949
3	Volumétrica	15,46	0,0351	0,955
4	Volumétrica	15,56	0,0266	0,937
5	Volumétrica	18,84	0,0324	0,919
	Média	**15,43**	**0,0317**	**0,935**
	Desv. Padrão		**0,0033**	**0,0174**

A figura 14 apresenta a regressão linear da retratibilidade volumétrica em função da umidade para valores inferiores a 25 %.

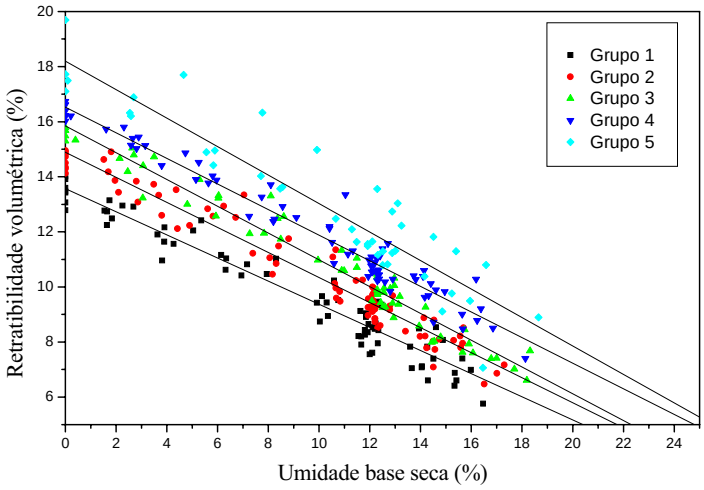


Figura 14 Retratibilidade volumétrica em função da umidade até 25 % das amostras dos grupos 1, 2, 3, 4 e 5 com as suas respectivas regressões lineares para amostras de *E. grandis*

A proposta da figura 14 em obter a regressão linear dos pontos abaixo de 25 % para diferentes valores de retratibilidade máxima já foi apresentada por Rezende (1997) relação do coeficiente angular com a retratibilidade volumétrica máxima, apresentada na tabela 3, é uma simples relação, que generaliza as retas e obtém uma relação geral da retratibilidade volumétrica com a retratibilidade volumétrica máxima e com a umidade.

Tabela 3 Valores das constantes R_{vmax}, α e α/R_{vmax} da equação da reta, do tipo ($R_v = R_{vmax} - \alpha U_{bs}$) e os coeficientes de correlação R, obtidas experimentalmente pela regressão linear da retratibilidade volumétrica em função da umidade das amostras dos grupos 1, 2, 3, 4 e 5

Grupo	R_{vmax} (%)	α	α/R_{vmax}	R
1	13,6	0,420	0,0310	0,975
2	14,9	0,455	0,0306	0,980
3	15,8	0,486	0,0307	0,986
4	16,5	0,465	0,0281	0,985
5	18,2	0,517	0,0284	0,956
Média	**15,8**	**0,469**	**0,0297**	
Desv. Padrão		**0,036**	**0,0014**	

A partir dos resultados da tabela 3 e da equação 10, obteve-se a equação 41.

$$R_v = R_{v\max}\left(1 - 0{,}03U_{bs}\right) \qquad (41)$$

O valor de 0,03 para a constante ψ na equação 10 ratifica os resultados de Kollmann e Côté (1968) que afirmam que a cada diminuição de três pontos percentuais do valor da retratibilidade máxima, aumenta um ponto percentual na umidade da madeira, válida para qualquer espécie de madeira com umidade menor que a umidade do ponto de saturação das fibras. É importante frisar que a equação 41 foi obtida empiricamente a partir de dados da retratibilidade da espécie *E. grandis* e só tem validade para madeira com umidades base seca menor que 25 %.

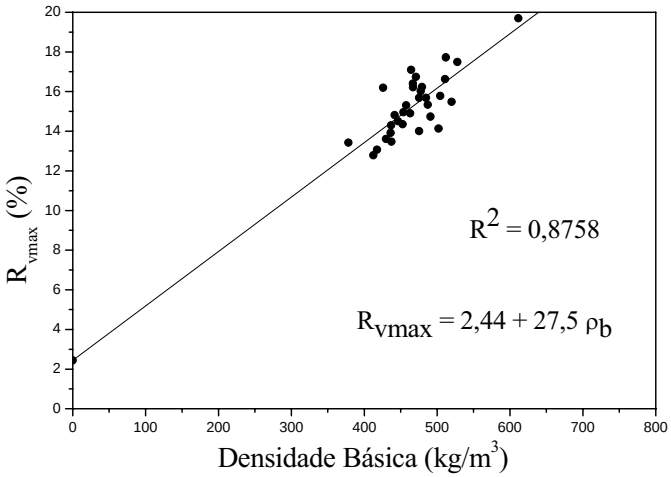


Figura 15 Retratibilidade volumétrica máxima percentual em função da densidade básica para *Eucalyptus grandis*

As constates empíricas da equação da reta obtida por regressão linear, apresentados na figura 15, foram diferentes das obtidas por (NEWLIN, 1919) e (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968), porque no presente trabalho, foi analisada apenas a espécie *E. grandis*, enquanto que os autores citados analisaram diversas espécies e forçaram a passagem

da reta pela origem para eliminar a constante que cruza a abscissa obtendo a equação $R_{vmax}=28\rho_b$.

Estas constantes também foram diferentes, mas apresentam valores próximos dos obtidos por Rezende (2003), este autor trabalhou com as espécies *E. grandis* e *Pinus Caribaea* var: *hondurensis* de madeira para a construção da figura e regressão linear dos pontos, obtendo a equação $R_{vmax}=1,96+24,28\rho_b$.

Com base nos resultados da regressão linear da figura 15 e da equação 41 pode-se transformar a equação 12 na equação 42.

$$R_v = (2,44 + 27,5\rho_b)(1 - 0,03U_{bs}) \quad (42)$$

6.2 Equações de transformação da densidade

A partir da obtenção dos valores das constantes *a*, *b* e ψ mostrados na equação 42, as equações 17, 18, 19 e 20 se transformam nas equações 43, 44, 45 e 46 respectivamente.

$$\rho_b = \frac{(97,56 + 0,0732U_{bs})\rho_u}{100 + U_{bs} + 27,5\rho_u - 0,825U_{bs}\rho_u} \quad (43)$$

$$\rho_u = \frac{(100 + U_{bs})\rho_b}{97,56 + 0,0732U_{bs} - 27,5\rho_b + 0,825U_{bs}\rho_b} \quad (44)$$

$$\rho_{12} = \frac{\rho_b}{0,8789 - 0,1571\rho_b} \quad (45)$$

$$\rho_0 = \frac{\rho_b}{0,9756 - 0,275\rho_b} \quad (46)$$

A equação 16 que relaciona a densidade úmida, a densidade básica, a umidade e a retratibilidade volumétrica da madeira é uma função matemática exata como pode ser comprovada pela sua dedução exposta anteriormente. Além de exata e simples esta equação, apresentada pela primeira vez aqui neste trabalho, pode gerar relações entre quaisquer densidades, desde que, seja obtida a relação da retratibilidade volumétrica em função da densidade básica ou densidade úmida ou umidade como foi obtida a relação na equação 41.

As equações 43 e 44, obtidas a partir das equações 16 e 42 relacionam as densidades básica e úmida e a umidade, apesar de parecerem distintas, se tratam da mesma equação, apresentada de forma diferente, ora com a densidade básica isolada, ora com a densidade úmida isolada.

Para a determinação da densidade a 12 % e a 0 % a partir da densidade úmida utiliza-se a equação 43 e depois a equação 45 para determinar a densidade a 12 % e a equação 46 para determinar a densidade a 0 %. As equações 43 e 45 ou 43 e 46 podem ser colocadas uma dentro da outra como mostra as equações 47 e 48.

$$\rho_{12} = \frac{(97{,}56 + 0{,}0732U_{bs})\rho_u}{87{,}89 + 0{,}8789U_{bs} + 8{,}84312\rho_u - 0{,}73659U_{bs}\rho_u} \quad (47)$$

$$\rho_0 = \frac{(97{,}56 + 0{,}0732U_{bs})\rho_u}{97{,}56 + 0{,}9756U_{bs} - 0{,}825U_{bs}\rho_u} \quad (48)$$

As equações 45, 46, 47 e 48 que relacionam também as densidades foram deduzidas a partir das equações 43 e 44, evidenciando que a origem das equações 43, 44, 45, 46, 47 e 48 de transformação das densidades foi à equação 16 juntamente com a definição empírica da equação 42.

Rezende (1997) já havia proposto duas equações que relacionavam as densidades, uma que relacionava a densidade básica com a densidade a 0 % e outro que relacionavam a densidade a 0 % com a densidade úmida e a umidade, mas a transformação da básica para a úmida, ou vice-versa, dependia da determinação da densidade a 0 %, dependência que não existe nas equações proposta neste trabalho.

A tabela 4 apresenta a retratibilidade volumétrica máxima percentual e as densidades determinadas e calculadas nas amostras do ensaio de retratibilidade, onde a partir da densidade básica calculou-se a densidade a 0 % e a variação percentual das densidades determinadas e calculadas a 0 %.

Tebela 4 Valores da retratibilidade volumétrica máxima percentual e das densidades determinadas e calculadas das amostras do ensaio da retratibilidade de *Eucalyptus grandis*

Nº da amostra	R_{vmax} (%)	ρ_b Determinada (g/cm^3)	ρ_0 Determinada (g/cm^3)	ρ_0 Calculada (g/cm^3)	Variação de ρ_0 (%)
1	16,40	0,4668	0,5584	0,5510	-1,32
3	14,50	0,4463	0,5220	0,5233	0,25
7	16,02	0,4777	0,5688	0,5658	-0,52
8	15,33	0,4872	0,5777	0,5789	0,21
9	16,62	0,5110	0,6129	0,6119	-0,15
10	15,30	0,4575	0,5402	0,5384	-0,33
11	16,21	0,4669	0,5586	0,5512	-1,32
12	17,49	0,5279	0,6404	0,6357	-0,74
13	16,23	0,4794	0,5722	0,5681	-0,72
14	17,10	0,4643	0,5601	0,5476	-2,23
15	15,68	0,4753	0,5636	0,5625	-0,20
17	15,68	0,4849	0,5751	0,5757	0,11
18	14,35	0,4528	0,5286	0,5320	0,63
19	15,48	0,5197	0,6149	0,6242	1,50
20	16,74	0,4710	0,5657	0,5567	-1,60
21	14,29	0,4369	0,5098	0,5108	0,19
22	14,90	0,4630	0,5440	0,5458	0,32
23	16,19	0,4259	0,5080	0,4962	-2,33
24	14,81	0,4419	0,5188	0,5175	-0,26
25	14,01	0,4753	0,5527	0,5625	1,77
26	13,91	0,4362	0,5066	0,5097	0,61
27	13,47	0,4376	0,5058	0,5117	1,18
28	19,49	0,5467	0,6790	0,6624	-2,45
29	15,78	0,5043	0,5989	0,6026	0,63
30	12,78	0,4125	0,4730	0,4785	1,17
31	13,43	0,3783	0,4370	0,4341	-0,67
32	14,95	0,4538	0,5336	0,5334	-0,04
33	13,60	0,4299	0,4975	0,5014	0,77
34	14,73	0,4909	0,5757	0,5839	1,44
35	13,07	0,4176	0,4804	0,4852	0,99
36	14,13	0,5020	0,5846	0,5994	2,53
37	19,69	0,6113	0,7612	0,7570	-0,55
39	17,72	0,5121	0,6224	0,6134	-1,44
			Desvio Padrão		1,17

As equações de transformação das densidades apesar de não serem tão triviais quanto a sua dedução, oferecem bastante precisão como pôde ser visualizado na tabela 4 que apresentou um desvio padrão da variação de 1,11 % da densidade a 0 % determinada

com a calculada. Apesar de ser avaliada apenas a equação 46 de transformação da densidade básica em densidade a 0 %, pode-se generalizar qualitativamente a avaliação para as outras equações, pois todas foram deduzidas a partir da mesma relação.

A generalização das equações para qualquer espécie de madeira depende de duas relações empíricas, a primeira definida pela equação 41, válida para qualquer espécie de madeira e a segunda definida pela regressão linear da figura 15.

Portanto foi possível encontrar as equações gerais que inter-relacionam as densidades úmidas, básica, a 0 % e a 12 %. E as transformações propostas podem ser realizadas pelas equações 43, 45, 46, 47 e 48.

6.3 Variações da densidade pontual e ponderada dos discos de madeira de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*

A localização do raio médio no disco para a determinação da densidade pontual pela TARG foi realizada de forma pouco criteriosa para facilitar o procedimento experimental. A escolha de uma direção radial que não represente exatamente à distância do raio médio não gera erros na determinação da densidade média ponderada, tão pouco na densidade pontual, porque se o volume, definido a partir do raio médio, for superestimado ou subestimado a massa também será.

A explicação deste fato está na natureza das grandezas envolvidas, porque o volume e a massa são grandezas extensivas, isto é, dependem das dimensões da amostra e a densidade é uma grandeza intensiva, isto é, não depende das dimensões da amostra. Considerando que na ponderação da densidade a massa é calculada a partir da multiplicação do volume pela a densidade, isso justifica a independência do erro do volume no cálculo da densidade.

Outro fator importante na discussão da determinação da densidade pela TARG é a presença de rachaduras nas amostras. Quando as rachaduras se estendem até o centro da amostra a determinação da densidade pontual no centro, ou seja, ao lado da rachadura, fica prejudicada, pois a atenuação da radiação não acontece por completa, fornecendo valores de densidade inferiores ao real. Estes erros não terão grandes conseqüências, pois a ponderação no centro é menor do que na extremidade do disco de madeira.

A colocação de hastes metálicas limitadoras no raio médio facilitou a delimitação dos pontos de densidade determinados pela TARG, principalmente na extremidade do disco, onde o erro pode comprometer a determinação da densidade da amostra.

Outra contribuição importante deste trabalho foi a dedução da equação 28 que facilitou o cálculo da densidade ponderada do disco. Nesta equação a densidade média ponderada depende apenas das densidades pontuais e do número de pontos, esta simplificação foi possível porque a amostra foi considerada perfeitamente circular como se fosse construída com diversas cascas cilíndricas delgadas concêntricas encaixadas uma dentro da outra. Com esta consideração a espessura, a constante π e o raio ao quadrado, que aparecem no numerador e no denominador são cancelados por simplificação simples.

Passados 40 dias após o preparo dos discos, os mesmos apresentaram uma estabilidade em massa total caracterizando um equilíbrio com a umidade ambiente.

Para a determinação da densidade úmida pontual foi utilizada a equação de Beer-Lambert sem a correção do tempo morto porque a contagem da fonte foi de aproximadamente 40000 cpm, valor muito abaixo do limite que justifica o uso da correção do tempo morto para valores acima 200000 cpm segundo (REZENDE, 1997). A correção da radiação de fundo também não foi utilizada porque durante todo ensaio ela representou no local, valores médios abaixo de 0,1 % das contagens por minutos incidentes.

No total foram amostradas cinqüenta e quatro árvores, sendo nove de cada tratamento. Para a visualização da variação da densidade pontual e ponderada optou-se pela apresentação de apenas uma árvore de cada tratamento, sendo esta árvore a mais representativa em termos de variação da densidade pontual e ponderada.

Nas figuras 16, 17, 18, 19, 20 e 21 estão apresentados os seis discos amostrados em cada árvore de cada tratamento, mostrando o comportamento da densidade a 12 % pontual e ponderada e também a densidade básica ponderada, todas em função da distância radial.

