

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO – OESTE, UNICENTRO-PR

**CARACTERÍSTICAS DE CRESCIMENTO E
PROPRIEDADES DA MADEIRA JUVENIL DE *Pinus*
taeda L.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ÉRICA MACHADO GARBACHEVSKI

IRATI-PR

2020

ÉRICA MACHADO GARBACHEVSKI

**CARACTERÍSTICAS DE CRESCIMENTO E PROPRIEDADES DA MADEIRA JUVENIL
DE *Pinus taeda* L.**

Dissertação apresentada à
Universidade Estadual do Centro-
Oeste, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação Stricto
Sensu em Ciências Florestais, área de
concentração em Manejo Sustentável
dos Recursos Florestais, para a
obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Éverton Hillig
Orientador

Prof^ª. Dr^ª. Fabiane Aparecida Retslaff Guimarães
Coorientadora

Prof. Dr. Henrique Koehler
Coorientador

IRATI-PR

2020

Catálogo na Publicação
Rede de Bibliotecas da Unicentro

G213c

Garbachevski, Érica Machado

Características de crescimento e propriedades da madeira juvenil de *Pinus taeda* L. / Érica Machado Garbachevski. -- Irati, 2020.

xii, 91 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, 2020.

Orientador: Éverton Hillig

Coorientadora: Fabiane Aparecida Retslaff Guimarães

Coorientador: Henrique Koehler

Banca examinadora: Raquel Marchesan, Thiago Campos Monteiro, Éverton Hillig

Bibliografia

1. Rotação florestal. 2. Espaçamento de plantio. 3. Resistência e rigidez da madeira. 4. Anéis de crescimento. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais.

CDD 634.9

TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa Nº 152

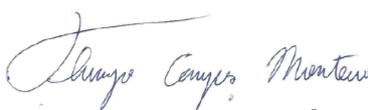
Érica Machado Garbachevski

“CARACTERÍSTICAS DE CRESCIMENTO E PROPRIEDADES DA MADEIRA JUVENIL DE *Pinus taeda* L.”

Dissertação aprovada em 18/09/2020, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:



Dra. Raquel Marchesan
Universidade Federal do Tocantins
Primeira Examinadora



Dr. Thiago Campos Monteiro
Universidade Federal do Paraná
Segundo Examinador



Dr. Éverton Hillig
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati - PR
2020

Dedicatória

Dedico esse trabalho a Deus, por ser o autor de minha vida, meu guia, minha luz, e à minha família.

Agradecimentos

A Deus, por sempre me conceder sabedoria nas escolhas, coragem para acreditar, força para não desistir e proteção para me amparar.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (UNICENTRO), coordenação, secretária e professores, obrigada por todo conhecimento transmitido, e pela oportunidade de me aperfeiçoar no Mestrado.

Ao meu professor orientador Dr. Everton Hillig, muito obrigada pela paciência de sempre, orientação, ensinamentos e amizade.

Aos meus orientadores Dr^a. Fabiane Aparecida Retslaff Guimarães, pela ajuda e amizade, Dr. Henrique Koehler, pela paciência e ajuda com a multivariada.

Aos professores Alexandre Behling, Fabiane Salles Ferro e Luciano Lansanova, e ao pós-doutorando Raul Abrel Neto, o meu muito obrigada!

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais pela troca de experiências, conhecimento, amizade, convivência e nossos cafés.

A todos os colaboradores da UNICENTRO que de alguma forma me auxiliaram, em especial ao Eraldo Rocha e ao Márcio Teixeira.

Aos meus pais Elcio e Leonilda e meus irmãos Eduwillian e Lorryne, pelo amor, apoio, confiança e motivação. As minhas avós Regina e Iracema, e toda a minha família por participarem das alegrias e das tristezas, das reclamações e das comemorações, junto comigo.

A Kauna, por toda ajuda e hospedagem em Curitiba. A Milayne e Aline Beatriz, pela amizade, conversas, por dividir os momentos de stress e de alegria, nós conseguimos! E a todos os meus amigos, Karoline, Andressa, Kelin, que sempre estavam lá para me escutar e a me incentivar e torcer por mim, amo todos vocês.

A todos que de alguma forma participaram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho, só tenho a agradecer!

