



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JOÃO GABRIEL MISSIA DA SILVA

**APLICAÇÃO DA RESISTOGRAFIA NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE E
UMIDADE DA MADEIRA EM ÁRVORES JOVENS DE EUCALIPTO**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2019

JOÃO GABRIEL MISSIA DA SILVA

**APLICAÇÃO DA RESISTOGRAFIA NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE E
UMIDADE DA MADEIRA EM ÁRVORES JOVENS DE EUCALIPTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre
Coorientador: José Tarcísio da Silva Oliveira

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S586a Silva, João Gabriel Missia da, 1988-
Aplicação da resistografia na estimativa da densidade e
umidade da madeira em árvores jovens de eucalipto / João
Gabriel Missia da Silva. - 2019.
104 f. : il.

Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre.

Coorientador: José Tarcísio da Silva Oliveira.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias.

1. Eucalyptus. 2. Características de crescimento de árvores.
3. Propriedades físicas da madeira. 4. Resistógrafo. 5.
Profundidade de perfuração. I. Vidaurre, Graziela Baptista. II.
Oliveira, José Tarcísio da Silva. III. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV.
Título.

CDU: 630*38

**APLICAÇÃO DA RESISTOGRAFIA NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE E UMIDADE
DA MADEIRA EM ÁRVORES JOVENS DE EUCALIPTO**

João Gabriel Missia da Silva

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 28 de fevereiro de 2019

Rejane Costa Alves

Profª. Drª. Rejane Costa Alves (Examinadora externa)
Universidade Federal do Espírito Santo

Dr. Leif Nutto

Dr. Leif Nutto (Examinador externo)
Unique forestry and land use

Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho (Examinador externo)
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira

Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira (Coorientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

Profª. Drª. Graziela Baptista Vidaurre

Profª. Drª. Graziela Baptista Vidaurre (Orientadora)
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela graça da vida, saúde e proteção ao longo desta jornada.

A Ufes, especialmente ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, pela minha formação profissional, oportunidades e pela estrutura para a realização desta pesquisa.

À Capes pela concessão da bolsa-auxílio. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À empresa Fibria S. A., atual Suzano S. A., pela doação do material e condições para a realização desta pesquisa. Em especial, ao pesquisador Eduardo Campinhos pela disponibilidade e apoio para que este projeto tenha sido realizado.

À minha esposa Keilla Lupin, pelo amor, carinho, companheirismo, incentivo, ajuda, pela paciência nos momentos que estive distante ao longo deste trabalho e por fazer do nosso pequeno lar, o melhor lugar do mundo.

Aos meus pais, João Batista e Célia Maria, pelo amor incondicional, educação, inspiração e incentivo a buscar o conhecimento, sem esquecer a humildade e o valor das pessoas.

À minha vó Rosinha Jaccoud (*in memoriam*), pelo amor, fortaleza, educação, acolhida e conselhos para a vida toda.

Aos meus sogros Sr. Jaime (*in memoriam*) e Dona Cleusa, por acreditar e incentivar a minha qualificação profissional e pela confiança e acolhimento em sua família.

À minha orientadora e madrinha Graziela B. Vidaurre, pela confiança, ensinamentos, incentivo, paciência, compreensão e ideias compartilhadas. Em vários momentos, apenas uma “pequena” conversa foi necessária para eliminar o desânimo e inspirar as melhores ações e pensamentos.

Ao Prof. José Tarcísio Oliveira, pela orientação, ensinamentos, sugestões e pelo valioso exemplo profissional.

Aos membros da banca examinadora, Prof.^a Rejane Alves, Leif Nutto e Prof. Pedro Segundinho, pelas valiosas contribuições e sugestões para melhoria do trabalho.

Ao Carlos Forechi, José Antônio Roela, Marcos Vassoler, Joel, Thiago e Edson, pelo apoio, disponibilidade e eficiência na realização da coleta da madeira pesquisada.

Ao Prof. Mario Tomazello Filho, pelos ensinamentos, sugestões, atenção e disponibilidade para a realização da densitometria de raios X.

Aos professores Juarez Paes, Humberto Fantuzzi, Wendel Andrade, Paulo Trugilho e Daniel Binoti, pelas sugestões para o aperfeiçoamento do projeto de tese. Aos Professores Djeison Batista, Fabrício Gonçalves, Marina Arantes, Marcus Vinicius Caldeira, Rodrigo Sobreira, Roberto Cecílio e Adriano Mendonça, pelos conselhos e ensinamentos.

Ao Prof. Ananias Júnior, pela ajuda, conselhos e parceria nas pesquisas.

À Lourdes Maria Santos, pela amizade, paciência, atenção, conselhos, ajuda na coleta dos dados, análises e escrita da tese, pela ótima convivência na salinha da marcenaria e por sempre compartilhar um Bis.

À Daniela Minini, pela amizade, atenção e ajuda nas análises e esquemas da tese.

Ao casal Jean Carlos Lopes e Ana Paula Câmara, pela amizade, conselhos e ajuda na coleta dos dados com o resistógrafo e análises da qualidade da madeira.

À Alexa Melo, Ramon Oliveira e Sofia Maria Rocha, pela amizade, boa-vontade, parceria e colaboração nas análises de umidade da madeira e no desenvolvimento das pesquisas.

Aos amigos Denise Soranso, Pedro Nicó, Brunela Rodrigues, Ana Boa, Anderson Firmino, Clailson Coelho, Dâmaris Billo, Alice Brito, Camilla Souza, Maria Naruna Felix, Daiana de Jesus, Joyce de Almeida, Ana Carla Bezerra, Marcia Carneiro, Glaucileide Ferreira, Jaily Andrade, Sandra Bezerra, Isabela Reboleto, Mayra Barros, Thaís Freitas, Carlos Dambroz, Paulo Souza, Luciana Silva, Walter Boschetti, Jordão Cabral e Victor Brocco, pelos cafés e momentos de descontração, colaboração e parcerias nas pesquisas.

Aos marceneiros Elecy Palácio e Betinho (*in memoriam*) e aos técnicos José Geraldo Oliveira, Danielle Leite e Luciano Dias, pelo apoio, boa-vontade, ensinamentos, ajuda e eficácia para o preparo de amostras e no desenvolvimento das análises.

À Vanessa Firmino, Adriane Gallo e Rosy Santos, pela boa-vontade em deixar o ambiente de trabalho limpo e organizado. À Elizangela Almeida, Calebe Pereira, Eliane Brito e Joceli Nunes, pela disponibilidade em ajudar sempre que preciso. Aos amigos vigilantes, pelas orientações quanto à segurança e zelo com o patrimônio.

À Maria Bermudes e ao Aparecido Siqueira pela recepção e atenção durante a minha estadia na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq).

RESUMO

SILVA, João Gabriel Missia da. **Aplicação da resistografia na estimativa da densidade e umidade da madeira em árvores jovens de eucalipto**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Graziela Baptista Vidaurre. Coorientador: José Tarcísio da Silva Oliveira.

A resistografia é uma técnica não destrutiva de grande potencial operacional para prever propriedades da madeira, porém, existem alguns fatores que precisam ser melhor compreendidos para aumentar a sua utilização. Teve-se por objetivo avaliar os parâmetros influenciadores da resistência à perfuração (RP) da haste do resistógrafo, além de estimar a densidade e umidade da madeira de clones de eucalipto em idade jovem. Leituras da RP foram feitas com o resistógrafo (R650-SC), na altura do DAP em 80 árvores de dois clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (76 meses de idade), plantados em Aracruz/ES, Brasil. A RP foi relacionada às características de crescimento e formação do lenho das árvores, ao teor de umidade, a perfis de densidade aparente por densitometria de raios X e diferentes profundidades de perfuração, e utilizada também como variável preditora de umidade natural (U%) e densidade básica (DB) da madeira. A relação da RP e DB da madeira com variáveis do crescimento das árvores foi específica por material genético. O diâmetro e a massa úmida das árvores, a menor proporção de cerne e a maior espessura de alburno aumentaram a RP. Nos primeiros 24 meses do crescimento e ao longo do diâmetro do cerne, ocorreu o rápido incremento da DB e RP e a redução da U%. A variabilidade dessas propriedades aumentou no alburno formado em idades recentes. A RP mensurada em árvores em pé foi correspondente aos perfis densitométricos, e estimou com boa precisão a DB e U% da madeira. A profundidade de perfuração de 1,5 cm a partir da casca foi mais precisa na estimação da DB que as perfurações radial e diametral das árvores dos clones. Entre faixas acima do ponto de saturação das fibras e em equilíbrio higroscópico, o aumento do teor de umidade da madeira originou maior RP. A utilização da RP como variável resposta da qualidade da madeira e não somente como preditora de DB e U%, contribuirá para o seu monitoramento contínuo, ao longo do crescimento das árvores.

Palavras-chave: *Eucalyptus*, características de crescimento de árvores, propriedades físicas da madeira, resistógrafo, profundidade de perfuração.

ABSTRACT

SILVA, João Gabriel Missia da. **Application of drilling resistance technique in the estimation of wood specific gravity and moisture in young trees of eucalyptus.** 2019. Thesis (Doctorate in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Graziela Baptista Vidaurre. Co-advisor: José Tarcísio da Silva Oliveira.

The drilling resistance technique have great potential operational to predict the wood properties of eucalyptus young trees, however, there are some factors that need to be better understood to increase their use. The aim of this study was to evaluate the parameters influencing the drilling resistance (DR) of the resistograph and the estimation of specific gravity and moisture content of the wood of eucalyptus clones at young age. DR readings were made with the resistograph (R650-SC) in the DBH (1.30 m from the ground) of 80 trees of two clones of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (76 months of age), planted in Aracruz, Espírito Santo State, Brazil. DR was related to tree growth and wood formation characteristics, moisture content, apparent density profiles by X-ray densitometry and different drilling depths, and was also used as a predictive variable of natural moisture (M%) and specific gravity (SG) of wood. The relationship between DR and SG of wood with growth variables of trees was specific for genetic material. The diameter and wet mass of the trees, the lowest heartwood ratio and the highest sapwood thickness increased DR. In the first 24 months of growth and along the heartwood diameter, there was a rapid increase in SG and DR and the reduction of M%. The variability of these properties increased in sapwood formed in recent ages. The DR measured in standing trees corresponded to the densitometry profiles, and accurately estimated SG and M% of the wood. The 1.5 cm drilling depth from the bark was more accurate in SG estimation than the radial and diametric drilling of the clones' trees. Between bands above the fibers saturation point and in equilibrium hygroscopic, the increase in the moisture content of the wood resulted in a higher DR. The use of DR as a response variable of wood quality and not only as a predictor of SG and M%, will contribute to its continuous monitoring, during the growth of the trees.

Keywords: *Eucalyptus*, characteristics of tree growth, physical properties of wood, resistograph, depth of drilling.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	9
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo geral	11
1.1.2 Objetivos específicos	11
1.2 Estrutura da Tese	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 Variabilidade diametral da densidade da madeira de eucalipto	13
2.2 Uso do resistógrafo na estimação da densidade da madeira	19
2.3 Efeito do teor de umidade da madeira na resistência à perfuração da haste do resistógrafo	24
2.4 Efeito da profundidade de perfuração da haste do resistógrafo na estimativa da densidade da madeira	26
CAPÍTULO I - ALTERAÇÕES DA RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO DA HASTE DO RESISTÓGRAFO E DENSIDADE DA MADEIRA DE EUCALIPTO COM VARIÁVEIS DE CRESCIMENTO	33
1 INTRODUÇÃO	33
2 METODOLOGIA	34
3 RESULTADOS	39
4 DISCUSSÃO	45
5 CONCLUSÕES	49
CAPÍTULO II - ESTIMAÇÃO DA DENSIDADE E UMIDADE DA MADEIRA DE EUCALIPTO POR RESISTOGRAFIA	50
1 INTRODUÇÃO	50
2 METODOLOGIA	51
3 RESULTADOS	57
4 DISCUSSÃO	66
5 CONCLUSÕES	72
CAPÍTULO III - OTIMIZAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PERFURAÇÃO E EFEITO DA UMIDADE DA MADEIRA DE EUCALIPTO NA RESISTOGRAFIA	73
1 INTRODUÇÃO	73
2 METODOLOGIA	74
3 RESULTADOS	79
4 DISCUSSÃO	87
5 CONCLUSÕES	93
3 CONCLUSÕES GERAIS	94
REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO GERAL

A ciência da madeira necessita cada vez mais da inovação e tecnologia. E a aplicação de técnicas de amostragem e análises não destrutivas da madeira permitem a flexibilidade, agilidade, precisão, redução dos custos e manutenção da condição preliminar estrutural do material, quando comparadas aos métodos tradicionais.

Para as espécies de eucalipto que possuem as maiores áreas plantadas no Brasil, novos materiais genéticos são produzidos periodicamente, com grande quantidade de amostras avaliadas em testes clonais. As técnicas não destrutivas (NDT's) contribuem pela agilidade e flexibilidade na obtenção dos resultados, com a possibilidade de diagnosticar a evolução temporal da qualidade da madeira dos materiais. Em campo e em laboratórios, o uso das NDT's reduz os custos fixos e de manutenção de equipamentos, além de permitir a velocidade dos diagnósticos, o que aumenta a produtividade das análises.

Ainda é necessário o ajuste das técnicas de aquisição, interpretação e análise dos dados, à realidade das espécies madeireiras e materiais genéticos plantados em diversas regiões do Brasil, com diferentes climas, solos, manejo, níveis de desenvolvimento, distúrbios fisiológicos e ocorrências de pragas. Não se restringe a aplicação em espécies tropicais de áreas naturais com plano de manejo sustentável. Todo o conhecimento e tecnologia gerados para o fortalecimento da cultura do eucalipto, poderão ser aplicados e são fundamentais para ajustar os acertos e falhas na implantação e desenvolvimento de materiais genéticos de pinus, mogno africano, teca, cedro australiano, paricá, acácia, araucária, populus e seringueira, que representam um grande marco na diversidade da silvicultura brasileira.

Entre as NDT's com grande potencial para avaliação da qualidade da madeira, está a aplicação do equipamento resistógrafo pela técnica de resistência à microperfuração (*micro-drilling resistance*) ou resistografia, que se baseia na energia consumida pelo motor de rotação do equipamento durante a perfuração de uma haste de aço. Com o valor da resistência à perfuração da haste na madeira é possível avaliar a estabilidade estrutural, os níveis de deterioração em árvores e prever a sua densidade, mediante uma correlação existente entre essas variáveis, ou seja, teoricamente, lenho mais denso resulta em maior resistência à perfuração.

A empresa detentora da patente e de registro do nome resistógrafo (*resistograph*®) lançou a sexta geração deste equipamento, com avançado nível tecnológico, portabilidade, robustez e precisão. Contudo, o avanço na tecnologia do equipamento é mais ligeiro que o da ciência da madeira, pois ainda há dúvidas quanto à sua aplicação na predição de densidade em árvores jovens de eucalipto e outras espécies, em condições de campo e laboratório, sendo importante o desenvolvimento de pesquisas para solucionar os questionamentos e equilibrar este descompasso.

A densidade da madeira é a propriedade mais pesquisada e utilizada para analisar possíveis alterações entre os materiais genéticos, com o ambiente de crescimento das árvores, variáveis climáticas, idade de corte, espaçamentos de plantio, técnicas de manejo da plantação, ocorrência de distúrbios fisiológicos, doenças e pragas, e da interação entre estes fatores. O conhecimento dessa propriedade física possibilita ajustar o beneficiamento, a tomada de decisão da aplicação da madeira, os cálculos de transporte e logística e a avaliação do sequestro de carbono das florestas. A densidade por influenciar o consumo específico de madeira nas fábricas de polpa celulósica é uma variável importante para o planejamento e controle dos processos industriais (polpação e controle das perdas) e direcionamento de pesquisas de desenvolvimento de clones de eucalipto.

Por ter relação com a densidade e demais propriedades e efeito no transporte, processamento e utilização da madeira, a umidade precisa ser conhecida e controlada. Esta tarefa se torna complexa para a umidade natural, que possui valores acima do ponto de saturação das fibras (30%) e ultrapassa os 100%, visto que os medidores portáteis de umidade disponíveis no mercado, principais NDT's utilizadas para este fim, não são aptos para registrar tais faixas de umidade. No caso de árvores em pé, toras e dormentes, há a necessidade de estudos e de novas tecnologias para a avaliação desta propriedade de forma não destrutiva e com maior representatividade do diâmetro e/ou espessura, por causa do gradiente de umidade que se forma entre as posições interna e externa.

Em virtude da demanda atual das empresas, por métodos que contribuam na avaliação e acompanhamento da secagem de toras em campo, é relevante testar a aplicação do resistógrafo como preditor da umidade da madeira, pelas relações existentes entre a densidade e umidade, e conseqüentemente com a resistência à perfuração.

Ditas as possibilidades de aplicação do resistógrafo, é fundamental desenvolver equações preditoras de densidade e umidade da madeira, compreender e responder sobre a profundidade de perfuração ideal no fuste de árvores em pé, para mitigar o atrito da haste com o lenho, que influencia a precisão das estimativas. Também é imperativo avaliar a correspondência da resistência à perfuração com os perfis densitométricos do lenho, a representatividade de posições mais periféricas do tronco na predição da densidade por resistografia, e os efeitos das características de crescimento das árvores e de faixas de umidade próximas ao ponto de saturação das fibras na resistência à perfuração. Estas informações permitirão ajustar criteriosamente as práticas de microperfuração, o que possibilitará maior aplicação da resistografia na avaliação da qualidade da madeira de eucalipto e de outras espécies, com boa precisão na estimativa das propriedades das árvore em pé, maior produtividade da mão de obra e a redução do tempo e de custos das coletas de campo e análises em laboratório.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar parâmetros influenciadores da resistência à perfuração da haste do resistógrafo e a estimação da densidade e umidade da madeira de clones de eucalipto em idade jovem.

1.1.2 Objetivos específicos

- Relacionar a resistência à perfuração da haste e a densidade básica da madeira com variáveis de crescimento das árvores e características de formação do lenho;
- Analisar os perfis de resistência à perfuração em árvores em pé e compará-los aos perfis densitométricos da madeira;
- Ajustar modelos matemáticos para estimativa da densidade básica e umidade da madeira pela resistência à perfuração em árvores em pé;
- Testar e otimizar profundidades de perfuração com resistógrafo, bem como a predição da densidade nos primeiros 5 cm a partir da casca;
- Examinar o efeito de faixas de umidade na resistência à perfuração da madeira.

1.2 Estrutura da Tese

De modo a atingir os objetivos, a tese foi estruturada em três capítulos:

Capítulo I – Alterações da resistência à perfuração da haste do resistógrafo e densidade da madeira de eucalipto com variáveis de crescimento;

Capítulo II – Estimação da densidade e umidade da madeira de eucalipto por resistografia;

Capítulo III – Otimização da profundidade de perfuração e efeito da umidade da madeira de eucalipto na resistografia.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Variabilidade diametral da densidade da madeira de eucalipto

A densidade, por expressar a relação entre a massa e o volume do lenho, em determinada umidade, possui importância relevante para os processos e aplicações industriais da madeira. Ela é influenciada principalmente pela genética, ambiente e sua interação (OLIVEIRA; HEILMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005). A procedência da semente ou material genético, as condições edafoclimáticas do ambiente ou local de desenvolvimento, a ocorrência de estresses de crescimento, doenças e pragas, a posição de amostragem, o sistema de implantação e condução da floresta, a taxa de crescimento, o espaçamento e idade de plantio, também são fatores influenciadores da densidade da madeira (FERREIRA; KAGEYAMA, 1978; TOMAZELLO FILHO, 1985, BARBOSA, 2013; RODRIGUES, 2013; MAURI et al., 2015; MENESES et al., 2015; MIRANDA; PEREIRA, 2015; BRITO, 2017; ROCHA, 2017; BOBADILHA et al., 2018; CÂMARA et al., 2018; ROCHA, 2018).

No interior do fuste, de modo geral, a densidade tende a ser máxima na base e nas regiões periféricas da casca, e a decrescer com a aproximação da copa e da medula (OLIVEIRA; SILVA, 2003). Esta variabilidade ocorre, possivelmente, em resposta às alterações ocorridas no câmbio com o avançar da idade, e impostas pelas condições ambientais (OLIVEIRA; SILVA, 2003; GONÇALVES et al., 2007). De forma específica, o lenho se torna mais denso por causa das fibras de parede espessa do lenho tardio nas camadas de crescimento, e também por mudanças na proporção e morfologia dos vasos (diâmetro e frequência), causadas pela atividade cambial e maturação das células (TOMAZELLO FILHO et al., 2008).

Para algumas espécies, a proporção de lenho inicial e tardio, a quantidade de células de raio (parênquima radial) e o teor de extrativos podem afetar a densidade. Em adição, espécies ou regiões do lenho com maior proporção de fibras em relação a de vasos são relativamente mais densas (SAVIDGE, 2003). Portanto, a densidade não é uma propriedade simples e é determinada por várias características da madeira (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989).

A proporção existente de lenho juvenil no fuste promove considerável variação da densidade ao longo do diâmetro, como resultado das modificações da estrutura

anatômica e proporção de espaços vazios. Porém, com o passar do tempo, o gradiente de variação das características anatômicas da madeira diminui pela formação do lenho adulto (GONÇALVES et al., 2007; TOMAZELLO FILHO et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2011; VIDAURRE et al., 2011). Em geral, conhecer as variações da densidade e como controlá-las é de valor primordial para os silvicultores, engenheiros e usuários da madeira (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989).

É possível encontrar diferentes tendências de variação da densidade da madeira de eucalipto ao longo da altura e diâmetro das árvores, com alterações entre espécies e de acordo com a idade da árvore (PÁDUA, 2009). De modo geral, a tendência da densidade da madeira de eucalipto é aumentar ao longo do diâmetro.

Os métodos de amostragem utilizados para avaliar a variabilidade diametral da densidade da madeira de eucalipto são o de distâncias fixas do raio a partir da medula, seja a cada 0,5, 1 ou 2 cm (CARNEIRO, 2017; BOBADILHA et al., 2018; CÂMARA et al., 2018); posições relativas do raio, por exemplo, 0% - próximo à medula, 33, 66 e 100% - próximo à casca (LOPES et al., 2011; BARBOSA, 2013); segregação qualitativa das regiões, retirando as amostras nas posições denominadas como medula, intermediária e casca; ou pelas camadas de tecidos formados na árvore, cerne interno, cerne externo e alburno (WILKES, 1984). Neste tipo de amostragem, a uniformidade do diâmetro e o deslocamento da medula dos discos são variáveis que precisam ser consideradas.

A amostragem por anéis de crescimento não é muito comum em espécies de eucalipto plantadas no Brasil, pela dificuldade de marcação e datação desses caracteres e assim pela idade ou estações do desenvolvimento. A formação e marcação dos anéis é dependente de condições climáticas caracterizadas pelo contraste da variação da disponibilidade hídrica ao longo das estações do ano, que cessa a atividade cambial (ALMONACID, 2013).

A maioria dos estudos de variabilidade da densidade da madeira apresenta os dados no sentido medula à casca, sendo interpretados para o diâmetro. A apresentação por posição diametral é mais comum na densitometria de raios X, uma técnica precisa e eficiente, que proporcionou significativo avanço em escala na análise da densidade (SARANPÄÄ, 2003). A análise de amostras de pequena espessura condicionadas (12% de umidade) proporciona um perfil detalhado da densidade da madeira ao longo do diâmetro (PALERMO; LATORRACA; ABREU, 2002; TOMAZELLO FILHO, 2006). A técnica possibilita medir com alta precisão as variações

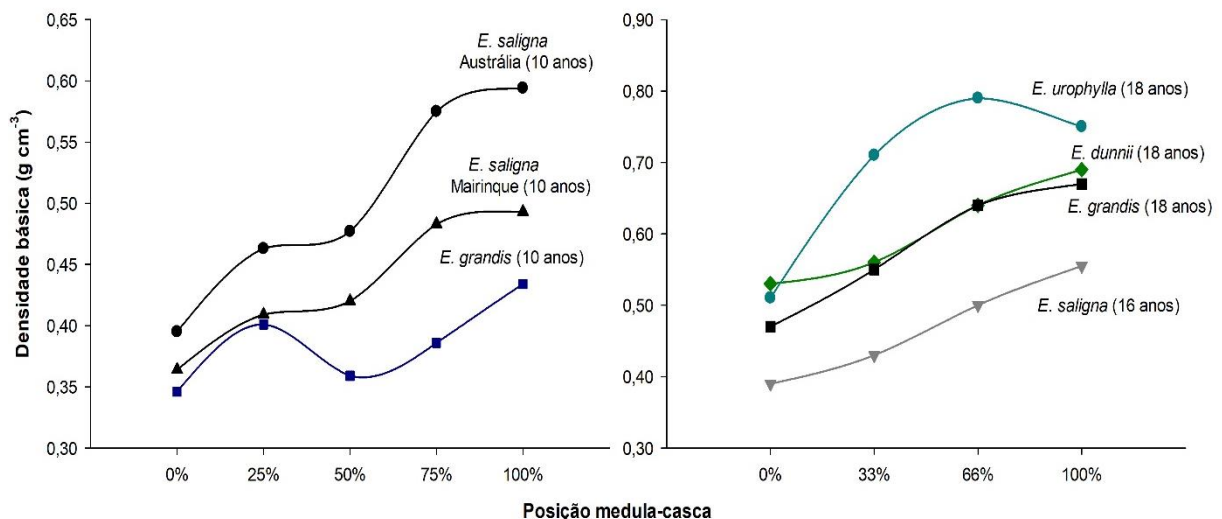
de densidade em distâncias micrométricas, intervalos de 80 micrômetros, o que é impossível pelo método gravimétrico convencional (OLIVEIRA, HEILMEISTER, 1998; OLIVEIRA et al., 2011).

A variabilidade diametral da densidade da madeira de eucalipto foi avaliada para diferentes espécies e materiais genéticos, locais e taxa de crescimento.

Espécie e material genético: a tendência de aumento da densidade da medula à casca para as espécies de *Eucalyptus grandis*, *E. robusta*, *E. globulus*, *E. regnans* e *E. saligna* foi citada por Zobel e Van Buijtenen (1989). Para espécies de eucalipto, a densidade é mais variável com a idade ou distância da medula à casca, que com os níveis de altura do fuste (HILLIS; BROWN, 1978).

A densidade da madeira de *E. grandis* e *E. saligna* possui tendência crescente no sentido medula-casca, porém, com variações mais bruscas para a madeira de *E. saligna*, representadas por um incremento de até 50% (Figura 1). Para duas progêneses de *E. saligna* (10 anos) plantadas em Salesópolis/SP, observou-se tendências semelhantes de variação no sentido medula-casca. Já a madeira desta espécie plantada em Anhembi/SP (16 anos) apresentou perfil de densidade crescente, porém bem mais linear que as árvores cultivadas em Salesópolis/SP.

Figura 1 – Variabilidade medula-casca da densidade básica da madeira de *Eucalyptus dunnii*, *E. grandis*, *E. saligna* e *E. urophylla* aos 10, 16 e 18 anos de idade



Fonte: Tomazello Filho (1985), Oliveira e Silva (2003) e Lopes et al. (2011), adaptado pelo autor.

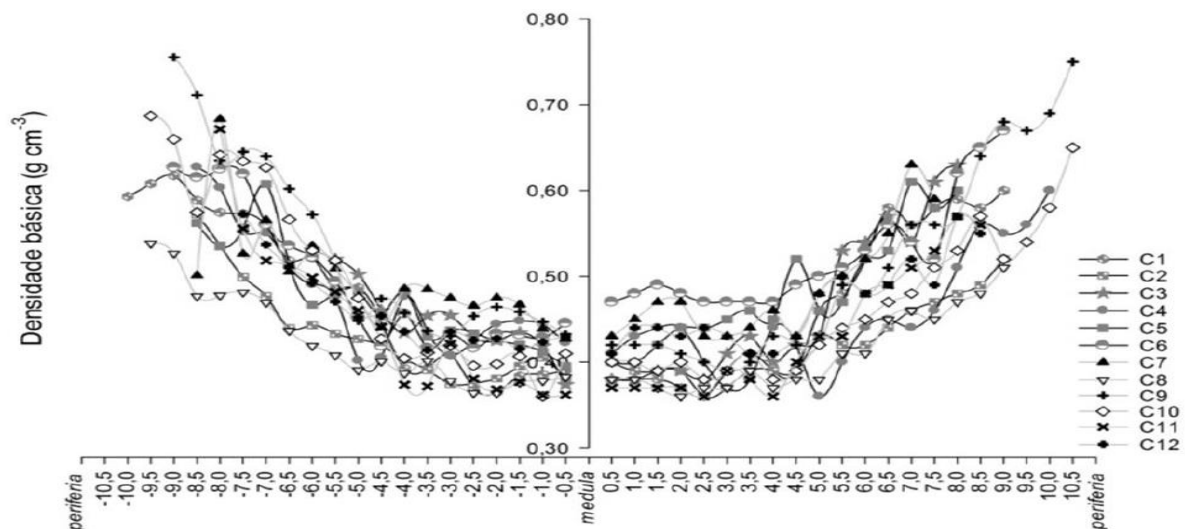
Apesar da diferença de idade, a madeira de *E. dunnii* apresentou incremento linear da densidade da medula à casca, semelhante ao observado para o *E. saligna*

(Figura 1). O *E. urophylla* teve incremento linear da densidade até posição de 75% do raio, com posterior decréscimo de 5% na região periférica do fuste.

Os valores de densidade básica no sentido medula-casca de *E. grandis* aumentam em média 42% para árvores aos 18 anos (Figura 1). Esta diferença na porcentagem de aumento da densidade da medula à casca, pode ser explicada pela transição de lenho juvenil para adulto, em que árvores mais velhas e com maior diâmetro proporcionam maior incremento dos valores de densidade se comparadas às árvores mais jovens.

A tendência geral de aumento da densidade básica a partir da medula até a proximidade da casca do fuste foi encontrada para 12 clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (6 anos) provenientes de Aracruz/ES (CARNEIRO, 2017). Os valores mínimos de densidade permaneceram até a posição de 3,5 a 4,5 cm, e a partir deste ponto houve o incremento até a região periférica com valores máximos (Figura 2).

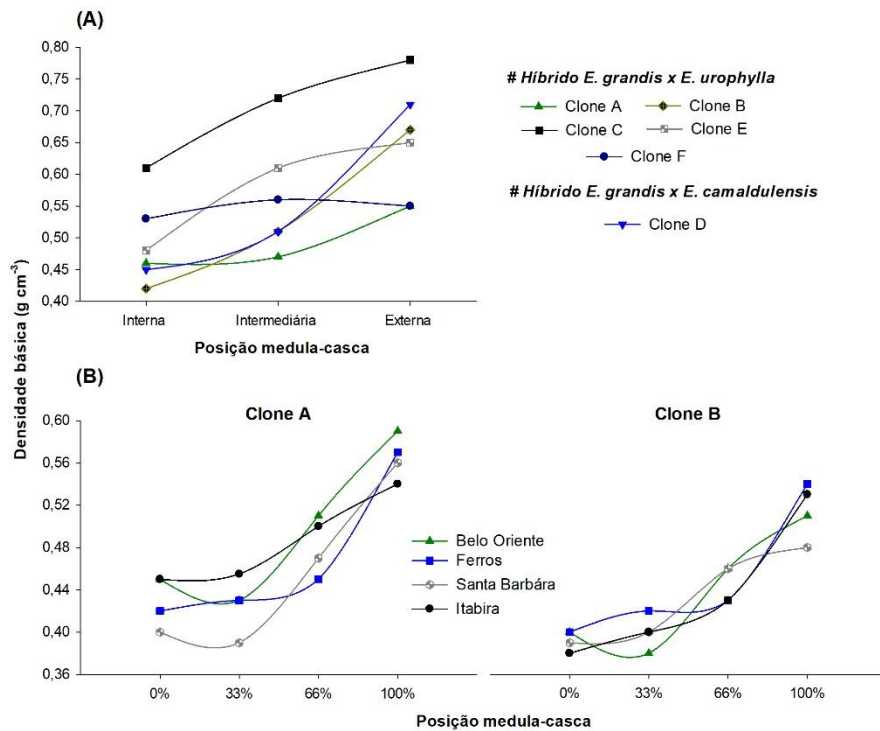
Figura 2 – Variabilidade diametral da densidade básica da madeira de clones (C1 a C12) de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 6 anos de idade



Fonte: Carneiro (2017, p. 40).

Três comportamentos de densidade básica no sentido medula-casca [Figura 3 (A)] foram observados para seis clones de *Eucalyptus* (14 anos), plantados em Venda Nova do Imigrante/ES (SILVA, 2018). O incremento linear da densidade da madeira ocorreu para os clones B, C, D e E, o clone A apresentou densidade uniforme entre as posições interna e intermediária, com posterior incremento na posição externa, mais próxima à casca; e o clone F não teve alteração significativa da densidade ao longo do raio.

Figura 3 – Variabilidade medula-casca da densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* e *E. grandis* x *E. camaldulensis* aos 14 anos de idade (A) e de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 6 anos de idade por local de crescimento (B)



Fonte: A - Silva (2018), B - Barbosa (2013), adaptado pelo autor.

Ambiente de crescimento: a densidade da madeira pode ser influenciada pelas condições dos locais de crescimento das árvores, contudo, esta resposta é diferente para valores médios da propriedade e variabilidade medula-casca. Por exemplo, a média de densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* e *E. grandis* (3 anos) foi diferente entre os cinco locais avaliados, porém, o ambiente de crescimento não influenciou o comportamento da densidade no sentido medula-casca (GOUVÊA et al., 2011b).