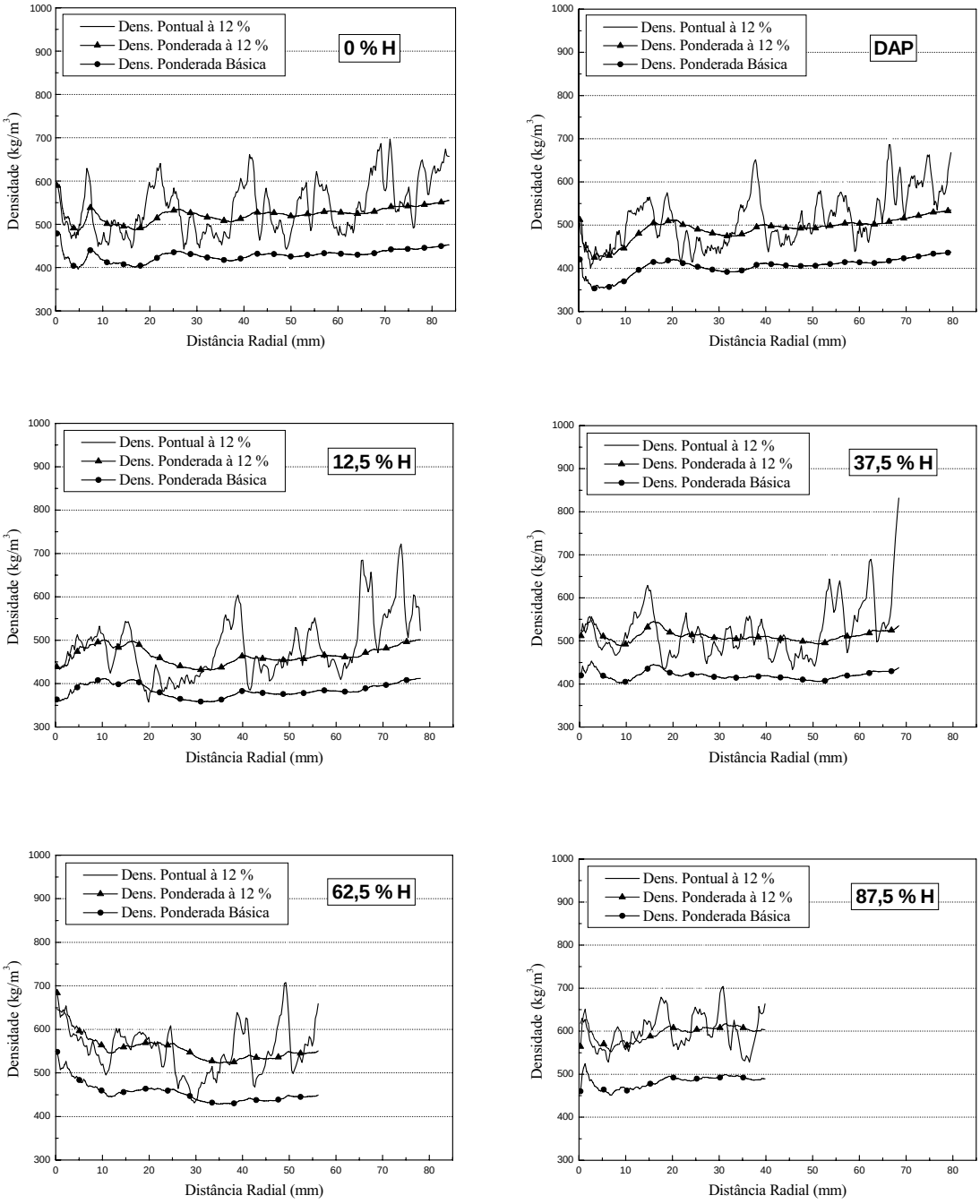


Figura 16 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore seminal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **S11**