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 Gênero <i>Pinus</i>	4
3.2 Espaçamento inicial de plantio	5
3.3 Madeira juvenil	7
3.4 Características de crescimento	9
3.4.1 Largura dos anéis de crescimento	9
3.4.2 Porcentagem de lenho tardio	10
3.5 Propriedades físicas da madeira	11
3.5.1 Massa específica da madeira	12
3.6 Propriedades mecânicas da madeira	13
4 MATERIAL E MÉTODOS	17
4.1 Área de estudo	17
4.2 Material	18
4.3 Confeção dos corpos de prova	19
4.4 Propriedades físicas	19
4.4.1 Massa específica aparente	19
4.4.2 Teor de umidade	20
4.5 Caracterização dos anéis de crescimento	20
4.6 Propriedades mecânicas	22
4.6.1 Flexão estática	22
4.6.2 Compressão paralela às fibras	23
4.6.3 Cisalhamento	25

4.7 Correção da umidade	26
4.8 Delineamento experimental	27
4.9 Análise estatística	27
4.9.1 Análise de variância multivariada (Manova).....	27
4.9.2 Análise Discriminante	28
4.9.3 Análise de variância (Anova) e Análise de correlação de Pearson.....	28
4.9.4 Análise de Regressão.....	29
5.1 Flexão estática	30
5.1.1 Análise Multivariada	30
5.1.2 Teste de médias e correlação	33
5.2 Compressão paralela às fibras	41
5.2.1 Análise Multivariada	41
5.2.2 Teste de médias e correlação	44
5.3 Cisalhamento	51
5.3.1 Análise Multivariada	51
5.3.2 Teste de médias e correlação	53
5.4 Considerações sobre os resultados	57

Lista de Figuras

Figura 1: Distribuição de plantio de Pinus em 2018 nos estados do país.....	5
Figura 2: Corte transversal de um fuste de <i>Pinus elliottii</i> com 34 anos, diferenciando madeira juvenil e adulta.	8
Figura 3: Localização do plantio no Campus Universitário da UNICENTRO em Irati, Paraná.	17
Figura 4: a) Toras. b) Identificação e secagem dos pranchões.....	18
Figura 5: Medição dos anéis de crescimento.....	21
Figura 6: Ensaio de flexão estática.....	22
Figura 7: Ensaio de compressão paralela as fibras.....	23
Figura 8: Dimensões do corpo de prova de cisalhamento.	25
Figura 9: Ensaio de cisalhamento.....	25
Figura 10: Grupos obtidos a partir dos valores estimados pelas funções discriminantes FD1 e FD2 para as variáveis dos ensaios de flexão estática.	32
Figura 11: Módulo de ruptura e elasticidade, em função da massa específica aparente e das características dos anéis de crescimento.....	36
Figura 12: <i>Half normal plot</i> e <i>qqplot</i> para distribuição residual referente ao módulo de ruptura em flexão estática aos 13 anos de idade.	39
Figura 13: Distribuição dos resíduos studentizados referentes ao módulo de resistência aos 13, 15 anos e ambas as idades.	39
Figura 14: Distribuição dos resíduos studentizados referentes ao módulo de elasticidade aos 13, 15 anos e ambas as idades.	40
Figura 15: Grupos obtidos a partir dos valores estimados pelas funções discriminantes FD1 e FD2 para as variáveis dos ensaios de compressão.....	43
Figura 16: Módulo de ruptura e elasticidade em compressão, em função da massa específica aparente e das características dos anéis de crescimento.	46
Figura 17: <i>Half normal plot</i> e <i>qqplot</i> para distribuição residual da resistência a compressão aos 13 anos de idade com a variável massa específica aparente.	48
Figura 18: Distribuição residual referente à resistência a compressão aos 13, 15 anos e ambas as idades.....	49
Figura 19: Distribuição residual referente ao módulo de elasticidade em compressão aos 13, 15 anos e ambas as idades.	50
Figura 20: Grupos obtidos a partir dos valores estimados pelas funções discriminantes FD1 e FD2 para as variáveis dos ensaios de cisalhamento.	53

Figura 21: Resistência ao cisalhamento em função da massa específica aparente, porcentagem de lenho tardio e tamanho médio de anel de crescimento dos corpos de prova testados.	55
Figura 22: <i>Half normal plot</i> e <i>qqplot</i> para distribuição residual referente à resistência ao cisalhamento com 13 anos de idade com a variável ρ aparente.	56
Figura 23: Distribuição dos resíduos studentizados para resistência ao cisalhamento aos 13 anos.....	57