Diferentes locais de plantio não tiveram efeito na densidade da madeira de dois clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (6 anos), e independente do clone e local de crescimento, o comportamento da densidade no sentido medula-casca foi crescente [Figura 3 (B)] (BARBOSA, 2013). Contudo, observou-se a tendência de a densidade decrescer da medula até a posição de 33% do raio, e a partir dessa posição aumentar em direção à casca para os clones A e B. Entre os materiais genéticos, o clone B foi mais uniforme quanto aos valores de densidade por posição medula-casca para os locais de crescimento.

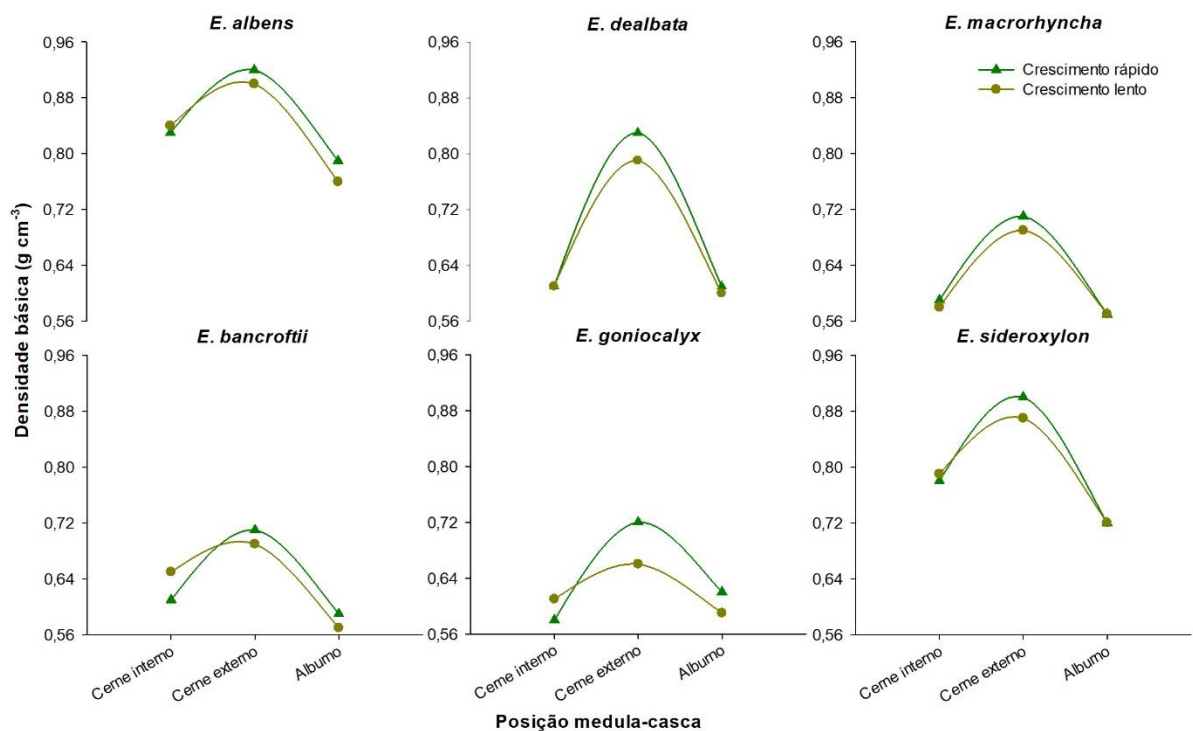
A variabilidade diametral da densidade aparente da madeira, determinada pela densitometria de raios X, de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (6 anos) para os

diferentes locais de crescimento, apresentou pequeno decréscimo nos três primeiros centímetros de cada raio, seguido de aumento até a casca (BARBOSA, 2013). Picos de densidade ocorreram na região da medula das árvores, mas inferiores aos observados próximo à casca.

Taxa de crescimento: o entendimento da relação da taxa de crescimento com a densidade da madeira de folhosas é complexo (KUMAR et al., 2014), e pode ocorrer de forma diferente conforme o tipo de distribuição dos vasos do lenho. O único grupo de espécies em que a densidade está relacionada com a taxa de crescimento é o das folhosas de porosidade em anel (SHMULSKY; JONES, 2011).

O incremento de densidade do cerne interno para o externo, independente da condição de crescimento, foi observado em seis espécies de *Eucalyptus* aos 40 anos (Figura 4). O cerne externo foi a região do lenho com maior variação nos valores de densidade, que foram menores nas árvores de crescimento mais lento. A densidade do albarno não alterou entre as árvores de maior e menor diâmetro. A taxa de crescimento teve pouco efeito sobre a densidade das espécies de eucalipto, tendo em vista que o albarno foi produzido em idades mais recentes, quando as árvores de cada grupo cresceram a taxas diferenciadas (WILKES, 1984).

Figura 4 – Variabilidade medula-casca da densidade da madeira de árvores de rápido e lento crescimento de seis espécies de *Eucalyptus* (40 anos de idade)



Fonte: Wilkes (1984), adaptado pelo autor.

A diferença na densidade entre a medula e a casca é maior onde as árvores de determinada espécie crescem mais rápido, devido à mudança no lenho com o crescimento em altura, como reforço à estrutura do tronco com a extensão da copa das árvores (MONTES; HERNÁNDEZ; BEAULIEU, 2007). O aumento da densidade nas árvores de rápido crescimento pode ser explicado pela teoria de Malan e Hoon (1992), pela qual as árvores com esta característica iniciam a produção de lenho adulto mais cedo, embora a sua proporção no diâmetro ainda não seja alta. Geralmente, o lenho adulto comparado ao juvenil apresenta maior densidade, dado o espessamento da parede e redução do diâmetro do lume das fibras.

Para o clone de *E. grandis* x *E. urophylla* (6 anos), Arantes et al. (2016) encontraram uma diminuição de 12,22% na densidade aparente da madeira com a redução da classe diamétrica, isso em valores absolutos. Árvores de menor crescimento em diâmetro foram menos densas, evidenciando uma possível correlação positiva entre as variáveis. Árvores de *E. grandis* (14 anos) de duas classes de diâmetro (37,1 e 27,0 cm) apresentaram variação semelhante de densidade básica no sentido medula à casca, com os menores valores desta propriedade na região da medula, seguidos de acréscimo até a região mais periférica do fuste (TREVISAN et al., 2008).

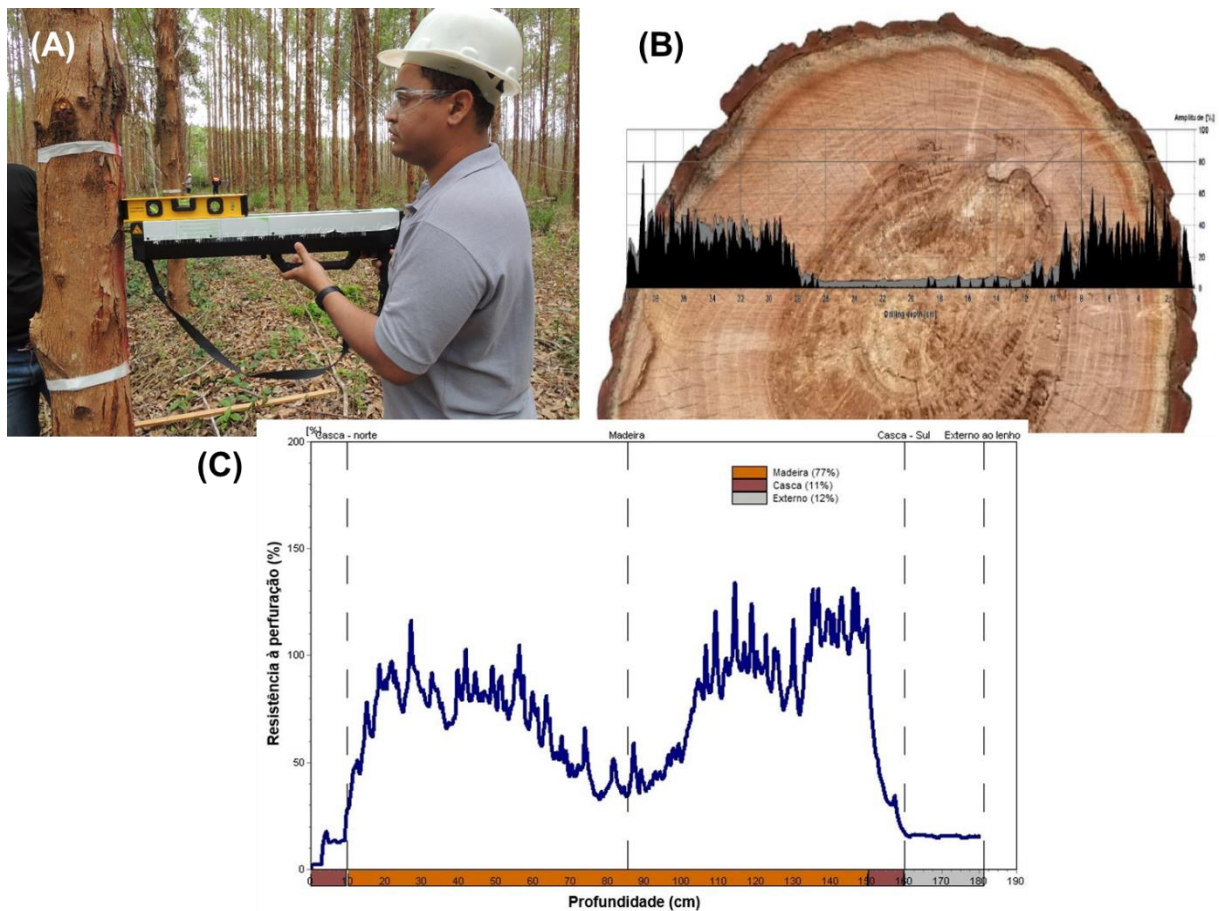
2.2 Uso do resistógrafo na estimação da densidade da madeira

O uso de ferramentas que permitam uma amostragem eficiente, de baixo custo e não destrutiva são fundamentais na avaliação da qualidade da madeira, tanto em plantações para testes clonais quanto comerciais (OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2015). O resistógrafo se enquadra como uma dessas ferramentas.

O resistógrafo [Figura 5 (A)] foi desenvolvido na Alemanha, com objetivo de avaliar de forma simples e segura, ainda em condições de campo, a sanidade de árvores, postes e estruturas de madeira (LIMA et al., 2006; CARDIN, 2011). O equipamento utiliza uma haste de aço [diâmetro de 1,5 mm, largura da aresta de corte (ponta) de 3 mm e comprimento variável com o modelo] que, ao perfurar a madeira à velocidade constante e pré-determinada, registra as alterações de torque correspondentes às variações estruturais e de crescimento do lenho (RINN; SCHWEINGRUBER; SCHAR, 1996; RINN, 2012; CARRASCO; PEREIRA; ALVES, 2013; GAO et al., 2017). As leituras mensuram o valor de resistência à perfuração da

haste (RP), sendo o perfil registrado na memória interna do equipamento para posterior análise em softwares específicos, com a possibilidade da impressão em papel (Impressora térmica *bluetooth*) e visualização momentânea em tablets, smartphones ou notebooks.

Figura 5 – Resistógrafo modelo R650-SC (Series 6, RINNTECH, Heidelberg, Alemanha) (A) e perfis de resistência à perfuração em disco de *Tipuana tipu* com deterioração na região central (B) e de árvore de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 6 anos de idade avaliado no software DECOM™ (C)



Fonte: A - autor, B - Nutto e Biechele (2015, p. 158), C - autor.

O resistógrafo modelo R650-SC [Figura 5 (A)], utilizado neste estudo, é equipado com dois motores, um motor de corrente contínua (*Maxon DCX*) para rotação da haste e outro para avanço (ou alimentação) à velocidade constante (KLOPPENBURG, 2018). O princípio deste equipamento é o consumo de energia eletrônica do motor de rotação da haste, que é proporcional ao torque mecânico, se o motor atua linearmente. Ou seja, apenas o motor de rotação é usado para mensurar os valores de RP, enquanto o de avanço não oferta informação adicional significativa (RINN, 2012; KLOPPENBURG, 2018).

Com o passar dos anos, foi proposta a sua utilização para a predição da densidade, ou seja, a resistografia se baseia na hipótese de que a maior densidade resulta em maior RP (ACUÑA et al., 2011; GOUVÊA et al., 2011b). Sob condições constantes, a menor resistência confirma um maior estado de deterioração da madeira [Figura 5 (B)].

As variações na resistência da haste ao perfurar são causadas pelas alterações da densidade da madeira dentro e entre os anéis de crescimento (EL-KASSABY et al., 2011) e com as mudanças das camadas de cerne e alburno. A RP é mensurada a cada 0,1 mm de avanço da haste no sentido diametral da árvore, o que permite representar detalhadamente o seu perfil (DIAZ et al., 2017), sendo possível verificar as diferenças de densidade entre o lenho inicial e tardio, defeitos internos e cavidades presentes na madeira (CARDIN, 2011). Na Figura 5 (C) é possível perceber regiões de baixa RP no início e fim do perfil, que correspondem a regiões da casca da árvore.

Dados não representativos de RP podem ser gerados por variações intrínsecas da madeira, como presença de nós, bolsas de goma e/ou resina, rachaduras ou fissuras, podridão, entre outros, ou pelo processo de amostragem e aquisição, como o contato da haste com a casca da árvore ou de leitura no exterior da madeira (LIMA et al., 2006; DIAZ et al. 2017).

Entre as vantagens do resistógrafo, Cardin (2011) citou a possibilidade de analisar as árvores de forma não destrutiva, a portabilidade do equipamento e a utilização de bateria recarregável como fonte de energia. Oliveira, Wang e Vidaurre (2017) consideraram o método de resistografia relativamente barato e confiável, possibilitando avaliar grande número de árvores em um curto período de tempo e com dano ínfimo a elas. Isso possibilita o seu uso no estudo de árvores matrizes crescidas em áreas de conservação e na seleção de materiais para programas de melhoramento genético. É possível, ainda, realizar o monitoramento contínuo da RP ao longo do crescimento das árvores, possibilitando registros do efeito da idade, espaçamentos de plantio, tratos silviculturais e da ocorrência de pragas e doenças.

O potencial do resistógrafo para avaliar em menor tempo a densidade da madeira de genótipos, em testes de progênies de *P. taeda*, foi observado por Isik e Li (2003). Uma vez que os valores de RP foram mais precisos para a seleção genética que o uso de simples variáveis fenotípicas, Rodrigues et al. (2008) concluíram que os ganhos genéticos indiretos na densidade básica da madeira podem ser eficientemente avaliados quando se seleciona materiais genéticos pela RP.

Outra vantagem do uso do resistógrafo é a possibilidade de selecionar uma combinação de velocidade de avanço e sensibilidade mais eficiente para a espécie de madeira, o que requer manutenção e calibração frequente durante a obtenção dos dados (CERALDI; MORMONE; RUSSO ERMOLLI, 2011). O aumento do atrito entre a haste e a madeira, por causa do cavaco gerado (serragem, em linguagem coloquial) pela perfuração e que aglutina na cavidade, causa o aumento da RP, o que pode interferir na sua relação com a densidade (GONÇALVES, 2006; LIMA et al., 2006). Isto demanda estudos para compreender como o efeito do atrito na RP poderá ser mitigado.

A relação da RP com os valores de densidade aparente (DA) foi descrita por Carrasco, Pereira e Alves (2013), que perceberam maiores valores de RP para as espécies mais densas, em ordem crescente: i) pinus, DA = 0,44 g cm⁻³ e RP = 19,83%; ii) angelim, DA = 0,86 g cm⁻³ e RP = 67,67%; iii) cumaru, DA = 1,03 g cm⁻³ e RP = 77,05%; e iv) paraju, DA = 1,14 g cm⁻³ e RP = 88,67%.

Para diferentes espécies madeireiras, Rinn, Schweingruber e Schar (1996) encontraram uma correspondência qualitativa (comparação gráfica) e quantitativa (relação numérica) entre a RP do resistógrafo e os perfis densitométricos de raios X. Os parâmetros de densidade que os gráficos do resistógrafo revelam, por exemplo, as áreas de lenho inicial e tardio em madeiras de coníferas e decíduas, corresponderam com os encontrados nos perfis de raios X.

Os efeitos do desbaste e da desrama no perfil de densidade e características dos anéis de crescimento da madeira de *Taiwania cryptomerioides* foram investigados por Wang, Chiu e Lin (2003), com o uso da técnica de resistografia. Pelos resultados obtidos, os autores defenderam que a técnica poderá fornecer informações para as práticas de manejo e utilização da madeira desta espécie.

Informações como a amostragem, relação da RP com a densidade básica da madeira de eucalipto e parâmetros da resistografia de diversas pesquisas, estão listados na Tabela 1. A maioria dos pesquisadores utiliza o DAP como o principal ponto de amostragem, sendo observados coeficientes de correlação variando de 0,29 a 0,85, em função da espécie, idade e ponto de amostragem.

Tabela 1 – Amostragem, coeficientes de correlação da resistência à perfuração com a densidade básica ($r_{RP \times DB}$) e parâmetros da resistografia na madeira de *Eucalyptus*

Material genético	Amostragem	$r_{RP \times DB}$	Velocidade de avanço	Modelo do resistógrafo	Autor
<i>E. globulus</i> (7 anos)	DAP (429 árvores)	0,45 a 0,53	30,0 cm min ⁻¹	RESI B400 Pro - IML	Gantz (2002)
<i>E. urophylla</i> (4 anos)	DAP (416 árvores)	0,29 a 0,61			
<i>Eucalyptus</i> sp. (7 anos)	DAP (12 árvores)	0,71 a 0,81	-	RESI F400 S-IML	Lima et al. (2006)
<i>Eucalyptus</i> sp. (16 anos)	DAP (26 árvores)	0,80	16,8 cm min ⁻¹	RESI F500 S-IML	Lima et al. (2007)
	0,70 m do solo	0,50			
	0,90 m	0,46			
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> (6 anos)	1,10 m	0,67	-	RESI F400 S-IML	Pádua (2009)
	DAP	0,54			
	1,50 m (50 árvores)	0,71			
<i>E. grandis</i> (9 a 12 anos)	DAP (120 árvores)	0,74	-	RESI F500 S-IML	Lopez, Genes e Lopez (2010)
<i>E. grandis</i> (42 meses)		0,73			
<i>E. grandis</i> (54 meses)	DAP (49 clones)	0,55	-	RESI F400 S-IML	Couto (2011)
<i>E. urophylla</i> (42 meses)		0,75			
<i>E. grandis</i> (54 meses)		0,69			
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> (2 a 7 anos)	DAP (278 árvores)	0,69	-	RESI F400 S-IML	Diaz (2011)
<i>E. globulus</i> (6 anos)	DAP (30 árvores)	0,84			
<i>E. nitens</i> (6 anos)	DAP (30 árvores)	0,85	100,0 cm min ⁻¹	RESI PD400 - IML	Carrilo, Valenzuela e Elissetche (2017)
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> (34 e 62 meses)	DAP (100 árvores)	0,85	22,0 cm min ⁻¹	RESI F300 S-IML	Oliveira, Wang e Vidaurre (2017)

^a amplitude para classe diamétrica de 14,2 cm.

Fonte: O autor.

A RP e a densidade básica (DB) da madeira apresentaram tendência de aumento com a classe diamétrica do *E. grandis* x *E. urophylla* aos 6 anos (PÁDUA, 2009). Os pontos mais indicados para utilização do resistógrafo foram a 1,10 e 1,50 m do solo, devido aos maiores coeficientes de correlação (r) da resistência e densidade estimada nas mesmas posições. A correlação entre RP e densidade no DAP foi moderada ($r = 0,54$).

A correlação entre a DB e RP foi elevada ($r = 0,86$) para a madeira de seis clones de *Eucalyptus* (3 anos), provenientes de quatro locais do estado de Minas Gerais. A espessura da parede das fibras também correlacionou positivamente ($r = 0,49$) com a RP, porém em magnitude bem inferior que a observada para a densidade, ou seja, a resistência não teve boa precisão na estimação da espessura da parede das fibras (GOUVÊA et al., 2011a).

O resistógrafo foi mais eficiente para estimar a DB da madeira de clones de *Eucalyptus* (GOUVÊA et al, 2011b) e de *P. taeda* (ISIK; LI, 2003) que o *Pilodyn* e NIR's. Equações ajustadas em função da RP validaram o seu potencial para a modelagem da DB da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (2 a 7 anos), e a inclusão das variáveis dendrométricas associadas à RP aumentou a precisão da estimação (DIAZ et al., 2017).

2.3 Efeito do teor de umidade da madeira na resistência à perfuração da haste do resistógrafo

Como a madeira é um material higroscópico, é importante conhecer o seu teor de umidade (TU) durante a determinação e estimação da densidade (JOZSA; MIDDLETON, 1994). Por isso, nas mensurações da RP em árvores em pé, toras, discos e peças serradas, o TU deve ser considerado (RINN; SCHWEINGRUBER; SCHÄR, 1996).

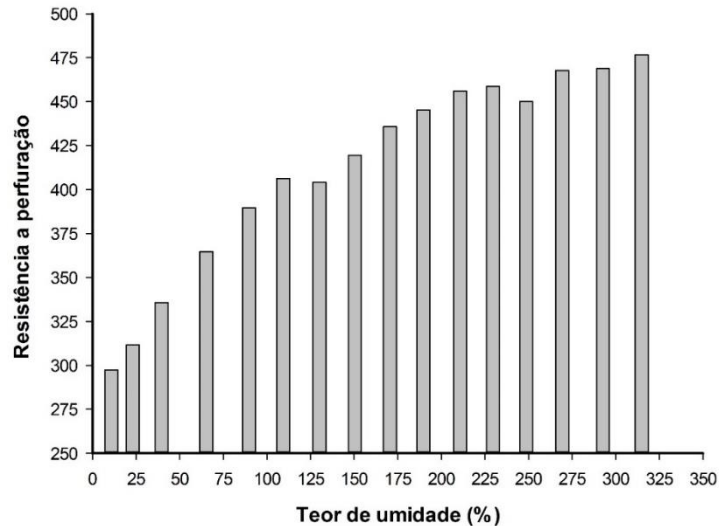
A presença da umidade da madeira aumenta a RP e resulta em altos valores de densidade estimada (KAHL et al., 2009). No entanto, a maior RP em elevados TU's não resulta de maior densidade da madeira, mas da fricção causada pelos cavacos que permanecem na cavidade de perfuração da haste (NOWAK; JASIENKO; HAMROL-BIELECKA, 2016). Este efeito ocasiona erros de superestimação da densidade em função da RP (FUNDOVÁ, 2012), o que reduz a precisão das equações estimativas. Por isso, Gantz (2002) descreveu a necessidade de pesquisas que relacionam a umidade da madeira com a RP e, assim, da implementação de métodos para aprimorar a predição da densidade.

Uma instantânea interpretação dos perfis pode gerar o entendimento de que nas regiões em que a RP foi alta, o lenho é mais denso, dada a relação diretamente proporcional entre as variáveis. Porém, essas regiões mencionadas podem ser visualizadas para posições centrais da árvore, por exemplo, que possuem geralmente menor densidade e maior TU. Já no caso da madeira seca, Ceraldi, Mormone e Russo Ermolli (2001) descreveram que a RP depende, principalmente, da sua densidade.

O efeito do TU médio nos valores de RP, durante a secagem ao ar da madeira de *Taiwania cryptomerioides* (22 anos), foi avaliado por Lin et al. (2003). A RP tendeu a decrescer com a diminuição da umidade da madeira (Figura 6), relação expressa

por uma equação linear ($R^2 = 0,31$), sendo recomendado o ajuste do TU na estimação da densidade da madeira de árvores em pé.

Figura 6 – Valores médios de resistência à perfuração da haste do resistógrafo em diferentes teores de umidade da madeira de *Taiwania cryptomerioides* (22 anos)



Fonte: Lin et al. (2003), adaptado pelo autor.

Amostras do lenho com diferentes TU, mas com valores semelhantes de densidade em virtude da organização da estrutura anatômica, podem ter divergências quanto à RP (Figura 6). A aplicação da Equação 1 ajustada por Lin et al. (2003) permite detalhar este efeito. Para a madeira com DB de $0,284 \text{ g cm}^{-3}$, a mudança de TU de 300 para 250% causa uma redução de 7,07% na RP, o que levaria a erros na estimativa, caso a umidade não seja conhecida.

$$RP = -55,6 + 1256,5 \text{ DB} + 0,74 \text{ TU} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} RP &= -55,6 + 1256,5 (0,284) + 0,74 (300) & RP &= -55,6 + 1256,5 (0,284) + 0,74 (250) \\ RP &= -55,6 + 356,85 + 222 & RP &= -55,6 + 356,85 + 185 \\ RP &= \mathbf{523,25} & RP &= \mathbf{486,25} \end{aligned}$$

Uma queda de 27,04% na densidade da madeira de *Picea engelmannii* x *Picea glauca* (13 anos), estimada pela RP da haste do resistógrafo, foi observada ao reduzir o TU de 168% (controle) para 19%. Todavia, a mudança de 168% para 25% não alterou significativamente os valores de densidade (UKRAINETZ; O'NEILL, 2010). Em amostras de madeira acondicionadas à umidade relativa de 0 e 70%, foi observado o aumento da RP média com o incremento de umidade da madeira (ANAGNOSTOPOULOU; POURNOU, 2013).

Entretanto, o TU não afetou a RP da madeira de *E. globulus* subsp. *Pseudoglobulus*. A fraca relação ($r = 0,04$) entre resistência e umidade pode ter ocorrido pela pequena magnitude das faixas de umidade entre as árvores (55 a 71%) (JOHNSTONE et al., 2011).

A umidade da madeira foi mencionada como fonte potencial de erro na relação entre a RP e a densidade, pois a resistência foi mensurada na madeira saturada em árvores em pé, enquanto a densidade pela densitometria de raios X em baguetas radiais secas (ECKARD et al., 2010). Segundo Isik e Li (2003) correlações negativas entre a densidade da madeira e a RP podem ser causadas por diferenças no TU.

Neste contexto, a utilização do resistógrafo é sensível a variações de umidade das árvores (ALVES, 2012) e os dados devem ser coletados em períodos de condições ambientais semelhantes (EL-KASSABY et al., 2011). Em casos em que a RP da haste do resistógrafo seja uma variável de interesse para a caracterização ou comparação de diferentes materiais genéticos, práticas silviculturais ou outros delineamentos, deve-se ter cautela com a umidade em que foi realizada a técnica.

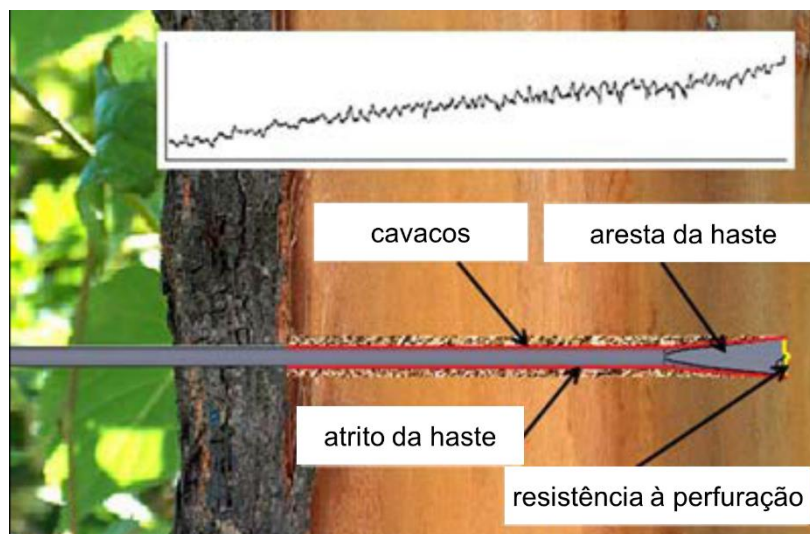
2.4 Efeito da profundidade de perfuração da haste do resistógrafo na estimativa da densidade da madeira

Em teoria, o perfil de RP da haste do resistógrafo na seção diametral do fuste deve ser semelhante ao padrão de variação da densidade, sendo maior próximo à casca e menor na região da medula (COUTO, 2011), salvo algumas oscilações causadas pela espécie, amostragem e idade de corte. Porém, a tendência de incremento dos valores de RP com a maior profundidade de perfuração foi detectada em pesquisas com diferentes espécies madeireiras (GANTZ, 2002; LIMA et al., 2006; 2007; BOUFFIER et al., 2008; OLIVEIRA, 2008; ECKARD et al., 2010; JOHNSTONE et al., 2011; FARIAS, 2013; NUTTO; BIECHELE, 2015; XAVIER, 2016; OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2017).

Este incremento na resistência ocorre pelo aumento do atrito entre a haste do resistógrafo e a madeira, causado pelos cavacos gerados pela perfuração (Figura 7), o que interfere na estimativa da densidade, configurando-se como uma limitação ao método (GONÇALVES, 2006; LIMA et al., 2007; BOUFFIER et al., 2008; ECKARD et al., 2010; RINN, 2012; NUTTO; BIECHELE, 2015). A ocorrência de defeitos internos do lenho, como presença de nós e bolsas de goma e resina, e diferenças na

distribuição das tensões internas de crescimento podem ocasionar alterações na magnitude da resistência (OLIVEIRA, 2008). Ângulos inferiores a 90° entre a haste do resistógrafo e os anéis de crescimento também podem contribuir para o aumento do atrito (COUTO, 2011; NOWAK; JASIENKO; HAMROL-BIELECKA, 2016). Portanto, é importante definir a profundidade ideal para a perfuração da haste do resistógrafo.

Figura 7 – Esquema da influência do atrito nos valores de resistência à perfuração da haste do resistógrafo (à medida que a perfuração avança para o interior do fuste os cavacos acumulados na cavidade aumentam o atrito da haste com a madeira e eleva a resistência)



Fonte: Nutto e Biechele (2015), adaptado pelo autor.

Alta correlação (0,88) entre a profundidade de perfuração e a densidade aparente da madeira de canafístula (14 anos) estimada pela RP foi encontrada por Xavier (2016). Quando a haste percorreu profundidades maiores, houve um incremento nos valores de RP e, por conseguinte, uma elevação na densidade estimada. Já Oliveira, Wang e Vidaurre (2017) observaram que com o aumento do diâmetro da árvore, o atrito gerado durante a perfuração tem um efeito não-linear na predição da DB da madeira de *Eucalyptus*.

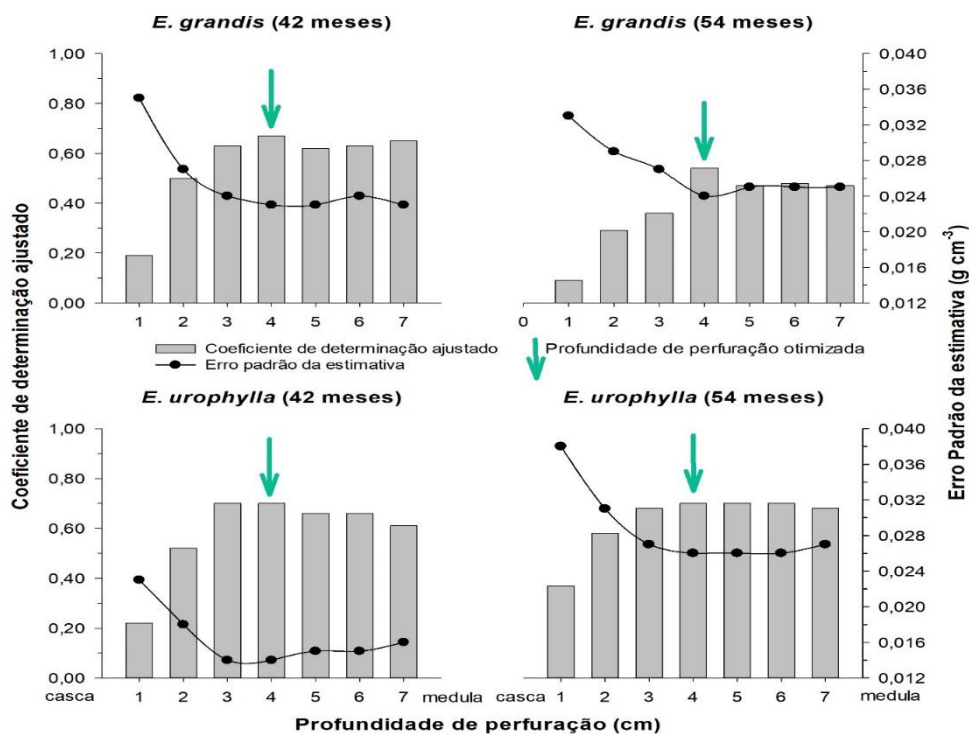
Somente os primeiros 5 cm a partir da casca das árvores de *P. pinaster* foram considerados para a mensuração da RP (BOUFFIER et al., 2008). Esta profundidade de perfuração foi proposta por duas razões: i) acima deste ponto, os perfis de RP tendem a aumentar com menos distinção dos limites dos anéis de crescimento; e ii) maior eficiência operacional para avaliação da maior quantidade de árvores em menor tempo, pois o resistógrafo foi testado como ferramenta a ser utilizada em programas de seleção e melhoramento genético.

Pela alta correlação entre a densidade determinada no raio inteiro e a estimada nos primeiros 5 cm a partir da casca, a amostragem somente dos primeiros anéis de crescimento após a casca foi adequada para avaliar a densidade da madeira de *P. pinaster* e realizar leituras com o resistógrafo em programas de melhoramento genético (BOUFFIER et al., 2008).