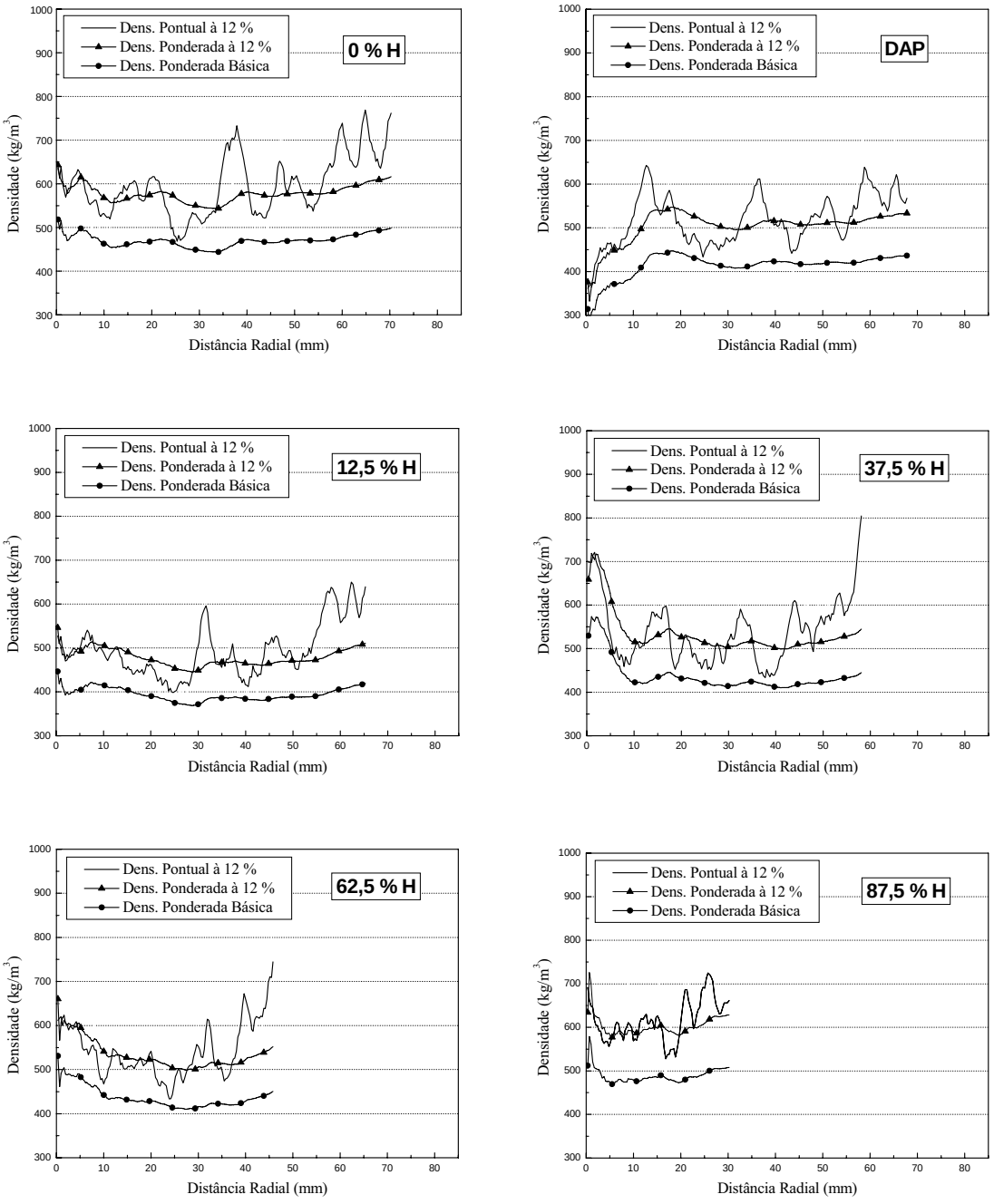


Figura 17 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C16**

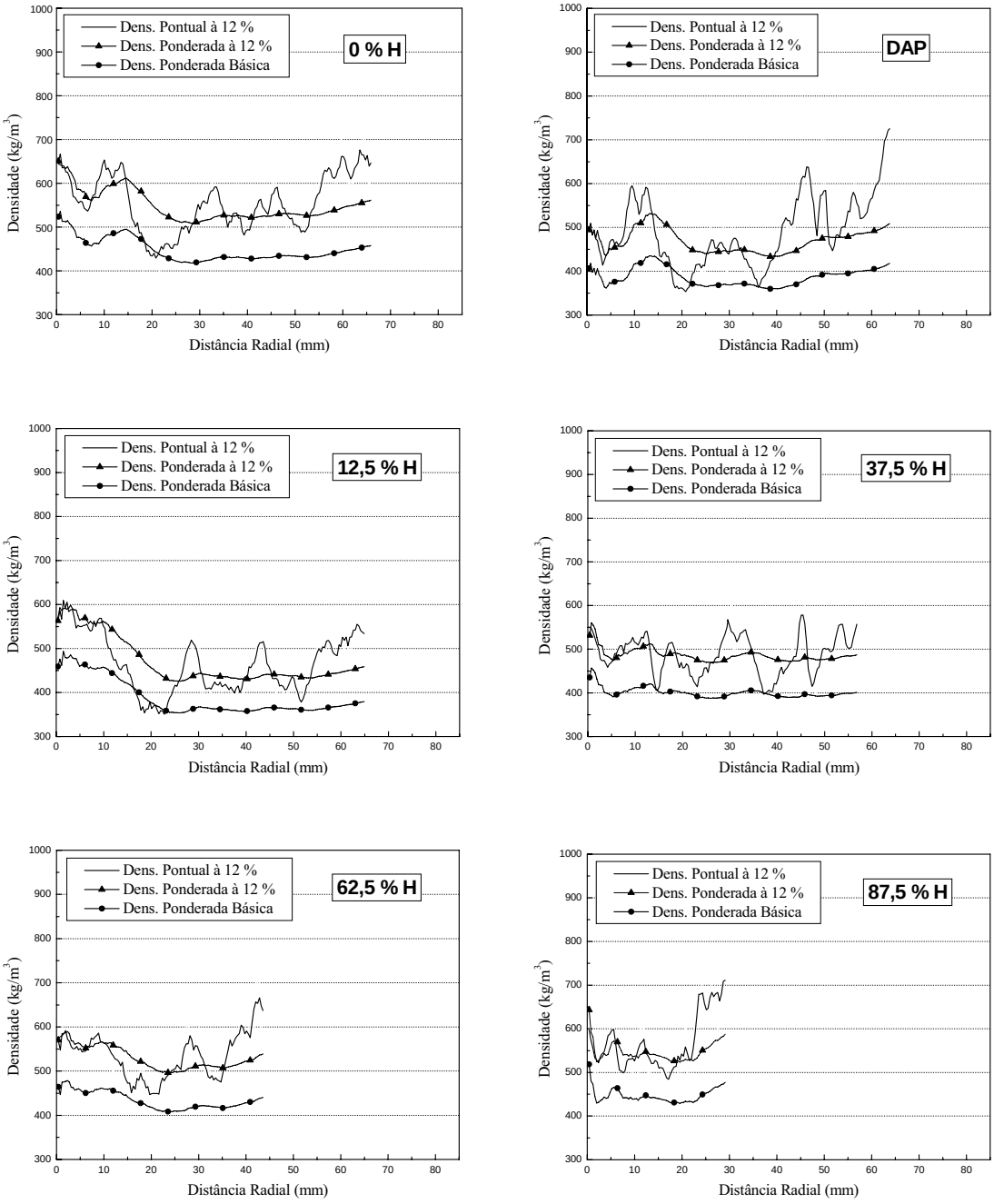


Figura 18 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C26**

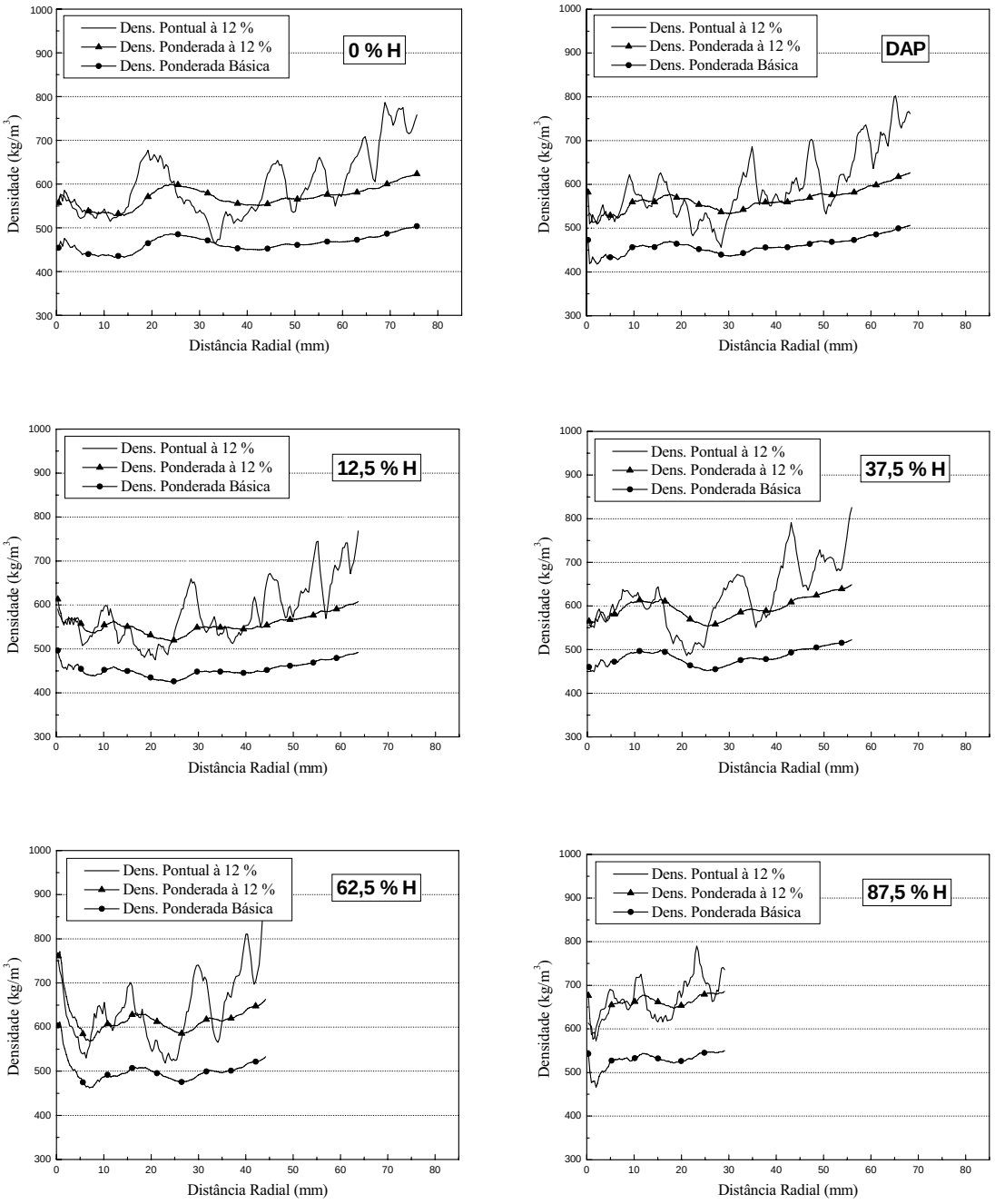


Figura 19 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H17**

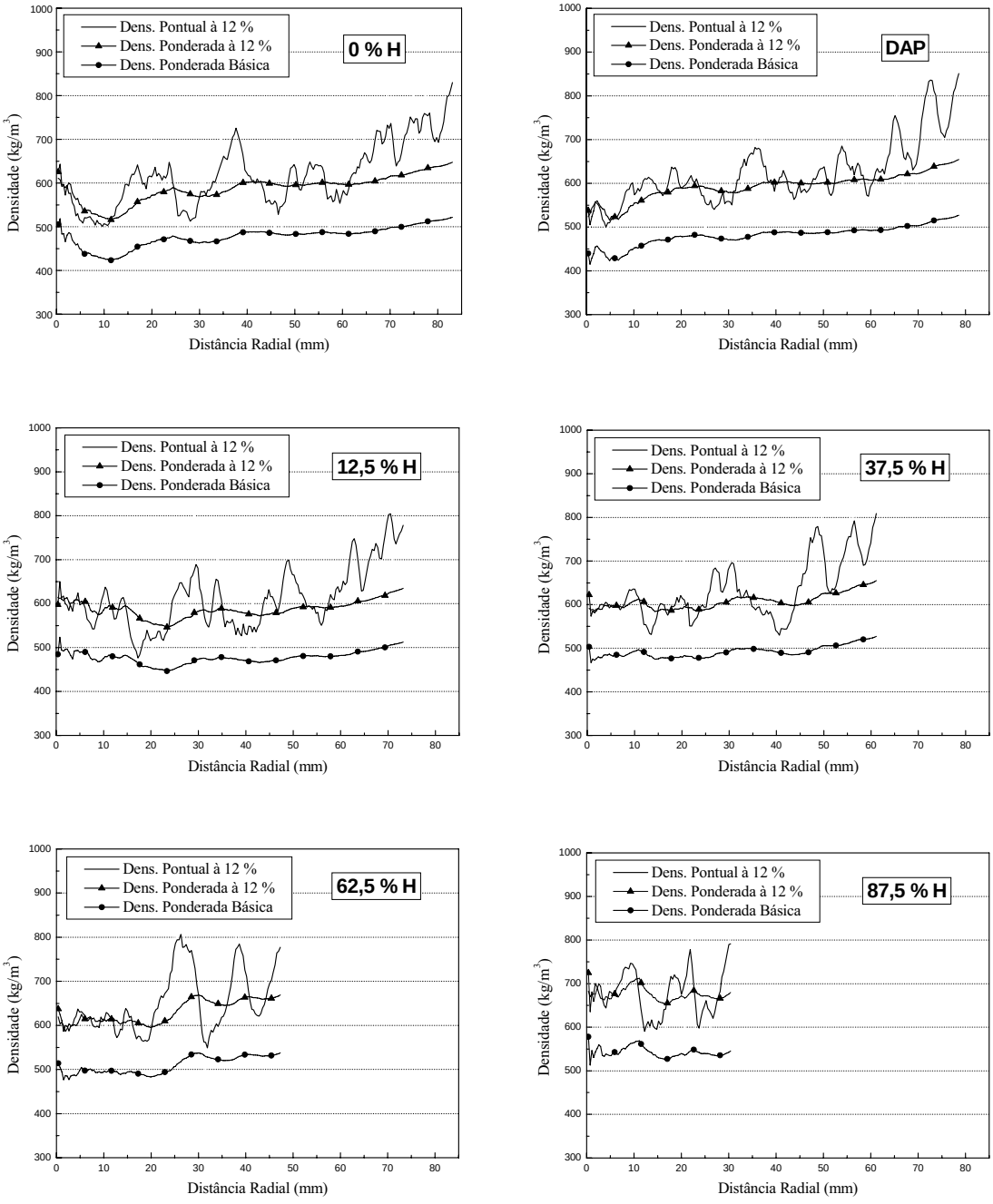


Figura 20 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H29**

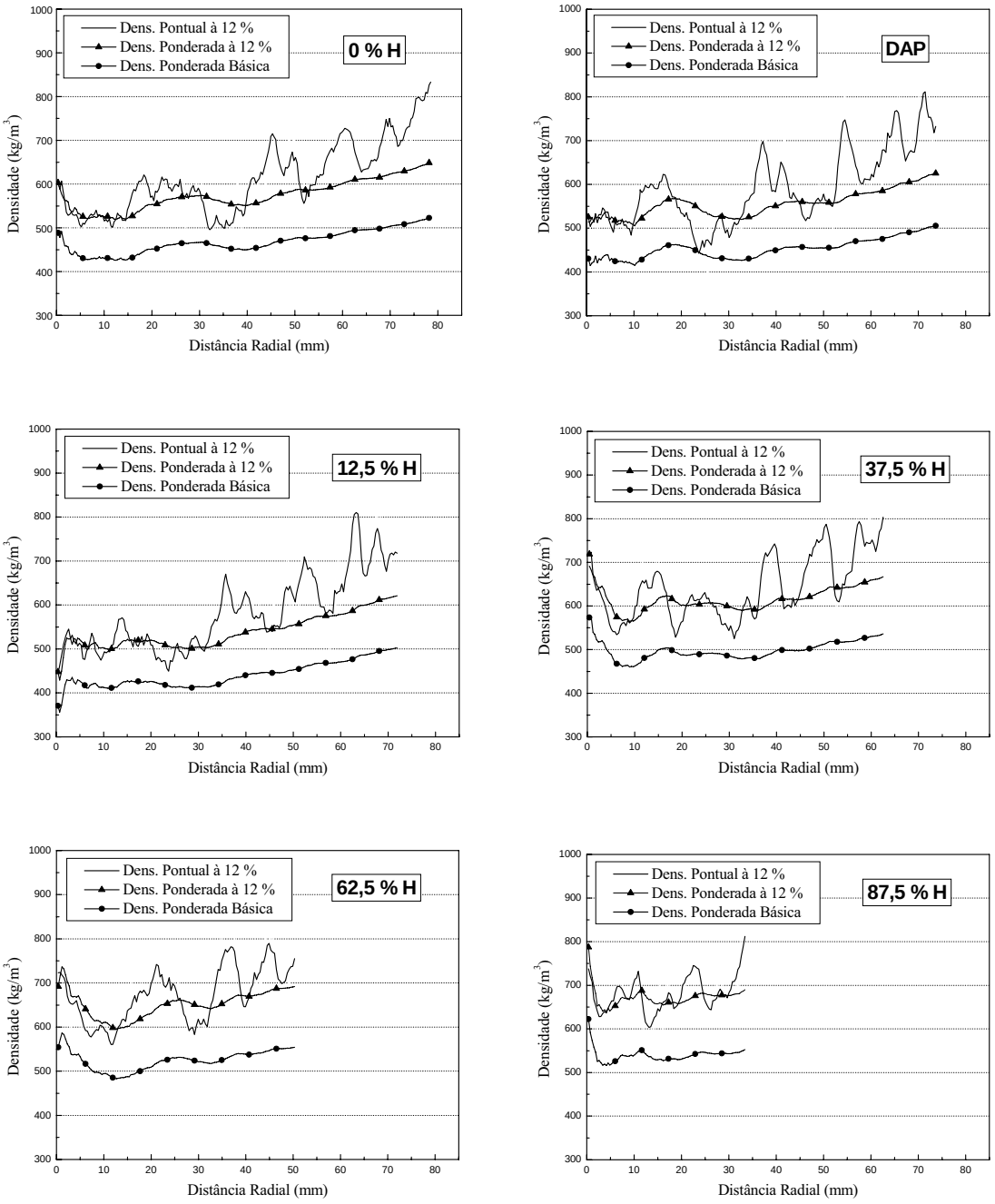


Figura 21 Variações das densidades a 12 % pontual e da densidade básica ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H32**

Apesar de terem sido determinadas às densidades pontuais e ponderadas de todos os discos de todas as árvores de cada tratamento, optou-se apresentar apenas uma das nove árvores de cada tratamento, porque a inserção das trinta e nove figuras sugeria sua apresentação em anexo.

A figura 16 expõe o comportamento da densidade pontual nos seis discos amostrados da árvore de número 1 da espécie seminal de *E. grandis*. A amplitude de variação da densidade pontual ficou entre 400 a 700 kg/m³. A densidade ponderada manteve-se praticamente estável com tendência de aumento nos últimos anos, ou seja ao longo de sua altura e baixa densidade no disco a 12,5 %.

O clone 1 representado pela figura 17 exibiu uma densidade pontual também variável de 400 a 700 kg/m³, o disco a 37,5 % também apresentou valores altos, evidenciando a presença das hastes limitadoras. A densidade ponderada apresentou uma pequena queda no início e logo depois se recuperou com uma tendência de aumento, apresentou baixa densidade no disco a 12,5 % e alta no disco a 87,5 %.

O clone 2 representado pela figura 18 apresentou uma amplitude de variação da densidade pontual entre 350 a 650 kg/m³. A densidade ponderada aparentemente caiu e se manteve estável.

Na figura 19 o híbrido 1, apresentou alta amplitude de variação de 450 a 800 kg/m³, em relação aos outro tratamentos. Sua densidade ponderada oscilou no inicio, mas mostrou bastante tendência de aumento nos últimos anos, apresentando também baixa densidade no disco a 12,5 % e alta no disco a 87,5 %.

O híbrido 2 da figura 20 exibiu baixa amplitude de variação de 500 a 800 kg/m³. Sua densidade ponderada apresentou constante crescimento com exceção do disco a 87,5 % que se manteve alta.

O híbrido 3 representado pela figura 21 apresentou praticamente o mesmo comportamento do híbrido 2.

6.4 Comparação entre os métodos de determinação da densidade da madeira

A densidade dos discos de madeira foi determinada utilizando três métodos diferente: TARG, método direto e método de imersão. No procedimento experimental os três métodos apresentaram vantagens, desvantagens e possíveis fontes de erros como exibido na tabela 5.

Tabela 5 Comparação encontrada entre as vantagens, desvantagens e possíveis fontes de erros na determinação da densidade de discos de madeira pela técnica de atenuação da radiação gama (TARG), método direto (M. Direto) e método de imersão (M. Imersão)

	TARG	M. Direto	M. Imersão
Vantagens	1) fornece a densidade pontual na direção radial do disco, 2) fornece a densidade média do disco durante seu crescimento, 3) rapidez na determinação dos resultados	1) rapidez na determinação dos resultados, 2) utilização de instrumentos simples	1) obtenção direta da densidade básica, 2) utilização de instrumentos simples
Desvantagens	1) tempo da estabilidade da umidade da amostra, 2) determinação da umidade, 3) uso de fonte radioativa, 4) custo de equipamento específico	1) tempo da estabilidade da umidade da amostra, 2) determinação da umidade, 3) necessidade de descascar o disco	1) necessidade de descascar o disco, 2) tempo da saturação em água do disco
Erros	1) uniformidade do disco	1) uniformidade do disco, 2) presença de rachaduras	1) obtenção do volume verde, 2) obtenção da massa seca

Com relação aos métodos pode-se destacar a vantagem da TARG que fornece maior detalhamento da densidade do disco. Os tempos de obtenção dos resultados, avaliados a partir do corte da árvore, podem ser considerados praticamente iguais, pois apesar da rapidez na determinação dos resultados pela TARG e pelo M. Direto, ambos necessitam de um tempo para que o disco estabilize sua umidade, para determinação correta da mesma, enquanto que o M. Imersão também necessita de um tempo para a saturação da amostra.

A preparação do disco destaca a vantagem da TARG que pode ser realizada no disco com casca, o ajuste fino das dimensões do disco é necessário nos três métodos. O aspecto do disco pode gerar erros na determinação da densidade, principalmente

no M. Direto, devido à presença de rachaduras. Quando o formato externo do disco for muito diferente de um círculo ou quando apresentar excentricidade, estes dois fatores separadamente irão produzir erros nos resultados da densidade do disco para qualquer um dos três métodos, se os dois fatores ocorrerem simultaneamente o erro será maior.

Considerando que o procedimento experimental foi realizado corretamente, a TARG apresenta menor possibilidade de erros na determinação em relação aos outros métodos, o único fator que possivelmente geraria erros é o formato da amostra, por exemplo, árvores inclinadas, excêntricas e pouco circulares. Enquanto que o M. Direto além deste fator, também pode produzir erros na presença de rachaduras. As possíveis fontes de erros do M. Imersão está associada ao tempo de saturação do disco em água e a secagem completa do disco.

Os M. Direto e M. Imersão apresentam uma vantagem em relação a TARG porque não necessitam de equipamento específico e, muito menos, utilizam fonte radioativa.

Outra contribuição deste trabalho foi à amostragem dos discos na árvore, as localizações de 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da *AC* facilitaram a determinação da densidade da árvore diminuindo um disco na amostragem quando comparada a amostragem sugerida por (PRONIN, 1966 apud BENJAMIN; BALLARIN, 2003) e também diminuiu a possibilidade de erros, excluindo da amostragem os discos da base e do topo da árvore.

A base da árvore muitas vezes apresenta alargamento do diâmetro devido à transição do caule para a raiz, amostrando um disco nesta região que não condiz com a realidade da árvore. O disco no topo da árvore pode provocar erros devido ao seu tamanho reduzido, onde a espessura chega a ser maior do que o diâmetro, alterando a forma da amostra de disco para cilindro.

A equação 31 ou a equação 32 apresentadas pela primeira vez neste trabalho e utilizadas para o cálculo da densidade média ponderada da árvore não é uma equação exata, esta equação foi deduzida a partir de uma aproximação que considerou a árvore formada por quatro cilindros retos e sobrepostos um em cima do outro, com mesma altura e diâmetros iguais ao dos discos amostrados. Esta aproximação não remete às geometrias reais da árvore, que por sua vez, não possui forma geométrica regular.

A forma geométrica que mais se aproxima da forma da árvore é um tronco de cone, mas como a altura é muito maior do que os diâmetros na árvore a aproximação do cilindro também é bem aceitável, até porque, o volume do cone desconsiderado na região perto do diâmetro maior é aproximadamente igual ao volume que o cilindro acrescenta na região do diâmetro menor quando são comparadas as formas cilíndricas com as cônicas.

A tabela 6 apresenta as densidades médias das nove árvores de cada tratamentos, onde a densidade de cada árvore foi calculada utilizando a equação 31 e as densidades dos discos obtidas pelos métodos: direto para a densidade úmida, de imersão para a densidade básica e TARG para as densidades úmida e básica, calculada a partir da equação 43.

Tabela 6 Valores das densidades determinadas úmidas e básicas obtidas pelos métodos Direto, Imersão e Técnica de Atenuação da Radiação Gama (TARG) para os seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

Tratamentos	M. Direto ρ_u (kg/m^3)	TARG ρ_u (kg/m^3)	Variação de ρ_u (%)	M. Imersão ρ_b (kg/m^3)	TARG ρ_b (kg/m^3)	Variação de ρ_b (%)
S1	553,8	563,9	1,8	458,5	451,3	-1,6
C1	544,6	549,5	0,9	449,1	439,0	-2,3
C2	515,3	511,7	-0,7	417,1	411,9	-1,2
H1	657,2	658,0	0,1	521,1	518,8	-0,4
H2	657,0	667,8	1,6	539,1	526,4	-2,4
H3	664,9	666,6	0,2	532,5	526,3	-1,2

As figuras 22 e 23 exibem os resultados das densidades úmida e básica obtidas pelo método direto, método de imersão e pela TARG.