Lista de Tabelas

Tabela 1: Variação da porcentagem de lenho juvenil de <i>Pinus taeda</i> em função da idade da árvore.....	8
Tabela 2: Espaçamento, taxa de mortalidade inicial e tratamentos silviculturais.	18
Tabela 3: Delineamento experimental.....	27
Tabela 4: Resultados da análise de variância multivariada para os testes Traço de Pillai, Lambda de Wilks, Traço de Hotelling e Maior Raiz de Roy na verificação da existência de diferenças entre os fatores espaçamento, idade e a interação entre eles, para os ensaios de flexão estática.	30
Tabela 5: Funções discriminantes para variáveis padronizadas, para os corpos de prova de flexão estática.	31
Tabela 6: Ensaio de flexão estática para a madeira de <i>Pinus taeda</i> L.....	33
Tabela 7: Matriz de correlação de Person para a propriedade de flexão estática.	34
Tabela 8: Resultados da regressão linear para fM e EM em flexão estática nas idades de 13 e 15 anos com a variável ρ aparente.....	37
Tabela 9: Resultados da regressão linear para fM e EM em flexão estática nas idades de 13 e 15 anos sem a variável ρ aparente.	37
Tabela 10: Resultados da análise de variância multivariada para os testes Traço de Pillai, Lambda de Wilks, Traço de Hotelling e Maior Raiz de Roy na verificação da existência de diferenças entre os fatores espaçamento, idade e a interação entre eles, para os ensaios de Compressão.	42
Tabela 11: Funções discriminantes para variáveis padronizadas, para os corpos de prova de 42	
Tabela 12: Médias das variáveis estudadas em relação aos espaçamentos e as idades, para compressão.	44
Tabela 13: Matriz de correlação de Person para a propriedade de compressão paralela.....	45
Tabela 14: Resultados da regressão linear para fco e Eco para o ensaio de compressão, considerando as idades de 13 e 15 anos com a variável ρ aparente.....	47
Tabela 15: Resultados da regressão linear das variáveis fco e Eco para o ensaio de compressão, considerando as idades de 13 e 15 anos sem a variável ρ aparente.	47
Tabela 16: Resultados da análise de variância multivariada para os testes Traço de Pillai, Lambda de Wilks, Traço de Hotelling e Maior Raiz de Roy na verificação da existência de diferenças entre os fatores espaçamento, idade e a interação entre eles, para os ensaios de Cisalhamento.	51

Tabela 17: Funções discriminantes para variáveis padronizadas, para os corpos de prova de cisalhamento.....	52
Tabela 18: Médias das variáveis estudadas em relação aos espaçamentos e as idades, para cisalhamento.....	53
Tabela 19: Matriz de correlação de Person para a propriedade de cisalhamento.....	54
Tabela 20: Resultados da regressão linear para o ensaio de cisalhamento.....	56

RESUMO

Erica Machado Garbachevski. Características de Crescimento e Propriedades da Madeira Juvenil de *Pinus taeda* L.

Nas últimas décadas, Florestas de *Pinus* têm sido implantadas em espaçamentos maiores e colhidas em prazos mais curtos, o que pode influenciar nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, por se tratar de árvores mais jovens, que ainda não possuem quantidade significativa de madeira adulta em sua composição. Nesse contexto, o objetivo dessa pesquisa foi estudar a relação entre as características de crescimento e as propriedades físico-mecânicas da madeira juvenil de *Pinus taeda* L. Foram avaliadas a massa específica básica, MOR e MOE em flexão estática, resistência e rigidez em compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento. Foram também avaliados o tamanho médio dos anéis de crescimento e a porcentagem de lenho tardio da madeira dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos. Os espaçamentos de plantio avaliados não causaram alterações significativas sobre a porcentagem de lenho tardio e as propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* L. aos 13 e 15 anos. Nos casos em que houve diferença (densidade aparente e tamanho médio de anel), não foi possível identificar de forma clara sua tendência. Houve correlação significativa das características de crescimento da árvore com a resistência e com a rigidez da madeira, embora de pequena magnitude. De modo geral, o emprego de diferentes espaçamentos não influenciou diretamente as propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* L. até as idades avaliadas. Por outro lado, a resistência, a rigidez, o tamanho médio de anel e a porcentagem de lenho tardio da madeira aumentaram significativamente com o aumento da idade de corte de 13 para 15 anos.

Palavras-chave: Rotação florestal, Espaçamento de plantio, Resistência e rigidez da madeira, Anéis de crescimento.