Morales-Conde, Rodríguez-Liñán e Saporiti-Machado (2014) avaliaram a relação da RP obtida na profundidade de perfuração de até 2 cm com a densidade determinada por baguetas (2 cm de comprimento e diâmetro de 7 mm) em estacas da madeira de *Pinus* sp., o que resultou em coeficiente de determinação (R^2) de 73%. Já a densidade determinada em discos do mesmo material e relacionada à RP mensurada no raio inteiro gerou um R^2 de 70%. Portanto, ocorreu um leve incremento no R^2 ao considerar a relação densidade e RP em regiões próximas à casca.

A plotagem das medidas de precisão da estimativa da DB pela RP a cada centímetro a partir da casca da árvore é uma estratégia favorável para otimizar a profundidade de perfuração da haste do resistógrafo (Figura 8). A posição em que ocorrer o maior R^2 e o menor erro padrão é a profundidade ideal de perfuração, dado o seu potencial preditivo de DB.

Figura 8 – Medidas de precisão da estimativa da densidade básica da madeira de *E. grandis* e *E. urophylla* (42 e 54 meses de idade) por profundidade de perfuração da haste do resistógrafo



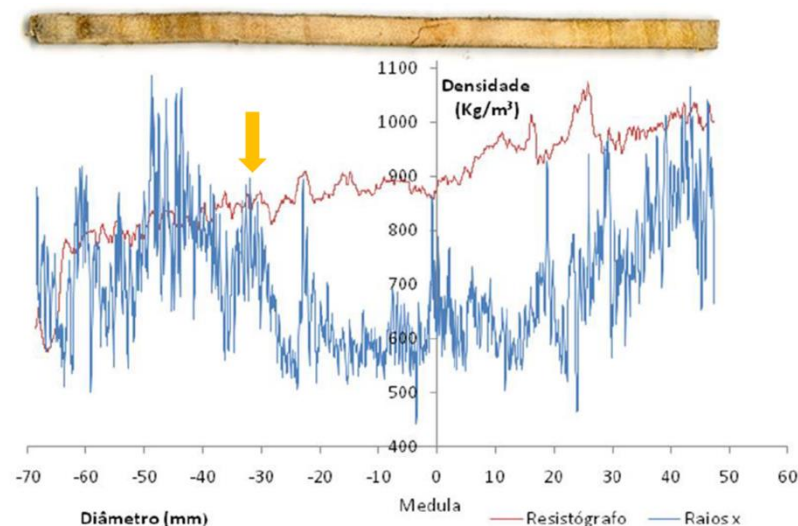
Fonte: Couto (2011), adaptado pelo autor.

Pela Figura 8, para a madeira de *E. grandis* e *E. urophylla* aos 42 e 54 meses, a profundidade ideal de perfuração ocorreu aos 4 cm, indicada pela seta verde claro. O R^2 ajustado neste ponto variou de 0,54 a 0,70 e o erro padrão de 0,014 a 0,024 g cm^{-3} para ambas as idades e espécies. Destaca-se que estes valores foram superiores aos observados para o raio inteiro, em vista de que em menores profundidades, o atrito da haste com o lenho é menor e há melhor relação entre a DB e RP (COUTO, 2011).

Tendência de redução dos coeficientes de correlação com o aumento da profundidade de perfuração em fustes de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 34 e 62 meses de idade, foi observada por Oliveira, Wang e Vidaurre (2017). Até 1,5 cm a partir da casca a correlação foi superior a 0,80, já em 3,5 cm o coeficiente diminuiu para 0,53. Logo, para este híbrido nas idades mencionadas, as regiões mais próximas à casca, até 2 cm, foram mais precisas na estimação da DB da madeira em função da RP.

Os valores mais confiáveis de densidade gerados pela resistografia são aqueles até a região próxima à medula, uma vez que após este ponto ocorreu uma tendência de superestimação dos valores de densidade pelo aumento da RP por profundidade de perfuração (XAVIER, 2016) (Figura 9). O resistógrafo (linhas vermelhas – Figura 9) não foi eficiente no estudo da variação diametral da densidade da madeira de canafístula, ao contrário da densitometria de raios X (linhas azuis – Figura 9) que foi mais precisa e demonstrou o decréscimo da DA na região interna do fuste e aumento nas regiões próximas à casca.

Figura 9 – Comparação dos perfis densitométrico e resistográfico da densidade aparente da madeira de canafístula



Fonte: Xavier (2016), adaptado pelo autor.

A representação gráfica unificada dos perfis densitométricos e de resistografia é uma estratégia importante para otimizar a distância radial de perfuração. Pela Figura 9 é possível perceber que, no raio esquerdo, há maior associação entre a densidade aparente estimada pelo resistógrafo e determinada pela densitometria, contudo, entende-se que esta relação é melhor descrita até a região onde as curvas se sobrepõem, indicada pela seta laranja. Descartadas as dimensões da casca da árvore, indica-se a região até 3,5 cm ou 50% do raio, como a profundidade ideal de perfuração em árvores de canafístula (14 anos e DAP de 14,45 cm), pois até este ponto, os perfis apresentaram comportamento semelhante e não ocorreu a superestimação dos valores de densidade.

Para diferentes espécies, a profundidade de perfuração com o resistógrafo está na faixa de 1,5 a 5 cm a partir da casca. Todavia, maiores investigações científicas são necessárias para detectar a profundidade ótima de perfuração, que poderá ser variável com a espécie ou material genético, idade, locais de crescimento da árvore, tratos silviculturais, posições de amostragem do fuste e equipamento utilizado.

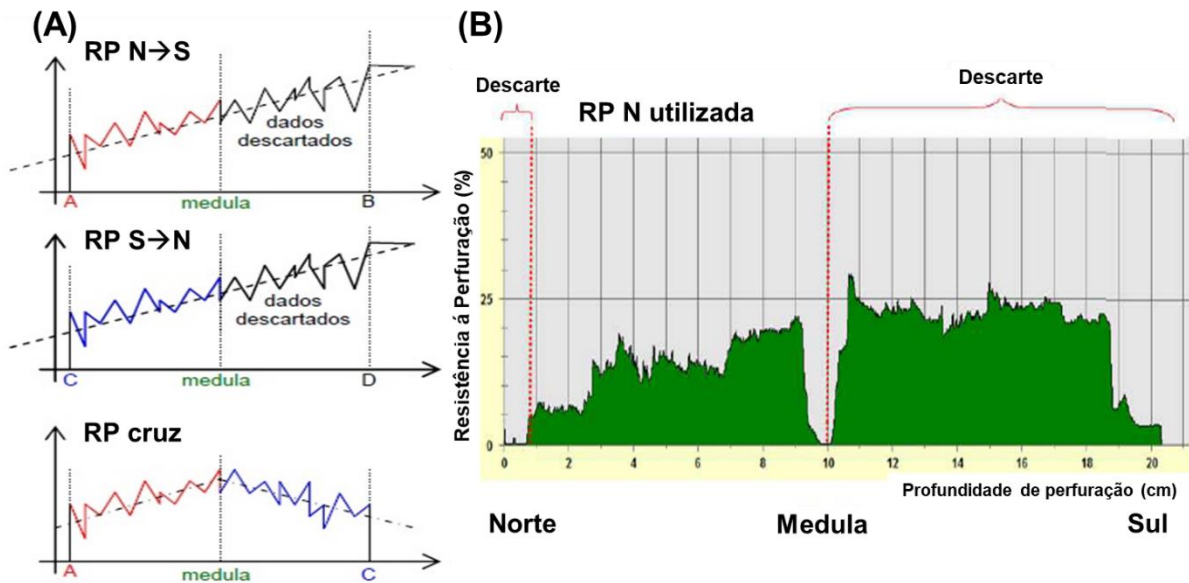
Alguns pesquisadores buscam atenuar a tendência de aumento da RP com a profundidade de perfuração pela mineração dos dados. Para eliminar valores “*outliers*”, devido à presença de nós, bolsas de resinas e outras anormalidades do lenho no trajeto da haste do resistógrafo, foram propostas duas mensurações adjacentes na mesma árvore, chamadas de *resisto1* e *resisto2*, com as cavidades de perfuração distanciadas a 5 cm (BOUFFIER et al., 2008). As árvores que exibiram diferença maior que 0,50 (Equação 2) entre as leituras foram descartadas da análise.

$$\frac{|resisto1 - resisto2|}{resisto1} \geq 0,50 \quad (2)$$

Em que: *resisto1*: primeira leitura e *resisto2*: segunda leitura de RP.

O procedimento de RP cruzada (RP cruz) foi proposto por Lima et al. (2006), que mensuraram a RP no sentido Norte→Sul (RP N→S) e Sul→Norte (RP S→N) do DAP das árvores. A RP cruz consistiu na junção dos valores medidos no primeiro raio do sentido N→S com o primeiro raio do S→N, com o descarte dos valores além da medula da árvore [Figura 10 (A)].

Figura 10 – Procedimentos de resistência à perfuração (RP) cruzada (A) e de mineração de dados de perfuração no sentido Norte→Sul (B)



Fonte: A - Lima et al. (2006), adaptado pelo autor; B - Farias (2013, p. 42).

Em testes e seleção de progênies de cedro australiano, Farias (2013) realizou microperfurações ao nível do DAP, no sentido Norte→Sul e Oeste→Leste, com a remoção prévia da casca das árvores. Para todos os ensaios, o raio posterior à medula apresentou incremento da RP, reflexo do atrito da haste durante a perfuração ou de outros fatores intrínsecos à madeira. Os dados do raio sul foram descartados e utilizou-se apenas os da primeira parte, raio norte [Figura 10 (B)].

Apesar da facilidade de aplicação da metodologia utilizada por Farias (2013), percebe-se pela Figura 11 (B) que ela não foi capaz de reduzir a imprecisão da predição da DB do cedro australiano pela RP. No raio norte ocorreu o incremento da RP da casca à medula, tendência contrária à geralmente observada para a densidade da madeira, o que resultou em R^2 baixos, entre 19,70 e 28,16%.

As variações de umidade e a inobservância de uma profundidade ideal de perfuração com o resistógrafo causam o aumento dos valores de RP e logo a superestimação da densidade da madeira. Este fato pode contribuir para o entendimento de que a resistografia é um método menos preciso para avaliar a variação diametral da densidade.

Ainda não há uma estratégia efetiva para mitigar os efeitos da umidade e do atrito nos valores de RP. Contudo, resultados satisfatórios poderão ser obtidos pela definição da profundidade ideal de perfuração e utilização da RP parcial do raio, pois nota-se a redução desses efeitos, e conseqüentemente da resistência, em distâncias

mais próximas à casca da árvore. Em adição, pesquisas sobre o desgaste e geometria das hastes e do efeito combinado da velocidade de rotação, taxa de avanço e da umidade da madeira nas medições de RP, têm sido realizadas por Sharapov e colaboradores (2018 a, b). A intenção é propor modelos de correção destes fatores influenciadores da RP, para ser inseridos como recurso tecnológico em futuras versões do equipamento.

CAPÍTULO I

ALTERAÇÕES DA RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO DA HASTE DO RESISTÓGRAFO E DENSIDADE DA MADEIRA DE EUCALIPTO COM VARIÁVEIS DE CRESCIMENTO

1 INTRODUÇÃO

Alinhar a produtividade das florestas com a qualidade da madeira é um importante alicerce e um desafio do setor florestal brasileiro. A compreensão das relações das variáveis do crescimento com a formação do lenho é ao mesmo tempo fundamental e indefinida, pelo número de materiais genéticos desenvolvidos e plantados em escala comercial, o que mantém a continuidade e necessidade de experimentos.

Há a demanda por modelos matemáticos para prever o impacto de diferentes combinações dos ambientes de crescimento, genótipos e tratamentos silviculturais na densidade da madeira, e a sua variabilidade no interior das árvores (KIMBERLEY et al., 2015). Com a modelagem matemática é possível abranger grandes extensões florestais e reduzir custos de análise da densidade da madeira (BALBINOT et al., 2009). Contudo, o sucesso da modelagem pode estar na seleção das variáveis preditoras e nas suas relações com a densidade da madeira, sendo esta etapa fundamental para atingir a eficiência e precisão das estimativas.

Métodos rápidos, econômicos e flexíveis para avaliar a densidade da madeira de diferentes espécies e materiais genéticos são importantes para a indústria madeireira, pois ela influencia as propriedades da polpa e papel, do carvão vegetal, dos produtos sólidos, entre outras aplicações (ISIK; LI, 2003). Consequentemente, a facilidade e precisão das predições impulsionam a adoção de técnicas não destrutivas na investigação da qualidade da madeira de inúmeros materiais genéticos em experimentação ou já comerciais (DOWNES et al., 1997; GOUVÊA et al., 2011b). Pela relação da densidade da madeira com a resistência à perfuração (RP), a resistografia possui grande potencial para a sua estimativa, bem como as vantagens descritas anteriormente (GANTZ, 2002; LIN et al., 2003; RODRIGUES et al., 2008; OLIVEIRA;

WANG; VIDAURRE, 2017; DOWNES et al., 2018; FUNDOVÁ; FUNDA; WU, 2018; SHARAPOV et al., 2018).

Apesar do potencial preditor da resistografia, são poucas as informações científicas das alterações da RP com o cerne e o alburno, o deslocamento da medula, uma evidência da formação do lenho de tração, os parâmetros da copa, as dimensões e a massa das árvores. Destaca-se que a estimativa da densidade da madeira pelo resistógrafo poderá ser aprimorada pela associação de outras variáveis que tenham efeito na RP e que contribuam para explicar as variações desta propriedade física.

A inclusão da altura, do diâmetro médio quadrático e na altura do peito (DAP) e da idade das árvores, aprimorou a precisão de modelos matemáticos para estimar a densidade da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (2 a 7 anos) pela RP (DIAZ et al., 2017). Estas variáveis foram selecionadas previamente pela correlação significativa com a densidade básica (DB) da madeira. Já a incorporação do DAP e da altura total de árvores de *Pinus radiata* não aperfeiçoou a precisão dos modelos de estimação da DB pela RP. Este efeito é específico e provavelmente ocorreu pela baixa variabilidade das árvores selecionadas, associadas a clones e famílias na mesma idade e local da plantação (BARRÍA; SANDOVAL; ROJAS, 2017).

As árvores de maiores dimensões e massa de fuste e copa, espessura de alburno e deslocamento de medula, poderão ter maior RP e DB da madeira. O objetivo foi avaliar a relação de variáveis do crescimento das árvores e de formação do lenho com a RP da haste do resistógrafo e DB da madeira de eucalipto em idade jovem.

2 METODOLOGIA

Material e amostragem

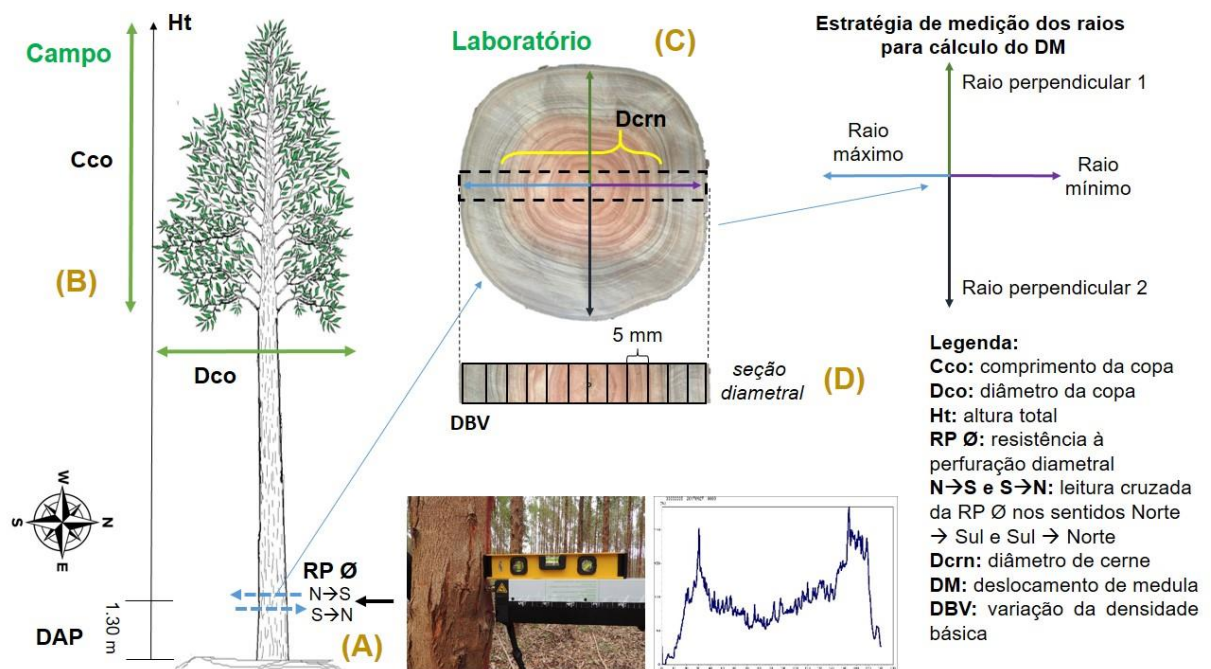
Avaliou-se dois clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 76 meses de idade, provenientes de plantação experimental em Aracruz, estado do Espírito Santo, Brasil, com área total de 2 hectares (19°49'15" Latitude Sul e 40°05'20" Longitude Oeste). O solo da região foi classificado como argissolo amarelo típico de textura arenosa média e o clima, de acordo com Alvares et al. (2013), como Aw - tropical com inverno seco e temperatura média anual de 23°C. Os materiais genéticos foram implantados em parcelas em faixas (seis linhas de árvores) com dois espaçamentos de plantio, o 3 x 2 e 3 x 3 m, sendo alocadas três subparcelas em cada parcela para medições anuais de crescimento e produção. Os clones foram escolhidos

pelas seguintes características: Clone A – crescimento lento e média densidade; e Clone B – crescimento rápido e baixa densidade.

20 árvores por material genético e espaçamento, totalizando 80 repetições, foram selecionadas pelo DAP (130 cm do solo) médio de cada parcela, determinado em inventário florestal realizado a quatro meses da coleta. Para controle da amostragem, as posições cardiais Norte e Sul da plantação foram determinadas com bússola digital e identificadas no fuste.

As leituras de RP da haste do resistógrafo foram realizadas na altura do DAP das árvores, nos sentidos Norte→Sul e Sul→Norte, com distância de 1,5 cm entre os furos (Figura 1 A). Na mesma região, foi retirado um disco (5 cm de espessura) para avaliação da proporção de cerne e alburo, deslocamento de medula e DB da madeira. Após identificação, descascamento e pesagem, os discos foram colocados em sacos plásticos vedados e armazenados em refrigerador para manter a umidade.

Figura 1 – Esquema de amostragem das árvores de eucalipto com a descrição das dimensões da copa, pontos de leituras do resistógrafo e análises realizadas (A ... D)



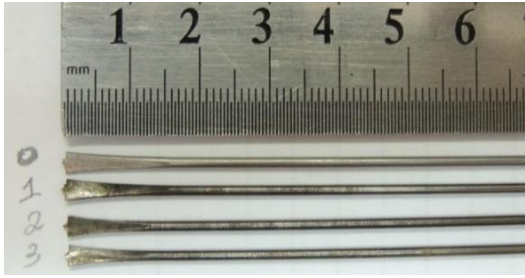
Fonte: O autor.

Resistência à perfuração da haste do resistógrafo

A RP foi mensurada com o resistógrafo R650-SC (Series 6, RINNTECH, Heidelberg, Alemanha), configurado com velocidade de avanço de 20 mm s⁻¹ para todas as árvores. Nas microperfurações utilizou-se hastes de aço com 1,5 mm de

diâmetro e 3 mm em sua ponta (aresta de corte), sendo a troca da ferramenta realizada conforme indicações do fabricante para madeira de folhosas e quando o desgaste era visível (Tabela 1).

Tabela 1 – Desempenho do resistógrafo por número de perfurações na avaliação da resistência da madeira de eucalipto

Item	1ª troca	2ª troca	3ª troca	4ª troca	Perfil das hastes utilizadas nas perfurações
Bateria¹	232	368	271	223	
Haste	296	351	480	-	

↑ Célula = número de perfurações até a troca do item

¹ não considera o tempo de deslocamento entre árvores e os acionamentos para limpeza e troca da haste.

Fonte: O autor.

A diferença no número de perfurações para a troca da haste (Tabela 1) ocorreu em função das condições (chuvas e ventos) e ritmo do trabalho de campo e também da mudança de densidade entre os materiais genéticos. Todavia, esta particularidade não demonstrou efeito significativo nos perfis de resistência.

Previamente às microperfurações, configurou-se o resistógrafo com o diâmetro com casca individual, sendo anotado o número do perfil correspondente à árvore e ao sentido (N→S e S→N). Em seguida, com nível de bolha posicionou-se o equipamento a 90° em relação ao eixo longitudinal do fuste (Figura 1 A), para o alinhamento da perfuração em relação aos anéis de crescimento e diminuição do efeito do atrito do lenho com a haste, sendo o operador do resistógrafo direcionado por um observador auxiliar. Realizou-se as microperfurações nas posições cardeais do fuste à linha do plantio, nos momentos com baixa ocorrência de ventos e chuvas. Nos casos de rajadas durante a operação, foi descartada a avaliação.

Os dados da memória do resistógrafo foram exportados, convertidos em arquivos com extensão compatível ao EXCEL e os perfis analisados no software DECOM™ (version 2.36c). Os pontos referentes à espessura de casca dos discos, mensurada com paquímetro previamente no campo, e de avanço da haste externamente à madeira, foram eliminados dos perfis resistográficos. A RP média foi

calculada com os dados das perfurações realizadas nos sentidos N→S e S→N (sentido invertido na análise de dados).

Variáveis dendrométricas das árvores

Com as árvores em pé foi mensurado o diâmetro da copa (Figura 1 B), sendo esticada uma trena até seus pontos periféricos, por dois observadores. Após o corte, foram mensuradas a altura total e distância da inserção do primeiro galho vivo até a altura do ápice, considerada o comprimento da copa (WINK et al., 2012). Outras variáveis relacionadas às dimensões do tronco e da copa foram calculadas pelas equações listadas no Quadro 1. As equações 3 a 8 foram definidas por Durlo e Denardi (1998), usando o modelo de árvore desenvolvido por Burger (1939).

Quadro 1 – Equações para o cálculo de variáveis dendrométricas das árvores de eucalipto

Variável	Equação	Legenda
Área basal (m ²)	$g = \frac{\pi * DAP^2}{40000}$ (1)	g: área basal; DAP: diâmetro à altura do peito; Apco: área de projeção, Dco: diâmetro, e Cco: comprimento de copa; Ht: altura total; Fco: formal de copa; GE: grau de esbeltez; IA: índice de abrangência; IS: índice de saliência; e IEV: índice de espaço vital
Área de projeção de copa (m ²)	$Apco = \frac{\pi * Dco^2}{4}$ (2)	
Porcentagem de copa (%)	$\%copa = \left(\frac{Cco}{Ht}\right) * 100$ (3)	
Formal de copa	$Fco = \frac{Dco}{Cco}$ (4)	
Grau de esbeltez	$GE = \frac{Ht}{DAP}$ (5)	
Índice de abrangência	$IA = \frac{Dco}{Ht}$ (6)	
Índice de saliência	$IS = \frac{Dco}{DAP}$ (7)	
Índice de espaço vital	$IEV = \left(\frac{Dco}{DAP}\right)^2$ (8)	

Fonte: O autor.

Massa úmida da parte aérea das árvores

Para mensuração da massa úmida foram avaliadas três árvores em cada espaçamento ou seis por material genético. Esta repetição foi utilizada em virtude dos custos de coleta e eficiência operacional que é de três árvores colhidas, pesadas e amostradas por dia. Em adição, tem-se a exigência ergonômica no transporte e pesagem do material.

Após o corte de cada árvore, fez-se a cubagem rigorosa, a coleta de galhos secos ao longo do tronco e dos vivos da copa e o seccionamento de discos e toras

(Figura 2 A...G, na sequência). Em seguida, os galhos vivos foram desfolhados e as toras e discos descascados (Figura 2 H...J). Por fim, foi realizada a pesagem individual dos galhos, folhas, cascas e da madeira (toras e discos) e a retirada de amostras para análises em laboratório (Figura 2 K...O). Para a pesagem utilizou-se balança eletrônica digital de piso com capacidade de 200 Kg, alimentada por bateria automotiva (Figura 2 M...N). Nesta pesquisa considerou-se as massas úmidas de copa (folhas + galhos vivos), tronco (galhos secos + cascas + madeira) e da árvore em si (massa copa + massa tronco).

Figura 2 – Sequência (A...O) de operações para mensuração da massa úmida da parte aérea de árvores de eucalipto



Fonte: o autor.

Cerne e albarno e deslocamento de medula das árvores

Na superfície transversal dos discos sem casca e polimento e na condição saturada, foram traçadas duas retas perpendiculares de uma extremidade a outra, centralizando na medula (Figura 1 C). A região limite entre o cerne e o albarno foi determinada visualmente pela alteração natural da cor da madeira, marcada com lápis diretamente sobre as linhas e mensurado o diâmetro total do disco e de cerne com régua centimétrica. A proporção de cerne e a espessura de albarno foram calculadas pelas equações 9 e 10.

$$\% \text{ cerne} = \frac{\pi \times (D_{\text{crn}})^2}{\pi \times (D_d)^2} \quad (9)$$

$$EA = \frac{D_d - D_{\text{crn}}}{2} \quad (10)$$

Em que: D_{crn} : diâmetro de cerne (cm); D_d : diâmetro do disco (cm); e EA: espessura de alburno.

O deslocamento de medula foi mensurado pela metodologia proposta por Lima, Garcia e Stape (2007), em que foi subtraído o raio médio (raios máximo, mínimo e perpendiculares) da maior distância entre a medula e a periferia dos discos (raio máximo) (Figura 1 C).

Densidade básica da madeira

Amostras a cada 5 mm (Figura 1 D) foram retiradas das seções diametrais dos 80 discos, para determinação da densidade básica (DB) da madeira, de acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2003). Por fim, calculou-se a média de densidade por árvore.

Análise estatística

Na descrição das características das árvores e da madeira dos clones foi utilizada a estatística descritiva de média e coeficiente de variação. A relação funcional ou grau de associação das variáveis de crescimento das árvores e de formação do lenho com a RP e DB da madeira foi avaliada pela análise de correlação de Pearson. A significância do coeficiente de correlação foi definida pelo teste t e utilizou-se o nível de 5% de significância. As análises foram realizadas pelo software *SigmaPlot 13.0*.

3 RESULTADOS

Valores médios das características avaliadas

Os espaçamentos foram considerados apenas como indicativo do efeito da taxa de crescimento das árvores nas variáveis dendrométricas e de formação da madeira (Tabela 2). Para o DAP e altura total das árvores, que são as primeiras evidências da taxa de crescimento na plantação, é possível perceber a diferença entre os materiais genéticos para as mesmas áreas úteis das árvores, plantadas na mesma localidade. Porém, ao observar os dados de DAP e altura por espaçamento e clone, percebe-se

pequena variação entre as árvores, sendo o agrupamento por material genético a melhor estratégia para atender aos objetivos propostos.

Tabela 2 – Variáveis dendrométricas, massa úmida da parte aérea, proporção de cerne, espessura de alburno e deslocamento de medula de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos 76 meses de idade

Variáveis	Material genético / espaçamento (m)			
	Clone A - CL + MD		Clone B - CR + BD	
	3 x 2	3 x 3	3 x 2	3 x 3
DAP (cm)	14,07 (2,63)	18,08 (6,33)	17,76 (2,40)	20,80 (3,81)
Ht (m)	21,94 (7,34)	24,87 (6,46)	24,47 (11,31)	29,61 (8,82)
g (m ²)	0,01556 (5,29)	0,02578 (12,80)	0,02478 (4,96)	0,03402 (7,56)
Eca (cm)	0,68 (9,49)	0,82 (12,94)	0,62 (11,11)	0,70 (10,87)
Dco (m)	3,04 (22,94)	3,53 (19,55)	3,44 (26,44)	3,27 (16,06)
Cco (m)	5,52 (31,41)	5,81 (23,53)	5,19 (28,31)	6,79 (19,50)
Apco (m ²)	7,62 (44,76)	10,11 (38,65)	9,69 (46,52)	8,61 (31,56)
Copa (Kg)	12,77 (37,73)	18,70 (38,41)	18,95 (43,02)	21,28 (9,67)
Tronco (Kg)	205,68 (6,35)	317,50 (10,09)	291,70 (18,57)	310,65 (15,22)
Árvore (Kg)	218,45 (7,46)	336,20 (10,64)	310,65 (15,22)	506,12 (6,24)
Cerne (%)	49,33 (13,22)	46,50 (7,58)	54,15 (9,60)	56,39 (8,02)
EA (cm)	1,82 (16,11)	2,53 (10,72)	2,08 (12,81)	2,29 (13,69)
DM (cm)	1,11 (76,82)	1,18 (50,44)	1,34 (36,52)	1,19 (45,80)

↑ Célula = média (coeficiente de variação, em %)

CL+MD: crescimento lento e média densidade; CR+BD: crescimento rápido e baixa densidade; DAP: diâmetro à altura do peito; Ht: altura total; g: área basal da árvore; Eca: espessura de casca; Dco: diâmetro, Cco: comprimento e Apco: área de projeção da copa; EA: espessura de alburno; DM: deslocamento de medula.

As dimensões e massa úmida da copa e o DM são as exceções de variabilidade dentro das classes de diâmetro e altura das árvores, originadas pelos espaçamentos, tendo apresentado os maiores coeficientes de variação. A área de projeção de copa é bem heterogênea entre as árvores de mesma classe diamétrica e de altura em ambos os clones. A alta variabilidade do DM é explicada pela quantidade de valores inferiores a 1 e próximos a 0, o que gera maiores coeficientes de variação, como o percebido no menor diâmetro médio do clone A.

Para a massa úmida da parte aérea das árvores, a de copa teve a menor alteração com o incremento em diâmetro e altura dos clones, apesar da sua alta variabilidade dentro das classes. A %cerne teve comportamento característico por material genético, uma vez que, para o clone A, ela diminuiu com o aumento do

diâmetro, situação contrária à observada para o clone B. Todavia, a espessura de albarno para os dois clones aumentou com incremento diamétrico.

Os valores médios de DB e RP da madeira foram $0,51 \text{ g cm}^{-3}$ (coeficiente de variação - CV = 6,57%) e 142,56% (CV = 30,94%) para o clone A e $0,42 \text{ g cm}^{-3}$ (CV = 5,24%) e 97,73% (CV = 13,82) para o clone B, respectivamente.

Variáveis dendrométricas das árvores

É evidente o efeito do material genético nas relações da RP e DB da madeira com as variáveis dendrométricas das árvores, pois a maioria das alterações significativas que ocorreram em um clone não se repetira no outro (Tabela 3). No geral, as correlações significativas da RP e DB da madeira com as variáveis dendrométricas foram moderadas a fortes ($r = 0,30$ a $0,67$).

Tabela 3 – Correlação das variáveis dendrométricas das árvores com a resistência à perfuração e densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 76 meses de idade

VD	Material genético							
	Clone A - CL + MD				Clone B - CR + BD			
	RP N→S	RP S→N	RP média	DB	RP N→S	RP S→N	RP média	DB
DAP	0,67 *	0,60 *	0,65 *	0,61 *	-0,11 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,31 *
Ht	0,50 *	0,46 *	0,49 *	0,35 *	-0,37 *	-0,16 ^{ns}	-0,32 ^{ns}	-0,15 ^{ns}
g	0,66 *	0,60 *	0,64 *	0,60 *	-0,10 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,31 *
Dco	0,17 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,38 *	0,39 *	0,43 *	0,27 ^{ns}
Cco	0,10 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,44 *
Apco	0,17 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,37 *	0,38 *	0,42 *	0,24 ^{ns}
%copa	-0,06 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,38 *	0,26 ^{ns}	0,37 *	0,55 *
Fco	-0,02 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-0,20 ^{ns}
GE	-0,49 *	-0,43 *	-0,47 *	-0,55 *	-0,46 *	-0,26 ^{ns}	-0,42 *	-0,50 *
IA	-0,03 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,50 *	0,36 *	0,49 *	0,32 *
IS	-0,26 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	0,39 *	0,34 *	0,41 *	0,14 ^{ns}
IEV	-0,27 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	0,38 *	0,33 *	0,41 *	0,11 ^{ns}

VD: variáveis dendrométricas; CL+MD: crescimento lento e média densidade; CR+BD: crescimento rápido e baixa densidade; RP: resistência à perfuração; N→S: perfuração sentido norte-sul; S→N: perfuração sentido sul-norte; DB: densidade básica; DAP: diâmetro à altura do peito; Ht: altura total; g: área basal da árvore; Dco: diâmetro, Cco: comprimento, Apco: área de projeção e Fco: formal de copa; GE: grau de esbeltez; IA: índice de abrangência; IS: índice de saliência; e IEV: índice de espaço vital.
* Coeficiente de correlação significativo pelo teste t ($p \leq 0,05$) e ^{ns} não significativo ($p > 0,05$).

A RP e DB da madeira do clone A aumentaram com o maior diâmetro, altura e área basal das árvores, sendo as correlações positivas entre essas variáveis. Para o clone B, apenas a DB aumentou com o incremento diamétrico e da área basal, sendo menor a RP do sentido N→S nas árvores mais altas.