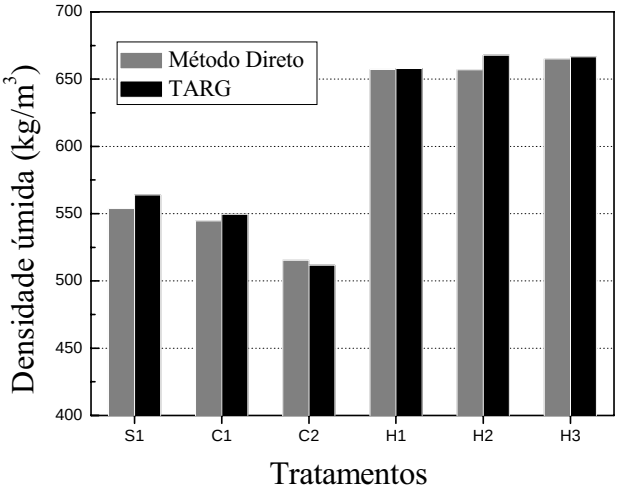


Figura 22 Resultados das densidades úmidas da madeira de seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*, obtidas pelo Método Direto e pela Técnica de Atenuação da Radiação Gama

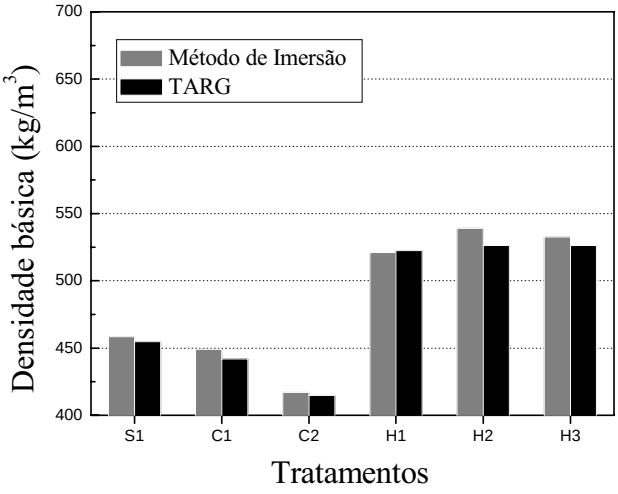


Figura 23 Resultados das densidades básica da madeira de seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*, obtidas pelo Método de Imersão e pela Técnica de Atenuação da Radiação Gama

Comparando os resultados da densidade úmida da árvore obtida pelo Método Direto e pela TARG, pôde-se observar na tabela 6 que a variação foi baixa, mas com o valor da densidade sempre maior para a TARG, com exceção do tratamento *C2*.

O fato de a densidade úmida ser menor pelo Método Direto pode ser explicado pela presença de rachaduras que superestimavam o volume das amostras, fazendo com que a densidade fosse subestimada devido à relação inversamente proporcional da densidade com o volume. Justificando ainda mais este fato, o tratamento *C2* que apresentou baixa densidade e conseqüentemente baixa retratibilidade não se evidenciou a presença de bastantes rachaduras.

A variação comparativa da densidade básica obtida pelo Método de Imersão e pela TARG também foi relativamente baixa, mas com valores mais altos para a densidade básica obtida pelo Método de Imersão, conforme tabela 6. Este fato pode ser explicado pelo procedimento do Método de Imersão, onde o erro na determinação do volume será sempre subestimado, porque a amostra nunca inchará mais do que o volume verde, o erro na determinação da massa seca será sempre superestimado, porque nunca será possível determinar um valor menor para a massa seca da amostra. Superestimando a massa e subestimando o volume, a densidade básica obtida pelo Método de Imersão será maior.

A tabela 7 exibe os valores das densidades básicas, a 12 % e a 0 % de cada tratamento, obtidos a partir das densidades úmidas dos tratamentos utilizando as equações propostas neste trabalho e as equações proposta por Rezende (1997) e também a densidade básica determinada pelo método de imersão para facilitar a comparação.

Tabela 7 Valores das densidades calculadas pelas equações deste trabalho (Costa) e pelas equações de Rezende (1997) para os tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

Trat.	Costa ρ_b (kg/m^3)	Rezende ρ_b (kg/m^3)	Variação (%)	Costa ρ_{12} (kg/m^3)	Rezende ρ_{12} (kg/m^3)	Variação (%)	Costa ρ_0 (kg/m^3)
S1	451,3	454,8	-0,8	558,8	557,9	0,2	530,5
C1	439,0	442,0	-0,7	542,0	540,7	0,2	513,6
C2	411,9	414,8	-0,7	505,9	505,0	0,2	477,6
H1	518,8	522,6	-0,7	650,7	648,8	0,3	622,9
H2	526,4	530,4	-0,8	661,1	659,4	0,3	633,6
H3	526,3	530,6	-0,8	661,1	659,6	0,2	633,5

A figura 24 expõe os resultados da densidade 0 %, básica e a 12 % calculadas com as equações proposta neste trabalho (Costa) e com as equações propostas por (REZENDE, 1997).

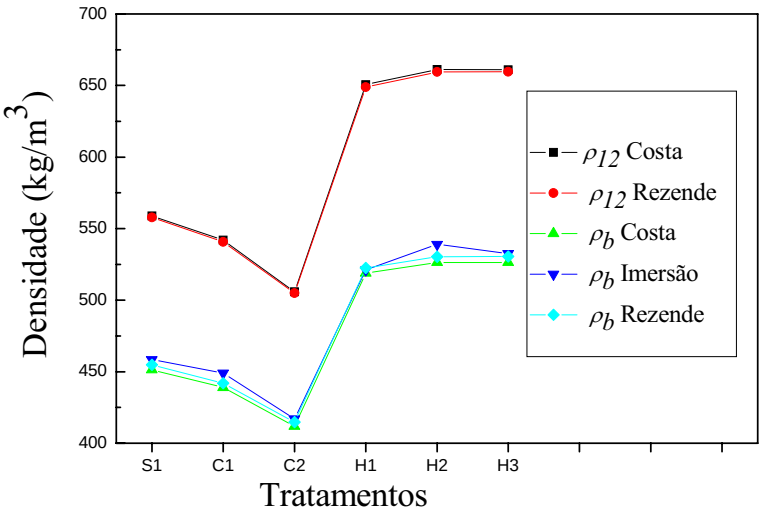


Figura 24 Resultados das densidades básica e a 12 % calculadas a partir das equações de transformações de densidade propostas neste trabalho e proposta por Rezende (1997) e também da densidade básica obtida pelo método de imersão

A figura 24 permite visualizar que as densidades obtidas pelas equações de transformação apresentadas neste trabalho foram semelhantes às densidades obtidas pelas equações proposta por (REZENDE, 1997). As densidades básicas e a 12 % podem ser consideradas iguais baseando-se nas variações percentuais exibidas na tabela 7.

Salienta-se ainda que Rezende (1997) deduziu suas equações de transformação da densidade para os gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, enquanto que as equações deste trabalho foram deduzidas apenas para a espécie *E. grandis*, que apresentou melhor concordância para as variações percentuais e comparativas da densidade a 0 % determinada e calculada como foi apresentado na tabela 4.

6.5 Comportamento das características físicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*

Como a madeira não possui uma estrutura física uniforme, suas características físicas também não são uniformes, com isso a apresentação apenas dos valores médios das características físicas empobreceriam este trabalho que tem como um dos objetivos a caracterização física da madeira, portanto foram exibidas e discutidas as densidades médias dos tratamentos na tabela 6 e as variações das densidades da madeira na direção radial nas figuras 16, 17, 18, 19, 20 e 21.

A variação da densidade na direção axial está apresentada na figura 25, pode-se notar basicamente dois comportamentos, o primeiro válido para os tratamentos *H1, H2* e *H3*, mostra uma relação praticamente linear, onde a densidade se apresenta diretamente proporcional a altura da árvore. O segundo comportamento válido para os tratamentos *S1*, *C1* e *C2* apresenta um pico de alta densidade na base que diminui até um valor mínimo até o disco de 12,5 % e depois aumenta até o topo chegando a valores próximos ao da base.

O comportamento apresentado pela variação da densidade dos híbridos na direção axial foi atípico, diferenciando dos padrões de comportamentos apresentados pela literatura (PANSHIN; ZEEUW, 1970).

Comparando os dois comportamentos fica evidenciado aumento da densidade na direção radial e no sentido base-topo, com exceção dos tratamentos *S1, C1* e *C2* que apresentaram alta densidade na base.

Os comportamentos da densidade pontual e da ponderada nos discos dos tratamentos foram apresentados nas figuras 16, 17, 18, 19, 20 e 21. A tabela 8 e a figura 25 apresentam a média das densidades a 12 % dos discos na posição relativa da árvore e a densidade a 12 % média ponderada de cada tratamento.

Na tabela 8 pode-se notar que a densidade média ponderada da árvore está representada em diferentes localizações nas diferentes espécies. Para as espécies híbridas dos tratamentos *H1*, *H2* e *H3* a densidade média ponderada da árvore se mostrou próxima a 30 % da altura comercial. Para a espécie seminal e clonal dos tratamentos *S1*, *C1* e *C2* a densidade média ponderada da árvore se mostrou em dois pontos, entre a base e o *DAP* e em aproximadamente 50 % da altura comercial.

Tabela 8 Médias das densidades a 12 % dos discos na posição relativa da árvore de cada tratamento e a densidade a 12 % média ponderada de cada tratamento: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

Trat.	ρ_{12} dos discos na posição relativa na árvore						ρ_{12} média ponderada (kg/m^3)
	BASE (kg/m^3)	*DAP* (kg/m^3)	12,5 % (kg/m^3)	37,5 % (kg/m^3)	62,5 % (kg/m^3)	87,5 % (kg/m^3)	
S1	587,6	543,8	542,7	550,7	569,9	610,4	558,84
C1	591,2	534,0	526,6	538,2	544,6	587,6	542,04
C2	550,5	487,3	476,7	496,7	545,2	574,8	505,87
H1	616,9	626,8	615,2	664,0	674,6	680,7	650,65
H2	642,0	644,1	633,9	660,1	693,4	688,1	661,13
H3	647,4	635,4	632,0	667,2	676,8	700,1	661,08

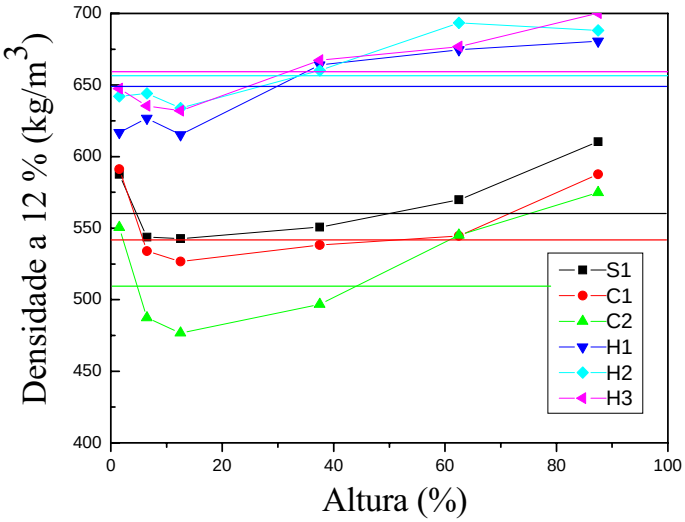


Figura 25 Variação da densidade a 12 % ao longo da direção axial na altura da árvore e a densidade média do tratamento para os seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

Para a apresentação dos resultados da retratibilidade pontual e ponderada da madeira dos seis tratamentos, optou-se por escolher a mesma árvore representativa da apresentação da densidade pontual e ponderada. As figuras 26, 27, 28, 29, 30 e 31 apresentam a retratibilidade volumétrica máxima percentual.

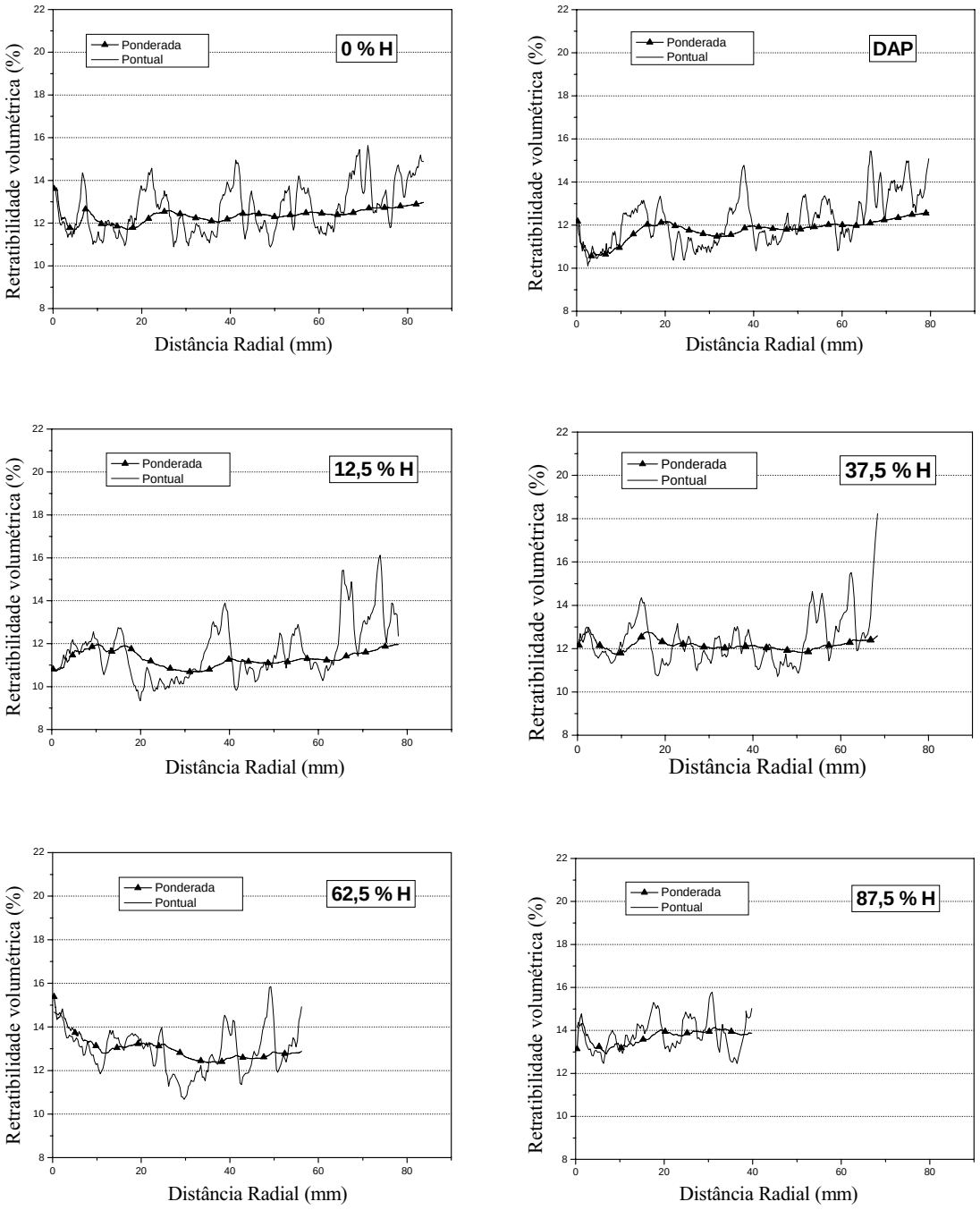


Figura 26 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore seminal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **S11**