ABSTRACT

Erica Machado Garbachevski. Growth characteristics and properties of juvenile *Pinus taeda* L. wood

In the last decades, pine forests have been implanted in larger spacing and harvested in shorter rotation, which could influenced the physical and mechanical properties of the wood, as they are younger trees, which do not yet have a significant amount of adult wood in its composition. In this context, the aim of this research was to study the relationship between growth characteristics and the physical-mechanical properties of juvenile wood of *Pinus taeda* L. The apparent density, MOR and MOE in static bending, strength and stiffness in parallel compression and shear strength were evaluated. The average size and the percentage of late wood of the growth rings in the specimens used in the mechanical tests were also evaluated. The planting spacing evaluated did not cause significant changes on the percentage of late wood and the mechanical properties of *Pinus taeda* L wood at 13 and 15 years old. In cases where there was a difference (apparent density and average size of the growth rings), it was not possible to clearly identify its tendency. There was a significant correlation between the growth characteristics of the tree and the strength and stiffness of the wood, although of small magnitude. In general, the use of different spacing did not directly influence the mechanical properties of *Pinus taeda* L. wood until the ages evaluated. On the other hand, the strength, the stiffness, the average ring size and the percentage of late wood of the growth rings increased significantly with the increase in the harvesting age from 13 to 15 years.

Keywords: Forest spacing, Forest rotation, Wood strength and stiffness, Growth rings.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui 1,6 milhões de hectares ocupados pelo gênero *Pinus*. No país, a região sul é responsável por 1.389.198 hectares das florestas plantadas de *Pinus*, o qual o Paraná responde por 42% da área nacional ocupada pelo gênero (IBÁ, 2019). Em 2018 o Paraná se destacou com maior área de florestas plantadas com *Pinus* no Brasil, sendo *Pinus taeda* L. e o *Pinus elliottii* Engelm as principais espécies cultivadas, em virtude de sua alta produção (REISSMANN e WISNIEWSKI, 2000; DALLA CORTE et al., 2014). Em 2018, as exportações da madeira destes plantios alcançaram US\$ 11,4 bilhões, com destaque para a produção de celulose e madeira serrada (IBÁ, 2019).

As principais aplicações da madeira de *Pinus*, desde a sua introdução no Brasil, têm sido para produção de celulose e papel, uso na construção civil, produção painéis particulados e de fibras (MDP, MDF, OSB), laminação, indústria moveleira e de madeira serrada (KRONKA et al., 2005). De acordo com Gonçalves et al. (2009), a utilização da madeira como matéria-prima para indústria e construções deve ser conduzida com conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas. Para Dias e Lahr (2004) é importante conhecer essas propriedades para que se possa utilizar a madeira de modo racional. Entretanto, no estudo da madeira devem ser considerados a existência dos parâmetros relacionados ao crescimento da árvore, em especial a proporção de madeira adulta e juvenil (ROSA et al., 2014).

Variáveis relacionadas ao crescimento da floresta podem causar alterações nas características da futura árvore (KRONKA et al., 2005) e influenciar nas propriedades da madeira (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000; VIDAURRE et al., 2013). Como exemplo, a largura dos anéis de crescimento de algumas coníferas que condiciona de forma marcante o seu desempenho físico-mecânico, podendo ser uma referência de padrão de qualidade dessas espécies. Quanto mais largos os lenhos iniciais do lenho, menor será seu desempenho mecânico. O inverso ocorre para a proporção de lenho tardio, havendo alta correlação entre a quantidade de lenho tardio e o aumento da massa específica e, conseqüentemente, quanto maior a porcentagem de lenho tardio, maior será a massa específica e maior a resistência da madeira (KNIGGE; SCHULTZ, 1966). Os plantios de *Pinus* no Brasil iniciaram na década de 1960, com os incentivos fiscais ao florestamento (SHIMIZU, 1997). Na época, a maioria implantada no espaçamento 2 x 2 metros e prevendo rotações entre 20 e 30 anos. Estes parâmetros foram sendo alterados com o tempo, prevalecendo o aumento dos espaçamentos iniciais e a diminuição das rotações (KRONKA et al., 2005; SUASSUNA et al., 2006). Atualmente,

plantações de *Pinus* tem sofrido redução do período de rotação florestal. Exemplos são povoamentos manejados com dois desbastes e corte raso entre 18 e 20 anos (REMASA, 2016) ou sem desbastes e corte final com 17 anos (WESTROCK, 2017). Outras empresas têm empregado rotações de 15 anos e sem desbastes. Nessas idades, em geral, as árvores do gênero *Pinus* ainda não possuem quantidade significativa de madeira adulta, o que pode influenciar nas suas propriedades físicas e mecânicas, por apresentar menor massa específica, menor porcentagem de lenho tardio e menor estabilidade dimensional.

Desta forma, embora bastante estudado em épocas anteriores por exemplo: Baker e Shottafer (1970) e Tomaselli (1979), o efeito da idade e do espaçamento inicial dos plantios de pinus volta a ter importância neste momento e necessita de novos estudos. Além da mudança nos planos de manejo florestal atualmente empregados se deve considerar também que o *Pinus taeda* foi uma espécie submetida a programas de melhoramento genético intensivos, o que vem melhorando muito a qualidade de seus povoamentos e que pode influenciar nas propriedades da madeira (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2002; COUTINHO et al., 2017).