As dimensões e os índices da copa das árvores do clone A não possuem correlação com a RP e DB da madeira. Para o clone B ocorreu o aumento da RP em árvores com maior área de projeção, porcentagem, diâmetro e índices de abrangência, saliência e de espaço vital da copa. A madeira deste clone também foi mais densa em árvores com maior comprimento, porcentagem e índice de abrangência da copa. Contudo, para os dois clones, a madeira foi menos densa e teve menor RP em árvores mais esbeltas, tendo o grau de esbeltez efeito mais intenso na DB que na RP da haste do resistógrafo.

Massa úmida da parte aérea das árvores

Maior RP da haste do resistógrafo foi observada em indivíduos com maior massa úmida de copa para o clone A, e de tronco e da árvore por completo (copa + tronco) no clone B (Tabela 4). O sentido de perfuração no fuste das árvores teve influência nas correlações, uma vez que elas foram significativas apenas para dados de RP mensurada no sentido N→S e RP média.

Tabela 4 – Correlação da massa úmida da parte aérea das árvores com a resistência à perfuração e densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 76 meses de idade

Variável	Massa úmida – parte aérea	Material genético	
		Clone A - CL + MD	Clone B - CR + BD
Resistência à perfuração N→S	Copa	0,86 *	-0,08 ^{ns}
	Tronco	0,54 ^{ns}	0,91 *
	Árvore	0,58 ^{ns}	0,90 *
Resistência à perfuração S→N	Copa	0,57 ^{ns}	-0,02 ^{ns}
	Tronco	0,58 ^{ns}	0,72 ^{ns}
	Árvore	0,60 ^{ns}	0,72 ^{ns}
Resistência à perfuração média	Copa	0,73 ^{ns}	-0,05 ^{ns}
	Tronco	0,62 ^{ns}	0,81 *
	Árvore	0,65 ^{ns}	0,81 *
Densidade básica	Copa	0,30 ^{ns}	-0,32 ^{ns}
	Tronco	0,77 ^{ns}	0,74 ^{ns}
	Árvore	0,75 ^{ns}	0,73 ^{ns}

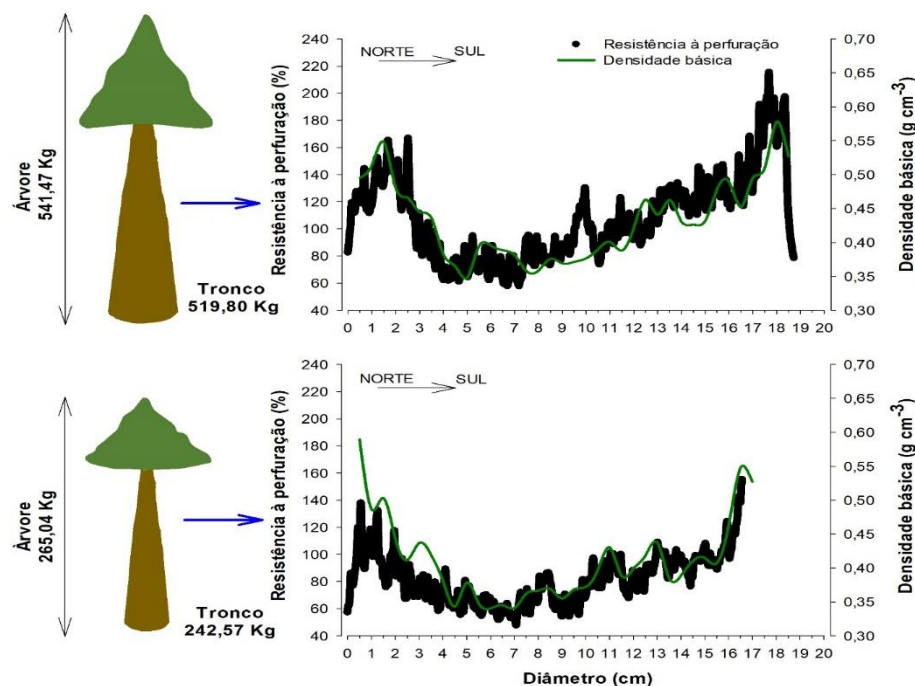
CL + MD: crescimento lento e média densidade; CR + BD: crescimento rápido e baixa densidade; N→S: perfuração sentido norte-sul; S→N: perfuração sentido sul-norte.

* Coeficiente de correlação significativo pelo teste t ($p \leq 0,05$) e ^{ns} não significativo ($p > 0,05$)

A DB da madeira não teve relação significativa com a massa úmida da parte aérea das árvores dos materiais genéticos. Os maiores coeficientes de correlação (positivos e fortes) ocorreram entre a DB da madeira e a massa úmida do tronco e da árvore, porém sem significância estatística.

Em vista da alta correlação da massa úmida do tronco e da árvore com a RP N→S para o clone B, na Figura 3 foi ilustrado o seu comportamento diametral e da DB da madeira para árvores com a maior e menor massa. As diferenças nos valores da RP ao longo do diâmetro são aparentes, sendo a magnitude da resistência superior na árvore de maior massa. Entretanto, o incremento dessa variável nas regiões próximas à casca é uma característica comum, o que também ocorreu para a DB. A associação da DB da madeira com a RP é mais evidente na árvore de maior massa.

Figura 3 – Comportamento da resistência à perfuração e da densidade básica da madeira em árvores de *E. grandis* x *E. urophylla* (clone B) de maior e menor massa úmida

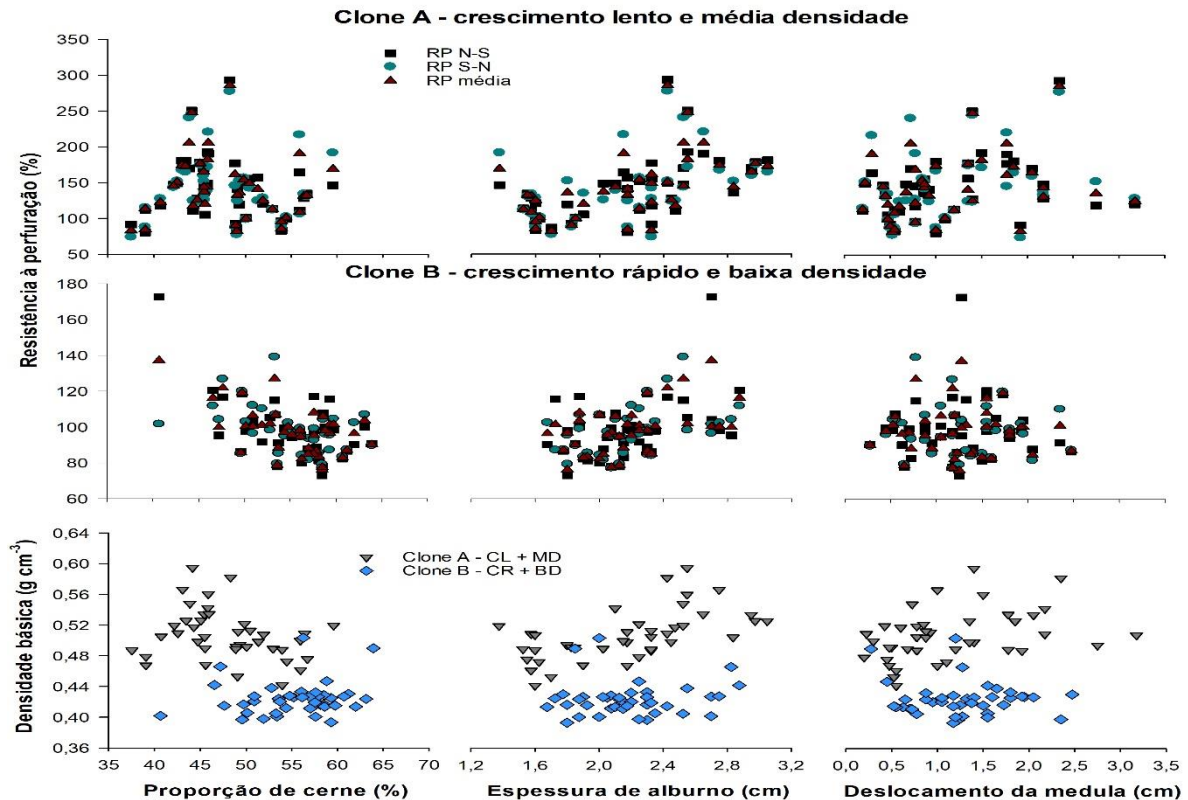


Para a árvore de maior diâmetro e massa úmida, observa-se uma queda da RP e DB da periferia até a distância de 7,5 cm no lado norte, e a partir desta posição o incremento linear das variáveis até a casca no lado Sul do fuste (Figura 3). O perfil de RP da árvore de menor massa úmida é mais homogêneo ao longo do diâmetro, com redução dos valores na região central do fuste.

Cerne e alburno e deslocamento de medula das árvores

As diferenças nas variáveis de crescimento dos materiais genéticos também se expressam nas características de formação do lenho, sendo apenas a relação da EA com a RP da haste do resistógrafo semelhante entre os clones (Figura 4).

Figura 4 – Correlação da resistência à perfuração e densidade básica com a proporção de cerne, espessura de alburno e deslocamento de medula de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 76 meses de idade



Coefficientes de correlação

Variáveis	Clone A – CL+MD			Clone B – CR+BD		
	% cerne	EA	DM	% cerne	EA	DM
RP N→S	-0,10 ^{ns}	0,55 *	0,33 *	-0,58 *	0,43 *	0,01 ^{ns}
RP S→N	-0,03 ^{ns}	0,46 *	0,24 ^{ns}	-0,42 *	0,42 *	-0,05 ^{ns}
RP média	-0,07 ^{ns}	0,52 *	0,29 ^{ns}	-0,57 *	0,48 *	-0,01 ^{ns}
DB	-0,26 ^{ns}	0,59 *	0,37 *	0,18 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,12 ^{ns}

CL+MD: crescimento lento e média densidade; CR+BD: crescimento rápido e baixa densidade; EA: espessura de alburno; DM: deslocamento de medula; RP: resistência à perfuração; N→S: perfuração sentido norte-sul; S→N: perfuração sentido sul-norte; DB: densidade básica.

* Coeficiente de correlação significativo pelo teste t ($p \leq 0,05$) e ^{ns} não significativo ($p > 0,05$).

A % cerne não alterou a RP e DB da madeira do clone A (Figura 4), o que está diretamente relacionado ao comportamento inverso dessas variáveis com o crescimento em diâmetro e altura das árvores. Para o clone B, árvores com maior % cerne tiveram menor RP, porém nenhuma alteração da densidade da madeira.

Apesar da DB da madeira dos clones de eucalipto não ter sido alterada com a formação do cerne, a EA teve efeito significativo no aumento da DB do clone A, o que também foi percebido para a RP dos clones A e B (Figura 4). Ou seja, árvores jovens

de eucalipto com maior EA foram mais resistentes à perfuração da haste do resistógrafo.

O DM teve relação com a RP e DB da madeira apenas para o clone A, sendo observado o aumento da RP N→S e da densidade com o maior DM, em uma pequena parcela das árvores (Figura 4). A dispersão dos dados de DM do clone B não permitiu explicar variações de acréscimo ou redução da RP e DB em árvores com medula descentralizada, independentemente do seu nível.

4 DISCUSSÃO

As correlações da RP e DB com as variáveis dendrométricas foram inerentes a cada material genético, em vista da diferente taxa de crescimento das árvores destes materiais. Em adição, a alta variabilidade de alguns fatores do crescimento (dimensões da copa e massa úmida), avaliados dentro de um mesmo espaçamento e material genético, também possui contribuição para os resultados observados.

Para o clone A, de crescimento lento e média densidade, ocorreu o incremento da RP e DB em árvores de maior DAP, altura e área basal. As correlações significativas da altura e área basal com a RP e DB, podem ser consequência da relação existente com o DAP das árvores. Tendo em vista as maiores correlações com as características avaliadas e a fácil mensuração em campo, o DAP foi a variável dendrométrica de maior potencial para ser incorporado em modelos de predição de DB da madeira por resistografia.

O aumento da RP em árvores de maior diâmetro pode ser causado pelo incremento da DB da madeira, adicionado às forças de atrito da haste do resistógrafo (GAO et al., 2017; SILVA et al., 2017; OLIVEIRA, WANG; VIDAURRE, 2017). Ao perfurar as árvores em pé, com umidade acima do ponto de saturação das fibras, ocorre uma concentração e aglutinação dos cavacos no interior da cavidade, o que contribui para o incremento das forças de atrito da haste com o material residual e a parede celular do lenho (SHARAPOV; WANG; SMIRNOVA, 2017).

Em árvores de maior diâmetro para ambos os clones, o incremento de DB da madeira ocorre em função das exigências mecânico-fisiológicas resultantes do seu processo de desenvolvimento (SETTE JR. et al., 2012). Ou seja, com o aumento das dimensões e massa do tronco das árvores, é necessário um reforço na proporção e morfologia das fibras para suportar esta carga, o que gera o incremento da DB. Maior

densidade da madeira com o aumento da classe diamétrica também foi encontrada para *E. urophylla* x *E. grandis* aos 72 meses (ARANTES et al., 2016).

São escassos os trabalhos que relacionam a RP da haste do resistógrafo com variáveis do crescimento de árvores de eucalipto. A inclusão da altura das árvores e do DAP aprimorou a precisão de modelos matemáticos para estimar a densidade da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* por resistografia (DIAZ et al., 2017). A RP média apresentou correlações fracas e significativas com o DAP ($r = 0,18$) e altura total ($r = 0,30$) de árvores de *Pinus sylvestris* (FUNDOVA; FUNDA; WU, 2018). Correlações fracas e negativas foram observadas entre a densidade estimada pelo resistógrafo e a altura total, DAP e grau de esbeltez de árvores de *Picea mariana* (DESPONTS; PERRON; DEBLOIS, 2017).

Em árvores do clone A, de menor crescimento e densidade média, as dimensões e parâmetros da copa não influenciaram a RP e DB da madeira. Isso pode ser uma característica inerente ao desenvolvimento e idade do material genético e também em resposta à variabilidade dos índices de copa em relação à RP e DB da madeira.

A RP em árvores do clone B apresentou relações diretamente proporcionais com os parâmetros da copa. As árvores com maior projeção e proporção de copa, que são indicativos da sua vitalidade e grau de concorrência (DURLO; DENARDI, 1998), foram mais resistentes à perfuração. A maior porcentagem de copa das árvores desse clone também aumentou a DB da madeira. Ou seja, árvores de eucalipto mais produtivas de um clone de crescimento rápido, dada a vitalidade de copa, apresentaram maior RP e DB da madeira. A copa é o órgão da árvore responsável pelo processo da fotossíntese e pode-se inferir que as suas dimensões estão diretamente relacionadas com o crescimento e a produção de matéria seca (NUTTO et al., 2001).

O grau de esbeltez (GE) representa o quanto de incremento em DAP ocorreu com o aumento da altura das árvores, sendo um conceito da sua estabilidade (DURLO, DENARDI, 1998). Quanto maior este índice, mais instáveis e menos robustas são as árvores, sendo sujeitas a maior ação dos ventos (BOSCHETTI et al., 2015). Para ambos os clones de eucalipto, as árvores mais esbeltas apresentaram menor RP média e menor DB da madeira, o que pode indicar uma fragilidade à ação dos ventos.

O alto GE das árvores jovens de eucalipto, pode ser explicado pelo fato da atividade do meristema apical ser muito mais intensa que a do meristema cambial, nos primeiros anos de desenvolvimento, pois, em plantações comerciais, elas são induzidas a crescer mais em altura em decorrência do espaçamento de plantio e nível de competição (BOSCHETTI et al., 2015). Pela relação inversamente proporcional observada entre a RP média e o GE, a utilização da resistografia em árvores de eucalipto em áreas sujeitas à ação de ventos poderá contribuir para a seleção de materiais menos propensos a este dano e no monitoramento contínuo da qualidade da madeira ao longo do seu crescimento.

A hipótese de que maior a massa úmida da árvore e de suas seções (copa e tronco), maior é a RP foi confirmada. Isso ocorre em virtude do incremento nas dimensões e do empacotamento das fibras da madeira para suporte mecânico do peso da árvore (produto da massa pela aceleração da gravidade). Com o espessamento da parede e aumento da proporção de fibras e redução da frequência de vasos, maior é a RP durante o avanço da haste do resistógrafo.

A não significância dos coeficientes de correlação da RP e DB com a massa úmida das árvores pode ter ocorrido em função do número de repetições utilizado por material genético e pelo coeficiente de variação dos dados. Quanto aos sentidos de perfuração com o resistógrafo, a ausência de correlações da RP mensurada no sentido N→S para o clone B ocorreu em função de algumas árvores avaliadas terem apresentado resistências semelhantes para diferentes valores de massa, além de valores de resistência inferiores em árvores mais pesadas. Valores semelhantes de RP em árvores com massas diferentes podem ocorrer por uma compensação das forças de atrito, alinhadas ao teor de umidade, densidade e outras características da madeira.

Os valores e o comportamento da RP por sentido de perfuração também podem ser influenciados pelas tensões de crescimento das árvores de eucalipto, pois a distribuição e/ou desequilíbrio das forças de tração e compressão no seu interior resistem ou alteram o avanço da haste durante a perfuração.

O incremento de DB da madeira de eucalipto na região próxima à casca (Figura 3) ocorre em resposta ao espessamento da parede celular das fibras e pela redução na frequência e proporção de vasos em relação às posições mais internas (OLIVEIRA; SILVA, 2003). A maior DB nesta região representa uma tendência geral para a madeira de eucalipto (LOPES et al., 2011; HEIN et al., 2015; CARNEIRO, 2017;

PRASETYO et al., 2017). Como a relação da RP com a DB é diretamente proporcional, nestas posições também acontece o incremento da resistência.

Para a árvore de maior massa úmida, o incremento linear da RP da posição de 7,5 cm do diâmetro até a casca no lado Sul do fuste acontece em função das forças de atrito da haste do resistógrafo com o lenho, adicionadas ao aumento da densidade neste mesmo sentido. Em maiores profundidades de perfuração aumenta a influência do atrito sobre a RP, o que fica evidente ao comparar os perfis das árvores de maior e menor massa úmida (Figura 3).

A % cerne apresentou comportamento característico para o clone A, diminuindo em valores absolutos com o incremento em diâmetro e altura, uma tendência inversa à observada para a DB e RP. A tendência distinta entre essas variáveis com o crescimento das árvores proporciona a ausência de correlação entre elas.

A redução da RP da haste do resistógrafo com a maior % cerne do clone B de crescimento rápido e baixa densidade pode ser explicada pela predominância de fibras de paredes finas e maior frequência de vasos na região do cerne juvenil. Como o comportamento de aumento das fibras e redução da frequência de vasos ocorre da medula em direção à casca, atingindo pontos de máximo na região do alburno, o lenho fica mais resistente à perfuração. Isso confirma a maior RP com o alburno mais espesso, para ambos os clones.

No clone de crescimento lento e média densidade, as árvores com alburno mais espesso também apresentaram um acréscimo de DB nesta região. A tendência de valores máximos de densidade em regiões próximas à casca, na região do alburno, também foi observada para outros materiais de eucalipto (TREVISAN et al., 2008; PEREIRA et al., 2013).

Altos valores de DM são um indicativo do incremento em madeira de tração (WANG et al., 2010). A alta variabilidade do DM do clone A e a maior quantidade de árvores com valores de DM superiores a 1 cm proporcionaram uma relação significativa com a RP N→S e DB da madeira. Os valores de DM no clone B foram pequenos, por isso as alterações no lenho provocadas pela assimetria da medula não foram registradas pelo resistógrafo e não houve efeito sobre a densidade. Contudo, não se descarta o efeito do lenho de tração na RP em árvores com deslocamento acentuado de medula para este clone.

5 CONCLUSÕES

A relação da resistência à perfuração e densidade básica com os parâmetros da copa, dimensões e massa úmida das árvores foi específica por material genético. Árvores do clone de crescimento lento e média densidade, de maior diâmetro e altura e menos esbeltas, possuem maior resistência à perfuração e densidade, que não são alteradas com os parâmetros da copa, apesar da copa mais pesada ocasionar o incremento da resistência à perfuração. O incremento das dimensões e índices da copa aumentaram a resistência à perfuração e densidade da madeira do clone de crescimento rápido e baixa densidade. O mesmo efeito na massa de fuste e da árvore ocasionou o aumento da resistência à perfuração.

A resistência à perfuração foi maior em árvores com menor proporção de cerne (clone de crescimento rápido) e maior espessura de alburno. O deslocamento da medula alterou a resistência à perfuração e densidade da madeira, apenas do clone de crescimento lento.

CAPÍTULO II

ESTIMAÇÃO DA DENSIDADE E UMIDADE DA MADEIRA DE EUCALIPTO POR RESISTOGRAFIA

1 INTRODUÇÃO

A amostragem intensiva de árvores para avaliação da qualidade da madeira, apesar de ideal, implica em maior demanda de tempo e custos (PÁDUA, 2009). Contudo, a amostragem inadequada pode não abranger as variações ambientais e genotípicas e originar interpretações e decisões incorretas, que trazem prejuízos econômicos (COUTO et al., 2012; DIAZ et al., 2017). Neste cenário, existe a demanda por novas metodologias e equipamentos que ofereçam diagnósticos eficientes, seguros e com menor custo operacional, se possível, ainda em condições de campo com as árvores em pé, o que poderá otimizar a gestão e o planejamento da cadeia produtiva e de suprimentos (GOUVÊA et al., 2011b).

Dentre as propriedades da madeira, a mais pesquisada é a densidade, pelo efeito direto no beneficiamento, desempenho operacional e financeiro, consumo específico, nas características do produto em si, pela herdabilidade genética, por responder às práticas silviculturais e às condições ambientais e pelas correlações com as demais propriedades (BATISTA; KLITZKE; SANTOS, 2010; COUTO et al., 2012; MAURI et al., 2015; MENESES et al., 2015; MIRANDA; PEREIRA, 2015; ROCHA, 2017; ROCHA, 2018).

A umidade da madeira é a propriedade física que expressa a massa de água presente na estrutura do lenho, e possui efeito nas demais propriedades, nos processos industriais, no transporte e em sua utilização. Para o acompanhamento da umidade, faz-se necessário o desenvolvimento e aprimoramento de metodologias de determinação rápida, de baixo custo e precisas (DONATO et al., 2015). Em árvores em pé e toras, ainda são poucos os estudos que abordam a estimação ou determinação da umidade.

Para a avaliação da densidade e umidade da madeira, a existência de métodos com as características descritas anteriormente e que não danifiquem árvores, toras,

peças serradas ou produtos em estudo, pode resultar em expressivos ganhos econômicos, desde que haja boa correlação entre a estimativa e o valor real da propriedade. Por isso, é importante as investigações e a adequação do resistógrafo como metodologia para a estimação dessas propriedades físicas, ao relacionar a resistência à perfuração (RP) da haste do equipamento com a densidade básica (LIMA et al., 2007; ACUÑA et al., 2011; GOUVÊA et al., 2011b; BARRÍA; SANDOVAL; ROJAS, 2017; CARRILLO; VALENZUELA; ELISSETCHE, 2017; DIAZ et al., 2017; OLIVEIRA, WANG; VIDAURRE, 2017; DOWNES et al., 2018; FUNDOVA; FUNDA; WU, 2018) e umidade da madeira (LIN et al., 2003; OLIVEIRA et al., 2017; UTHAPPA et al., 2017).

Perante as lacunas existentes na estimação da densidade da madeira e umidade acima do ponto de saturação das fibras (PSF), é importante responder ao seguinte questionamento: a RP da haste do resistógrafo aferida em árvores em pé possibilita estimar com precisão a densidade e umidade da madeira de eucalipto?

A densidade básica (DB) e umidade natural (U%) da madeira apresentam relação inversamente proporcional e regiões de lenho mais denso aumentam a RP. A hipótese é que a RP tem relação inversamente proporcional com a U%, o que corrobora a sua estimação pela resistografia em árvores em pé, toras e dormentes. Não se descarta a possibilidade do rastreamento e da rápida predição para o controle de cargas de madeira em determinada condição de umidade e tempo de estocagem, e o retorno da densidade “em rede”, utilizada atualmente em algumas plantas industriais.

Teve-se por objetivo analisar a variabilidade diametral das propriedades físicas e da RP da haste do resistógrafo em árvores em pé, compará-la a perfis densitométricos e estimar a DB e a U% da madeira.

2 METODOLOGIA

Material e amostragem

Avaliou-se dois clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 76 meses de idade, provenientes de plantação experimental em Aracruz, estado do Espírito Santo, Brasil, com área total de 2 hectares (19°49'15" Latitude Sul e 40°05'20" Longitude Oeste). O solo da região é classificado como argissolo amarelo típico textura arenosa média e o clima, de acordo com Alvares et al. (2013), como Aw -

tropical com inverno seco e temperatura média anual de 23°C. Os materiais genéticos foram implantados em parcelas em faixas (seis linhas de árvores) com dois espaçamentos de plantio, o 3 x 2 e 3 x 3 m, sendo alocadas três subparcelas em cada parcela para medições anuais de crescimento e produção. Os clones foram escolhidos pelas seguintes características: Clone A – crescimento lento e média densidade; e Clone B – crescimento rápido e baixa densidade.

20 árvores por material genético e espaçamento (tratamentos), totalizando 80 repetições, foram selecionadas pelo diâmetro à altura do peito (DAP, 130 cm do solo) médio de cada parcela, determinado em inventário florestal realizado a quatro meses da coleta (Tabela 1). Para controle da amostragem, as posições cardiais Norte e Sul da plantação foram determinadas com bússola digital e identificadas no fuste. Os espaçamentos foram considerados apenas como indicativo do efeito da taxa de crescimento das árvores nas variáveis em estudo.

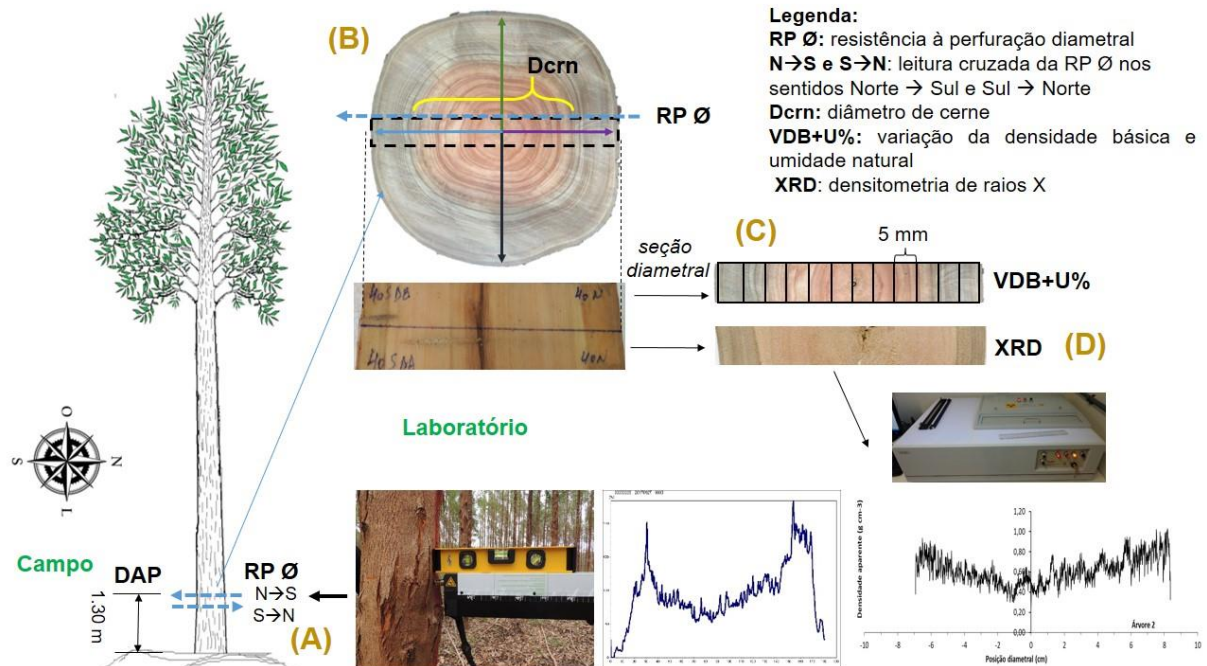
Tabela 1 – Valores médios do diâmetro e altura total das árvores de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos 76 meses de idade

Variáveis	Material genético / espaçamento (m)			
	Clone A - CL + MD		Clone B - CR + BD	
	3 x 2	3 x 3	3 x 2	3 x 3
DAP (cm)	14,07 (2,63)	18,08 (6,33)	17,76 (2,40)	20,80 (3,81)
Ht (m)	21,94 (7,34)	24,87 (6,46)	24,47 (11,31)	29,61 (8,82)

CL + MD: crescimento lento e média densidade; CR + BD: crescimento rápido e baixa densidade; DAP: diâmetro à altura do peito; Ht: altura total. Valores entre parênteses são os coeficientes de variação. Fonte: O autor.

As leituras da RP da haste do resistógrafo foram realizadas na altura do DAP das árvores, nos sentidos Norte→Sul e Sul→Norte, com distância de 1,5 cm entre os furos (Figura 1 A). Na mesma região, foi retirado um disco (5 cm de espessura) para avaliação das propriedades físicas da madeira. Após a identificação, os discos foram colocados em sacos plásticos e armazenados em refrigerador para manter a umidade.

Figura 1 – Esquema de amostragem das árvores com a descrição dos pontos de leituras do resistógrafo e análises realizadas (A ... D)



Fonte: O autor.

Incremento médio anual em DAP

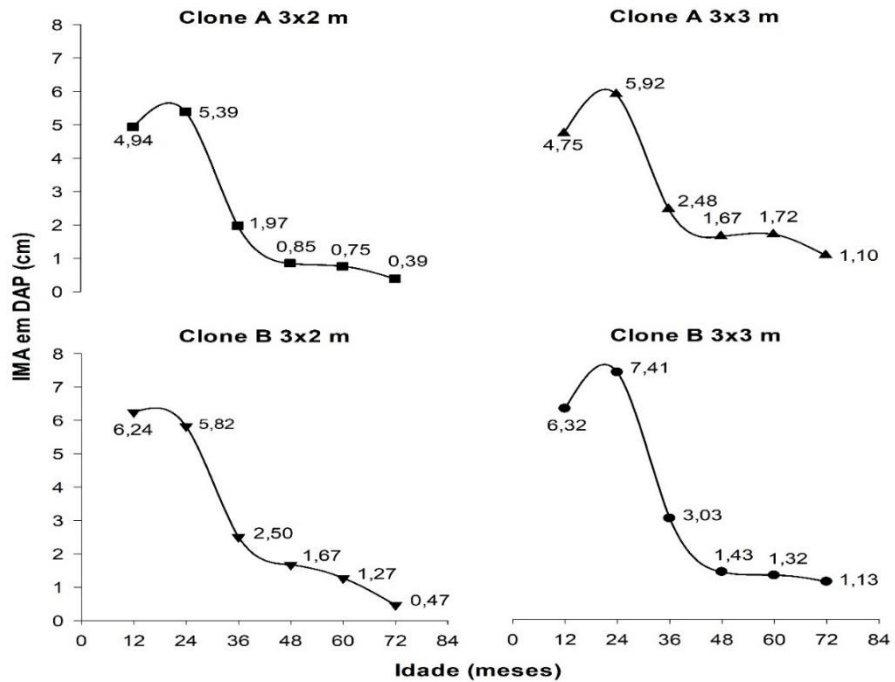
Ao longo do período de crescimento das árvores foram realizados inventários anuais e mensurou-se o DAP e altura total de 15 árvores em cada subparcela. Com os dados de diâmetro com casca em cada idade calculou-se o incremento médio anual (IMA) (Equação 1) por material genético e espaçamento (Figura 2).

$$\text{IMA} = \text{DAP}_i - \text{DAP}_{i-1} \quad (1)$$

Em que: IMA: incremento médio anual em DAP (cm); i: idade atual; n-1: idade antecedente.

Com os dados do IMA em DAP foi possível demarcar as idades nos gráficos de variabilidade diametral e observar o comportamento da RP e das propriedades físicas da madeira ao longo do crescimento das árvores. Apesar do pequeno deslocamento de medula das árvores, foi necessário ajustar os pontos de incremento por raio (Norte e Sul) em cada tratamento, demarcando-se no eixo das abcissas do gráfico as posições correspondentes às idades.

Figura 2 – Incremento médio anual em diâmetro à altura do peito (DAP) de árvores de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* por espaçamento de plantio



Fonte: O autor.

Resistência à perfuração da haste do resistógrafo

A RP foi mensurada com o resistógrafo R650-SC (Series 6, RINNTECH, Heidelberg, Alemanha), configurado com velocidade de avanço de 20 mm s⁻¹ para todas as árvores. Nas microperfurações utilizou-se hastes de aço com 1,5 mm de diâmetro e 3 mm em sua ponta (aresta de corte), sendo a troca da ferramenta realizada conforme indicações do fabricante para madeira de folhosas e quando o desgaste era visível (Tabela 2).

Tabela 2 – Desempenho do resistógrafo por número de perfurações na avaliação da resistência da madeira de eucalipto

Item	1ª troca	2ª troca	3ª troca	4ª troca	Perfil das hastes utilizadas nas perfurações
Bateria ¹	232	368	271	223	
Haste	296	351	480	-	

↑ Célula = número de perfurações até a troca do item

¹ não considera o tempo de deslocamento entre árvores e os acionamentos para limpeza e troca da haste.

Fonte: O autor.