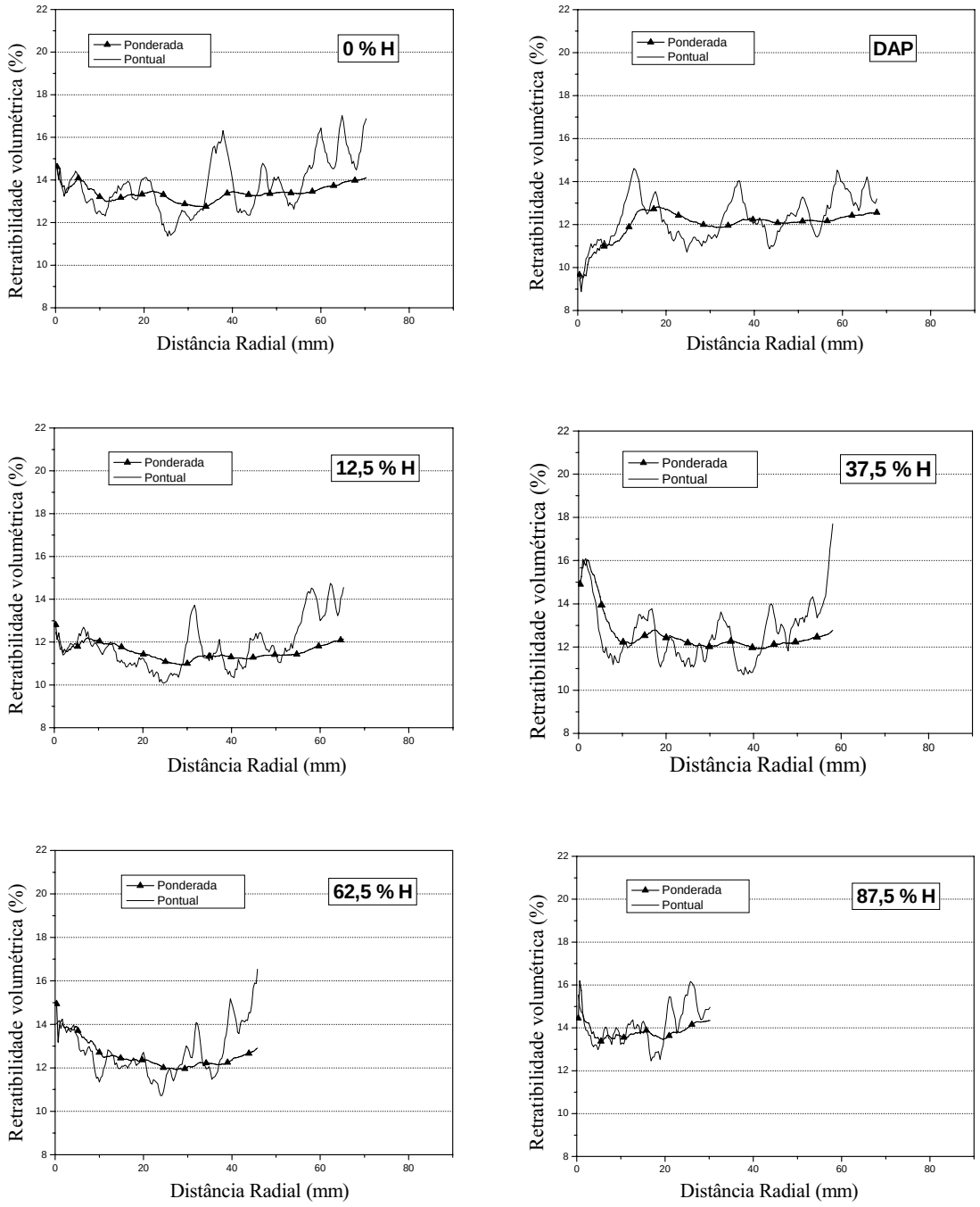


Figura 27 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C16**

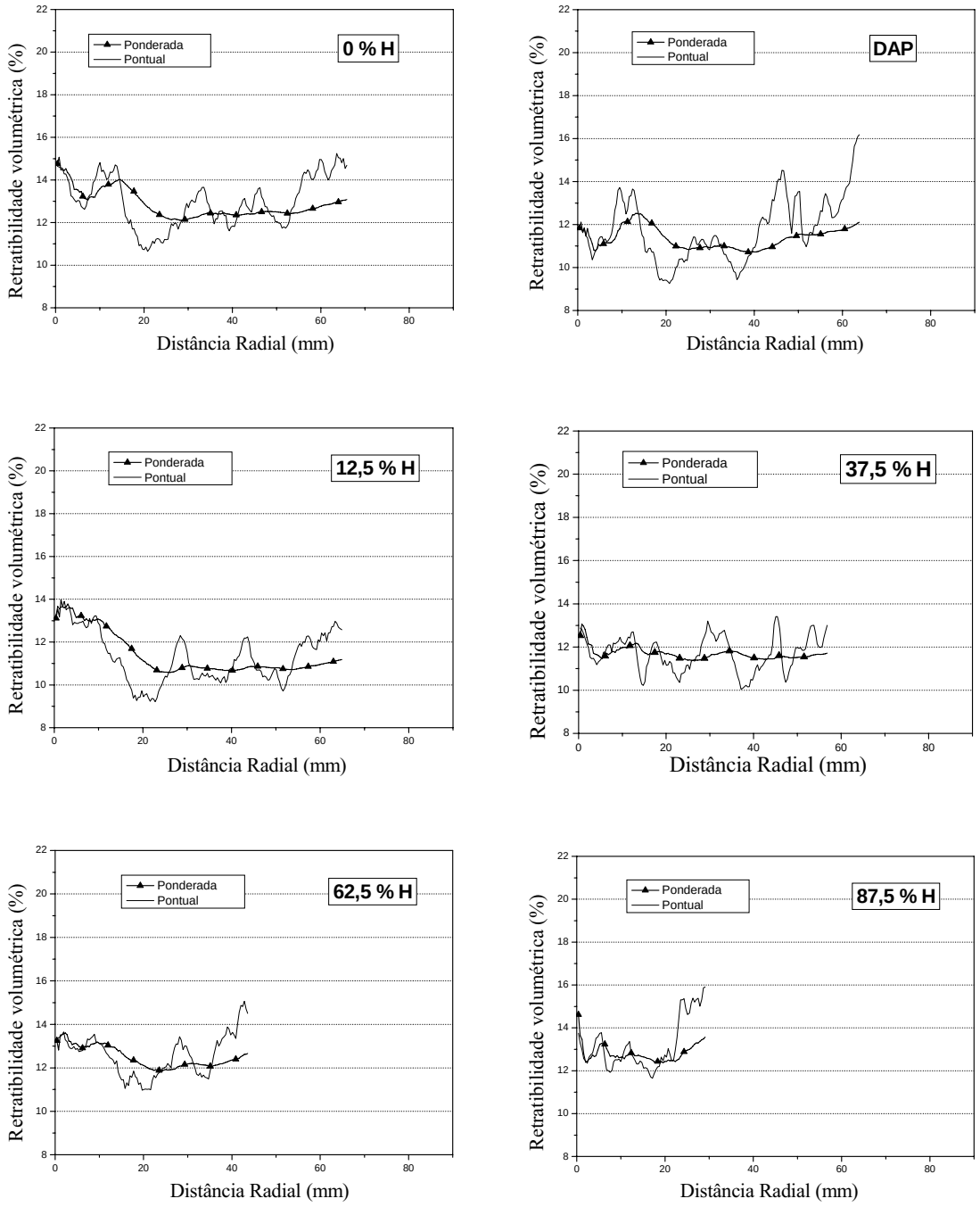


Figura 28 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C26**

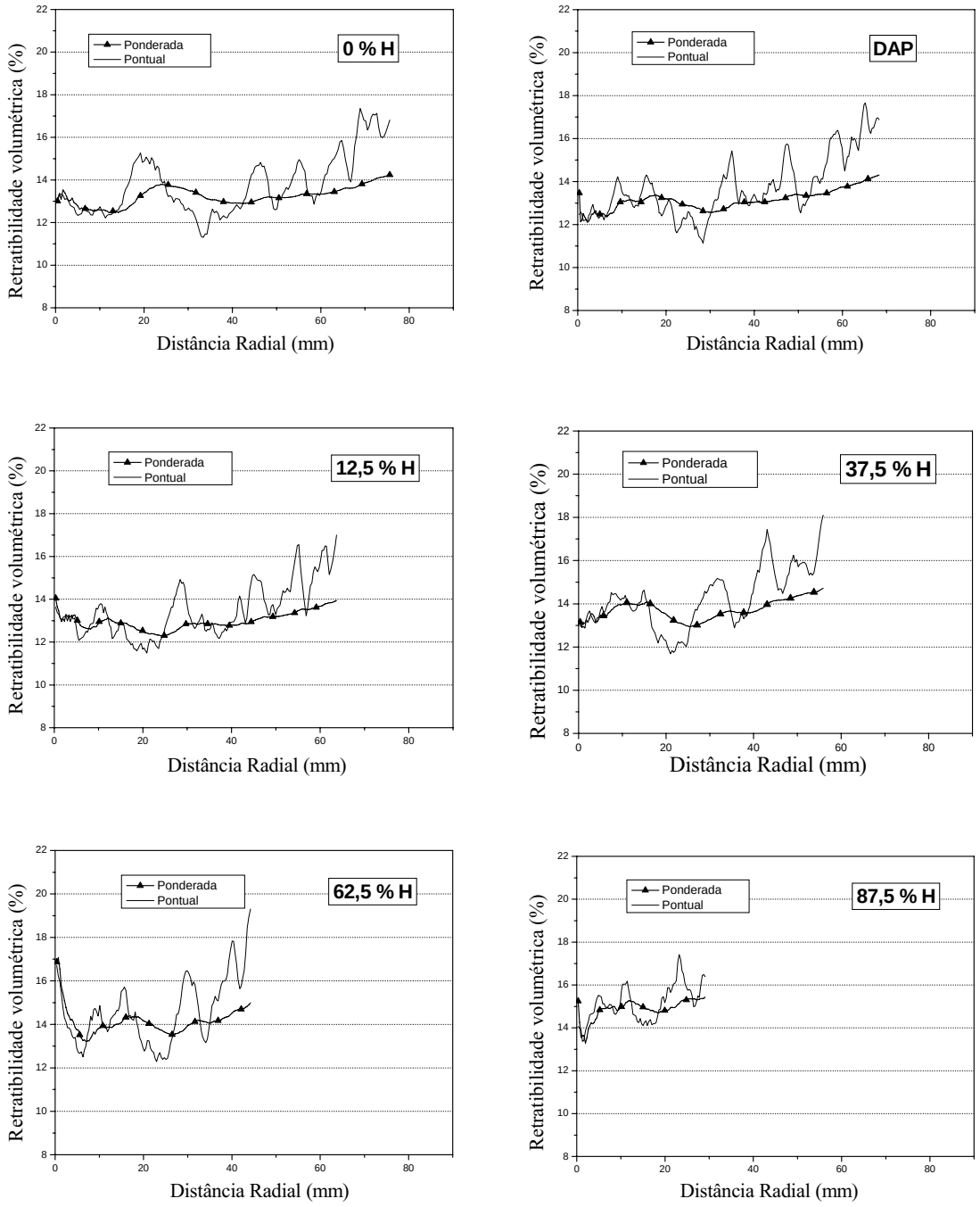


Figura 29 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H17**

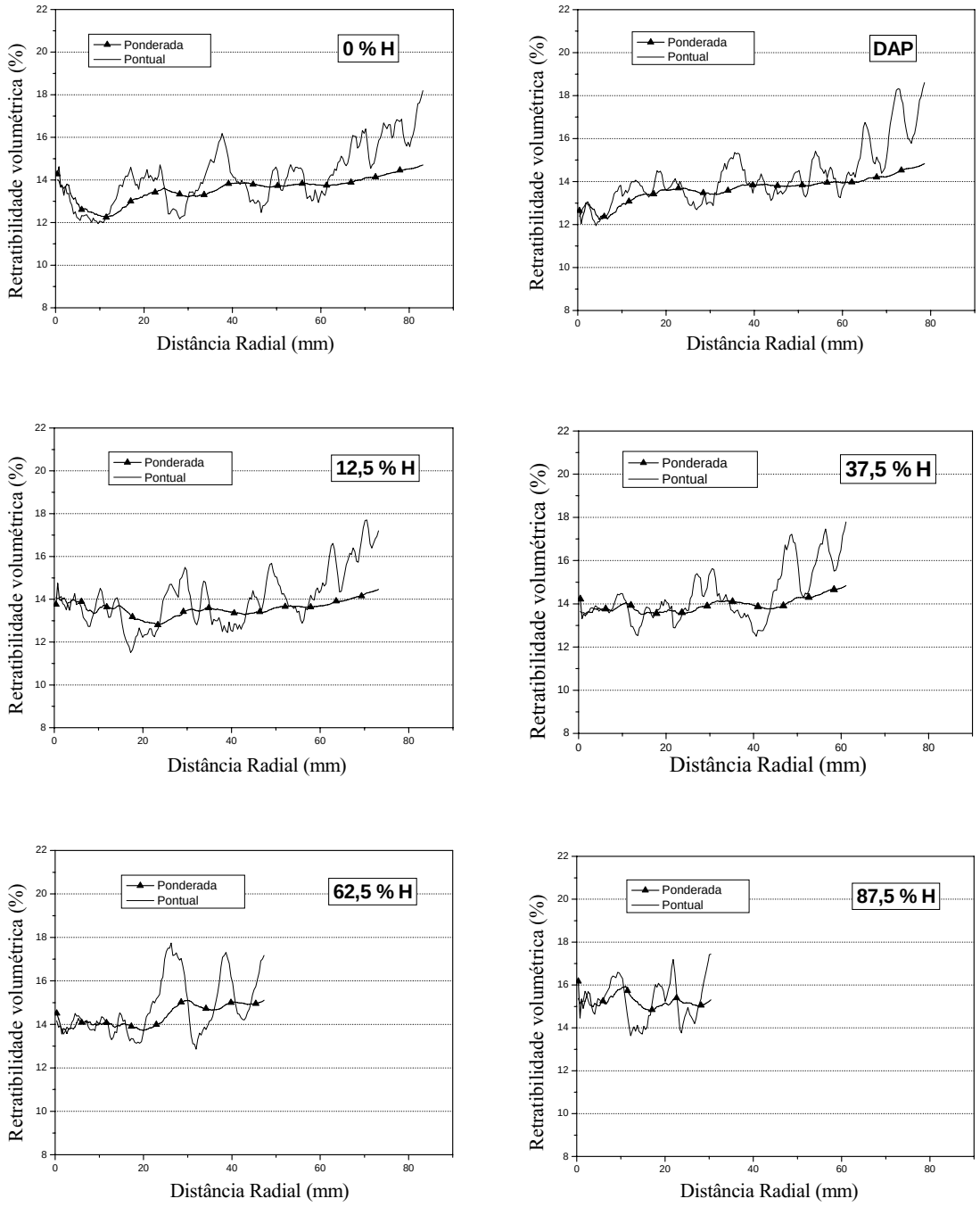


Figura 30 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H29**

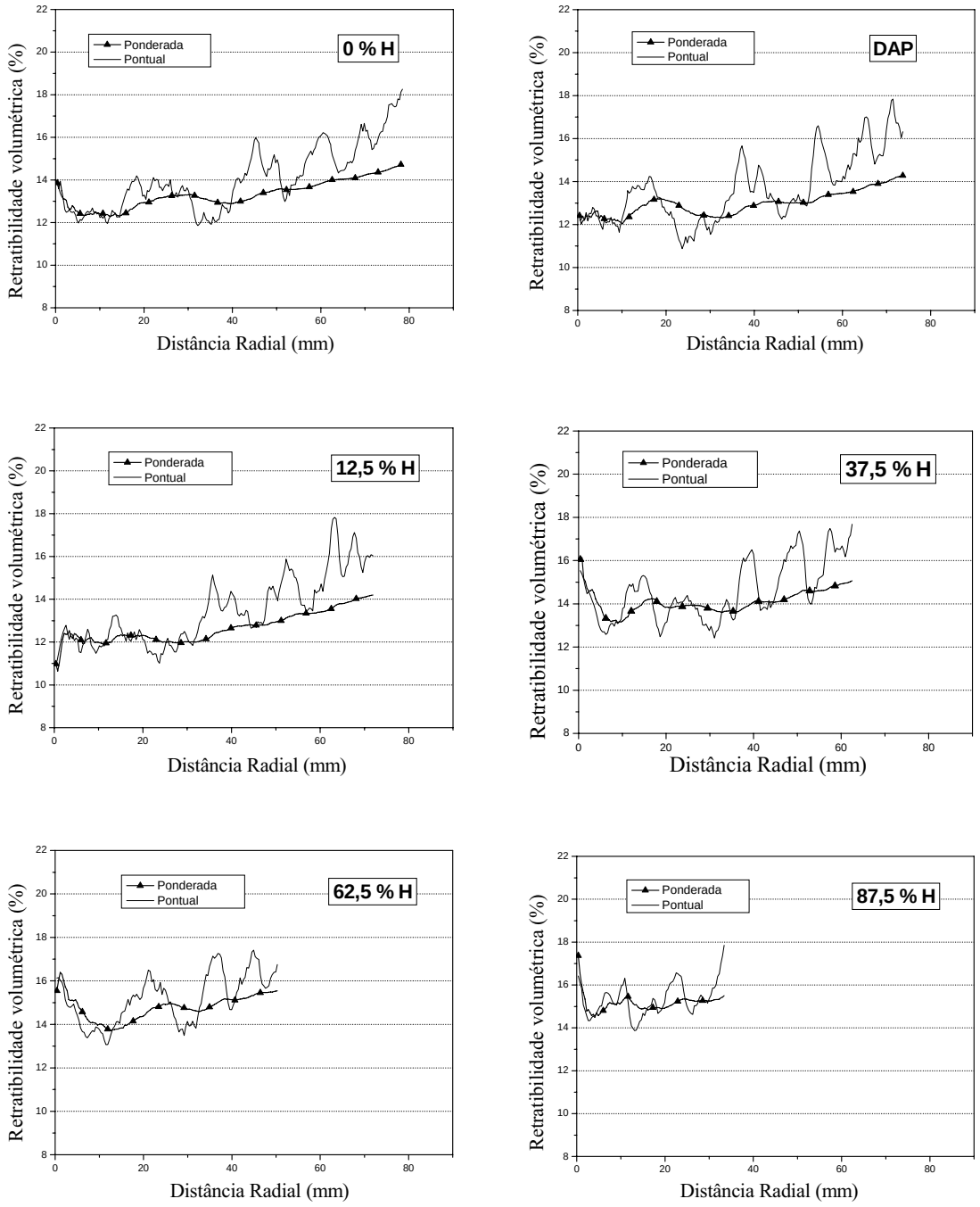


Figura 31 Variações da retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H32**

As figuras 26, 27, 28, 29, 30 e 31 apresentam a retratibilidade volumétrica máxima percentual pontual e ponderada em função da distância radial dos seis discos amostrados em uma árvore de cada tratamento, sendo esta árvore a mesma utilizada para visualizar o comportamento da densidade.