Portanto, é de grande importância avaliar o efeito da idade e do espaçamento nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, em especial, na resistência, para a adequada utilização do produto final. Além disso, realizar mais estudos para que se possa saber se é possível estabelecer parâmetros brasileiros para a classificação de madeiras a partir do tamanho dos anéis de crescimento e a porcentagem de lenho tardio em nosso país.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar o efeito da idade e do espaçamento de plantio nas propriedades da madeira juvenil de *Pinus taeda* L. e avaliar a sua relação com as características do anel de crescimento.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a influência dos espaçamentos do plantio 2,0 x 2,0, 3,0 x 2,0 m, 4,0 x 2,0 m, nas propriedades físico-mecânicas da madeira juvenil de *P. taeda*;
- b) Avaliar a influência da idade da árvore (13 e 15 anos) nas propriedades físico-mecânicas da madeira juvenil de *P. taeda*;
- c) Avaliar a relação entre as características de crescimento (porcentagem de lenho tardio e tamanho médio de anéis de crescimento) e as propriedades da madeira.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Gênero *Pinus*

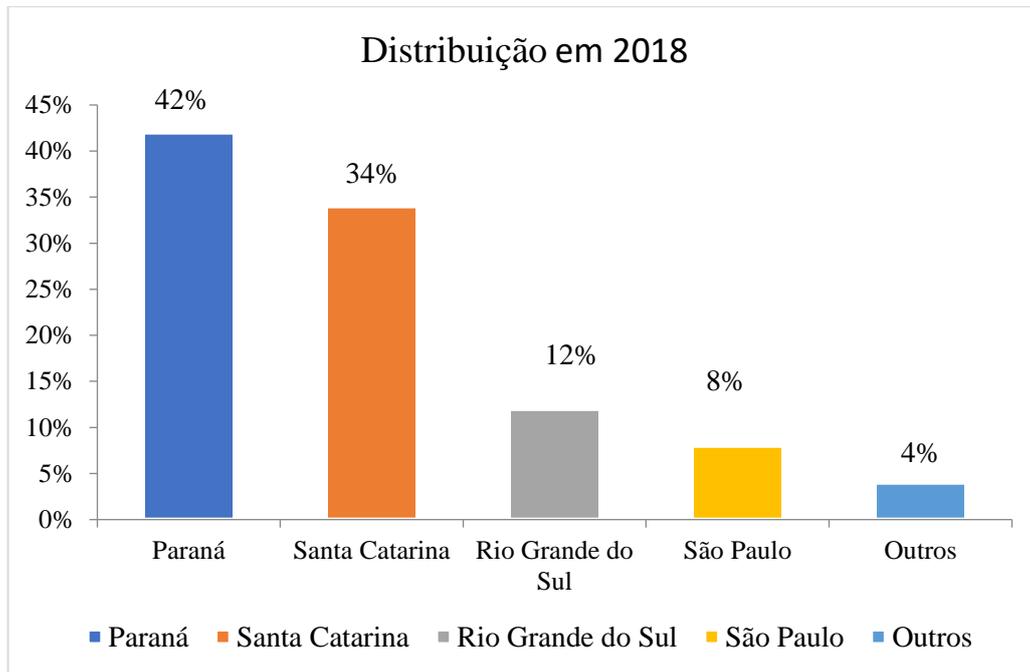
Pinus taeda L. é uma das espécies florestais mais importantes dentre as plantadas no sul e sudeste dos Estados Unidos. É uma espécie nativa na Nova Jersey, Delaware, Flórida, Texas, Vale do Mississippi ao extremo sudeste do Oklahoma, Arkansas e Tennessee (USDA FOREST SERVICE, 2016). Segundo Marchiori (1996) é uma conífera, que possui copa densa, ramos acinzentados, folhas aciculares e casca gretada. Em seu ambiente natural, a espécie pode atingir até 45 metros de altura e 1,30 m de diâmetro a altura do peito (DAP), sendo a madeira considerada resistente (USDA FOREST SERVICE, 2016).

No Brasil, as primeiras sementes de *P. taeda* chegaram por volta de 1936, trazidas pelo Instituto Florestal de São Paulo (KRONKA et al., 2005). Por meio do Serviço Florestal do estado de São Paulo foram realizados ensaios com espécies americanas dos gêneros *Pinus* em 1948, incluindo *P. taeda*. Os reflorestamentos com espécies do gênero *Pinus* foram intensificados após a Lei de Incentivos Fiscais. Por volta da metade da década de 1960 muitas áreas foram ocupadas predominantemente com *P. taeda* e *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm, promovendo a base florestal para a industrialização brasileira (SHIMIZU, 1997).