A diferença no número de perfurações para a troca da haste (Tabela 2) ocorreu em função das condições (chuvas e ventos) e ritmo do trabalho de campo e também da mudança de densidade entre os materiais genéticos. Todavia, esta particularidade não demonstrou efeito significativo nos perfis de resistência.

Previamente às microperfurações, configurou-se o resistógrafo com o diâmetro com casca individual, sendo anotado o número do perfil correspondente à árvore e ao sentido (N→S e S→N). Em seguida, com nível de bolha posicionou-se o equipamento a 90° em relação ao eixo longitudinal do fuste (Figura 1 A), para o alinhamento da perfuração em relação aos anéis de crescimento e diminuição do efeito do atrito do lenho com a haste, sendo o operador do resistógrafo direcionado por um observador auxiliar. Realizou-se as microperfurações nas posições cardeais do fuste à linha do plantio, nos momentos com baixa ocorrência de ventos e chuvas. Nos casos de rajadas durante a operação, foi descartada a avaliação.

Os dados da memória do resistógrafo foram exportados, convertidos em arquivos com extensão compatível ao EXCEL e os perfis analisados no software DECOM™ (*version 2.36c*). Os pontos referentes à espessura de casca dos discos, mensurada com paquímetro previamente no campo, e de avanço da haste externamente à madeira, foram eliminados dos perfis resistográficos. A RP média foi calculada com os dados das perfurações realizadas nos sentidos N→S e S→N (sentido invertido na análise de dados) e também foi adotado o procedimento de RP cruzada, proposto por Lima et al. (2006).

O balanceamento dos dados na mesma escala de amostragem da densidade da madeira foi realizado, uma vez que o resistógrafo registra a RP a cada 0,01 mm de avanço da haste, ou seja, 1000 pontos de leituras por centímetro. Deste modo, o valor de DB determinado a cada 5 mm foi alinhado à média de 500 dados de RP, enquanto a densidade aparente mensurada a cada 0,08 mm pela densitometria de raios X foi comparada à média de 8 dados de resistência.

Diâmetro de cerne

Na superfície transversal dos discos sem casca e polimento e na condição saturada, foram traçadas duas linhas, paralela e perpendicular ao sentido das microperfurações do resistógrafo (Figura 1 B). A região limite entre o cerne e o alborno foi determinada visualmente pela alteração natural da cor do lenho, marcada com lápis

diretamente sobre as linhas e mensurado o diâmetro total do disco e de cerne com régua centimétrica. Por fim, calculou-se o diâmetro de cerne médio dos tratamentos.

Densidade e umidade da madeira

Amostras a cada 5 mm (Figura 1 C) foram retiradas das seções diametrais dos discos do DAP, para determinação da DB de acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2003) e U% da madeira pela NBR 7190 (ABNT, 1997). A densidade e umidade médias por árvore foram determinadas e avaliadas as suas variabilidades ao longo do diâmetro.

A densidade aparente da madeira (DA, 12% de umidade) foi avaliada pela técnica de densitometria de raios X. Seções diametrais dos discos de oito árvores por tratamento foram utilizadas (Figura 1 D), sendo quatro selecionadas pela divergência entre os perfis de RP nos sentidos N→S e S→N, e as restantes pela semelhança entre os perfis. As seções diametrais foram secas ao ar, coladas em suportes de madeira e, posteriormente, seccionadas no sentido transversal em serra circular dupla, para a obtenção de amostras finas de aproximadamente 2,0 mm de espessura. Estas amostras foram acondicionadas em câmara de climatização (12 h, 20°C e 60% UR) até atingir 12% de umidade.

A varredura das seções transversais foi realizada por um feixe de raios X colimado, em intervalos de 80 µm, no equipamento QTRS-01X (*Quintek Measurement Systems* – Figura 1 D). Utilizou-se o software QMS para transformação dos valores de raios X em densidade aparente (DOBNER; HUSS; TOMAZELLO FILHO, 2018; ORTEGA RODRIGUEZ; TOMAZELLO FILHO, 2019).

Análise estatística

O teste F da análise de variância foi utilizado para avaliação da diferença estatística entre as médias de RP mensuradas nos sentidos N→S e S→N e entre as classes de diâmetro, assim como da DB e U%. A comparação da RP da haste do resistógrafo com a densitometria de raios X (DA) foi realizada de forma qualitativa pela análise gráfica dos perfis médios por tratamento e quantitativa pela correlação linear de Pearson.

Uma vez que a RP apresentou correlação significativa com a DB e U% da madeira, foram ajustados modelos polinomiais de grau n (Equação 2) pela análise de regressão linear, para a sua estimação.

$$DB \text{ ou } U\% = \beta_0 + \beta_1 RP + \beta_2 RP^2 + \dots + \beta_n RP^n + e \quad (2)$$

Em que: DB: valor estimado da densidade básica (variável dependente); U%: valor estimado da umidade (variável dependente); β_0 : constante de regressão (intercepto da reta com o eixo Y); β_1 : coeficiente de regressão; β_2 : coeficiente de regressão do componente quadrático; β_p : coeficiente de regressão do polinômio de grau n; RP: valor de resistência à perfuração da haste do resistógrafo (variável independente); e: erro da regressão.

Os modelos lineares ajustados foram analisados pela significância da análise de regressão (teste F) e de todos os coeficientes da equação (teste t), pelo coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da estimativa (S_{yx}) e pela análise gráfica dos resíduos. Para todos os testes estatísticos utilizou-se o nível de 5% de significância, sendo realizados no software *SigmaPlot 13.0*.

3 RESULTADOS

Os valores médios de DB, U% e RP da madeira foram 0,51 g cm⁻³, 137,94% e 142,56% para o clone A e 0,42 g cm⁻³, 176,22% e 97,73% para o clone B, respectivamente.

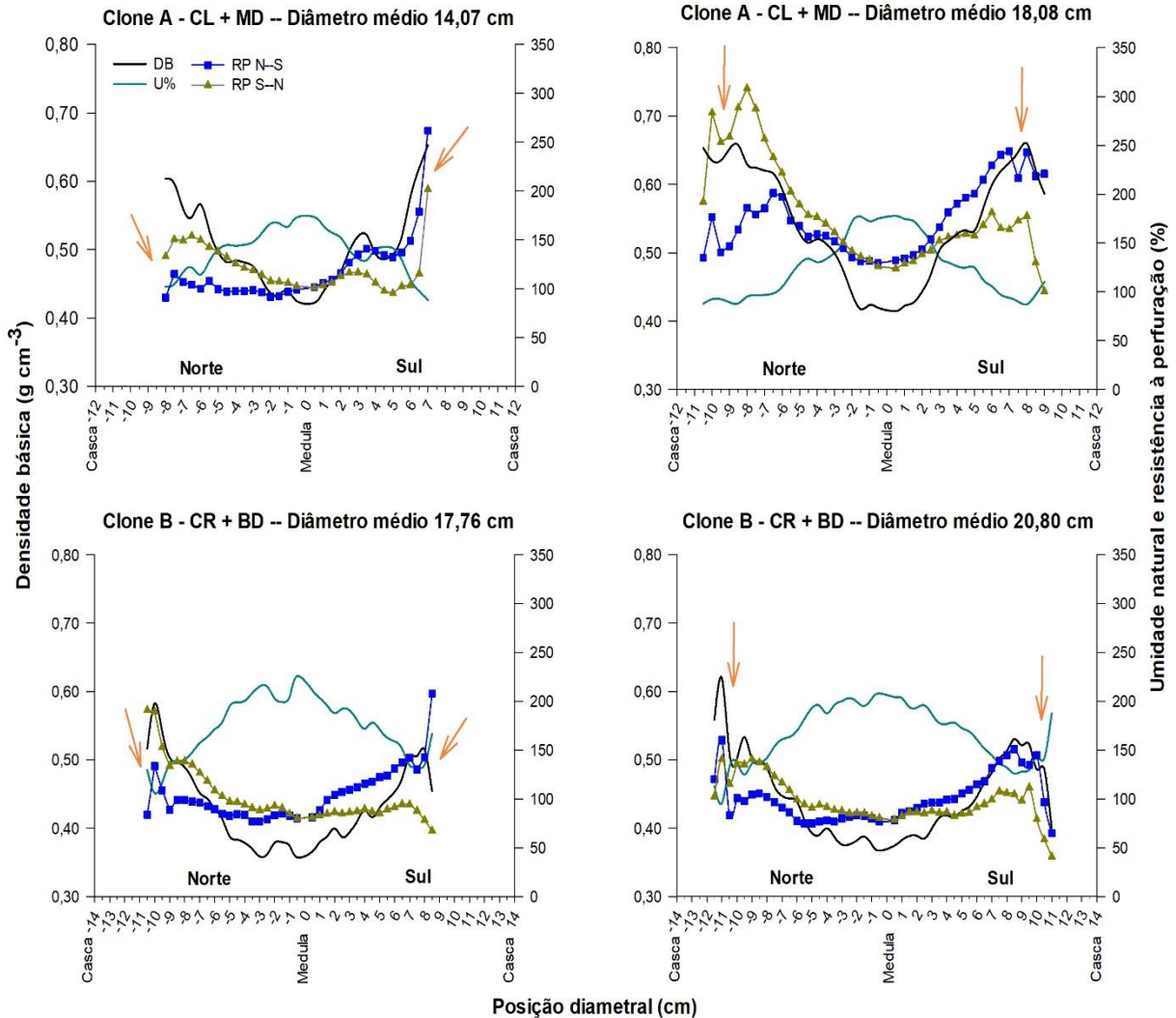
Variabilidade diametral da resistência à perfuração e propriedades físicas da madeira

As médias de RP dos materiais genéticos dentro das classes de diâmetro, mensuradas nos sentidos N→S e S→N não diferem entre si, mas o comportamento ao longo do diâmetro foi divergente (Figura 3). No clone A, de crescimento lento e média densidade, a RP apresentou maior alteração entre as classes diamétricas, com incremento e maior variabilidade dos perfis em maiores diâmetros. No clone B, de crescimento rápido e baixa densidade, as tendências da RP ao longo do diâmetro das árvores são semelhantes entre as classes diamétricas.

No geral, ocorreu o incremento da RP da região da medula até a casca para os raios Norte e Sul. Na região próxima à casca, as variações da RP são mais bruscas

(setas alaranjadas – Figura 3), com quedas seguidas por incrementos, ou vice e versa, ou apenas o acréscimo linear.

Figura 3 – Variabilidade diametral da resistência à perfuração (RP) nos sentidos N→S e S→N, densidade básica (DB) e umidade natural (U%) da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade)

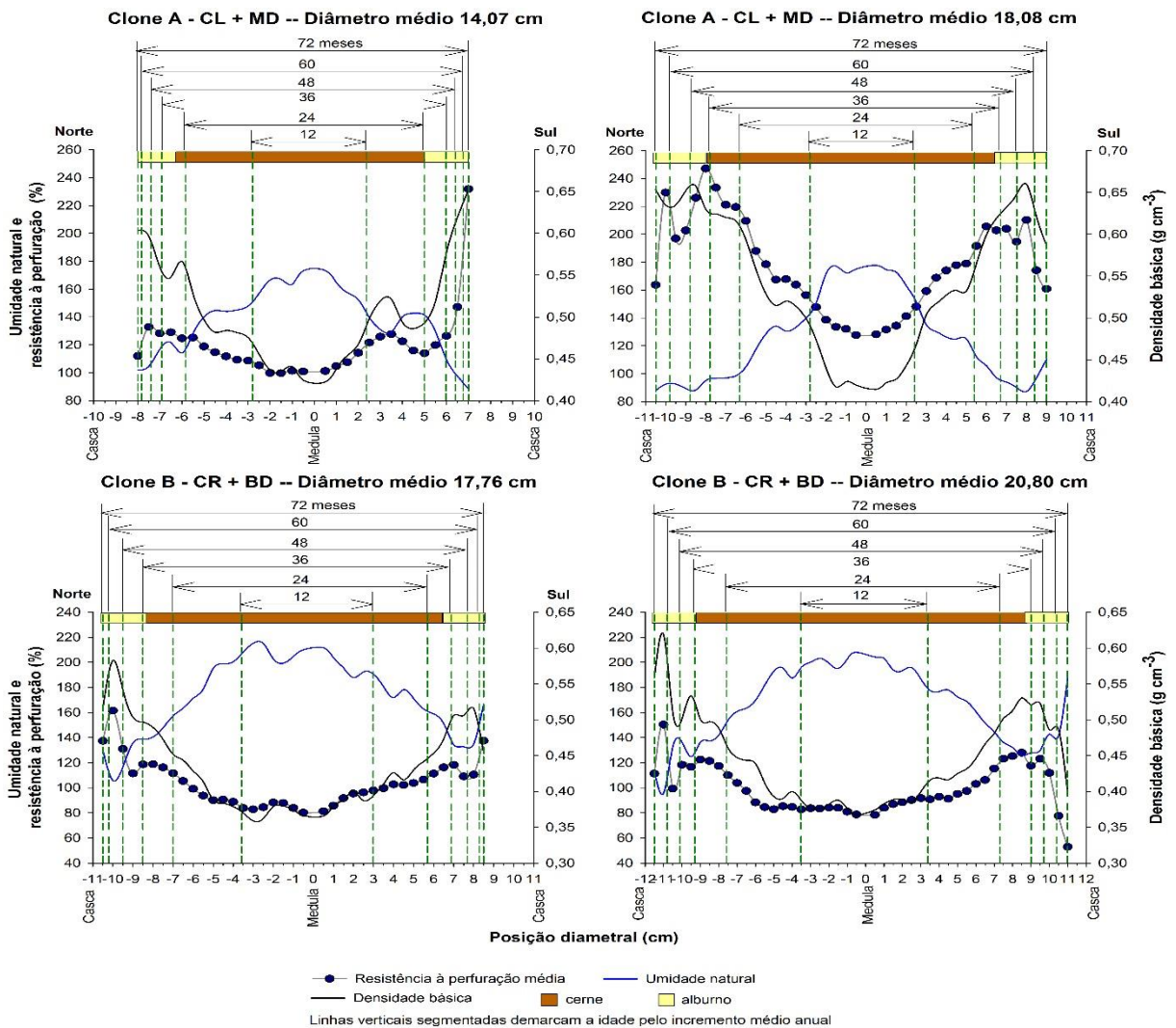


A média de DB aumentou e a de U% diminuiu com o aumento da classe diamétrica das árvores, para ambos os clones (Figura 3). Independente da classe de diâmetro, a DB aumentou da medula em direção à casca, com oscilações ao longo do raio e quedas em regiões adjacentes à casca do fuste (setas alaranjadas – Figura 3), para a maioria dos tratamentos. O comportamento inverso ocorreu para a U%, com acréscimo na região central e decréscimo em direção à casca do fuste. Ao considerar o eixo das ordenadas dos gráficos, as curvas de DB e U% apresentam forma côncava e convexa com algumas oscilações, ou seja, um comportamento espelhado ao longo do diâmetro das árvores.

Maior correspondência dos perfis de DB e U% com a RP ocorreu no segundo raio das perfurações nos sentidos N→S e S→N das árvores. Este resultado corrobora o uso da técnica de RP cruzada e da média aritmética dos dados dos sentidos de perfuração, como método plausível para aprimorar a relação da RP com a DB e U% da madeira.

Mediante as variações das propriedades que ocorrem com o crescimento das árvores e formação do lenho, foi importante analisar o comportamento diametral da RP, DB e U% por período de crescimento e dentro do cerne e alburno (Figura 4).

Figura 4 – Variabilidade diametral da resistência à perfuração média, umidade natural e densidade básica da madeira por idade, diâmetro de cerne e espessura de alburno em clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade)



Em função da variabilidade diametral da DB e RP em regiões mais internas do fuste ou próximas à medula, o cerne apresentou os menores valores destas variáveis,

com incremento na região do alburno (Figura 4). O inverso aconteceu para a U% da madeira, ou seja, ela diminuiu do cerne para o alburno. No clone A, que cresce mais lentamente e possui densidade mediana, as diferenças de RP, DB e U% entre o cerne e alburno são mais expressivas, principalmente em árvores de maior diâmetro.

À medida que o cerne envelheceu a DB e RP aumentaram e a U% decresceu. Na região do alburno a variabilidade foi maior, e com o avançar da idade pode ocorrer tanto o aumento quanto o decréscimo destas variáveis, porém, para a maioria dos casos ocorreu uma elevação seguida por queda da RP e DB e o contrário para U%.

No clone B de crescimento rápido e baixa densidade, independentemente da classe de diâmetro, a RP ao longo do diâmetro do cerne é mais homogênea, e a partir de 24 meses iniciam as alterações na DB e U%. Estas divergências tem efeito direto sobre a precisão das equações preditoras, visto que nessa região do lenho a RP não vai explicar exatamente o comportamento da DB e U% da madeira deste clone.

O rápido incremento (>) da RP e DB e o decréscimo (<) da U% da madeira foram observados nos primeiros 24 meses de crescimento, com as alterações até esta idade, descritas na sequência abaixo:

- i) 18 [>], 25 [>] e 26% [<] para árvores de diâmetro médio de 14,07 cm do clone A;
- ii) 61 [>], 41 [>] e 40% [<] para árvores de 18,08 cm do clone A;
- iii) 38 [>], 24 [>] e 25% [<] para árvores de 17,76 cm do clone B; e
- iv) 48 [>], 30 [>] e 30% [<] para árvores de 20,80 cm do clone B.

Estes resultados corroboram a maior variabilidade das árvores de maior diâmetro do clone A e a homogeneidade do clone B entre as classes de diâmetro (Figura 4). A partir de 24 meses, as alterações nos valores de RP, DB e U% com as idades foram mais bruscas, principalmente para as árvores de maior diâmetro.

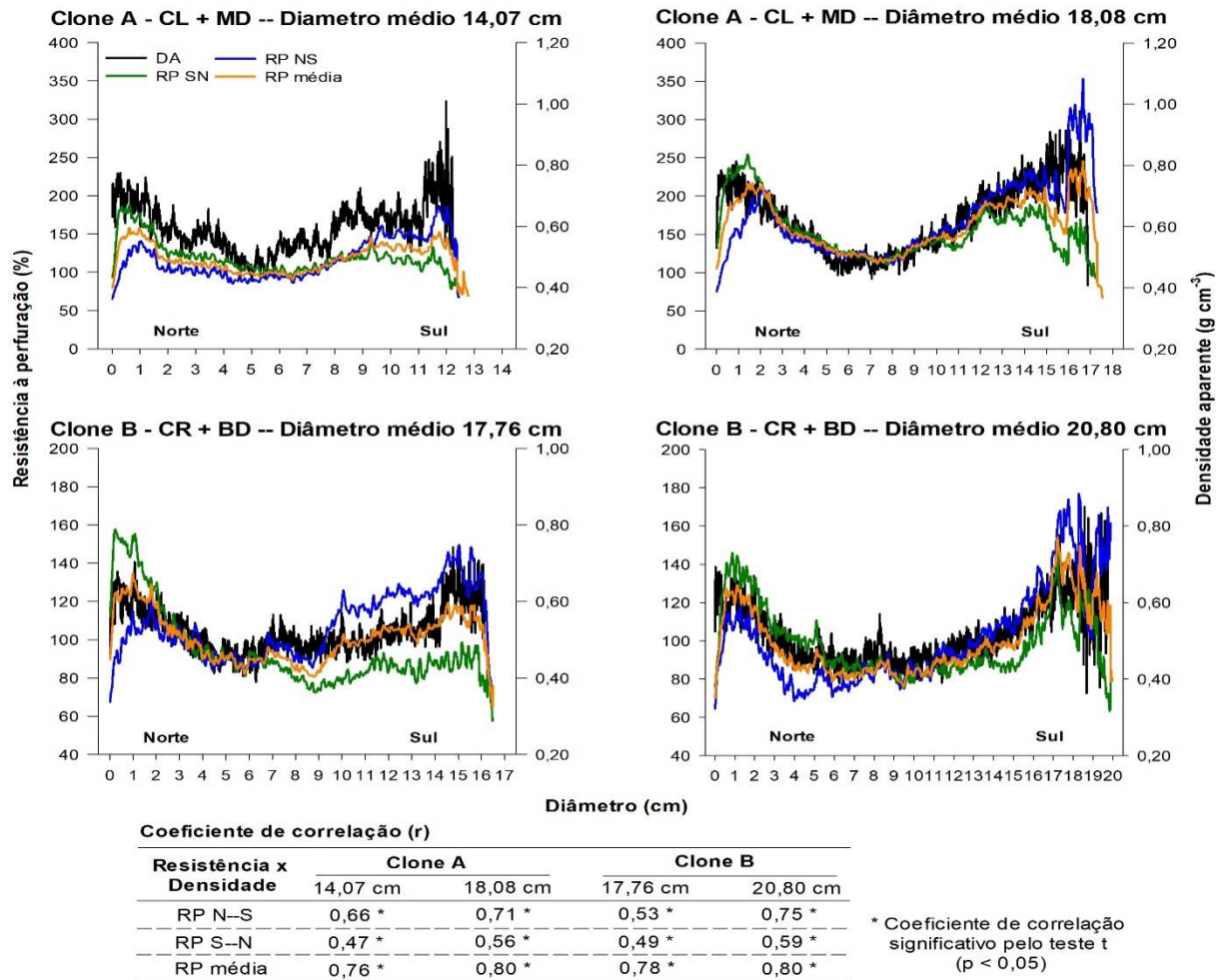
Avaliação comparativa dos perfis de resistência à perfuração e densitométricos

A RP da haste do resistógrafo mensurada, em árvores em pé apresentou boa correspondência com a DA determinada pela densitometria de raios X, demonstrada pela análise gráfica dos perfis e numérica pelos coeficientes de correlação (Figura 5). O grau de associação dessas variáveis alterou em função do material genético e da classe diamétrica das árvores, mas, no geral, os coeficientes de correlação foram positivos e moderados ($r < 0,60$) a fortes ($0,60 < r < 0,90$).

A RP mensurada no sentido N→S para ambos os materiais genéticos e classes diamétricas teve maior associação com o comportamento diametral de DA da

madeira. A RP média fez uma suavização da tendência observada nos sentidos N→S e S→N, e aumentou a correspondência gráfica entre os perfis e os valores dos coeficientes de correlação.

Figura 5 – Comparação dos perfis de resistência à perfuração (RP) e de densidade aparente (DA, 12% de umidade) determinada por densitometria de raios X da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade) por classe de diâmetro



Nas regiões com picos de elevação de DA, também foi percebido o mesmo efeito para a RP. Esta semelhança é importante para confirmar que, com o avanço da perfuração, o incremento em RP foi uma característica dependente, em maior parte, da estrutura anatômica do lenho, como fibras mais espessas e longas e a menor proporção de vasos, variáveis que também explicam a variação de DA.

Ao longo do diâmetro ocorreu a redução da DA e RP da madeira na região central, com incremento em direção à casca nos lados N e S do fuste. No geral, o maior acréscimo dessas variáveis ocorreu em direção à casca do lado S do fuste, região na qual a RP foi mais diversa entre os sentidos de mensuração N→S e S→N.

Predição da densidade básica e umidade da madeira por resistografia

As medidas de precisão da estimativa da DB e da U% da madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* pela RP da haste do resistógrafo apresentaram variações por sentido de perfuração, classe de diâmetro e material genético (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3 – Predição da densidade básica (DB) pela resistência à perfuração (RP) diametral em árvores de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade)

Variáveis independentes	Equação	R ² aj. (%)	S _{yx} (g cm ⁻³)	P
Clone A - MD + CL – Diâmetro médio 14,07 cm				
<i>RP</i> _{N→S}	DB = 0,376 + 0,0011 RP	35,30	0,049	*
<i>RP</i> _{S→N}	DB = 0,285 + 0,0018 RP	44,40	0,046	*
<i>RP</i> _{Cruz}	DB = 0,276 + 0,0017 RP	71,40	0,033	*
<i>RP</i> _{média}	DB = -0,323 + 0,010 RP - 2,51x10 ⁻⁵ RP ²	77,51	0,029	*
Clone A - MD + CL – Diâmetro médio 18,08 cm				
<i>RP</i> _{N→S}	DB = 0,286 + 0,0015 RP	38,80	0,065	*
<i>RP</i> _{S→N}	DB = 0,356 + 0,0011 RP	44,70	0,061	*
<i>RP</i> _{Cruz}	DB = 0,247 + 0,0015 RP	83,10	0,034	*
<i>RP</i> _{média}	DB = -0,447 + 0,009 RP - 1,91 x10 ⁻⁵ RP ²	82,81	0,034	*
Clone A - MD + CL				
<i>RP</i> _{N→S}	DB = -1,981 + 0,041 RP - 0,0002 RP ² + 3,76x10 ⁻⁷ RP ³	63,37	0,049	*
<i>RP</i> _{S→N}	DB = 0,359 + 0,0011 RP	52,60	0,055	*
<i>RP</i> _{Cruz}	DB = 0,278 + 0,0014 RP	88,20	0,028	*
<i>RP</i> _{média}	DB = -0,286 + 0,008 RP - 1,80x10 ⁻⁵ RP ²	93,63	0,020	*
Clone B - BD + CR – Diâmetro médio 17,76 cm				
<i>RP</i> _{N→S}	DB = 0,314 + 0,0011 RP	23,70	0,051	*
<i>RP</i> _{S→N}	DB = 1,307 - 0,024 RP + 0,0002 RP ² - 5,0x10 ⁻⁷ RP ³	50,11	0,042	*
<i>RP</i> _{Cruz}	DB = 1,182 - 0,023 RP + 0,0002 RP ² - 5,3x10 ⁻⁷ RP ³	93,34	0,015	*
<i>RP</i> _{média}	DB = 0,125 + 0,003 RP	83,10	0,024	*
Clone B - BD + CR – Diâmetro médio 20,80 cm				
<i>RP</i> _{N→S}	DB = 0,243 + 0,0020 RP	60,20	0,039	*
<i>RP</i> _{S→N}	DB = 0,259 + 0,0019 RP	42,10	0,047	*
<i>RP</i> _{Cruz}	DB = 0,198 + 0,0023 RP	71,70	0,033	*
<i>RP</i> _{média}	DB = 0,860 - 0,017 RP + 0,0002 RP ² - 4,9x10 ⁻⁷ RP ³	79,94	0,027	*
Clone B - BD + CR				
<i>RP</i> _{N→S}	DB = 0,242 + 0,0020 RP	54,30	0,042	*
<i>RP</i> _{S→N}	DB = 0,269 + 0,0018 RP	37,00	0,050	*
<i>RP</i> _{Cruz}	DB = 0,185 + 0,0023 RP	69,20	0,035	*
<i>RP</i> _{média}	DB = 1,037 - 0,022 RP + 0,0002 RP ² - 6,4x10 ⁻⁷ RP ³	81,84	0,027	*
Clones A e B				
<i>RP</i> _{N→S}	DB = 0,308 + 0,0014 RP	40,10	0,043	*
<i>RP</i> _{S→N}	DB = 0,358 + 0,0010 RP	23,90	0,049	*
<i>RP</i> _{Cruz}	DB = 0,263 + 0,0016 RP	58,00	0,036	*
<i>RP</i> _{média}	DB = 0,222 + 0,0022 RP	57,20	0,037	*

N→S: perfuração sentido norte-sul e S→N: sentido sul-norte; Cruz: resistência à perfuração cruzada; R² aj.: coeficiente de determinação ajustado; S_{yx}: erro padrão da estimativa; P: valor P.

* Significativo (P < 0,05) pelo teste F da regressão e de t para coeficientes da equação.

Tabela 4 – Predição da umidade natural (U%) pela resistência à perfuração (RP) diametral em árvores de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade)

Variáveis independentes	Equação	R ² aj. (%)	S _{yx} (%)	P
Clone A - MD + CL – Diâmetro médio 14,07 cm				
<i>RP_{N→S}</i>	U% = 184,93 - 0,397 RP	32,20	19,11	*
<i>RP_{S→N}</i>	U% = 218,20 - 0,661 RP	40,90	17,83	*
<i>RP_{Cruz}</i>	U% = 368,91 - 2,482 RP + 0,0054 RP ²	86,64	8,48	*
<i>RP_{média}</i>	U% = 477,06 - 4,163 RP + 0,0107 RP ²	78,88	10,66	*
Clone A - MD + CL – Diâmetro médio 18,08 cm				
<i>RP_{N→S}</i>	U% = 444,65 - 3,067 RP + 0,0068 RP ²	47,11	22,45	*
<i>RP_{S→N}</i>	U% = 194,56 - 0,388 RP	43,00	23,30	*
<i>RP_{Cruz}</i>	U% = 404,73 - 2,284 RP + 0,0042 RP ²	93,79	7,69	*
<i>RP_{média}</i>	U% = 553,83 - 4,059 RP + 0,0089 RP ²	87,42	10,95	*
Clone A - MD + CL				
<i>RP_{N→S}</i>	U% = 1138,15 - 16,29 RP + 0,0855 RP ² - 0,0001 RP ³	69,44	16,23	*
<i>RP_{S→N}</i>	U% = 316,81 - 1,83 RP + 0,0037 RP ²	58,53	18,91	*
<i>RP_{Cruz}</i>	U% = 354,29 - 2,00 RP + 0,0038 RP ²	95,72	6,07	*
<i>RP_{média}</i>	U% = 477,36 - 3,60 RP + 0,0084 RP ²	95,83	5,99	*
Clone B - BD + CR – Diâmetro médio 17,76 cm				
<i>RP_{N→S}</i>	U% = 388,03 - 3,202 RP + 0,0103 RP ²	37,88	24,44	*
<i>RP_{S→N}</i>	U% = 247,72 - 0,728 RP	43,70	23,27	*
<i>RP_{Cruz}</i>	U% = 468,11 - 3,900 RP + 0,0112 RP ²	88,58	10,48	*
<i>RP_{média}</i>	U% = 553,18 - 5,575 RP + 0,0178 RP ²	87,00	11,18	*
Clone B - BD + CR – Diâmetro médio 20,80 cm				
<i>RP_{N→S}</i>	U% = 264,19 - 0,983 RP	59,40	19,11	*
<i>RP_{S→N}</i>	U% = 255,56 - 0,924 RP	40,90	23,07	*
<i>RP_{Cruz}</i>	U% = 289,96 - 1,148 RP	75,10	14,97	*
<i>RP_{média}</i>	U% = 303,12 - 1,392 RP	73,90	15,32	*
Clone B - BD + CR				
<i>RP_{N→S}</i>	U% = 265,99 - 0,971 RP	53,50	21,20	*
<i>RP_{S→N}</i>	U% = 252,19 - 0,875 RP	35,70	24,93	*
<i>RP_{Cruz}</i>	U% = 298,51 - 1,186 RP	73,00	16,15	*
<i>RP_{média}</i>	U% = 315,33 - 1,483 RP	72,60	16,28	*
Clones A e B				
<i>RP_{N→S}</i>	U% = 227,28 - 0,634 RP	39,20	19,80	*
<i>RP_{S→N}</i>	U% = 203,26 - 0,448 RP	21,80	22,44	*
<i>RP_{Cruz}</i>	U% = 248,26 - 0,731 RP	57,80	16,49	*
<i>RP_{média}</i>	U% = 264,18 - 0,948 RP	54,20	17,18	*

N→S: perfuração sentido norte-sul e S→N: sentido sul-norte; Cruz: resistência à perfuração cruzada; R² aj.: coeficiente de determinação ajustado; S_{yx}: erro padrão da estimativa; P: valor P.

* Significativo (P < 0,05) pelo teste F da regressão e de t para coeficientes da equação.

A RP, quando avaliada por classe de diâmetro, explicou em 35 a 83% a variação da densidade da madeira do clone A, de crescimento lento e média densidade (Tabela 3). A maior precisão das estimativas ocorreu para a DB de árvores de maior diâmetro deste clone. Para o clone B, a RP foi mais precisa na estimativa de

DB das árvores de menor diâmetro, que no geral explicou de 23 a 93% a variação desta propriedade física da madeira.

Os modelos ajustados para U% apresentaram boa precisão na estimativa, com erros padrões de 5,99 a 24,93% (Tabela 4), considerados baixos, tendo em vista que os valores dessa propriedade física superaram os 100%. Para o clone A, a RP média foi mais eficiente na predição da U%, enquanto para o clone B e para os materiais combinados, a RP cruzada foi a variável preditora que gerou maior R^2 aj. e menor Syx.

Os sentidos de perfuração N→S e S→N, quando avaliados isoladamente em ambos os clones, explicaram muito pouco a variação da DB e U%, porém a média aritmética das perfurações dos dois sentidos e a técnica de RP cruzada aumentaram as medidas de precisão (Tabelas 3 e 4). A modelagem com as classes diamétricas combinadas também contribuiu para a melhoria da precisão dos ajustes, principalmente para o clone A. No clone B, a RP cruzada de árvores de menor diâmetro estimou a DB e U% de forma mais precisa que os modelos ajustados para as classes diamétricas combinadas.