A determinação da retratibilidade volumétrica máxima foi realizada a partir da densidade básica utilizando a equação de regressão linear da figura 15, que mostra que a retratibilidade é diretamente proporcional à densidade básica. As figuras 26, 27, 28, 29, 30 e 31 tiveram como principal objetivo mostrar que a retratibilidade volumétrica máxima varia consideravelmente na madeira.

As figuras 29, 30 e 31 apresentaram valores da retratibilidade volumétrica pontual mais elevados nas extremidades dos discos, proporcionando um aumentando na retratibilidade volumétrica da madeira em comparação com as figuras 26, 27 e 28. Considerando que o processo de troca de água da madeira com o ambiente inicia-se também nas extremidades do disco, estes aspectos devem ser analisados com detalhes quando se deseja estabelecer um programa de secagem para a madeira.

Para a apresentação dos resultados da porosidade pontual e ponderada da madeira dos seis tratamentos, optou-se por escolher a mesma árvore representativa da apresentação da densidade pontual e ponderada. As figuras 32, 33, 34, 35, 36 e 37 apresentam a porosidade percentual da madeira seca.

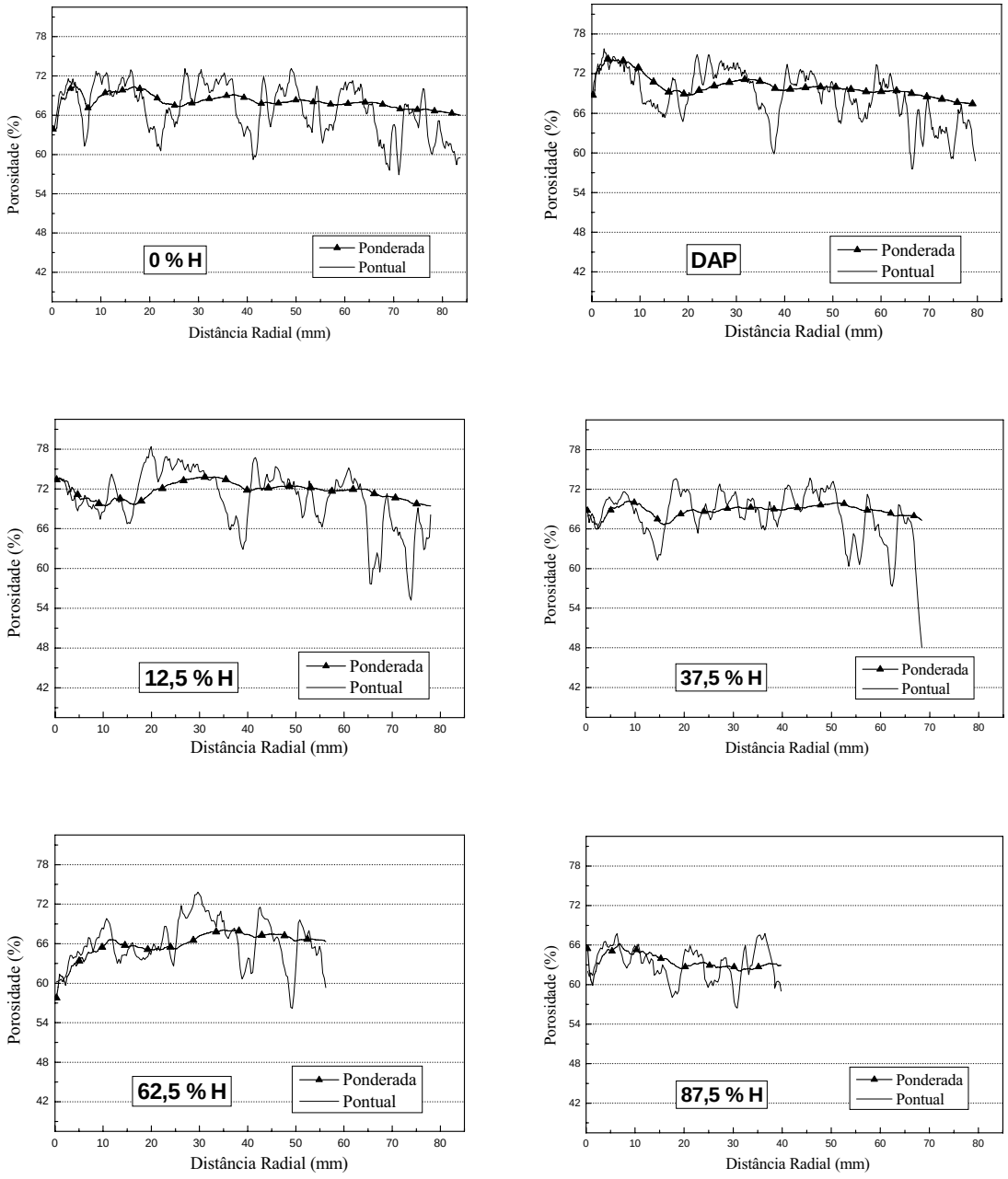


Figura 32 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore seminal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **S11**

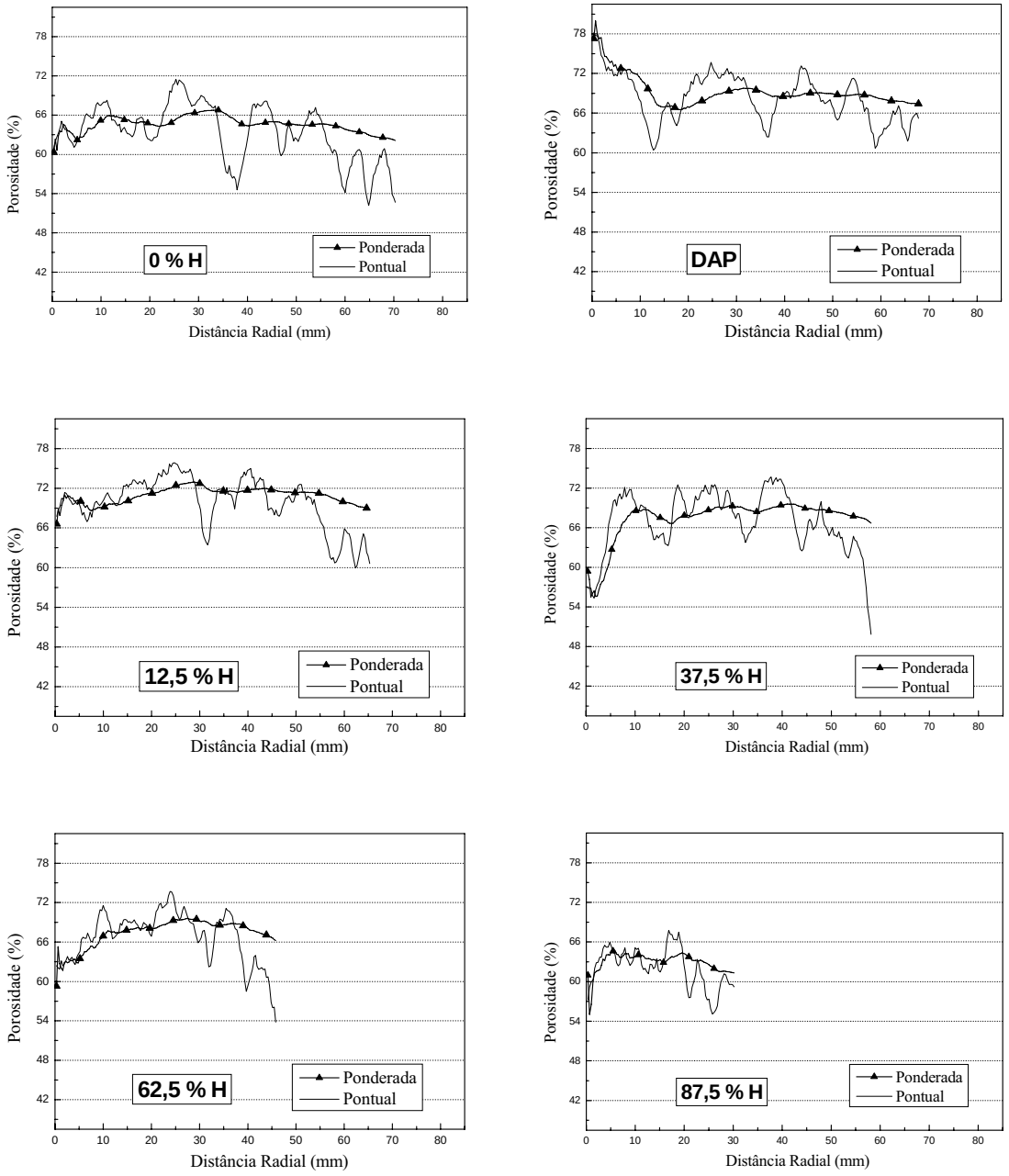


Figura 33 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C16**

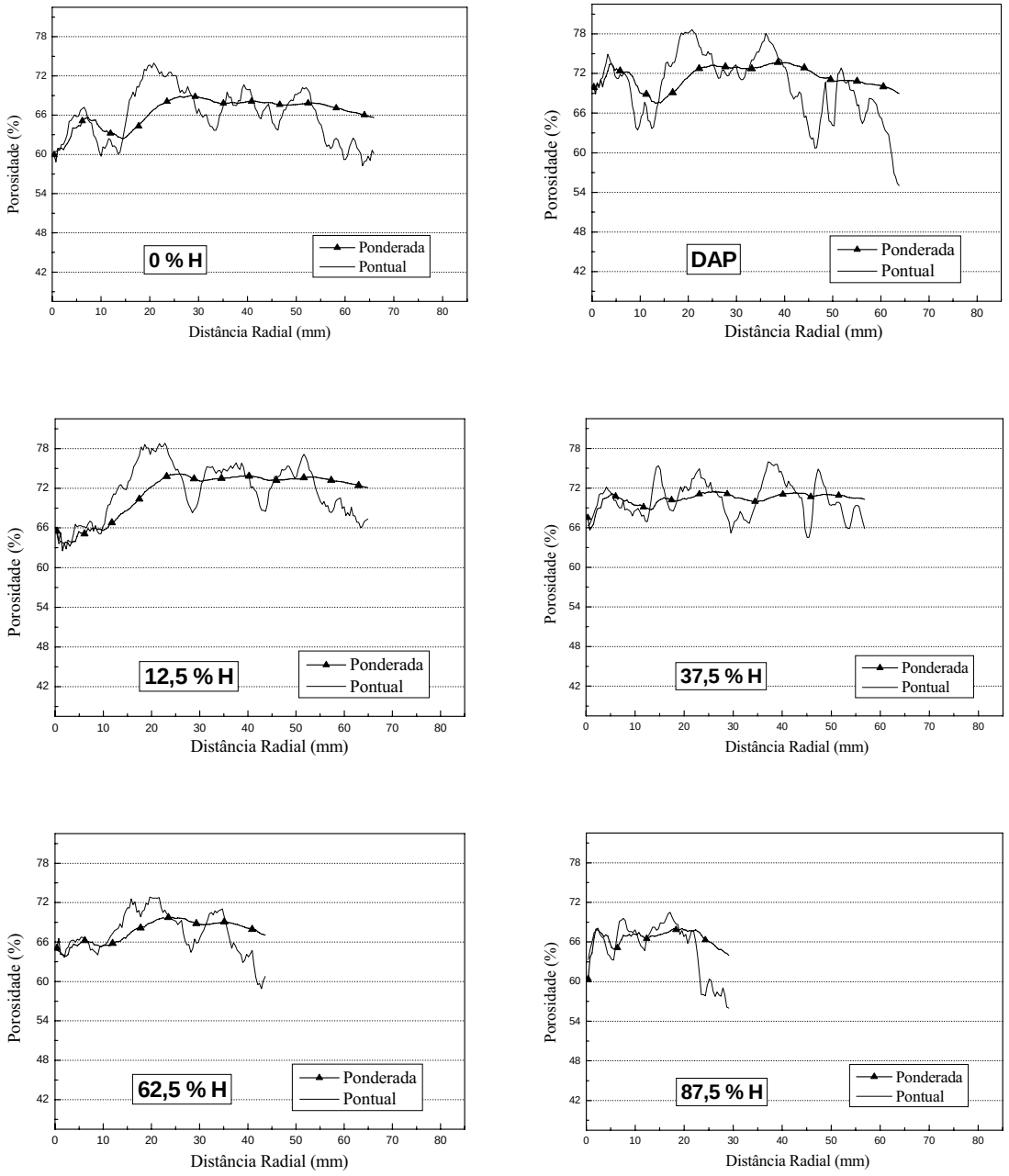


Figura 34 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal da espécie *Eucalyptus grandis*, com número de identificação **C26**