Nas décadas de 1970 e 1980 as plantações deste gênero foram as principais fontes de matéria-prima para o desenvolvimento da indústria florestal brasileira, abastecendo um mercado bastante diversificado (SHIMIZU, 2018). A rusticidade da espécie, a alta capacidade de desenvolvimento e de adaptação, foram algumas das características que contribuíram fortemente para o desenvolvimento da cultura.

Atualmente, a indústria de árvores plantadas brasileira é referência mundial por sua taxa de crescimento das árvores. Em 2018, o setor brasileiro de florestas plantadas apresentou crescimento de 13,1% em relação ao ano anterior. A área total de florestas plantadas manteve-se praticamente estável em relação a 2017, com total de 7,83 milhões de hectares plantados. A área ocupada por plantio de *Pinus* spp. é de 1,6 milhões de hectares, sendo distribuído principalmente no estado do Paraná com 42%, Santa Catarina 34% e Rio Grande do Sul com 12% (Figura 1) (IBÁ, 2019).

Figura 1: Distribuição de plantio de *Pinus* em 2018 nos estados do país.



Fonte: adaptado de IBÁ (2019).

Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2019) o setor brasileiro apresentou a maior produtividade mundial considerando o volume de madeira produzido por área ao ano, com média de 36,0 m³/ha.ano para eucalipto e 30,1 m³/ha.ano para plantio de *Pinus*.

A espécie *P. taeda* tem alto potencial de crescimento (altura e diâmetro), se adapta muito bem a condições de baixas temperaturas, baixa exigência nutricional, e sua madeira possui traqueídes, apropriados para a fabricação de papel de alta resistência (SHIMIZU, 2016). Segundo Cargnin (2005), os plantios de *Pinus* têm como diferencial a possibilidade de gerar multiprodutos, pois sua madeira pode ser destinada para a fabricação de compensados; para a indústria de serrados, papel e celulose; painéis reconstituídos e, até o seu resíduo, é aproveitado como biomassa para geração de vapor e energia (KRONKA et al., 2005).

3.2 Espaçamento inicial de plantio

O espaçamento entre plantas é importante na área florestal, pois afeta diretamente o crescimento, volume individual, qualidade da madeira e rotação da cultura (DANIEL, 2014). Chies (2005) afirmou que o principal objetivo da escolha do espaçamento é proporcionar um

espaçamento suficiente para que a árvore atinja seu máximo crescimento, com alta qualidade e menor custo.

Os primeiros plantios florestais com *Pinus* no Brasil, em geral, adotavam densidades iniciais de 900 a 2500 árvores por hectare, dependendo dos objetivos e da rotação estabelecida (RETSLAFF, 2014). De acordo com Botelho (1998), as empresas florestais escolhem os espaçamentos levando em consideração a mecanização da implantação, manutenção e colheita, com espaçamento entre linhas em torno de 3,0 m. Historicamente, esse gênero tem sido plantado com espaçamentos 2,0 x 2,0 m; 2,5 x 2,5 m; 3,0 x 1,5 m; 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 2,5 m.

Segundo Oliveira Neto et al. (2003), a escolha do espaçamento de plantio está relacionada com a finalidade do plantio. Em espaçamentos menores a produtividade de biomassa por unidade de área é maior, em espaçamentos maiores a produção individual é maior (considerando um mesmo sítio e uma mesma idade). Segundo Botelho (1998), as recomendações de espaçamento não devem ser generalizadas e devem ser levadas em consideração a qualidade do sítio, características de cada espécie, tipo de manejo, mercado consumidor, colheita e outros produtos. O espaçamento e/ou desbaste, ou a conciliação dos mesmos, são métodos silviculturais que resultam em maior desempenho na formação da planta e logo, na massa específica da madeira.

Espaçamentos maiores tendem a produzir madeira com baixa massa específica básica (GARCIA et al., 1991). Esse fato deve-se ao aumento da taxa de crescimento e maior formação do lenho juvenil, o qual resulta em menor massa específica (BOTELHO, 1998). Ao contrário, nos espaçamentos menores, há uma redução no lenho juvenil, produzindo assim madeiras de maior massa específica básica e resistência mecânica (CHIES, 2005). Verificou-se que espaçamento mais amplo no plantio está associado a um MOE (módulo de elasticidade) mais baixo em várias espécies de coníferas (LASSERRE et al., 2005; ROTH et al., 2007; LASSERRE et al., 2008).