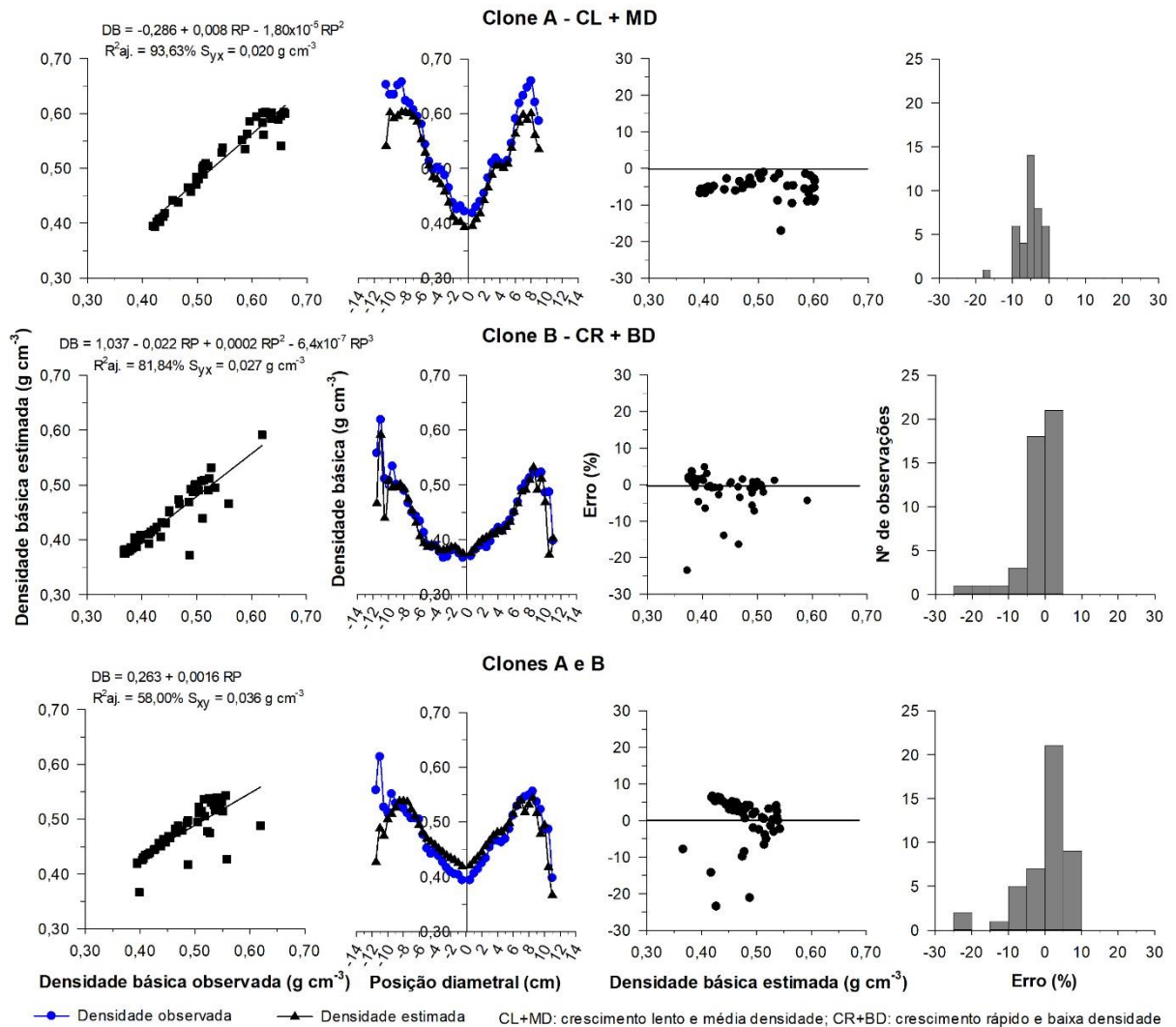
No clone de crescimento lento, média densidade e conseqüentemente menor umidade, a resistografia foi mais precisa na estimativa da DB e U% da madeira de eucalipto. A RP foi mais homogênea ao longo do diâmetro para o clone de crescimento rápido e baixa densidade, o que influenciou na predição do comportamento da DB e U% da madeira, que conforme observado na Figura 4, apresentaram oscilações a partir do segundo ano de crescimento.

A RP cruzada conseguiu explicar em 58% a variabilidade da DB e U% da madeira dos clones avaliados conjuntamente, com erros de $0,036 \text{ g cm}^{-3}$ e 16,5%, respectivamente. Em vista da variabilidade existente entre os materiais genéticos, a estimação da DB e U% da madeira de eucalipto pela RP em árvores em pé pode ser considerada razoável.

As equações ajustadas em função da RP média para os clones A e B e da RP cruzada para os clones combinados foram as escolhidas para predizer a DB da madeira de eucalipto (Figura 6). O clone A apresentou bom ajuste entre DB observada e estimada pela distribuição e comportamento ao longo do diâmetro, com a concentração dos erros em valores próximos a 5% e tendência do modelo de subestimar a densidade. Pequenas oscilações ocorrem entre a DB observada e estimada da madeira do clone B, principalmente nas regiões mais próximas à casca, com erros mais distribuídos, porém concentrados em 5% para cima ou para baixo da

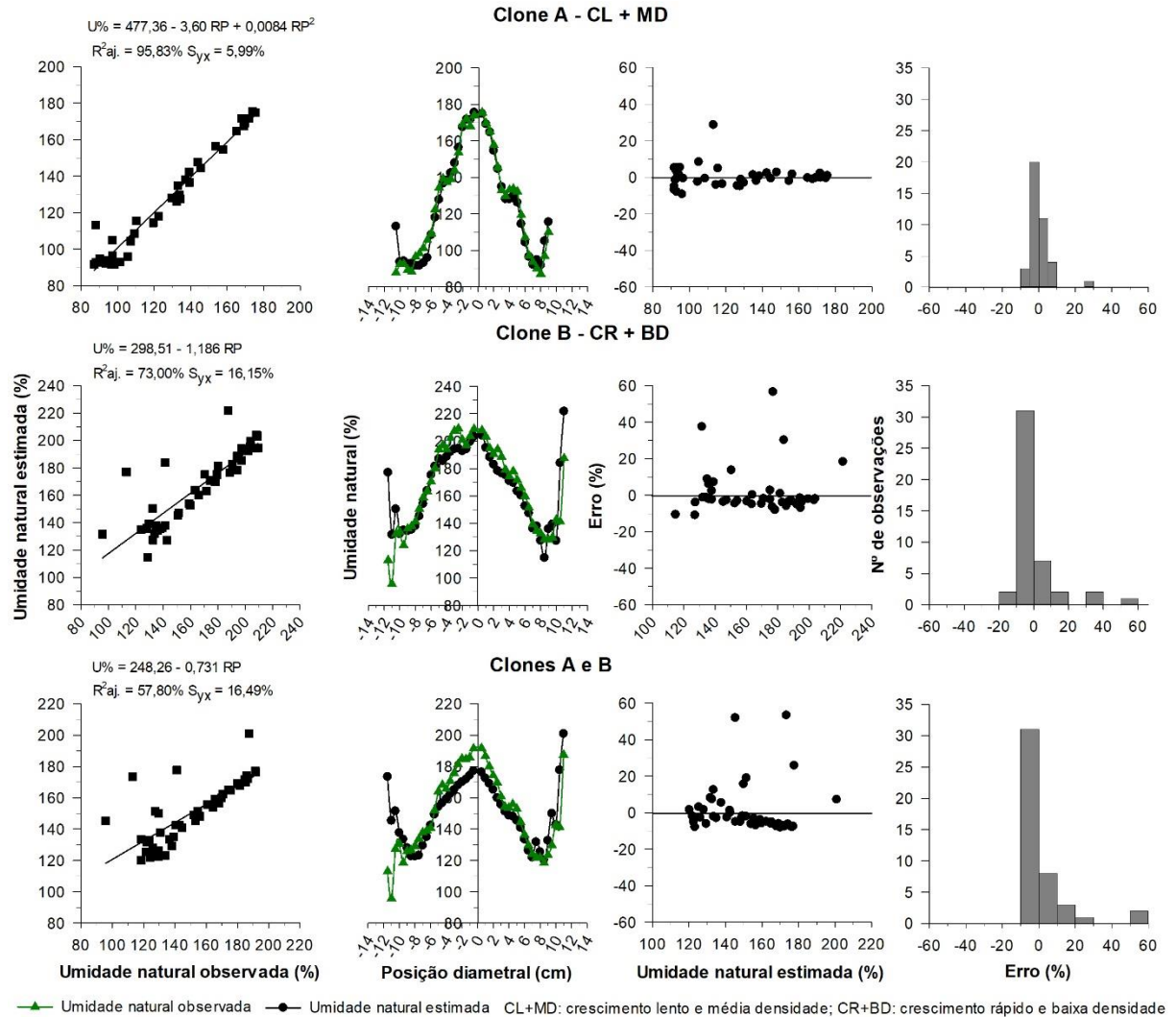
média. Para o agrupamento dos clones, acontecem ao longo do diâmetro mais pontos de divergência entre as densidades estimada e observada e a distribuição dos erros concentrou entre 5 e 10%.

Figura 6 – Densidade básica (DB) estimada versus a observada, variabilidade diametral, distribuição e histograma de frequência dos erros percentuais para a madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade)



A U% estimada do clone A apresenta alta similaridade com a observada, seja pela dispersão e/ou comportamento ao longo do diâmetro, com erros bem distribuídos e concentrados em 5% (Figura 7). Para o clone B, ocorreram alterações na dispersão e variabilidade diametral da U% estimada e observada, com erros mais dispersos e frequentes entre -10 e 0%. Com a combinação dos clones é nítida a divergência entre a U% observada e estimada em regiões próximas à casca da árvore, com erros ainda concentrados entre -10 e 0%.

Figura 7 – Umidade natural (U%) estimada versus a observada, variabilidade diametral, distribuição e histograma de frequência dos erros percentuais para a madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade)



4 DISCUSSÃO

Variabilidade diametral da resistência à perfuração e propriedades físicas da madeira

O balanceamento dos dados de RP da haste do resistógrafo entre os sentidos de perfuração (N→S e S→N) ocorreu para as árvores de eucalipto. Com exceção da direção S→N em árvores de menor diâmetro do clone A, a RP aumentou do primeiro para o segundo raio e, como os sentidos das perfurações se cruzam (Figura 3), ao calcular a média desta característica por diâmetro, o valor tornou-se semelhante.

Para a maioria das posições diametraes foi possível perceber a correspondência da variação da RP da haste do resistógrafo com a DB e U% da madeira, ou seja, os pontos de incremento em RP foram em regiões de lenho mais denso e

consequentemente de menor umidade. Esta correspondência é o principal indicativo do potencial preditor dessas propriedades físicas da madeira pela resistografia em árvores em pé de eucalipto.

O incremento de RP com a classe diamétrica para o clone A foi uma resposta do aumento da DB da madeira. Contudo, nas árvores de maior diâmetro deste clone, a RP aumentou linearmente no segundo raio de cada sentido de perfuração, e apesar de seguir o comportamento da DB nos lados N e S do fuste, a resistência foi mais elevada em comparação ao primeiro raio. Ao comparar as classes diamétricas deste clone, observou-se para a região da medula que teve valores semelhantes de DB entre as classes, maior RP nas árvores de maior diâmetro. Isso confirma a influência das forças de atrito nos perfis gerados e, consequentemente, na predição da DB e U% da madeira.

À medida que a haste do resistógrafo avançou no diâmetro da árvore, em cada sentido de perfuração, ocorreu o aumento da fricção e o aquecimento da ferramenta de corte com os cavacos dentro da cavidade, que sobrepõem a RP oriunda de diferenças naturais de densidade do lenho (RINN, 2012; GAO et al., 2017; OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2017; SHARAPOV; WANG; SMIRNOVA, 2017; SILVA et al., 2017). De forma específica, acontece um somatório das forças de atrito com a RP, o que causa a sua elevação, superestimação da DB e subestimação da U% da madeira, principalmente em regiões ao longo do diâmetro, que, por uma compensação anatômica ou por outros fatores, apresentam valores semelhantes das propriedades físicas. Mesmo sem o deslocamento acentuado da medula das árvores dos clones de eucalipto, não se descarta o efeito do lenho de tração nos perfis de DB e RP.

Pela semelhança da RP entre os sentidos de perfuração e classes diamétricas das árvores do clone B, de crescimento rápido e baixa densidade, pode-se inferir que o efeito do atrito da haste na RP para estes materiais genéticos pode estar mais vinculado aos valores intrínsecos de DB (acima de $0,50 \text{ g cm}^{-3}$) adicionados às forças inerentes de fricção, que ao diâmetro das árvores. Clones de eucaliptos de média à alta densidade da madeira, comumente plantados para a produção de biomassa energética ou em idades mais avançadas, poderão ter maior influência do atrito nos perfis de RP, sendo necessárias futuras investigações.

A similaridade dos perfis de RP entre as classes diamétricas pode ser uma característica intrínseca do material genético e um indicativo da sua estabilidade

ambiental (LIMA et al., 2007). O que representa a maior homogeneidade dos perfis de RP para o clone B.

Apesar de algumas oscilações, a RP e DB dos clones de eucalipto diminuíram na região central do cerne, correspondente à medula, um comportamento oposto do observado para a U%. Este efeito é explicado pela menor espessura da parede das fibras e maior frequência de vasos nesta região, formada em idades iniciais do crescimento, além da influência da medula, que possui menor resistência mecânica. O aumento da DB em direção à casca representa uma tendência geral para a madeira de eucalipto (LIMA et al., 2007; PÁDUA, 2009; LOPES et al., 2011; SETTE JR. et al., 2012; HEIN et al., 2015; ARANTES et al., 2016; CARNEIRO, 2017; PRASETYO et al., 2017), o mesmo pode ser interpretado para a queda da U% a partir da medula (OLIVEIRA; HEILMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005).

A redução da RP em direção ao centro do fuste também foi observada para clones de *Eucalyptus* aos 16 anos (LIMA et al., 2007). Em contraste, a RP de árvores de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 34 meses, aumentou ao longo do primeiro raio, permaneceu alta no segundo e diminuiu gradualmente à medida que a haste se moveu para fora da árvore no lado oposto. Na idade de 62 meses, a RP diminuiu rapidamente até 4,0 cm de profundidade, e a partir desta posição aumentou gradualmente à medida que a haste avançou para o interior do lenho (OLIVEIRA, WANG, VIDAURRE, 2017).

O efeito do atrito nos perfis do resistógrafo para árvores em pé de eucalipto é inerente ao método, mas é possível realizar a sua mitigação e controle. Contudo, destaca-se que o comportamento diametral da RP dos clones de eucalipto plantados em Aracruz/ES seguiu o da densidade, com redução na região central e acréscimo próximo à casca, em ambos os lados do fuste (Figuras 3 e 4). Logo, não foi percebido o aumento severo da RP com o avanço diametral da haste do resistógrafo, como descrito em algumas literaturas (GANTZ, 2002; LIMA et al., 2007; COUTO, 2011; JOHNSTONE et al., 2011; OLIVEIRA, WANG, VIDAURRE, 2017).

As variações bruscas de RP, DB e U% na região do albúrnio ocorrem em resposta à redução do IMA em DAP com o avanço da idade. Este fenômeno causa a aproximação das camadas de crescimento na região próxima à casca (Figura 4), que aumenta a proporção de lenho tardio por área e intensifica a DB e a RP e diminui a U%. Entretanto, ainda são formadas faixas estreitas de lenho inicial, que geralmente são menos densas e resistentes e possuem maior U%, o que confirma as oscilações da RP e das propriedades físicas da madeira (CARRILLO; VALENZUELA;

ELISSETCHE, 2017). Nos perfis densitométricos dos clones de eucalipto (Figura 5), as variações na região próxima à casca foram nítidas, principalmente para o lado Sul das árvores.

O segundo raio das perfurações apresentou melhor ajuste à variabilidade da DB e U% da madeira dos clones de eucalipto, mesmo com a elevação da RP pelo atrito, que teve o nível dependente do material genético. A utilização da RP média das direções de perfuração N→S e S→N suaviza as tendências ao longo do diâmetro e reduz a influência do atrito na predição das propriedades físicas da madeira, sendo uma importante estratégia para aumentar a precisão do método. O impacto quantitativo da RP média nas relações com a DA pode ser observado na Figura 5.

Em árvores de maior diâmetro, o incremento de DB ocorre em função das exigências mecânico-fisiológicas resultantes do seu processo de desenvolvimento (SETTE JR. et al., 2012). Ou seja, com o aumento das dimensões e massa do tronco e da copa das árvores, é necessário um reforço na proporção e morfologia das fibras para suportar esta carga, o que gera o incremento de DB. Com o reforço estrutural das fibras, ocorre a redução dos espaços celulares nos quais a U%, em maior parte na forma de água livre, se concentra. Maior densidade da madeira com o aumento da classe diamétrica também foi encontrada para *E. urophylla* x *E. grandis* aos 72 meses (ARANTES et al., 2016).

Para as árvores do clone de crescimento lento e maior diâmetro, o incremento máximo em DAP de 12 para 24 meses (Figura 2) proporcionou as maiores variações da RP e propriedades físicas da madeira. Com a taxa de crescimento intensificada na idade de 24 meses, as árvores deste clone adquirem maiores dimensões rapidamente, sendo necessária uma estruturação anatômica para suportar o fuste em pé e resistente à ação de forças externas, às exigências da copa e à ocorrência de fatores intrínsecos ao local de crescimento. Esta nova estruturação anatômica é acompanhada de um incremento na DB da madeira.

Avaliação comparativa dos perfis de resistência à perfuração e densitométricos

Apesar das relações moderadas a fortes da RP com a DA na madeira dos clones de eucalipto, este resultado foi considerado como bom, pois divergências nos perfis de variação da densidade determinada por densitometria de raios X e a RP do resistógrafo podem ocorrer (RINN; SCHWEINGRUBER; SCHÄR, 1996; JOHNSTONE et al. 2011). Tendo em vista que o resistógrafo avalia a madeira com umidade acima

do ponto de saturação das fibras (30%) e na árvore em pé e a densitometria é realizada em amostras de 2 mm de espessura, acondicionadas a 12%, de umidade, estas diferenças são fontes de dispersão na correspondência dos métodos. Destaca-se que, na maioria das posições diamétricas, as alterações que ocorreram para a DA foram detectadas pela RP.

A RP e DA seguem o comportamento inerente ao material genético e às suas condições de crescimento, como descrito anteriormente (Figuras 3 e 4). Em adição, o efeito do atrito na RP e do gradiente de umidade entre os métodos pode refletir na associação da RP com a DA, de forma específica para clones e classes diamétricas. Este efeito demonstra que a estimação das propriedades físicas por material genético, teoricamente, é a mais apropriada, mas que pode ter efeito na eficiência operacional.

A associação mais evidente da perfuração N→S com a DA da madeira é um reflexo do esquema e condução da amostragem. Apesar dos pequenos desvios entre os sentidos de perfuração, ao cortar as seções diamétricas do disco para a densitometria, a maior quantidade delas pode ter sido retirada alinhadas à direção de perfuração N→S, o que promove a maior correspondência entre RP e DA.

O atrito da haste do resistógrafo com o lenho dos clones pode ter mais efeito no valor da RP que em sua variabilidade diametral, e ao estimar a densidade por modelos matemáticos, um mesmo valor desta propriedade física pode ser associado a dois diferentes de RP. Esta teoria, proposta anteriormente, é fundamentada conjuntamente pela observação do comportamento da DB e RP ao longo do diâmetro das árvores (Figura 4) e pela comparação dos perfis resistográficos e densitométricos (Figura 5).

A densitometria de raios X possibilita medir com alta precisão em intervalos micrométricos as variações de densidade ao longo do diâmetro (SARANPÄÄ, 2003). Por isso a comparação entre a DA e RP certificou a resistografia como um método potencial para a estimação da densidade da madeira em árvores em pé de eucalipto em idade jovem.

Predição da densidade básica e umidade da madeira por resistografia

As divergências da precisão das equações ajustadas por sentido de perfuração, classe diamétrica e material genético, podem ser explicadas pela variabilidade diametral da RP e propriedades físicas da madeira que foram intrínsecas a estes fatores (Figura 3). Em exemplo, os sentidos de perfuração, que quando avaliados

isoladamente, apresentaram as menores medidas de precisão. Isso aconteceu porque, ao longo do diâmetro, a perfuração em uma direção teve apenas um raio que foi o mais representativo do comportamento da DB e U% da madeira. Quanto ao material genético e classes diamétricas, as variações que ocorrem das propriedades físicas e da RP por estes fatores são expressivas na modelagem matemática.

Os casos de divergências da modelagem por classes diamétricas são recorrentes do quanto à RP foi representativa da variação diametral da DB e U%. Seja por efeito do atrito da haste do resistógrafo ou de características intrínsecas de formação do lenho, a perda de representatividade da RP tem efeito negativo nas predições das propriedades físicas. Este problema ocorreu principalmente nas regiões do alburno adjacentes à casca das árvores.

A modelagem das propriedades físicas pela RP com as classes diamétricas combinadas foi mais precisa. Isso provavelmente ocorreu pelo aumento do número de árvores avaliadas, que proporciona uma faixa mais ampla de valores de RP, DB e TU. Este efeito também foi observado para a combinação dos dados de DB e RP de duas idades de árvores de *E. grandis* x *E. urophylla* (OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2017). Para o clone de crescimento rápido e densidade média, a representatividade da DB e U% pela resistografia nas árvores da menor classe diamétrica superou a observada com a combinação das classes diamétricas.

Os modelos ajustados para estimar a DB e U% pela RP média dos sentidos de perfuração e RP cruzada foram mais precisos. Estas estratégias permitem uma mineração aos dados e suavizam a perda de representatividade da RP de um sentido de perfuração e/ou raio em relação ao outro, o que demonstra o seu potencial prático para utilização em trabalhos com o resistógrafo.

A estimativa geral das propriedades físicas da madeira dos clones de eucalipto pela resistografia teve uma precisão razoável. Porém, ao considerar a variabilidade de crescimento e propriedades da madeira entre estes clones, a economia, eficiência operacional e velocidade de retorno dos relatórios, o método e o modelo geral ajustado são potenciais para avaliação da qualidade da madeira de árvores jovens de eucalipto. O ideal é que sejam adotados os modelos gerados por material genético, dada a sua maior precisão, contudo esta alternativa deverá ser avaliada e adaptada às condições reais das plantações florestais em desenvolvimento.

O resistógrafo apresentou potencial para estimar a umidade acima do PSF. Apesar da forte correlação existente entre a DB e U%, os modelos gerados

demonstraram um comportamento independente dessas propriedades, registrado pela RP. Pela precisão dos modelos ajustados para árvores em pé, o método poderá contribuir para a determinação da umidade de toras, durante a secagem em campo, uma das limitações da cadeia de suprimento das indústrias de carvão vegetal e polpa celulósica. Todavia, novos estudos ainda são necessários para ajustar a aplicação, viabilidade econômica e avaliar a predição da umidade de árvores e toras ao longo das estações do ano e em gradientes climáticos do país.

5 CONCLUSÕES

A densidade básica da madeira aumentou com incremento em diâmetro e da medula para a casca, enquanto a umidade natural diminuiu. A resistência à perfuração diminuiu em direção ao centro do fuste, com oscilações por sentido de perfuração. Árvores de maior diâmetro do clone de crescimento lento e média densidade foram mais resistentes à perfuração e mais heterogêneas. O diâmetro das árvores não teve efeito na resistência à perfuração do clone de crescimento rápido e baixa densidade.

O rápido incremento da densidade e resistência à perfuração e redução da umidade natural ocorre nos dois primeiros anos do crescimento e ao longo do diâmetro do cerne, porém a variabilidade dessas propriedades aumenta no alburno formado em idades mais recentes à do corte.

A resistência à perfuração mensurada em árvores em pé e os perfis de densidade aparente da madeira apresentaram bom grau de correspondência.

As precisões das estimativas de densidade básica e umidade natural da madeira pela resistência à perfuração foram variáveis por sentido de perfuração e dependentes do diâmetro médio e material genético. Com a combinação dos clones, a precisão das estimativas das propriedades físicas da madeira por resistografia foi razoável (58%). Os modelos para clone individual, gerados pela resistência à perfuração cruzada e média, são os mais apropriados para a madeira de eucalipto jovem.

CAPÍTULO III

OTIMIZAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PERFURAÇÃO E EFEITO DA UMIDADE DA MADEIRA DE EUCALIPTO NA RESISTOGRAFIA

1 INTRODUÇÃO

Para a predição da densidade da madeira em árvores em pé, o resistógrafo tem sido utilizado e pesquisado como um método não destrutivo, rápido, prático e que possibilita a redução dos custos e tempo de coleta em campo e de análise em laboratórios (GANTZ, 2002; LIMA et al., 2007; GOUVÊA et al., 2011b; JOHNSTONE et al., 2011; COUTO et al., 2013; BARRÍA; SANDOVAL; ROJAS, 2017; CARRILLO; VALENZUELA; ELISSETCHE, 2017; DIAZ et al., 2017; GAO et al., 2017; DOWNES et al., 2018; FUNDOVA; FUNDA; WU, 2018). A adequação da resistência à perfuração (RP), variável resposta da resistografia, para avaliação da qualidade de árvores jovens de eucalipto foi mencionada por Oliveira, Wang e Vidaurre (2017).

O perfil de RP da haste do resistógrafo na seção diametral do fuste deveria ser semelhante ao padrão de variação da densidade, com incremento em regiões próximas à casca e decréscimo próximo à medula (COUTO, 2011). Pesquisas apontaram a tendência de acréscimo dos valores de RP com o avanço da haste no diâmetro das árvores, o que impacta negativamente a predição da densidade.

A resistência, a densidade e o processo de corte são impactados pelo teor de umidade da madeira (TU), por isso é fundamental compreender as implicações das variações de umidade das árvores nos perfis resistográficos, e consequentemente na estimativa da densidade (LIN et al., 2003; SHARAPOV et al., 2016). É válido mencionar que o método de resistografia é embasado em um processo de corte da madeira, que registra o consumo de energia eletrônica do motor de rotação da haste, que é proporcional ao torque mecânico (KLOPPENBURG, 2018).

Em maiores distâncias a partir da casca, o TU mais alto no interior do lenho origina uma aglutinação dos cavacos na cavidade da perfuração, que dificulta o trajeto normal da haste e em consequência aumenta a RP. Isso aumenta a complexidade e

necessidade de atenuar os efeitos da umidade e otimizar a profundidade de perfuração ideal em árvores em pé de eucalipto.

Apenas os primeiros 5 cm a partir da casca foram considerados na avaliação da densidade da madeira de *Pinus pinaster* por resistografia, por causa da tendência crescente da RP acima desta posição, ocasionada pelo atrito da haste, e pela eficiência operacional, que permitiu a avaliação de até 200 árvores por dia (BOUFFIER et al., 2008). Altas correlações ($r > 0,80$) da densidade e RP foram encontradas nos primeiros 5 cm a partir da casca das árvores.

Teve-se por objetivo avaliar a variabilidade periférica da densidade básica e da RP e o efeito da profundidade de perfuração e de faixas de umidade da madeira na resistografia.

2 METODOLOGIA

Material e amostragem

Avaliou-se dois clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 76 meses de idade, provenientes de plantação experimental em Aracruz, estado do Espírito Santo, Brasil, com área total de 2 hectares (19°49'15" Latitude Sul e 40°05'20" Longitude Oeste). O solo da região é classificado como argissolo amarelo típico textura arenosa média e o clima, de acordo com Alvares et al. (2013), como Aw - tropical com inverno seco e temperatura média anual de 23°C. Os materiais genéticos foram implantados em parcelas em faixas (seis linhas de árvores) com dois espaçamentos de plantio, o 3 x 2 e 3 x 3 m, sendo alocadas três subparcelas em cada parcela para medições anuais de crescimento e produção. Os clones foram escolhidos pelas seguintes características: Clone A – crescimento lento e média densidade; e Clone B – crescimento rápido e baixa densidade.

20 árvores por material genético e espaçamento, 80 repetições no total, foram selecionadas pelo diâmetro à altura do peito (DAP) médio de cada parcela, determinado em inventário florestal realizado a quatro meses da coleta (Tabela 1). Para controle da amostragem, as posições cardeais Norte e Sul da plantação foram determinadas com bússola digital e identificadas no fuste. Os espaçamentos foram considerados apenas como indicativo do efeito da taxa de crescimento das árvores nas variáveis em estudo.

Tabela 1 – Valores médios do diâmetro e altura total das árvores de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos 76 meses de idade

Variáveis	Material genético / espaçamento (m)			
	Clone A – CL + MD		Clone B – CR + BD	
	3 x 2	3 x 3	3 x 2	3 x 3
DAP (cm)	14,07 (2,63)	18,08 (6,33)	17,76 (2,40)	20,80 (3,81)
Ht (m)	21,94 (7,34)	24,87 (6,46)	24,47 (11,31)	29,61 (8,82)

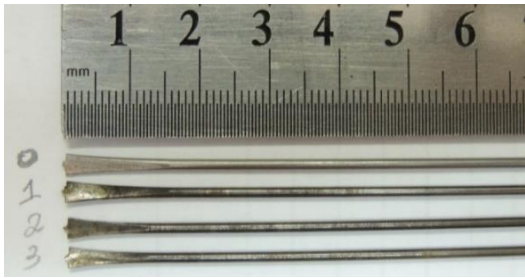
CL + MD: crescimento lento e média densidade; CR + BD: crescimento rápido e baixa densidade; DAP: diâmetro à altura do peito; Ht: altura total. Valores entre parênteses são os coeficientes de variação. Fonte: O autor.

As leituras da RP da haste do resistógrafo foram realizadas na altura do DAP das árvores, nos sentidos Norte→Sul e Sul→Norte, com distância de 1,5 cm entre os furos, e nos primeiros 5 cm da casca nos lados Norte e Sul, a uma distância de 4,5 cm das perfurações diamétrais (Figura 1 A). Na mesma região retirou-se dois discos (5 cm de espessura) para avaliação das propriedades físicas da madeira (Figura 1 B e C), que após a sua identificação, foram colocados em sacos plásticos e armazenados em refrigerador para manter a umidade.

Resistência à perfuração da haste do resistógrafo

A RP foi mensurada com o resistógrafo R650-SC (Series 6, RINNTECH, Heidelberg, Alemanha), configurado com velocidade de avanço de 20 mm s⁻¹ para todas as árvores. Nas microperfurações utilizou-se hastes de aço com 1,5 mm de diâmetro e 3 mm em sua ponta (aresta de corte), sendo a troca da ferramenta realizada conforme indicações do fabricante para madeira de folhosas e quando o desgaste era visível (Tabela 2).

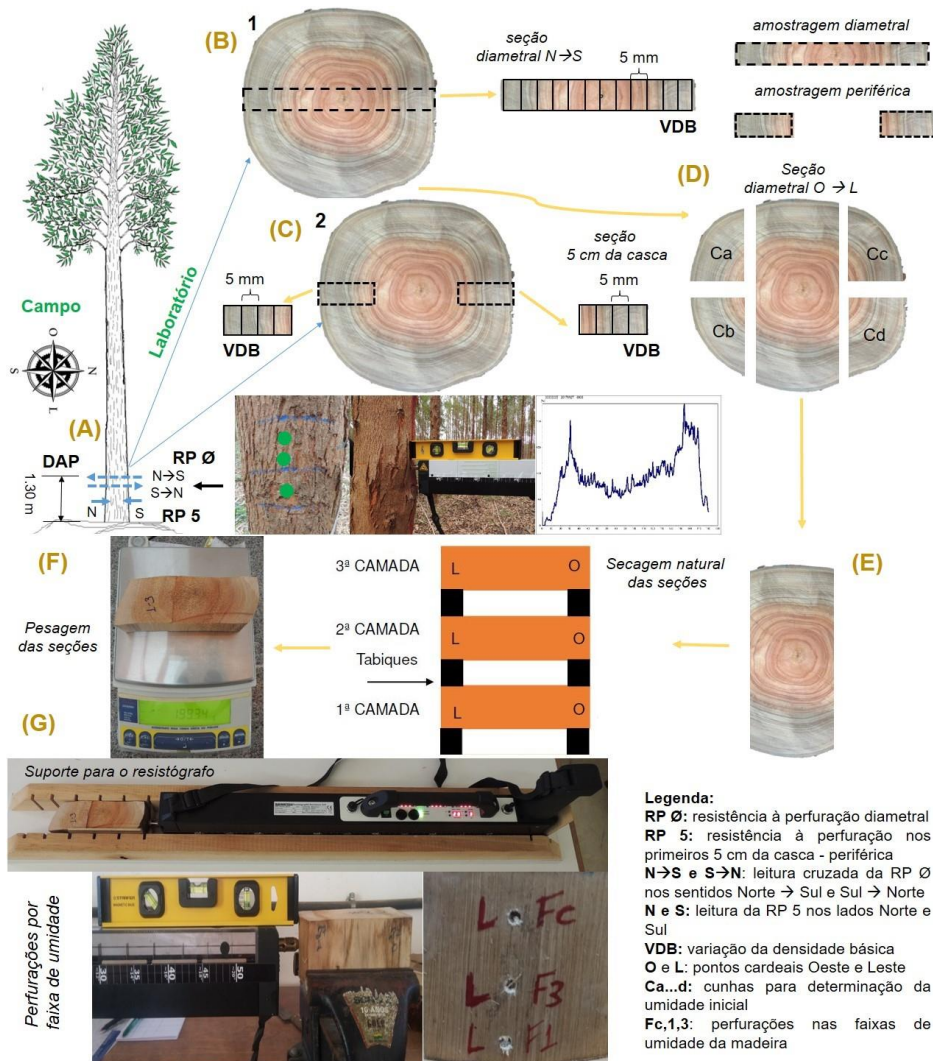
Tabela 2 – Desempenho do resistógrafo por número de perfurações na avaliação da resistência da madeira de eucalipto

Item	1ª troca	2ª troca	3ª troca	4ª troca	Perfil das hastes utilizadas nas perfurações
Bateria ¹	232	368	271	223	
Haste	296	351	480	-	

↑ Célula = número de perfurações até a troca do item

¹ não considera o tempo de deslocamento entre árvores e os acionamentos para limpeza e troca da haste. Fonte: O autor.