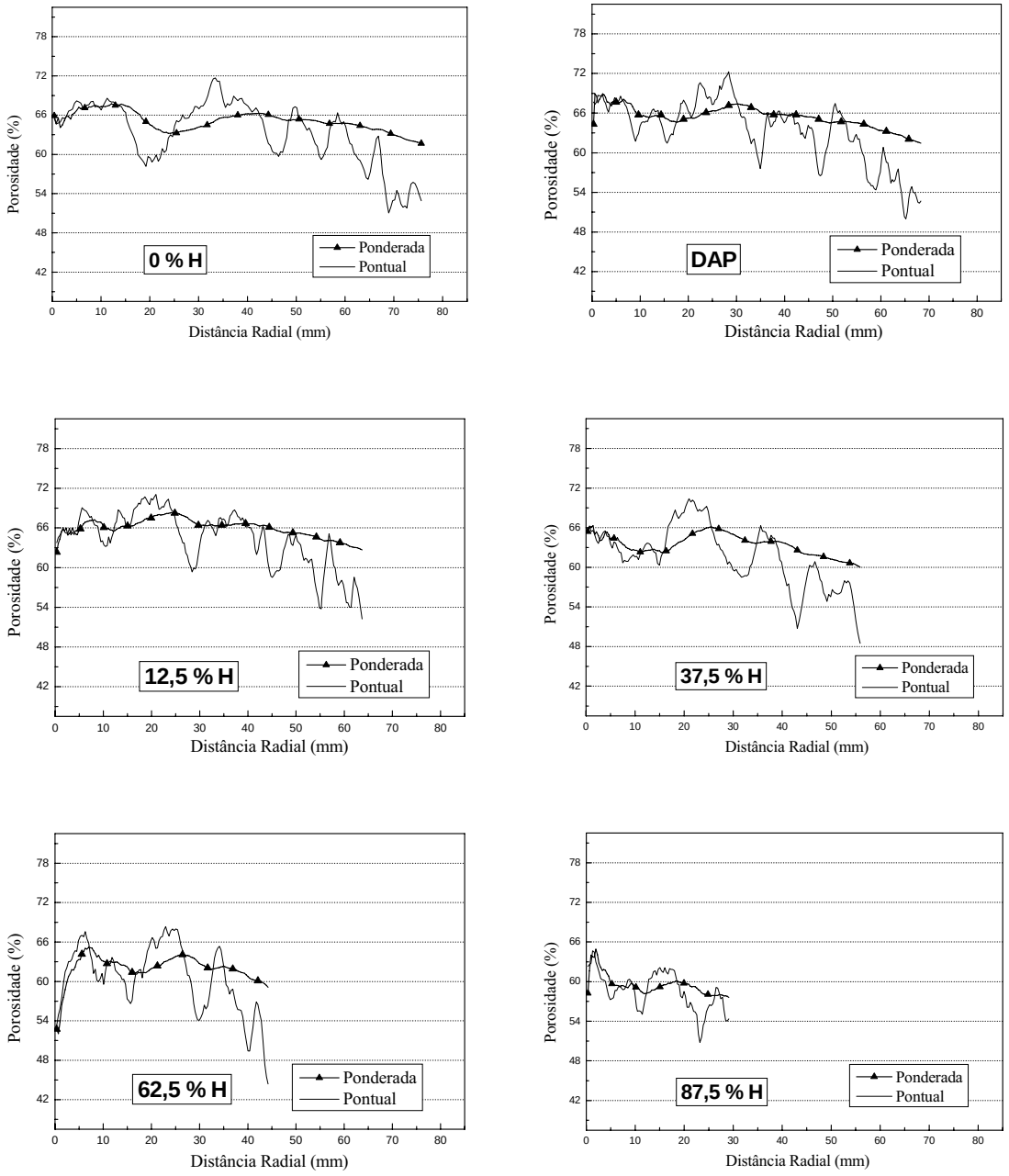


Figura 35 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H17**

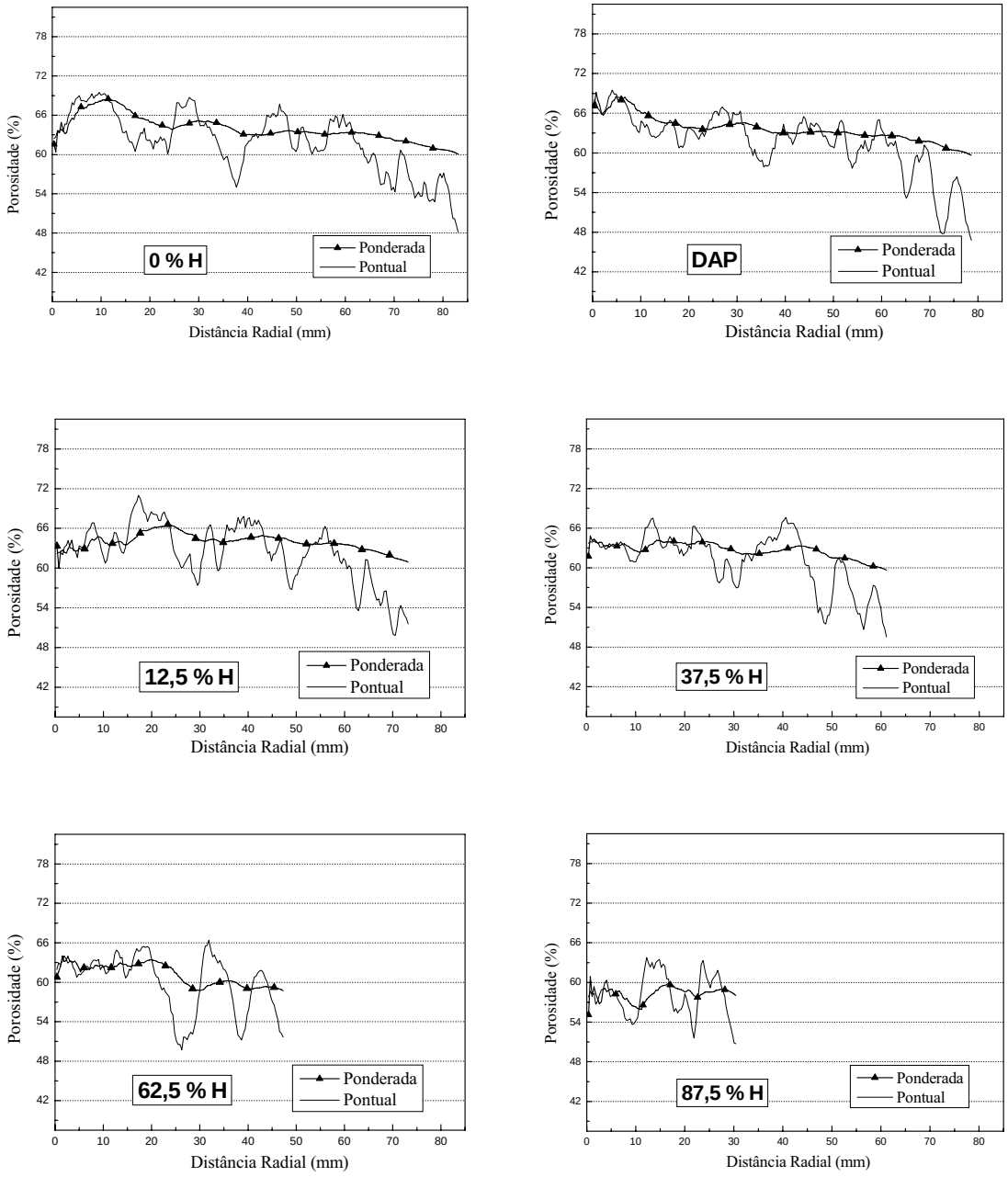


Figura 36 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H29**

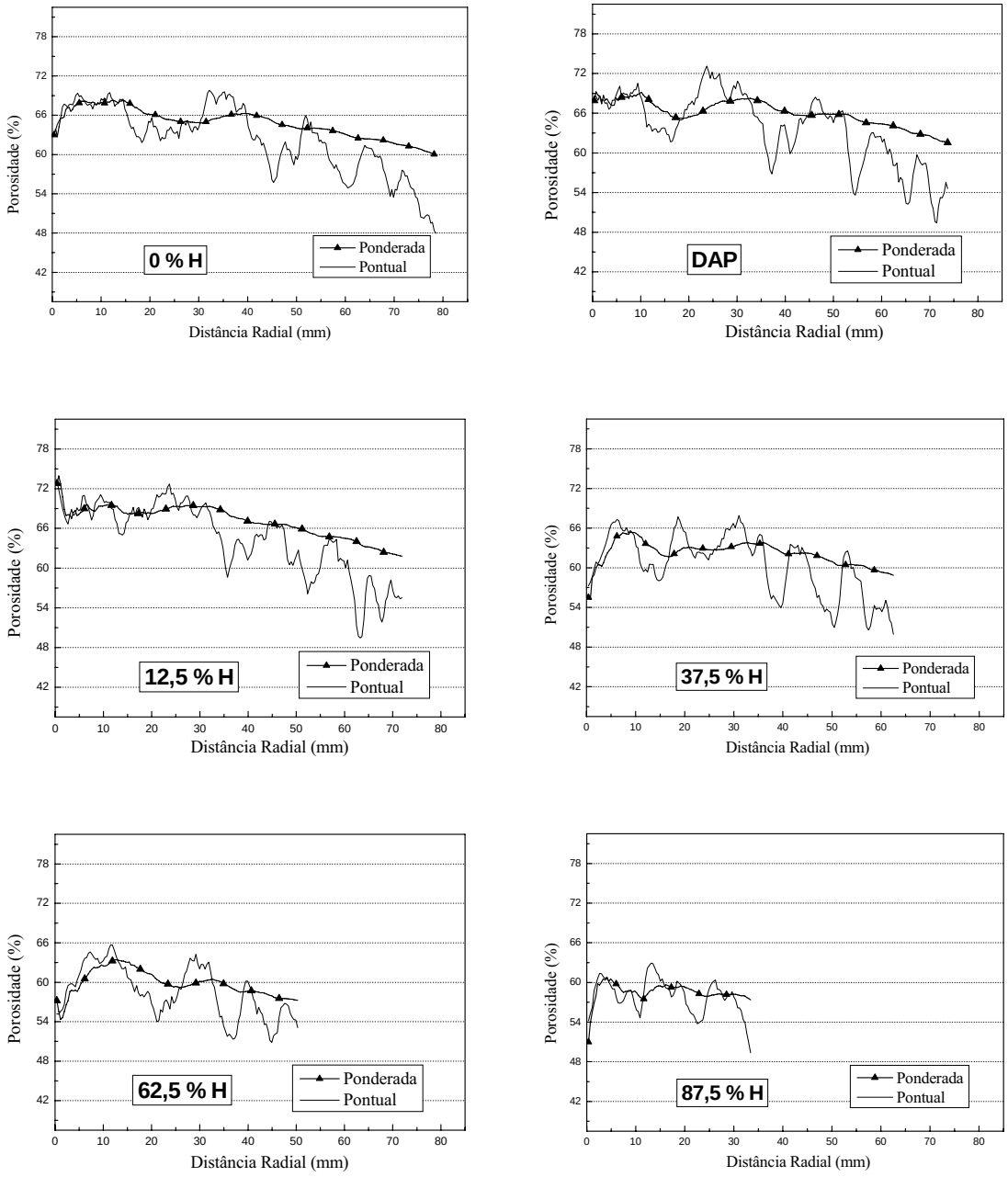


Figura 37 Variações da porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial nos discos localizados na base, *DAP*, 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da altura comercial da árvore clonal híbrida das espécies *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*, com número de identificação **H32**

As figuras 32, 33, 34, 35, 36 e 37 exibem a porosidade percentual pontual e ponderada da madeira seca em função da distância radial dos discos, estes valores foram calculados a partir da densidade a 0 % utilizando a equação 33. Estas figuras tiveram como o objetivo apresentar as variações da porosidade na madeira.

A capacidade de uma peça de madeira em absorver e reter água está diretamente ligada à porosidade, portanto esta propriedade física da madeira é importante do ponto de vista qualitativo. Outro aspecto que deve ser enfatizado com relação à porosidade da madeira é a sua capacidade de deterioração por ataques de fungos, que procuram regiões de máxima porosidade na madeira. Portanto, ainda mais importante que conhecer a porosidade média de uma peça de madeira é conhecer sua porosidade máxima como pode ser observado nas figuras 32, 33, 34, 35, 36 e 37.

6.6 Comparação da produtividade da madeira de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*

A partir da tabela 7 foi construída figura 38 apresenta os valores das densidades dos seis tratamentos de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* obtidas a partir das equações 43, 47 e 48.

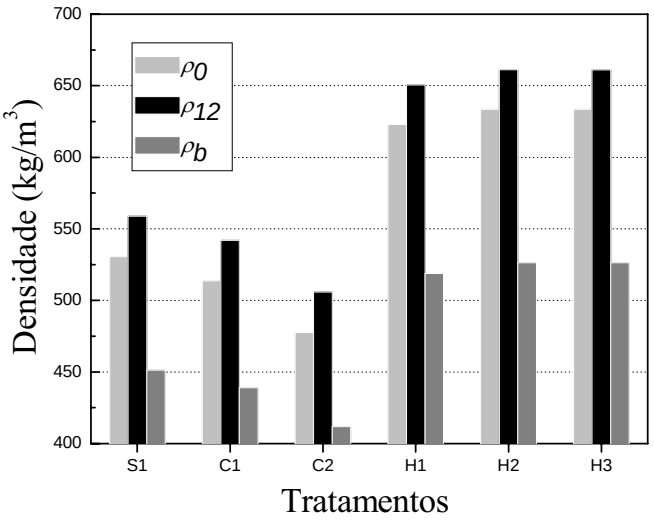


Figura 38 Apresentação das densidades a 0 %, a 12 % e básica do lenho para os seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

A figura 38 ilustra as variações das densidades em função dos tratamentos estudados. Os tratamentos híbridos *H1*, *H2* e *H3* apresentaram maiores valores da densidade comparados com os demais, e podem ser observados de maneira evidente nesta figura. Este resultado foi extremamente positivo e destaca sua importância para o reflorestamento no Brasil.

A tabela 9 e a figura 39 apresentam a produção percentual de casca na massa da árvore dos seis tratamentos de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* e as densidades básicas com e sem casca.

Tabela 9 Percentual médio de casca (θ) nas árvores e suas densidades básicas com (ρ_{bcc}) e sem casca (ρ_{bsc}) para os seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

Tratamentos	θ (%)	ρ_{bcc} (kg/m^3)	ρ_{bsc} (kg/m^3)
S1	10,1	435,4	451,3
C1	9,3	424,6	439,0
C2	9,4	398,3	411,9
H1	7,3	505,4	518,8
H2	7,0	513,5	526,4
H3	6,3	514,8	526,3

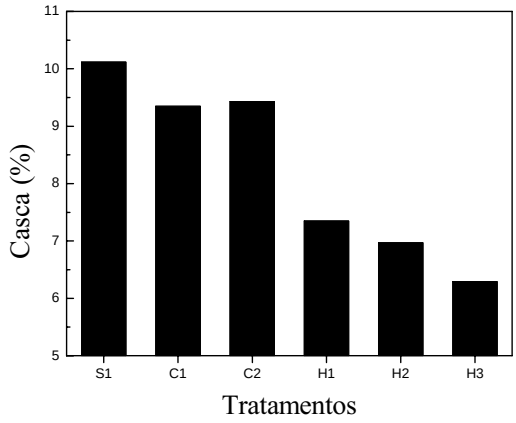


Figura 39 Produção percentual de casca na massa da árvore dos seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

Os tratamentos híbridos *H1*, *H2* e *H3* possuem baixa porcentagem de casca em relação aos demais como mostra a figura 39 do percentual de casca em função dos tratamentos. Isso pode ser um fator decisivo na opção da madeira com casca ou sem casca no processo industrial, levando em consideração a qualidade do produto final.

O poder calorífico superior do lenho ou da casca de todos os tratamentos não apresentaram diferenças, todos ficaram em torno do valor médio de 4673 kcal/kg.