Alguns autores, tais como Baker e Shottafer (1970), Roque e Ledzema (2003), Lima et al. (2009) e Haselein et al. (2002), discordaram dessa afirmação, pois em seus estudos encontraram que houve um aumento significativo da massa específica com o aumento do espaçamento. Lasserre et al. (2009), avaliando a influência do espaçamento em algumas propriedades (ângulo das microfibrilas, densidade da madeira, características das fibras, módulo de elasticidade, largura de anel e porcentagem de lenho tardio) da madeira do *Pinus radiata*, citaram que o espaçamento influenciou significativamente. No espaçamento menor

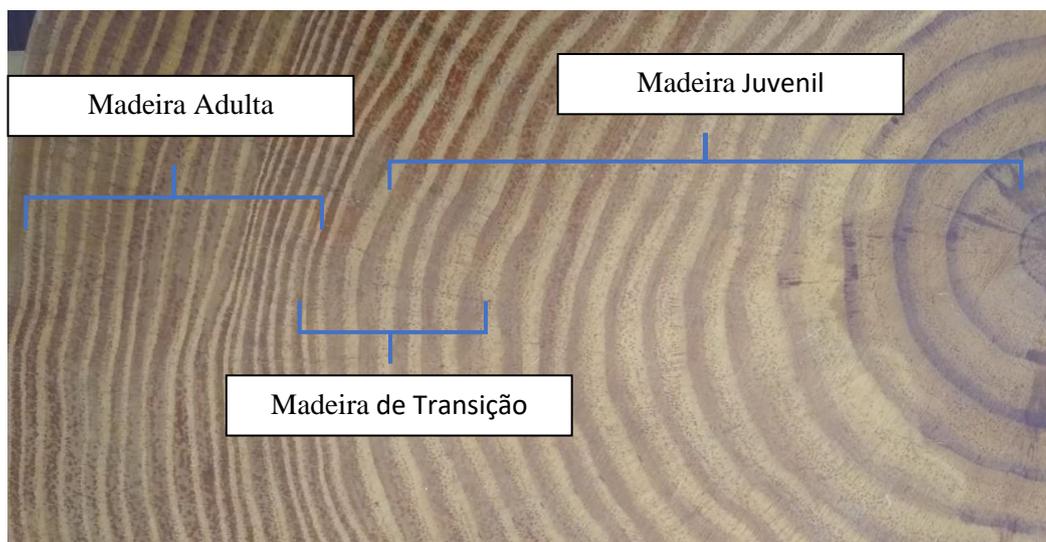
(2500 árv/ha), houve uma redução significativa de 38% da largura do anel de crescimento, e aumentos significativos no MOE de 35%, e porcentagem de lenho tardio de 20% em relação ao espaçamento mais amplo (833 árv/ha).

Segundo Leite et al. (2006), é fundamental determinar o espaçamento ideal para o plantio de *Pinus*, pois irá influenciar diretamente na qualidade e destinação do produto final. O espaçamento afeta os tratamentos culturais, a qualidade da madeira, a colheita florestal e, como resultado, os custos da produção. Nesse contexto existem diversos estudos relacionados com o espaçamento do *Pinus taeda* (HARMS et al., 2000; BALDWIN JUNIOR et al., 2000; WILL et al., 2001; RADTKE et al., 2003; PAULESKI 2010).

3.3 Madeira juvenil

A madeira juvenil corresponde a região próxima a medula, apresenta forma cilíndrica, desde a base até o topo da árvore, podendo formar parte do albúrnio ou do cerne no tronco (EVANS et al., 2000; RALL, 2006) sendo formada durante a fase juvenil do câmbio vascular da árvore. De modo geral, a madeira juvenil caracteriza-se por menor massa específica, menor conteúdo de celulose e resistência mecânica, maior ângulo das microfibrilas na camada S₂, traqueídes mais curtos, contração transversal menor, maior contração longitudinal, maior proporção de lenho de reação, além de possuir menor proporção de lenho tardio, o que resulta num aspecto visual diferente da madeira adulta. Para os gêneros *Pinus* plantados no Brasil, os anéis de crescimento da madeira juvenil são mais largos (por conta da grande proporção de lenho inicial). A diferenciação entre as duas regiões (madeira juvenil e madeira adulta), embora possa ser realizada visualmente (Figura 2), pode ser determinada de forma mais precisa, por meio da análise da variação do comprimento das fibras na direção radial do fuste da árvore e pelo método da densidade (RALL, 2006). A madeira juvenil apresenta traqueídes mais curtos próximos a medula, aumentando em direção a casca, enquanto na madeira adulta ocorre uma estabilização (BALLARIN; PALMA, 2003).