Figura 1 – Esquema de amostragem das árvores com a descrição dos pontos de leituras do resistógrafo e análises realizadas (A ... G)



Fonte: O autor.

A diferença no número de perfurações para a troca da haste (Tabela 2), ocorreu em função das condições (chuvas e ventos) e ritmo do trabalho de campo e também da mudança de densidade entre os materiais genéticos. Todavia, esta particularidade não demonstrou efeito significativo nos perfis de resistência.

Previamente às microperfurações, configurou-se o resistógrafo com o diâmetro com casca individual, sendo anotado o número do perfil correspondente à árvore e ao sentido. Em seguida, com nível de bolha posicionou-se o equipamento a 90° em relação ao eixo longitudinal do fuste (Figura 1 A), para o alinhamento da perfuração em relação aos anéis de crescimento e diminuição do efeito do atrito da haste com o lenho, sendo o operador do resistógrafo direcionado por um observador auxiliar. As microperfurações foram realizadas nas posições cardeais do fuste à linha do plantio,

nos momentos com baixa ocorrência de ventos e chuvas. Nos casos de rajadas durante a operação, foi descartada a avaliação.

Os dados da memória do resistógrafo foram exportados, convertidos em arquivos com extensão compatível ao EXCEL e os perfis analisados no software DECOM™ (*version 2.36c*). Os pontos referentes à espessura de casca dos discos, mensurada com paquímetro previamente no campo, e de avanço da haste externamente à madeira, foram eliminados dos perfis resistográficos. A RP média foi calculada com os dados das perfurações realizadas nos sentidos N→S e S→N (sentido invertido na análise de dados).

O balanceamento dos dados na mesma escala de amostragem da densidade da madeira foi realizado, uma vez que o resistógrafo registra a RP a cada 0,01 mm de avanço da haste, ou seja, 1000 pontos de leituras por centímetro. Deste modo, o valor de densidade básica (DB) determinado a cada 5 mm foi alinhado à média de 500 dados de RP.

Densidade básica da madeira

Amostras a cada 5 mm (Figura 1 B e C), foram retiradas das seções diametrais e dos primeiros 5 cm a partir da casca nos lados Norte e Sul dos discos do DAP (160 no total), para determinação da DB de acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2003). A densidade média por árvore e na região periférica do fuste foi determinada e avaliou-se a sua variabilidade.

Otimização da profundidade de perfuração com o resistógrafo

Dois técnicas de microperfuração com o resistógrafo, a periférica e a diametral (Figura 1 A), foram utilizadas para avaliar o efeito da profundidade ou distância na estimativa da DB da madeira. Na periférica, padronizou-se previamente a profundidade de 5 cm mais a espessura média da casca nos lados Norte e Sul de cada árvore. Apesar da perfuração diametral ter sido realizada de casca a casca do fuste, no teste de otimização foram utilizados os dados das profundidades dos raios casca-medula, por classe diamétrica.

A RP em cada profundidade foi relacionada aos valores de densidade da posição e média do diâmetro da árvore. Por exemplo, a RP mensurada na

profundidade de 4 cm estimou a DB desta mesma posição e também a DB média determinada ao longo do diâmetro total da árvore.

O conceito de RP parcial na estimação da DB da madeira, descrito por Oliveira, Wang e Vidaurre (2017), também foi testado. Este método utiliza os dados de RP e DB mensurados em cada raio medula-casca completo (Norte e Sul), combinando todas as profundidades de perfuração.

Resistência à perfuração por faixas de umidade da madeira

Seções diametrais foram retiradas dos discos do DAP no sentido Leste→Oeste, com largura variável em função das classes diamétricas, e cunhas nas extremidades (Figura 1 D). As cunhas foram utilizadas para determinar o TU inicial da madeira pelo método gravimétrico – NBR 7190 (ABNT,1997). Já as seções diametrais foram pesadas para determinação da sua massa inicial e pela Equação 1 foi possível estimar a sua massa seca.

$$M_{se} = \frac{M_i}{\left(\frac{TU_i}{100} + 1\right)} \quad (1)$$

Em que: M_{se} : massa seca estimada da seção diametral (g); M_i : massa inicial da seção diametral (g); e TU_i : teor de umidade das cunhas (%).

As amostras foram mantidas em ambiente coberto para secagem ao ar livre (Figura 1 E), sendo realizadas pesagens periódicas (diárias nos primeiros 15 dias, e posteriormente, a cada dois dias) para controle do seu TU, calculado pelas massas atual e seca estimada (Figura 1 F). Avaliou-se três faixas de umidade: i) acima do ponto de saturação das fibras – PSF (28%); ii) intermediária (17 a 23%); e iii) no equilíbrio higroscópico (12%). Ao atingir cada faixa de umidade, realizou-se as microperfurações com o resistógrafo no sentido diametral das amostras (Figura 1 G), seguidas de nova pesagem. Finalizada a etapa de perfurações por faixas de umidade, as amostras foram secas em estufa para correções e determinação dos valores finais de TU.

Um suporte de madeira (Figura 1 G) foi produzido para estabilizar e nivelar as amostras e o resistógrafo durante as microperfurações em laboratório, evitando-se movimentos que poderiam influenciar os resultados. A configuração da velocidade de avanço da haste do resistógrafo nas microperfurações por faixas de umidade foi a mesma utilizada para árvores em pé (20 mm s^{-1}).

Análise estatística

As médias de DB e RP por posição cardeal (lados norte e sul) do diâmetro do fuste, classe diamétrica e tipo de amostragem (primeiros 5 cm a partir da casca da amostragem periférica e radial – Figura 1 B e C) foram comparadas pelo teste F da análise de variância (Anova). Nos testes de otimização da profundidade de perfuração e na estimação da DB por RP parcial, foram ajustados modelos lineares simples (Equação 2) pela análise de regressão.

$$DB = \beta_0 + \beta_1 RP_i + e \quad (2)$$

Em que: DB: valor estimado da densidade básica (variável dependente); β_0 : constante de regressão (intercepto da reta com o eixo Y); β_1 : coeficiente de regressão; RP: valor de resistência à perfuração da haste do resistógrafo (variável independente); i: profundidade de perfuração; e: erro da regressão.

Os modelos ajustados foram analisados pela significância da análise de regressão (teste F) e de todos os coeficientes da equação (teste t), pelo coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da estimativa (S_{yx}). A profundidade ideal de perfuração foi considerada como aquela em que a modelagem da DB da madeira retornou o maior $R^2_{aj.}$ e menor S_{yx} .

O grau de associação das faixas de umidade com a RP foi avaliado pela análise de correlação de Pearson. Para tal, a RP média do diâmetro das amostras foi correlacionada ao seu TU em cada condição. Para identificar possíveis diferenças das médias de RP entre as faixas de umidade foi realizada a Anova, e em caso significativo, utilizou-se o teste de Tukey. As pressuposições de normalidade dos dados e homocedasticidade de variâncias foram analisadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Cochran, respectivamente. Para todos os testes estatísticos utilizou-se o nível de 5% de significância, sendo realizados no software *SigmaPlot 13.0*.

3 RESULTADOS

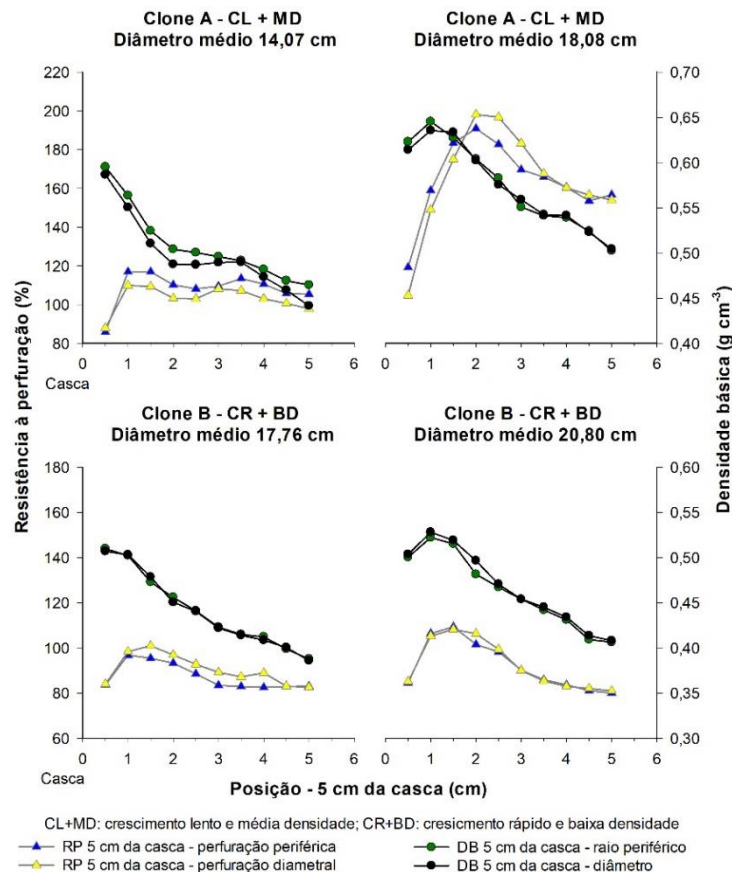
A madeira do clone A, de crescimento lento, apresentou médias gerais de DB e RP de $0,51 \text{ g cm}^{-3}$ (coeficiente de variação - CV = 6,57%) e 134,41% (CV = 35,89%), e a do clone B, de crescimento rápido, $0,42 \text{ g cm}^{-3}$ (CV = 5,24%) e 106,28% (CV = 19,96%).

Variabilidade periférica da RP e DB da madeira

A madeira da região periférica das árvores do clone A apresentou médias de DB e RP de $0,54 \text{ g cm}^{-3}$ ($\text{CV} = 8,34\%$) e $136,26\%$ ($\text{CV} = 26,40\%$), já a do clone B, $0,45 \text{ g cm}^{-3}$ ($\text{CV} = 5,69\%$) e $89,70\%$ ($\text{CV} = 12,59\%$). A DB desta região do fuste foi mais variável e aumentou 6,90 e 6,60% em relação à determinada para o diâmetro total das árvores dos clones A e B, respectivamente. A RP mensurada nos primeiros 5 cm da casca das árvores do clone A foi semelhante à diametral, e a do clone B foi 16% inferior, entretanto, os valores foram menos dispersos para ambos os materiais.

Os lados Norte e Sul nos primeiros 5 cm da casca das árvores não alteram significativamente a DB e RP da madeira dos materiais genéticos, sendo apresentadas as tendências da média dessas variáveis por tipo de amostragem e classes diamétricas (Figura 2). Resultado semelhante foi observado ao comparar os valores dessas propriedades por amostragem periférica e diametral. Em adição, a classe diamétrica teve efeito na RP e DB da madeira dos primeiros 5 cm, apenas para o clone A, com incremento em maiores diâmetros.

Figura 2 – Variabilidade periférica da resistência à perfuração (RP) e densidade básica (DB) da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade) por tipo de amostragem e classes diamétricas



As tendências de variação periférica da DB e RP são divergentes, principalmente para as árvores de maior diâmetro do clone A, de crescimento lento e média densidade. Para este clone, a depender da classe diamétrica, a RP até 1 ou 2 cm de profundidade teve incremento linear, enquanto a DB decresceu, o que pode inibir a relação entre as variáveis nesta região. O clone B, de crescimento rápido e baixa densidade, possui tendências semelhantes de variação periférica da RP e DB da madeira.

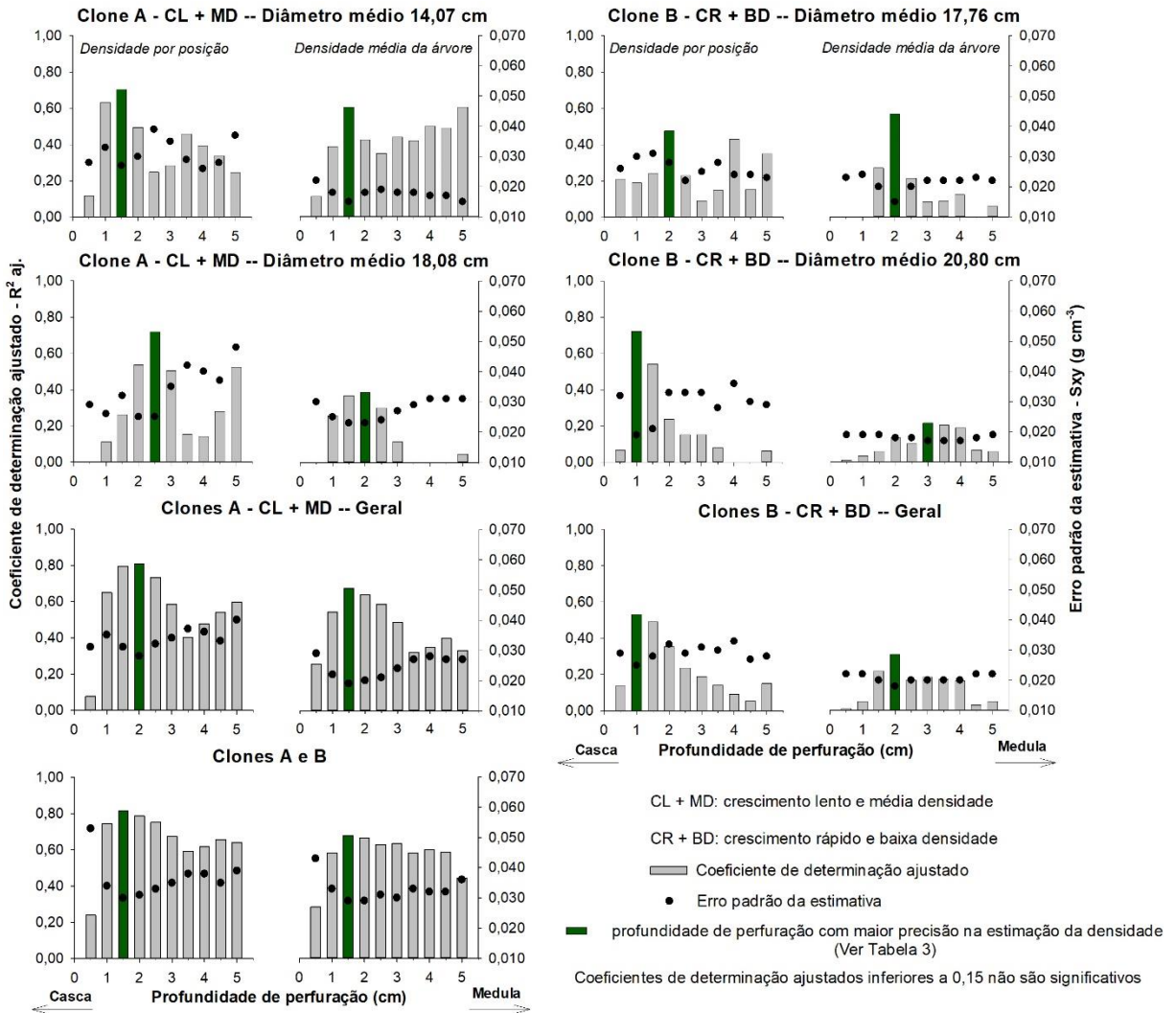
A DB da madeira das árvores da menor classe diamétrica para ambos os clones decresceu 23,5% da região próxima à casca até a posição de 5 cm. Já para as árvores da maior classe diamétrica, ocorreu um acréscimo de 4% da densidade no primeiro centímetro a partir da casca, seguido de decréscimo de 28% até 5 cm. A RP aumentou nos primeiros 2 cm, com incremento de 18 a 75%, seguido de um decréscimo de 12 a 31% até 5 cm, o que foi dependente da classe diamétrica e clone.

Otimização da profundidade de perfuração

A RP nas profundidades de 0,5 a 1,0 cm, 4 a 5 cm e mais próximas à medula, na amostragem periférica e radial, não foram eficientes na predição da DB da madeira dos clones de *E. grandis* x *E. urophylla*, sendo as estimativas não significativas (Figuras 3 e 4). Em função do diâmetro, o potencial preditivo (maior R^2_{aj} e menor S_{yx}) da DB média pela RP até 5 cm a partir da casca foi superior em árvores da menor classe de ambos os clones (Figura 3).

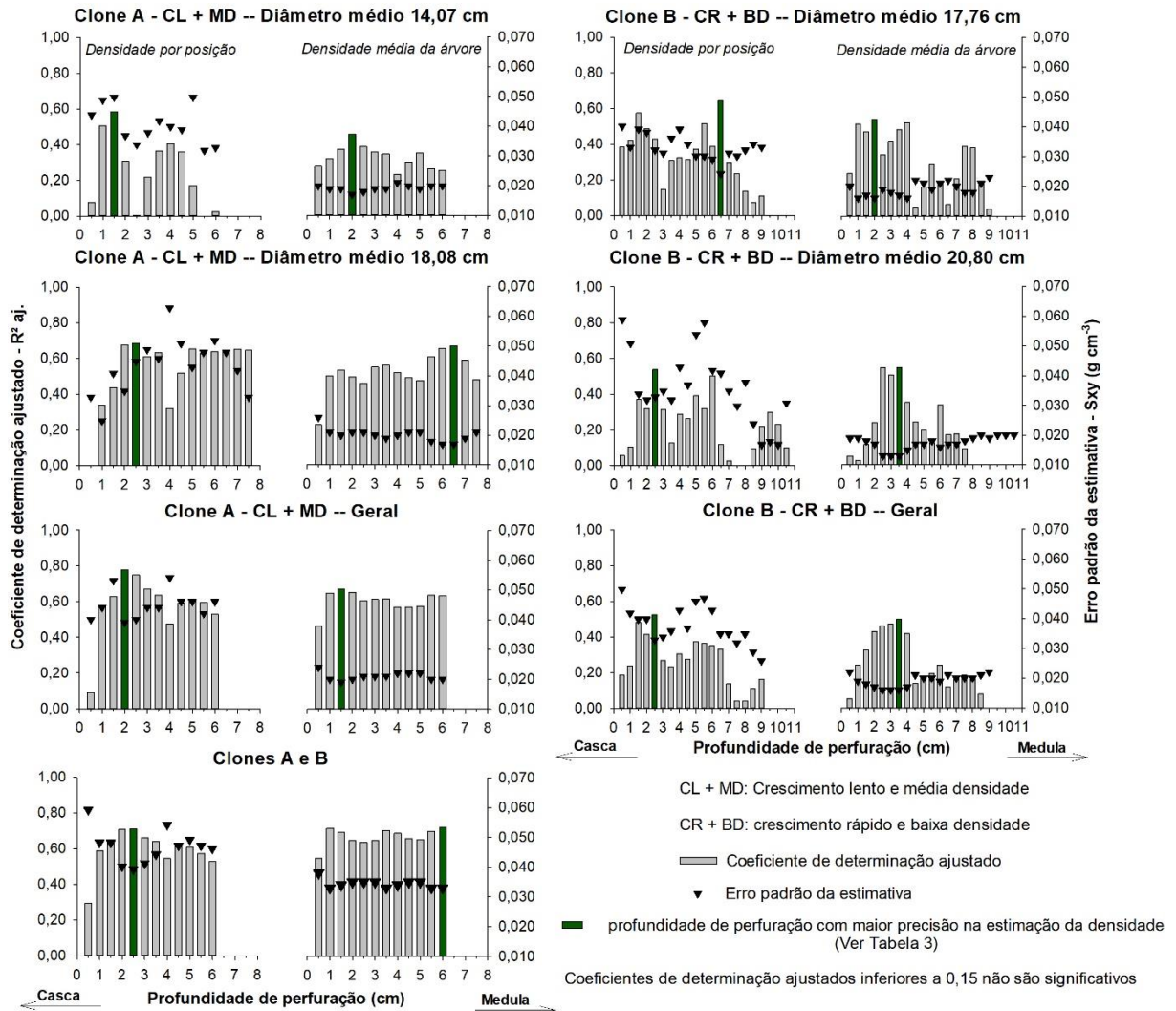
A estimativa de DB da posição e média da madeira dos clones A e B, para classes diamétricas isoladas, não apresentou uma tendência com o avanço da profundidade de perfuração. Em adição, a RP nos primeiros 5 cm da casca em árvores do clone B conseguiu explicar apenas 30% da variação da DB. Quando os clones foram combinados, foi possível perceber um comportamento de aumento do potencial preditivo da DB da madeira até 1,5 cm da casca, seguido de redução com o avanço da profundidade de perfuração até 5 cm (Figura 3).

Figura 3 – Medidas de precisão da estimativa da densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade) por profundidade de perfuração periférica – primeiros 5 cm da casca



As predições da DB da posição e média das árvores dos clones de eucalipto pela RP apresentaram desempenho divergente (Figuras 3 e 4). As medidas de precisão da estimativa da DB por posição foram mais variáveis, principalmente quanto ao erro padrão que não teve tendência. Para a densidade média da árvore, os erros foram menores e mais homogêneos com as profundidades de perfuração (Figura 4). No geral, as profundidades de melhor ajuste da DB alteraram com a classe diamétrica e material genético, sem padrão notável quanto ao potencial preditivo por distância casca-medula.

Figura 4 – Medidas de precisão da estimativa da densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade) por profundidade de perfuração radial – casca à medula



A profundidade de maior precisão na estimativa da DB média do clone A ocorreu próxima à medula das árvores da maior classe diamétrica, relação também observada com a combinação dos clones (Figura 4). Como ocorreu para a amostragem periférica, a estimativa da DB por profundidade de perfuração em árvores do clone B foi mais complexa e com capacidade inferior para explicar a variação da propriedade física.

A DB e a RP nos primeiros 5 cm da casca mensuradas por amostragem periférica e radial não apresentaram diferenças significativas. Contudo, ao avaliar as medidas de precisão das estimativas de DB por profundidade, nota-se um comportamento divergente com o tipo de amostragem. Na prática, a amostragem periférica foi mais eficiente na predição da DB, visto que as profundidades ótimas ocorreram próximo à casca das árvores (Tabela 3).

Tabela 3 – Profundidades de perfuração otimizadas para estimação da densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade) por resistografia

Material genético	Densidade por posição		Densidade média da árvore	
	Profundidade (cm)	Medidas de precisão	Profundidade (cm)	Medidas de precisão
Perfuração periférica (5 cm da casca)				
Clone A - CL + MD -- Diâmetro médio de 14,07 cm	1,50	$R^2_{aj.} = 0,71$ $S_{yx} = 0,027$	1,50	$R^2_{aj.} = 0,61$ $S_{yx} = 0,015$
Clone A - CL + MD -- Diâmetro médio de 18,08 cm	2,50	0,72 0,025	2,00	0,39 0,023
Clone A - CL + MD -- Geral	2,00	0,81 0,028	1,50	0,67 0,019
Clone B - CR + BD -- Diâmetro médio de 17,76 cm	2,00	0,48 0,028	2,00	0,57 0,015
Clone B - CR + BD -- Diâmetro médio de 20,80 cm	1,00	0,72 0,019	3,00	0,22 0,017
Clone B - CR + BD -- Geral	1,00	0,53 0,025	2,00	0,31 0,018
Clones A e B	1,50	0,81 0,030	1,50	0,68 0,029
Perfuração radial (casca – medula)				
Clone A - CL + MD -- Diâmetro médio de 14,07 cm	1,50	$R^2_{aj.} = 0,58$ $S_{yx} = 0,050$	2,00	$R^2_{aj.} = 0,46$ $S_{yx} = 0,017$
Clone A - CL + MD -- Diâmetro médio de 18,08 cm	2,50	0,69 0,045	6,50	0,67 0,017
Clone A - CL + MD -- Geral	2,00	0,78 0,039	1,50	0,67 0,019
Clone B - CR + BD -- Diâmetro médio de 17,76 cm	6,50	0,64 0,024	2,00	0,54 0,016
Clone B - CR + BD -- Diâmetro médio de 20,80 cm	2,50	0,54 0,033	3,50	0,55 0,013
Clone B - CR + BD -- Geral	2,50	0,53 0,033	3,50	0,50 0,016
Clones A e B	2,50	0,71 0,039	6,00	0,58 0,033

Para o clone A, com a união das classes diamétricas, as profundidades de perfuração mais precisas na estimativa da DB da posição e média das árvores foram semelhantes entre as estratégias de perfuração. Na avaliação isolada do clone B, de crescimento rápido e baixa densidade, a perfuração radial foi mais efetiva na predição da DB média da árvore. No geral, as profundidades de perfuração otimizadas por material genético e classe diamétrica explicam a variação de DB da madeira de eucalipto na faixa de 22 a 81%.

Em relação à RP diametral, ocorreu a melhoria das medidas de precisão (aumento do $R^2_{aj.}$ e redução do S_{yx}) da estimativa da DB pela RP parcial, o que foi dependente da classe diamétrica e material genético, sendo os $R^2_{aj.}$ moderados a fortes (Tabela 4). Para o clone A de crescimento lento e média densidade, a RP mensurada no segundo raio (Sul) do fuste foi mais precisa na estimação da DB que a

diametral, e em alguns casos houve a proximidade dos R^2_{aj} . determinados no primeiro raio (Norte) e diâmetro.

Tabela 4 – Equações de regressão linear para estimação da densidade básica (DB) da madeira por resistência à perfuração (RP) diametral e parcial em árvores de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (76 meses de idade)

Profundidade de perfuração	Equação	R^2_{aj}	Syx (g/cm ³)
Clone A - MD + CL – Diâmetro médio 14,07 cm			
Diâmetro	$DB = 0,272 + 0,0020 \times RP^*$	0,57	0,040
Raio Norte	$DB = 0,004 + 0,0044 \times RP^{ns}$	0,68	0,033
Raio Sul	$DB = 0,293 + 0,0017 \times RP^*$	0,69	0,037
Clone A - MD + CL – Diâmetro médio 18,08 cm			
Diâmetro	$DB = 0,157 + 0,0022 \times RP^*$	0,77	0,040
Raio Norte	$DB = 0,189 + 0,0020 \times RP^*$	0,76	0,042
Raio Sul	$DB = 0,065 + 0,0028 \times RP^{ns}$	0,83	0,034
Clone A - MD + CL			
Diâmetro	$DB = 0,197 + 0,0022 \times RP^*$	0,88	0,028
Raio Norte	$DB = 0,223 + 0,0020 \times RP^*$	0,86	0,032
Raio Sul	$DB = 0,134 + 0,0026 \times RP^*$	0,95	0,017
Clone B - BD + CR – Diâmetro médio 17,76 cm			
Diâmetro	$DB = 0,125 + 0,0030 \times RP^*$	0,83	0,024
Raio Norte	$DB = 0,115 + 0,0031 \times RP^*$	0,94	0,016
Raio Sul	$DB = 0,157 + 0,0027 \times RP^*$	0,53	0,032
Clone B - BD + CR – Diâmetro médio 20,80 cm			
Diâmetro	$DB = 0,162 + 0,0029 \times RP^*$	0,75	0,030
Raio Norte	$DB = 0,109 + 0,0034 \times RP^*$	0,86	0,026
Raio Sul	$DB = 0,220 + 0,0023 \times RP^*$	0,64	0,032
Clone B - BD + CR			
Diâmetro	$DB = 0,141 + 0,0030 \times RP^*$	0,74	0,032
Raio Norte	$DB = 0,072 + 0,0037 \times RP^*$	0,89	0,024
Raio Sul	$DB = 0,217 + 0,0023 \times RP^*$	0,57	0,035
Clones A e B			
Diâmetro	$DB = 0,222 + 0,0022 \times RP^*$	0,57	0,037
Raio Norte	$DB = 0,135 + 0,0029 \times RP^*$	0,63	0,037
Raio Sul	$DB = 0,272 + 0,0018 \times RP^*$	0,55	0,035

R^2_{aj} .: coeficiente de determinação ajustado; Syx: erro padrão da estimativa. MD + CL: média densidade e crescimento lento; BD + CR: baixa densidade e crescimento rápido. * significativo pelos testes t para coeficientes da equação e F da análise de regressão; ^{ns} não significativo pelo teste t para coeficientes da equação.

Para o clone B de crescimento rápido e baixa densidade, independentemente da classe diamétrica e quando os clones foram combinados, o primeiro raio (Norte) de perfuração foi mais preciso na estimação da DB da madeira de eucalipto, sendo os valores de R^2_{aj} . e Syx superiores e inferiores aos determinados por perfuração

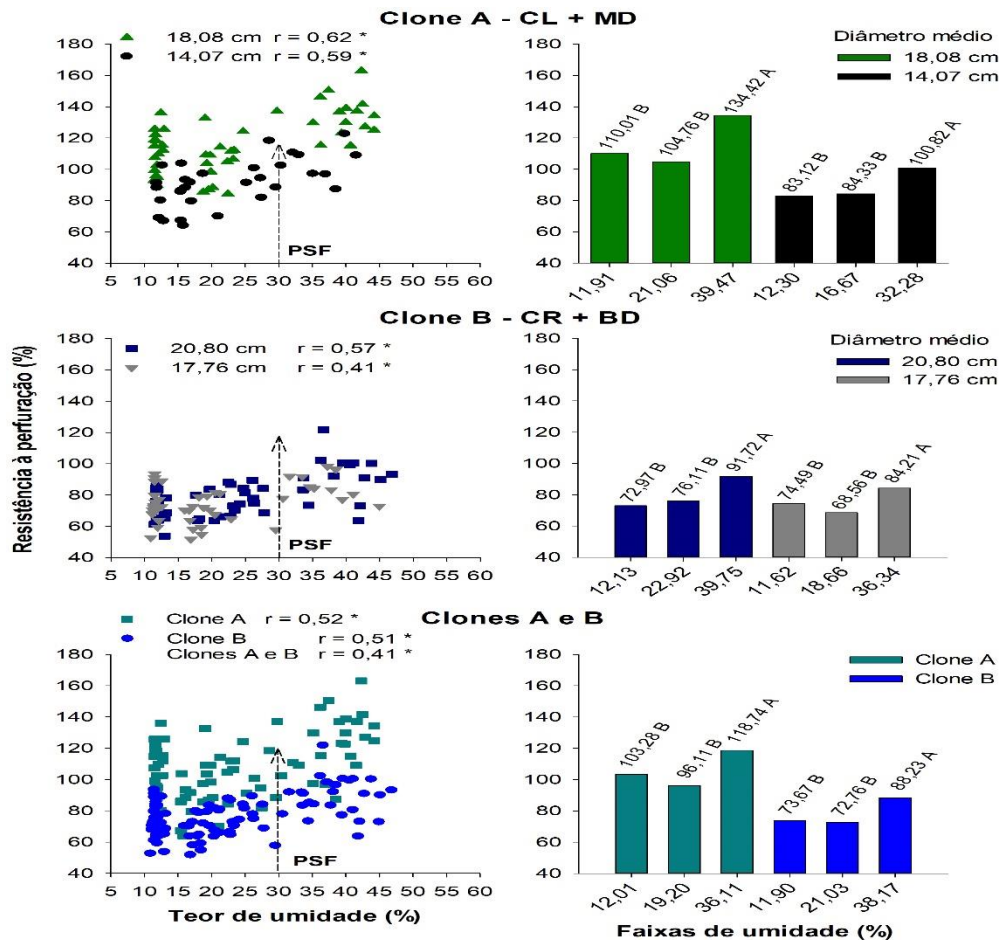
diametral (Tabela 4). Em ambos os casos, a RP do segundo raio (Sul) teve menor potencial preditivo que a observada ao longo do diâmetro das árvores.

Na estimação da DB da madeira de clones de eucalipto, a profundidade de perfuração otimizada a 1,5 cm a partir da casca ($R^2_{aj.} = 68\%$) foi 5% mais precisa que a RP parcial ($R^2_{aj.} = 63\%$) e permite maior eficiência operacional à resistografia.

Efeito do teor de umidade na resistência à perfuração

Quanto maior o TU, maior a RP da madeira de eucalipto (Figura 5). Foram observadas correlações positivas e moderadas ($r = 0,30$ a $0,60$) entre a RP e as faixas de umidade da madeira de ambos os clones e classes de diâmetro. Nas amostras de maior diâmetro, o grau de associação entre a umidade e a RP foi intensificado e ao desconsiderar o fator classe diamétrica, os clones apresentaram coeficientes de correlação semelhantes.

Figura 5 – Relação do teor de umidade e resistência à perfuração da haste do resistógrafo na madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 76 meses de idade



Destaca-se que o efeito da umidade na RP ocorreu principalmente entre as faixas acima e abaixo do PSF da madeira (Figura 5). As diferenças percentuais de RP mensurada acima do PSF e na umidade de equilíbrio (12%) é de 15,0% para o clone A e 19,8% para o clone B. Os TU abaixo do PSF, na média de 20 e 12%, não alteram significativamente a RP para os clones e classes diamétricas. Este resultado explica os valores moderados de correlação, visto que a RP não possui decréscimo perfeitamente linear entre umidades acima do PSF e em equilíbrio higroscópico.

4 DISCUSSÃO

Variabilidade periférica da RP e DB da madeira

O incremento de DB da madeira dos clones de eucalipto na região periférica do fuste ocorre em resposta ao espessamento da parede celular das fibras e pela redução na frequência e proporção de vasos em relação às posições mais internas (OLIVEIRA; SILVA, 2003). A maior DB na proximidade da casca do fuste representa uma tendência para a madeira de eucalipto (LOPES et al., 2011; HEIN et al., 2015; CARNEIRO, 2017; PRASETYO et al., 2017).