Os incrementos médios anuais de volume, de massa e de energia com e sem casca dos seis tratamentos de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 Incrementos médios anuais de volume, de massa e de energia com e sem casca dos seis tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

Trat.	*IMAV*cc (m^3/ha.ano)	*IMAV*sc (m^3/ha.ano)	*IMAM*cc (ton/ha.ano)	*IMAM*sc (ton/ha.ano)	*IMAE*cc (Gcal/ha.ano)	*IMAM*sc (Gcal/ha.ano)
S1	44,4	41,5	19,3	18,7	90,4	87,4
C1	41,5	38,7	17,6	17,0	82,3	79,4
C2	55,1	51,4	22,0	21,2	102,6	99,0
H1	58,8	54,2	29,7	28,1	138,9	131,3
H2	62,0	57,1	31,9	30,1	148,9	140,5
H3	56,1	51,7	28,9	27,2	135,1	127,2

As figuras 40, 41 e 42 exibem os *IMAV, IMAM e IMAE* com e sem casca respectivamente dos seis tratamentos.

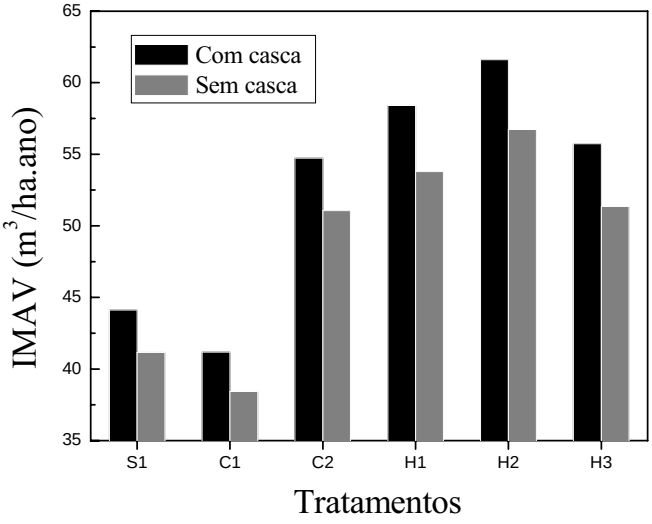


Figura 40 Incrementos médios anuais de volume verde (*IMAV*) com e sem casca dos tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

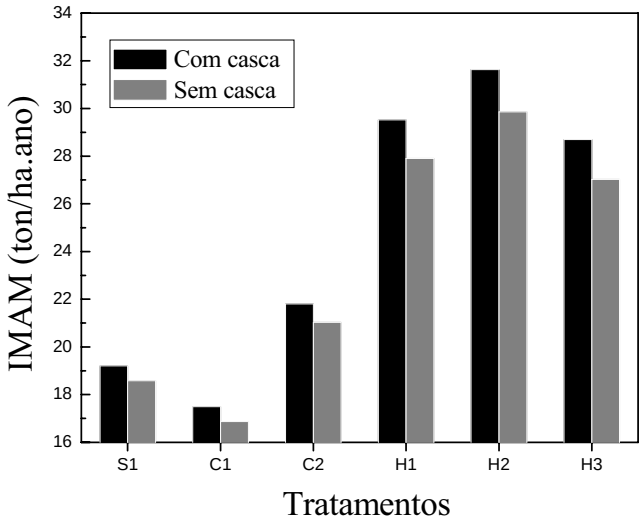


Figura 41 Incrementos médios anuais de massa seca (*IMAM*) com e sem casca dos tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

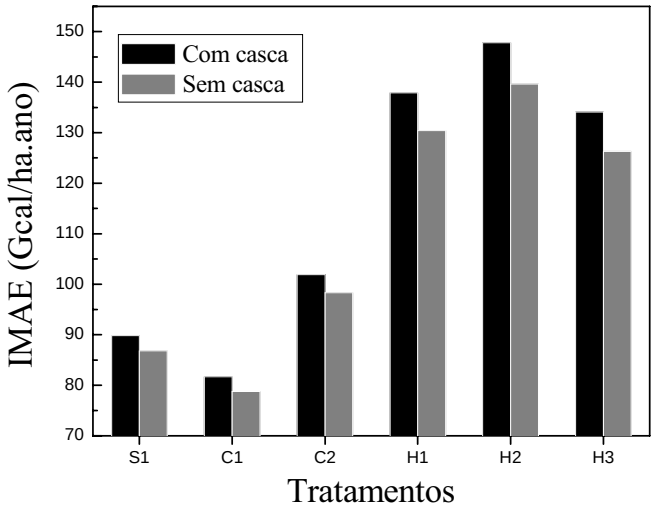


Figura 42 Incrementos médios anuais de energia (*IMAE*) com e sem casca dos tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

As figuras 40, 41 e 42 mostram a grande vantagem produtiva dos híbridos *H1*, *H2* e *H3* em comparação ao seminal e aos clones *S1*, *C1* e *C2*, tanto em volume, massa e energia, evidenciando o aspecto mais importante que é a sua produtividade média anual.

A figura 43 mostra a relação da densidade básica com casca em função da produtividade de volume verde com casca da madeira dos seis tratamentos de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* do reflorestamento.

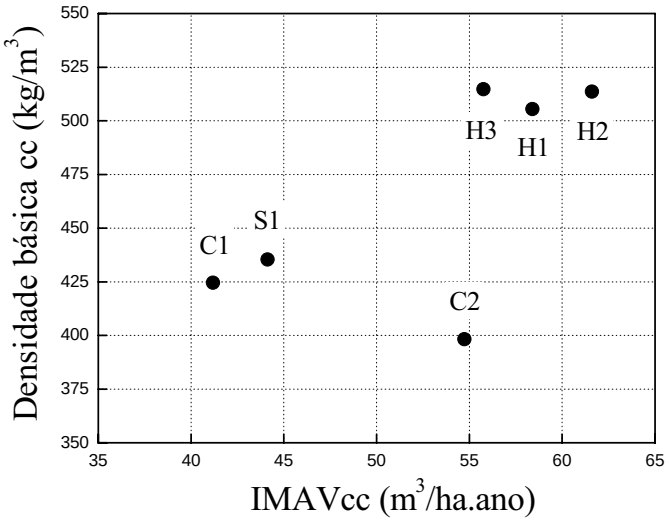


Figura 43 Densidade básica da madeira com casca em função do incremento médio anual de volume com casca (*IMAVcc*) dos tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

A figura 44 apresenta a relação da produtividade de massa seca com casca em função da produtividade de volume verde com casca da madeira dos seis tratamentos das espécies de *Eucalyptus grandis* e híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* do reflorestamento.

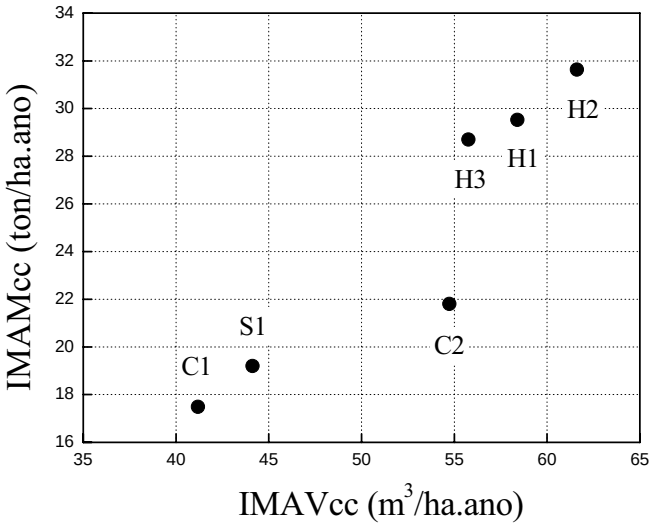


Figura 44 Incremento médio anual de massa com casca (*IMAMcc*) em função do incremento médio anual de volume com casca (*IMAVcc*) dos tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*

Enfim as figuras 43 e 44 apresentam os resultados mais importantes deste trabalho, demonstrando que a clonagem da espécie *E. grandis*, pode ser um procedimento com poucas vantagens na produtividade média anual e que a clonagem aliada à hibridização pode ser uma opção muito mais produtiva para reflorestamentos no Estado de São Paulo.

7 CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos e o desenvolvimento do trabalho foi obtido as seguintes conclusões.

Conclusões da metodologia:

1- A retratibilidade volumétrica da madeira de *Eucalyptus grandis* pode ser determinada em qualquer umidade abaixo de 25 % a partir da equação empírica $R_v = (2{,}44 + 27{,}5\rho_b)(1 - 0{,}03U_{bs})$;

2- As densidade da madeira podem ser relacionadas, com bastante precisão, a partir da equação $\frac{\rho_u}{\rho_b} = \frac{100 + U_{bs}}{100 - R_v}$, para densidades úmidas ρ_u menores que 25 %;

Conclusões da caracterização física:

3- Os híbridos apresentaram aumento da densidade durante o crescimento, e conseqüentemente, maior variação da densidade na direção radial comparado aos outros tratamentos;

4- A TARG do ^{241}Am mostrou maior detalhamento da densidade da madeira e a amostragem de discos na árvore a 12,5 %, 37,5 %, 62,5 % e 87,5 % da *AC* evitou erros nos discos amostrados nas extremidades e reduziu os discos amostrados;

5- A densidade da madeira dos tratamentos na direção axial aumentou da base para o topo, com exceção do seminal e dos clones de *E. grandis* que apresentaram também alta densidade somente na base. O ponto ideal para a amostragem da densidade da árvore foi de 30 % da *AC* para os híbridos e 50 % da *AC* para os outros tratamentos. A retratibilidade apresentou mesma variação da densidade e a porosidade apresentou variação inversa à da densidade;

Conclusão da produtividade:

6- A clonagem de híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* obteve em média densidades 23 % maior, 3 % a menos de casca e maior produtividade em volume, massa e energia quando comparados ao seminal e clone de *E. grandis*.

A conclusão geral do trabalho foi que a caracterização física da madeira pela técnica de atenuação da radiação gama do ^{241}Am possibilita a obtenção de detalhes sobre o comportamento das características físicas da madeira. E também, que a produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* é maior quando comparado com seminal e clone e *E. grandis*.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALZETE, S. B. A.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S. M. S. Longitudinal variation of the wood basic density of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. and *E. grandis x urophylla* clones. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p. 87-95, 2005.

AMARAL, A. C.; FERREIRA, M.; COUTO, H. T. Z. Métodos de avaliação da densidade básica da madeira de populações de pinheiros tropicais. **IPEF**, Piracicaba, n. 15, p. 47-67, 1977.

ANDRADE, A. M.; CARVALHO, L. M. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do Estado do Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 5, n. 1, p. 24-42, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190/97**: Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BACHA, C. J. C.; BARROS, A. L. M. Reforestation in Brazil: recent evolution and the future. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 66, p. 191-203, 2004.

BENJAMIN, C. A.; BALLARIN, A. W. Correlações entre a densidade básica média ponderada da madeira e a densidade básica em alguns pontos ao longo do tronco de árvores de *E. saligna, E. grandis*, e híbrido *E. grandis x E. urophylla*. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 1-12, 2003.

BRASIL, M. A. M.; VEIGA, R. A.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica nas secções transversais do caule da base do tronco para a copa de Eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n. 15, p. 73-82, 1977.

BRASIL, M. A. M.; MONTAGNA, R. G.; COELHO, L. C. C.; VEIGA, R. A. A. Densidade básica da madeira de *Pinus elliottii* em três regiões do Estado de São Paulo. **Silvicultura**, São Paulo, v. 2, n. 16, 1980.

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da densidade do carvão vegetal por atenuação da radiação gama. **IPEF**, Piracicaba, n. 39, p. 17-20, 1988.

CRUZ, C. R.; LIMA, J. T.; MUNIZ, G. I. B. Within trees and between clones variations of the wood physical and mechanical properties of *Eucalyptus* hybrids. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 64, p. 33-47, 2003

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.

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.; MORA, E.; MENOCHELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. **O papel**, São Paulo, v. 53, n. 5, p. 35-40, 1992.

HASELEIN, C. R.; LOPES, M. C.; SANTINI, E. J.; LONGHI, S. J.; ROSSO, S.; FERNANDES, D. L. G.; MENEZES, L. F. Technological characteristics of wood of selected trees of *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 145-155, 2004.

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

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

KARSULOVIC, J. T.; LEON, L. A.; DINATOR, M. I. The use of linear attenuation coefficients of gamma radiation for detecting knots in *Pinus Radiata*. **Forest Products Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 73-6, 1999.

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

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

LISI, C. S. **Atividade de ^{14}C do "Fallout" e razão isotópica de $^{13}C/^{14}C$ em anéis de crescimento de árvores de clima tropical e subtropical do Brasil**. 2000. 111f. Tese (Doutorado em Ciências / Energia Nuclear na Agricultura) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

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

MONTANHEIRO, M. N. S.; NASCIMENTO FILHO, V. F.; PINTO, F. A. Introdução à espectrometria gama. **Boletim Didático do CENA**, Piracicaba, n. 021, p. 1-17, 1977.

NEWLIN, J. A. **The relation of the shrinkage and strength properties of wood to its specific gravity**. Washington: U.S. Departament of Agriculture, 1919. (Bulletin, 676).

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 381-5, 2003.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. C. F.; ABREU, H. S. Métodos e técnicas de diagnose de identificação dos anéis de crescimento de árvores tropicais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 9, n. 1, p. 165-75, 2002.

PALERMO, G. P. M. **Qualidade da Madeira de árvores resinadas de *Pinus elliottii* Engelm**. 2003. 137f. 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.

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

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

REZENDE, M. A.; FERRAZ, E. S. B. Densidade anual da madeira de *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 30, p. 37-41, 1985.

REZENDE, M. A.; FERRAZ, E. S. B. Incrementos anuais de volume, massa, e idade ideal de corte para *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 32, p. 43-8, 1986.

REZENDE, M. A.; FERRAZ, E. S. B. Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. **IPFE,** Piracicaba, n. 39, p. 33-40, 1988.

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.; SAGLIETTI, J. R. C.; CHAVES, R.; Specific gravity variation of *Eucalyptus grandis* wood at 8 years old in function of a different productivity indexes. **Scientia Forestalis**, 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. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 29, n. 1/2, p. 67-84. 1999.

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

REZENDE, M. A.; COSTA, V. E. Relação da densidade básica da casca e do lenho da espécie *Eucalyptus grandis*. (Trabalho ainda não publicado). 2006.

SCHWEINGRUBER, F. H. **Tree rings, basics and applications of dendrochronology**. Dordrecht: Reidel, 1988. 276 p.

SILVA, J. C.; CABALLEIRA LOPEZ, A. G.; OLIVEIRA, J. T. S. Influência da idade na resistência natural da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden ao ataque de cupim de madeira seca (*Cryptotermes brevis*). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 583-7, 2004a.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINTER JR., S.; MATOS, J. L. M. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 1, 2004b.

SOUZA, V. R.; CARPIM, M. A.; BARRICHELLO, L. E. G. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetros e posições em árvores de *Eucalyptus grandis* e *E. salígna*. **IPEF**, Piracicaba, n. 33, p. 65-72, 1986.

STROOSNIJDER, L.; DE SWART, J.G. Column scanning with simultaneous use of ^{241}Am and ^{137}Cs gamma radiation. **Soil Science**, Baltimore, v. 118, n. 2, p. 61-69. 1974.

SHIMOYAMA, V.R.S.; BARRICHELO, L.E.G. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. **Série técnica IPEF**, Piracicaba, v. 6, n. 20, p.1-22, 1989.

THIERSCH, C. R. **Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para plantios de clones de *Eucalyptus sp***. 2002. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal / Florestas de Produção) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

VALE, A. T., MOURA, V. P. G., MARTIANS, I. S. et al. Densidade básica média em função da produtividade de penetração do "Pilodyn" e da classe diamétrica e variação axial da

densidade básica em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden". **Revista árvore**, Viçosa, v. 19, p. 80-91, 1995.

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

ZOBEL, .B. J.; TALBERT, J. **Aplied Forest: tree in provement**. New York: John Wiley, 1984.