A similaridade da RP da região periférica com a média do diâmetro das árvores do clone A é uma característica importante para a precisão da estimativa da DB média e pode ter ocorrido em função do ritmo de crescimento mais lento desse clone. Já a redução da RP periférica em relação à diametral do clone B confirma os baixos valores das medidas de precisão encontrados na predição da DB média da madeira. A ausência de diferenças da DB e RP dos lados norte e sul do fuste corrobora o controle da amostragem, que suavizou o efeito do lenho de tração formado pela incidência dos ventos e competição individual dentro das parcelas.

A variabilidade da RP e DB, em regiões periféricas das árvores de eucalipto, é importante na certificação do método de amostragem para avaliar as propriedades da madeira e realizar a seleção ou ranking de materiais genéticos. A semelhança da RP nos primeiros 5 cm da casca mensurada por amostragem periférica e diametral qualifica a microperfuração dessa região como procedimento potencial para predição da DB da madeira de eucalipto. Tendo em vista que não foram observadas alterações do comportamento da resistência em resposta a diferenças na sensibilidade ou autocalibração do resistógrafo e de desvios da incidência da haste em relação as fibras durante a perfuração prolongada e de menor distância.

Diferenças da RP nos primeiros 5 cm por amostragem periférica e diametral do fuste poderiam ocorrer pela presença de defeitos e nós internos na região próxima à casca e caso a angulação e direção de incidência da haste ao realizar as perfurações não fosse controlada pelo nível de bolha. Bouffier et al. (2008) mencionaram o fato de que a haste pode fletir durante a perfuração da madeira, principalmente pelas oscilações da ferramenta ao cruzar rachaduras internas, podridão e nós.

Em virtude da alta correlação entre a densidade determinada no raio inteiro e a estimada nos primeiros 5 cm a partir da casca, Bouffier et al. (2008) concluíram que a amostragem somente dos primeiros anéis de crescimento após a casca foi adequada para avaliar a densidade da madeira de *P. pinaster* e realizar leituras com o resistógrafo em programas de melhoramento genético.

Otimização da profundidade de perfuração

As profundidades de perfuração adjacentes à casca (0,5 e 1,0 cm) possuem potencial preditivo inferior, por causa do efeito reincidente desta camada e do câmbio na RP das primeiras posições. Apesar da casca ser eliminada, aparentemente há um prolongamento do seu efeito na redução da resistência, enquanto o valor da DB nesta mesma região é máximo. Baixa precisão das estimativas de DB média pela RP no primeiro centímetro da casca também foi observada para as espécies *E. grandis* e *E. urophylla* nas idades de 42 e 54 meses (COUTO, 2011).

Em árvores de menor classe diamétrica, como o raio é menor, aumenta a possibilidade de as profundidades até 5 cm da casca reproduzirem a DB média do diâmetro. Uma segunda resposta pode ser advinda do menor efeito da fricção da haste do resistógrafo, em microperfuração de árvores de menor diâmetro (GAO et al., 2017; SILVA et al., 2017; OLIVEIRA, WANG; VIDAURRE, 2017).

Pelo método de aproximação de Wiemann existe uma posição ao longo do raio em que a DB é equivalente à DB média do diâmetro total da árvore ou disco, que é dois terços ($2/3$) do raio medula-casca (WILLIAMSON; WIEMANN, 2010) ou a um sexto ($1/6$) do diâmetro sem casca (GAO et al, 2017). A perfuração com resistógrafo e amostragem periférica nos primeiros 5 cm da casca é coincidente e engloba este ponto de aproximação em árvores com diâmetro de até 30 cm e com baixo deslocamento de medula. Ou seja, como o raio dessa árvore é de 15 cm, os $2/3$ a partir da medula vão incidir na posição de 10 cm ou a 5 cm da casca.

Para todas as classes diamétricas avaliadas neste trabalho, a perfuração até 5 cm englobou a posição de aproximação de Wiemann. Porém, apenas para as árvores de diâmetro médio de 14,07 cm do clone A, a profundidade de maior precisão na estimação da DB média foi condizente com os 2/3 do raio medula-casca. Em árvores do clone B, com diâmetro médio de 17,76 cm e com as classes diamétricas combinadas dos clones A e B, as profundidades de perfuração com maior potencial preditor de DB da madeira foram adjacentes às posições de aproximação.

A ausência de padrão na relação da DB com a RP por profundidade de perfuração também foi percebida para árvores de *E. grandis* x *E. urophylla* nas idades de 34 e 62 meses, em análise individual. Porém, quando as idades foram combinadas foi observada uma clara tendência de redução linear dos coeficientes de correlação com o aumento da profundidade de perfuração (OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2017). Para os clones de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 76 meses de idade, plantados em Aracruz/ES, a tendência de redução da precisão da estimativa da DB pela RP com o aumento da profundidade de perfuração iniciou a partir de 1,5 cm da casca. Esta divergência nas tendências da precisão por profundidade pode ser atribuída à variabilidade de DB e características anatômicas entre os materiais genéticos e aos equipamentos utilizados nas microperfurações.

As correlações e o potencial preditivo diminuem em maiores profundidades, em detrimento do incremento das forças de atrito com o lenho, que sobrepõem o da RP devido às diferenças de densidade (RINN, 2012; OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2017; SHARAPOV; WANG; SMIRNOVA, 2017). Este efeito explica a ausência da relação da DB (por posição ou média) com a RP da madeira observada em maiores profundidades, seja por perfuração nos primeiros 5 cm da casca ou radial de árvores de *E. grandis* x *E. urophylla*.

Uma relação linear entre o atrito da haste do resistógrafo e a profundidade de perfuração foi observada para toras de *Betula alleghaniensis*, com DB da madeira de $0,71 \text{ g cm}^{-3}$ (SHARAPOV; WANG; SMIRNOVA, 2017). O modelo de regressão ajustado para estimar a força de atrito com a profundidade de perfuração nesta espécie demonstrou aumento de 1,5% do atrito a cada 1 cm de avanço da haste do resistógrafo. Esta relação demonstra a importância da otimização da profundidade de perfuração em posições mais próximas à casca da árvore.

A profundidade ótima para estimar a DB da madeira pela resistografia ocorreu a 1,5 cm por perfuração periférica, nos primeiros 5 cm a partir da casca. Nesta

profundidade a RP conseguiu explicar 81% da variação da DB da posição e 68% da DB média das árvores. A porcentagem complementar de efeito na DB da madeira pode ocorrer por alterações na espessura de parede das fibras, morfologia e proporção dos vasos em relação a fibras, características genéticas e fatores ambientais.

A maior precisão ($R^2 \geq 0,86$) na estimativa de DB média também foi observada na profundidade de 1,5 cm da casca em árvores de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 34 e 62 meses (OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2017). Já para as espécies *E. grandis* e *E. urophylla* nas idades de 42 e 54 meses, a profundidade ótima à predição de DB média ocorreu em 4 cm da casca (COUTO, 2011).

A variabilidade entre os clones contribuiu para reduzir as medidas de precisão da estimativa de DB por perfuração diametral e radial, quando estes foram combinados. Contudo, no geral, a RP parcial do primeiro raio (Norte) foi mais efetiva na predição de DB, comportamento semelhante ao observado para árvores de *E. grandis* x *E. urophylla*, por Oliveira, Wang e Vidaurre (2017). A precisão na estimativa da DB da madeira de um raio para outro (Norte e Sul) também pode ser influenciada pelas tensões de crescimento das árvores de eucalipto, pois a distribuição e/ou desequilíbrio das forças de tração e compressão no seu interior resistem ou alteram o avanço da haste durante a perfuração.

A pequena diferença de 5% de aumento na precisão da estimativa de DB da madeira por RP da amostragem periférica comparada à parcial é suficiente para a opção por esta técnica de perfuração e, assim, aumentar a produtividade da resistografia em árvores em pé, pela avaliação de maior número de indivíduos em menor tempo. Em profundidades mais próximas à casca, o efeito do atrito é menor, o que aumenta a precisão dos modelos gerados. Este tipo de amostragem permite tanto a predição da DB média da árvore, quanto o ranking de materiais genéticos para programas de melhoramento ou outras decisões.

Na seleção de técnicas não destrutivas para determinar a DB de árvores em pé, é importante que a solução atenda às necessidades práticas do trabalho em campo e que as estimativas dos valores médios da propriedade sejam razoáveis e com erros mensuráveis (GAO et al., 2017). Em adição, as técnicas precisam ser mais eficientes que procedimentos caros e altamente técnicos.

Efeito do teor de umidade na resistência à perfuração

O incremento da RP com o TU da madeira de eucalipto, principalmente, entre o equilíbrio higroscópico e faixas acima do PSF, está diretamente associado ao aumento das forças de atrito da aresta de corte da haste do resistógrafo com a superfície lenhosa. Esta associação também foi descrita por Sharapov et al. (2016) e Kloppenburg (2018).

O aumento da umidade tem efeito significativo no processo de formação dos cavacos durante a perfuração, alterando a sua geometria e movimentação ao longo da cavidade (SHARAPOV et al., 2016). Em amostras com maiores TU ocorreu uma aglutinação dos cavacos no interior da cavidade (Figura 6 A), o que contribui para o incremento das forças de atrito ao longo da haste com o material residual e a parede celular do lenho (SHARAPOV; WANG; SMIRNOVA, 2017).



Figura 6 - Solidificação dos cavacos (marcação em azul) na cavidade de perfuração em amostras que foram perfuradas quando saturadas (A); escoamento de cavacos (círculo azul) após a perfuração do resistógrafo em amostra com teor de umidade de equilíbrio higroscópico (B)

Ao perfurar as amostras com menores TU, foi perceptível o escoamento dos cavacos para a superfície, com o recuo da haste do resistógrafo (Figura 6 B). Ou seja, em menores TU a aglutinação dos cavacos não ocorreu, o que diminuiu os efeitos do atrito com a haste e os valores de RP. Isso explica a semelhança estatística da RP mensurada entre faixas de 20 e 12% de umidade da madeira dos clones de eucalipto. Semelhanças de RP mensurada em faixas de umidade (8-20% e 19-25%) inferiores

ao PSF da madeira também foram percebidas por Ukrainetz e O'Neill (2010) e Kloppenburg (2018).

Acima do PSF não há alteração volumétrica da madeira e a cavidade da haste do resistógrafo pode não expandir em maiores TU, o que resulta em menor espaço para o escoamento dos cavacos e aumento do atrito (KLOPPENBURG, 2018). Esta relação poderá ser influenciada pelas deformações residuais das fibras da madeira de eucalipto, sendo necessários novos estudos para confirmar a teoria.

Além da umidade, o atrito da haste do resistógrafo é influenciado pela espécie madeireira, parâmetros de velocidade de corte, ângulo, afiação e variáveis de atenuação da aresta de corte (SHARAPOV; WANG; SMIRNOVA, 2017). Segundo Couto (2011), o aumento do atrito da haste com o lenho também pode ocorrer pela presença de extrativos da madeira, como gomas e resinas.

Acima do PSF, a água livre no lume das células pode atuar como lubrificante da superfície da ferramenta de corte, e reduzir as forças de corte e o consumo de potência do motor (SHARAPOV et al., 2018 a). Porém, para um processo de corte fechado como a resistografia, o efeito principal do alto TU da madeira é o aumento das forças de atrito.

A sensibilidade da técnica de resistografia à variação do TU também é dependente do comportamento intrínseco de cada espécie avaliada (ABAD, 2009). O incremento da RP com o aumento do TU da madeira também foi observado para a espécie *Taiwania cryptomerioides* (LIN et al., 2003) e *P. pinaster* (ABAD, 2009). Ao aumentar o TU da madeira das faixas de 10-12% a 90-150%, foi notado o incremento de 50% da RP para a espécie *Betula pendula* e de 25% para *P. sylvestris* e *Quercus robur* (SHARAPOV et al., 2016). A variação da umidade de 55 a 75% não teve efeito significativo na RP da madeira de *E. globulus* (JOHNSTONE et al., 2011).

O impacto do TU da madeira na RP depende da velocidade de rotação e de avanço da haste do resistógrafo, que pode aumentar e diminuir a RP (SHARAPOV et al., 2018 b). Esta relação foi observada para a espécie *Picea abies* com densidade de 0,47 g cm⁻³. Para a madeira de eucalipto e outras folhosas ainda são necessários estudos para validar este efeito combinado durante as microperfurações.

Uma vez que não ocorrem alterações das propriedades físicas e mecânicas da madeira em função do TU acima do PSF (GLASS; ZELINKA, 2010), a predição da DB em árvores em pé de eucalipto poderá ser influenciada pela consequência da alta umidade na RP, que é a aglutinação dos cavacos na cavidade de perfuração e

aumento do atrito. Este efeito poderá ser amenizado pela perfuração em profundidades mais próximas à casca ou apenas no primeiro raio medula-casca das árvores em pé.

A perfuração em faixas de umidade abaixo do PSF é facilitada pela redução do atrito, o que permite melhores ajustes às equações preditoras de DB da madeira. Entretanto, a principal aplicação da resistografia, neste caso, é a otimização dos métodos em laboratórios, para predição de densidade em discos e peças serradas.

Para uma mesma faixa de umidade, o comportamento da RP ao longo do diâmetro é inversamente proporcional ao do TU. Por exemplo, em regiões próximas à casca que ocorre o incremento da RP, o TU da madeira decresce. Portanto, ao mudar as faixas de umidade, acima e abaixo do PSF, os valores médios diminuem, mas a tendência ao longo do diâmetro da RP e TU permanece semelhante.

5 CONCLUSÕES

A variabilidade periférica da densidade básica e da resistência à perfuração foi dependente do material genético e classe diamétrica. Para o clone de crescimento rápido, a densidade básica e a resistência à perfuração diminuíram similarmente a partir da casca. Já a resistência do clone de crescimento lento foi mais instável, o inverso do comportamento da densidade básica.

A profundidade de perfuração a 1,5 cm a partir da casca, foi a mais eficiente na estimação da densidade básica da madeira de clones de eucalipto, de crescimento lento e média densidade e crescimento rápido e baixa densidade. A resistência à perfuração parcial comparada à diametral aumentou a precisão da estimativa da densidade básica da madeira de eucalipto, tendo o primeiro raio da perfuração o maior potencial preditivo. Contudo, a estimativa pela resistência à perfuração mensurada a 1,5 cm a partir da casca foi mais precisa e eficiente que a parcial.

Quanto maior o teor de umidade, maior a resistência à perfuração da madeira de eucalipto, principalmente entre faixas acima do ponto de saturação das fibras e na umidade de equilíbrio.

3 CONCLUSÕES GERAIS

A relação da resistência à perfuração e densidade básica da madeira com variáveis do crescimento das árvores de eucalipto foi específica por material genético. O diâmetro teve a maior correlação com a resistência à perfuração e densidade básica da madeira, com potencial para ser incorporado em modelos de predição de densidade pela resistografia. O incremento das massas úmidas de copa, de tronco e da árvore por completo, a menor proporção de cerne e maior espessura de alburno, aumentaram a resistência à perfuração.

No geral, a resistência à perfuração mensurada em árvores em pé foi correspondente aos perfis densitométricos da madeira. A resistografia estimou com precisão a densidade básica e umidade natural da madeira, com destaque para a resistência à perfuração média e cruzada, como variável independente.

O comportamento da densidade e resistência à perfuração nos primeiros 5 cm a partir da casca foi semelhante ao observado para o diâmetro total do fuste, o que confirmou a eficiência desta estratégia de amostragem. A profundidade de perfuração a 1,5 cm a partir da casca estimou com maior precisão a densidade básica da madeira de clones de eucalipto, sendo superior em precisão e eficiência operacional às avaliações do raio casca-medula e diâmetro total da árvore.

O aumento do teor de umidade da madeira originou maior resistência à perfuração, entre faixas acima do ponto de saturação das fibras e na umidade de equilíbrio.

A utilização da resistência à perfuração como variável resposta da qualidade em si, e não somente como preditora de densidade e umidade da madeira, poderá possibilitar o seu monitoramento contínuo, ao longo do crescimento das árvores. Na prática, isso poderá ser feito com a instalação de parcelas permanentes, idênticas às utilizadas no inventário florestal, sendo mais uma informação a ser obtida durante este procedimento.

REFERÊNCIAS

ABAD, I. R. **Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera.** 2009. 422 f. Tesis (Doctorado) – Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

ACUÑA, L. et al. Aplicación del resistógrafo a la obtención de la densidad y la diferenciación de especies de madera. **Materiales de Construcción**, v. 61, n. 303, p. 451-464, 2011.

ALMONACID, M. A. A. **Avaliação do crescimento e da qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus urophylla*, de 8 anos, de teste de progênies, visando a produção de carvão vegetal.** 2013. 161 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, R. C. **Qualificação dos ensaios não destrutivos para estimar as características físico-mecânicas da madeira.** 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ANAGNOSTOPOULOU, V.; POURNOU, A. Correlating visual grading with NTD methods for assessing timber condition in historic buildings. **Advanced Materials Research**, v. 778, p. 273-280, 2013.

ARANTES, M. D. C. et al. Densitometria de raios X na madeira e carvão de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 155-162, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11941:** madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190:** Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BALBINOT, R. et al. Ajuste de equações alométricas para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. Utilizando análise de componentes principais conjuntamente com análise de regressão. **Floresta**, v. 39, n. 2, p. 232-237, 2009.

BARBOSA, T. L. **Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* cultivados em cinco regiões do estado de Minas Gerais para produção de celulose.** 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2013.

BARRÍA, C.; SANDOVAL, S.; ROJAS, G. Uso del método de resistografía para la predicción de la densidad básica de la madera en árboles en pie de *Pinus radiata*. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, v. 19, n. 3, p. 349-362, 2017.

- BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.
- BOBADILHA, G. S. et al. Efecto del ataque de *Leptocybe invasa* en plantaciones de eucalipto destinadas a la producción de pulpa de celulosa Kraft. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 20, n. 2, p. 171-182, 2018.
- BOSCHETTI, W. T. N. et al. Parâmetros dendrométricos e excentricidade da medula em árvores inclinadas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 781-789, 2015.
- BOUFFIER, L. et al. Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)? **Annals of Forest Science**, v. 65, n. 1, p.106.1-106.8, 2008.
- BRITO, A. S. **Efeito do espaçamento de plantio nas propriedades da madeira em árvores jovens de eucalipto**. 2017. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2017.
- BURGER, H. Baumkrone und Zuwachs in zwei hiebsreifen Fichtenbeständen. **Mitt. Schweiz. Anst. f. forstl. Vers. Wesen**, v. 21, p. 147-176, 1939.
- CÂMARA, A. P. et al. Physiological disorders affecting dendrometric parameters and *Eucalyptus* wood quality for pulping wood. **Cerne**, v. 24, n.1, p.27-34, 2018.
- CARDIN, V. S. **Ensaio não destrutivo aplicado à madeira serrada e estruturas: técnicas potenciais para uso no Brasil**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
- CARNEIRO, M. F. **Qualidade da madeira de clones de eucalipto utilizados na produção de celulose**. 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2017.
- CARRASCO, E. V. M.; PEREIRA, N. C. S.; ALVES, R. C. Estimativa da densidade aparente, resistência à compressão e módulo de elasticidade da madeira por meio do resistógrafo. **Construindo**, v. 5, n. 1, p. 45-51, 2013.
- CARRILLO, I.; VALENZUELA, S. ELISSETCHE, J. P. Comparative evaluation of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* wood and fibre quality. **IAWA Journal**, v. 38, n. 1, p. 105-116, 2017.
- CERALDI, C.; MORMONE, V.; RUSSO ERMOLLI, E. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics. **Materials and Structures**, v. 34, n. 1, p. 59-64, 2001.
- COUTO, A. M. et al. Amostras longitudinais alternativas para a determinação da densidade básica em clones de *Eucalyptus* sp. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 2, p.184-193, 2012.

COUTO, A. M. et al. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. **Cerne**, v. 19, n. 1, p. 27-34, 2013.

COUTO, A. M. **Modelagem da densidade básica e caracterização química em clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis***. 2011. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

DESPONTS, M.; PERRON, M.; DEBLOIS, J. Rapid assessment of wood traits for large-scale breeding selection in *Picea mariana* [Mill.] B.S.P. **Annals of Forest Science**, v. 74, n. 3, p.1-12, 2017.

DIAZ, D. C. et al. Uso da técnica de resistografia e de variáveis dendrométricas na modelagem da densidade básica de povoamentos clonais de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 609-619, 2017.

DIAZ, D. C. **Uso da Resistografia na modelagem da densidade básica de clones de Eucalipto**. 2011. 52 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

DOBNER, M.; HUSS, J.; TOMAZELLO FILHO, M. Wood density of loblolly pine trees as affected by crown thinnings and harvest age in southern Brazil. **Wood Science and Technology**, v. 52, n. 2, p. 465-485, 2018.

DONATO, D. B. et al. Teor de umidade da madeira em Tora. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 703-712, 2015.

DOWNES, G. M. et al. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts. **Australian Forestry**, v. 81, n. 3, p. 177-185, 2018.

DOWNES, G. M. et al. **Sampling plantation eucalyptus for wood and fibre properties**. Collingwood, Austrália: CSIRO Publishing, 1997. 132 p.

DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabraela canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 8, n. 1, p. 55-66, 1998.

ECKARD, J. T. et al. Selection efficiency for solid wood traits in *Pinus taeda* using time-of-flight acoustic and micro-drill resistance methods. **Forest Science**, v. 56, n. 3, p. 233-241, 2010.

EL-KASSABY, Y. A. et al. In situ wood quality assessment in Douglas-fir. **Tree Genetics & Genomes**, v. 7, n. 3, p. 553-561, 2011.

FARIAS, E. S. **Seleções em teste de origem e progênie de *Toona ciliata* M. Roemer var. australis, para densidade da madeira em avaliações destrutivas e não destrutivas**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

- FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P. Y. Melhoria genética da densidade básica da madeira do eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 3., 1978, Manaus. **Anais...**São Paulo: SBS, 1978. p. 148-152.
- FUNDOVÁ, I. **In situ wood quality assessment in interior spruce**. 2012. 90 f. Thesis (Masters in Forest Science) - University of British Columbia, Vancouver.
- FUNDOVA, I.; FUNDA, T.; WU, H. X. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn. **PLoS ONE**, v. 13, n. 9, e0204518, 2018.
- GANTZ, C. H. **Evaluating the efficiency of the Resistograph® to estimate genetic parameters for wood density in two softwood and two hardwood species**. 2002. 88 f. Dissertation (Masters in Forest Science) - University of North Carolina State, Raleigh, 2002.
- GAO, S. et al. critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees. **Annals of Forest Science**, v. 74, n. 2, p. 1-13, 2017.
- GLASS, A. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook** - Wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010.
- GONÇALVES, F. G. **Avaliação da qualidade da madeira de híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *grandis* para produtos sólidos**. 2006. 167 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2006.
- GONÇALVES, M. P. M. et al. Variação radial da densidade básica e comprimento das fibras da madeira de *Tectona grandis* L. **Floresta e Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 70-75, 2007.
- GOUVÊA, A. F. G. et al. Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011b.
- GOUVÊA, A. F. G. et al. Relação entre características da madeira da polpa celulósica de *Eucalyptus* com métodos não destrutivos na árvore viva. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 205-220, 2011a.
- HEIN, P. R. G. et al. Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along *Eucalyptus* trunks grown under contrasting growth conditions. **Trees**, v. 30, n. 3, p. 871-882, 2015.
- HILLIS, W. E.; BROWN, A. C. **Eucalyptus for wood production**. Adelaide: CSIRO Griffin Press Ltd., 1978. 434 p.

- ISIK, F.; LI, B. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs. **Canadian Journal Forest Research**, v. 33, n. 12, p. 2426-2435, 2003.
- JOHNSTONE, D. et al. Using an IML-Resi drill to assess wood density in *Eucalyptus globulus* subsp. *Pseudoglobulus*. **Australian Forestry**, v. 74, n. 3, p. 190-196, 2011.
- JOZSA, L. A.; MIDDLETON, G. R. **A discussion of wood quality attributes and their practical implications**. Vancouver: Forintek Canada Corp., Western Laboratory, 1994. 42 p.
- KAHL, T. et al. Using drill resistance to quantify the density in coarse woody debris of Norway spruce. **European Journal of Forest Research**, v. 128, n. 5, p. 467-473, 2009.
- KIMBERLEY, M. O. et al. Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown radiata pine. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 45, n. 22, p. 1-13, 2015.
- KLOPPENBURG, A. M. **Density determination of tropical hardwoods with the Resistograph**. 84 f. 2018. Thesis (Master of Science in Materials Science and Engineering) - Delft University of Technology, Delft, 2018.
- KUMAR, S. S. et al. Effect of growth Rate and Latewood content on basic Density of Wood from 120-to 154-Year-old Natural-grown Teak (*Tectona grandis* L. f.). **International Research Journal of Biological Sciences**, v. 3, n. 4, p. 66-72, 2014.
- LIMA, J. T. et al. Adequação do Resistograph® para estimativa da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Pedro: UNESP / CEVEMAD / IBRAMEM, 2006. CD-ROM
- LIMA, J. T. et al. Uso do resistógrafo para estimar a densidade básica e a resistência à perfuração da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, n. 75, p. 85-93, 2007.
- LIN, C. et al. Effect of moisture content on the drill resistance value in Taiwania plantation wood. **Wood and Fiber Science**, v. 35, n. 2, p. 234-238, 2003.
- LOPES, C. S. D. et al. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 315-322, 2011.
- LOPEZ, A. J.; GENES, P. Y.; LOPEZ, J. A. Evaluación no-destruccion de la densidad de la madera de arboles vivos en pie de *Eucalyptus grandis* utilizando resistógrafo. IN: JORNADAS FORESTALES DE ENTRE RIOS, 24., 2010, Concordia, Argentina.
- MALAN, F. S.; HOON, M. Effect of initial spacing and thinning on some wood properties of *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, v. 163, n.1, p. 13-20, 1992.

MAURI, R. et al. Wood density of clones of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* in different conditions of growth. **Floresta**, v. 45, n. 1, p. 193-202, 2015.

MENESES, V. A. et al. Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 101-116, 2015.

MIRANDA, I.; PEREIRA, H. Variation of wood and bark density and production in coppiced *Eucalyptus globulus* trees in a second rotation. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v. 9, p. 270-275, 2015.

MONTES, R. E.; HERNÁNDEZ, R. E.; BEAULIEU, J. Radial variation in wood density and correlations with growth of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. **Wood and Fiber Science**, v. 39, p. 377-387, 2007.

MORALES-CONDE, M. J.; RODRÍGUEZ-LIÑÁN, C.; SAPORITI-MACHADO, J. Predicting the density of structural timber members in service. The combine use of wood cores and drill resistance data. **Materiales de Construcción**, v. 64, n. 315, p. 1-11, 2014.

NOWAK, T. P.; JASIENKO, J.; HAMROL-BIELECKA, K. In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method – Evaluation of usefulness. **Construction and Building Materials**, v. 102, 403-4015, 2016.

NUTTO, L. et al. Utilização dos parâmetros da copa para avaliar o espaço vital em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 42, p. 123-138, 2001.

NUTTO, L.; BIECHELE, T. Drilling resistance measurement and the effect of shaft friction – using feed force information for improving decay identification on hard tropical wood. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 19., 2015, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2015. p. 154-161.

OLIVEIRA, A. C. **Amostragem não destrutiva e qualidade da madeira em clones de *Eucalyptus* spp.** 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

OLIVEIRA, B. R. U. et al. Correlações dendroclimatológicas do *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden na região de Rio Claro, RJ. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 499-508, 2011.

OLIVEIRA, J. T. S. et al. Relationship between wood moisture content and drilling resistance in eucalypt trees. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 20., 2017, Madison. **Proceedings...** Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2017. p. 470.

OLIVEIRA, J. T. S.; HEILMEISTER, J. C. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998, 45p. (Boletim Técnico).

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

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

OLIVEIRA, J. T. S.; WANG, X.; VIDAURRE, G. B. Assessing specific gravity of young *eucalypt* plantation trees using a resistance drilling technique. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 19., 2015, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2015. p. 574-584.

OLIVEIRA, J. T. S.; WANG, X.; VIDAURRE, G. B. Assessing specific gravity of young *eucalypt* plantation trees using a resistance drilling technique. **Holzforschung**, v. 71, n. 2, p. 137-145, 2017.

ORTEGA RODRIGUEZ, D. R.; TOMAZELLO FILHO, M. Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. **New Forests**, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11056-018-09702-9>>. Acesso em: 5 jan. 2019.

PÁDUA, F. A. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 99 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; ABREU, H. S. Métodos e Técnicas de diagnose de identificação dos anéis de crescimento de árvores tropicais. **Floresta e Ambiente**, v. 9, n. 1, p. 165-175, 2002.

PEREIRA, B. L. C. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013.

PRASETYO, A. et al. Variations on growth characteristics and wood properties of three *Eucalyptus* species planted for pulpwood in Indonesia. **TROPICS**, v. 26, n. 2, p. 59-69, 2017.

RINN, F. Basics of micro-resistance drilling for timber inspection. **Holztechnologie**, v. 53, n. 3, p. 24-28, 2012.

RINN, F.; SCHWEINGRUBER, F. H.; SCHAR, E. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. **Holzforschung**, v. 50, n. 4, p. 303-311, 1996.

ROCHA, M. F. V. **Influence of plant spacing and genetic material on wood density and stiffness in Eucalyptus stands**. 2017. 97 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

ROCHA, S. M. G. **Densidade básica da madeira de eucalipto em gradientes climáticos no Brasil**. 2018. 48 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.

RODIGUES, B. P. **Qualidade do lenho de árvores de clone de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* sob estresse abiótico e o impacto na produção de celulose**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2013.

RODRIGUES, E. A. C. et al. Seleção de clones de *Eucalyptus* para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo. **Cerne**, v. 14, n. 2, p. 147-152, 2008.

SARANPÄÄ, P. Wood density and growth. In: BARNETT, J. R.; JERONIMIDIS, G. (Org.). **Wood Quality and its Biological Basis**. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2003. p. 87-117.

SAVIDGE, R. A. Tree growth and wood quality. In: BARNETT, J. R.; JERONIMIDIS, G. (Org.). **Wood Quality and its Biological Basis**. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2003. p. 1-29.

SETTE JR., C. R. et al. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.

SHARAPOV, E. et al. Combined effect of wood moisture content, drill bit rotational speed and feed rate on drilling resistance measurements in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). **Wood Material Science & Engineering**, 2018b. DOI: 10.1080/17480272.2018.1557249

SHARAPOV, E. et al. Wear behavior of drill bits in wood drilling resistance measurements. **Wood and Fiber Science**, v. 50, n. 2, p. 154-166, 2018a.

SHARAPOV, E. S. et al. The Impact of moisture content on the accuracy of wood properties evaluation by drilling resistance measurement method (ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕРЛЕНИЮ). **Forestry Journal**, n. 2, p. 103-113, 2016.

SHARAPOV, E.; WANG, X.; SMIRNOVA, E. Drill bit friction and its effect on resistance drilling measurements in logs. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 20., 2017, Madison. **Proceedings...** Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2017. p. 413-423.

SHMULSKY, R.; JONES, P. D. **Forest Products and Wood Science: An Introduction**. 6^a ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2011. 483 p.

SILVA, C. E. S. et al. Estimativa da densidade da madeira em árvores vivas de *Cedrela fissilis* Vell. através de resistografia. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 113, p. 139-144, 2017.

SILVA, L. F. **Avaliação da aptidão da madeira de seis clones de híbridos de *Eucalyptus* para o processamento mecânico**. 2018. 90 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.

TOMAZELLO FILHO, M. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla***. 2006.146 f. Tese (Livre Docência em Ciência e Tecnologia de Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

TOMAZELLO FILHO, M. et al. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of *Eucalypt* Wood. **Maderas: Ciência y Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 139-149, 2008.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **IPEF**, n. 29, p. 37-45, 1985.

TREVISAN, R. et al. Variação radial da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta**, v. 38, n. 3, p. 553-559, 2008.

UKRAINETZ, N. K.; O'NEILL, G. A. An analysis of sensitivities contributing measurement error to Resistograph values. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, n. 4, p. 806-811, 2010.

UTHAPPA, A. R. et al. Rapid measurement of density of wood in progeny trial of *Acacia mangium* Willd. using resistograph - a nondestructive method. In: PANDEY, K. K. et al. (Org.). **Wood is Good** Current trends and future prospects in wood utilization. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2017. p. 37-45.

VIDAURRE, G. B. et al. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 10-18, 2011.

WANG, S.; CHIU, C.; LIN, C. Application of the drilling resistance method for annual ring characteristics: evaluation of Taiwania (*Taiwania cryptomerioides*) trees grown with different thinning and pruning treatments. **Journal Wood Science**, v. 49, n. 2, p. 116-124, 2003.

WANG, Y. et al. Wood properties and chemical composition of the eccentric growth branch of *Viburnum odoratissimum* var. awabuki. **Trees**, v. 24, n. 3, p. 541-549, 2010.

WILKES, J. The influence of rate of growth on the density and heartwood extractives content of eucalypt species. **Wood Science and Technology**, v. 18, n. 2, p. 113-120, 1984.

WILLIAMSON, G. B.; WIEMANN, M. C. Measuring wood specific gravity ... correctly. **American Journal of Botany**, v. 97, n. 3, p. 519-524, 2010.

WINK, C. et al. Parâmetros da copa e a sua relação com o diâmetro e altura das árvores de eucalipto em diferentes idades. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 93, p. 57-67, 2012.

XAVIER, C. N. **Avaliação não destrutiva da qualidade da madeira e do fuste de árvores de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub em área de restauração florestal**. 2016. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016.

ZOBEL, B. J.; VAN BUIJTENEN, J. P. **Wood variation: its causes and control**. Berlin: Springer Verlag, 1989. 361 p.