Figura 2: Corte transversal de um fuste de *Pinus elliottii* com 34 anos, diferenciando madeira juvenil e adulta.



Segundo Green et al. (1999), nas coníferas a madeira juvenil se compõe a partir da medula até próximo ao 20º anel de crescimento, e apresenta diferenças nas propriedades físicas e mecânicas, em relação à madeira adulta. Em um estudo realizado por Ballarin e Palma (2003) com *Pinus taeda* L. aos 37 anos de idade, mostrou que a madeira juvenil está compreendida entre a medula até o 14º anel de crescimento, entre 14º e o 18º é considerada madeira de transição e, a partir deste até o último anel de crescimento, é considerada madeira adulta. Também estudando *Pinus taeda* L., Tomaselli (1979) observou que o comprimento dos traqueídes aumenta em direção a casca até idade entre 9 e 13 anos, após esse período ocorre uma estabilização dimensional.

A madeira proveniente de árvores jovens apresenta maior quantidade de madeira juvenil em relação as árvores mais velhas (Tabela 1). A madeira juvenil apresenta características inferiores em termos de resistência e estabilidade dimensional o que pode influenciar negativamente na sua utilização (SANTINI et al., 2000).

Tabela 1: Variação da porcentagem de lenho juvenil de *Pinus taeda* em função da idade da árvore.

Idade (anos)	Porcentagem de lenho juvenil	
	Peso seco (%)	Volume (%)
15	76	85
25	50	55
45	15	19

Fonte: Adaptado de MUÑIZ (1993)

A presença da madeira juvenil pode influenciar nas propriedades mecânicas da madeira. Peças estruturais que contenham lenho juvenil apresentam classes de resistência inferiores, por este motivo é importante conhecer as diferenças entre as propriedades do lenho juvenil e adulto na utilização da madeira processada mecanicamente (VIDAURRE et al., 2011). Larson et al. (2001) e Guler et al. (2007) relataram que o módulo de elasticidade, a resistência à compressão paralela e normal, a flexão estática e a tração paralela são altamente afetadas pela presença de madeira juvenil.

3.4 Características de crescimento

3.4.1 Largura dos anéis de crescimento

A configuração dos anéis de crescimento, juntamente com a formação do cerne e o aspecto superficial são empregadas, desde o início de sua utilização, como indicadores de suas propriedades (KNIGGE; SCHULTZ, 1966).

Os anéis de crescimento estão relacionados com o crescimento da árvore, ou seja, cada anel corresponde a um período de um ano, sendo eles compostos por lenho inicial e lenho tardio. O lenho inicial coincide com o crescimento da árvore no período vegetativo, quando as plantas despertam do ciclo de dormência, reestabelecendo suas atividades fisiológicas com total vigor. As células formadas nesta fase são identificadas por suas paredes finas e lumens grandes e coloração clara. Com o fim do período vegetativo, as células vão reduzindo gradativamente sua atividade fisiológica, em consequência as paredes das células vão se transformando gradualmente, ficando mais espessas e os lumens menores, diferenciando do lenho anterior por apresentarem uma coloração mais escura (BURGER; RICHTER, 1991).

Quando ocorre competição de árvores, por consequência as larguras dos anéis de crescimento são reduzidas com o grau de competição. As condições de crescimento da árvore afetam os anéis de crescimento e mudanças bruscas podem contribuir para taxas de crescimento desuniformes (LARSON et al., 2001).

Segundo Klock (2000) a largura dos anéis de crescimento em coníferas é facilmente observada em corte transversal e pode ser indicadora de muitas características da madeira e de seu comportamento, tais como a regularidade e distribuição de determinadas propriedades,

manutenção da forma depois de trabalhada, massa específica e propriedades mecânicas. Para Barbosa (1982) a largura dos anéis de crescimento é influenciada pelas condições climáticas, edáficas e o manejo florestal, onde, conseqüentemente, afeta a massa específica da madeira.

Segundo Knigge e Schulz (1966), existem grandes variações de largura dos anéis de crescimento dentro de uma árvore, tanto num plano transversal como em função de sua altura. Em um estudo Krempl (1977), observou valores máximos de largura nos anéis de crescimento no ápice e na base das árvores crescidas em maciços florestais, localizando-se a zona de largura média mais regular na posição a um terço da altura da árvore.

3.4.2 Porcentagem de lenho tardio

Segundo Chies (2005) a proporção entre os lenhos inicial e tardio é uma variável frequentemente estudada em vários estudos sobre a qualidade da madeira, mostrando correlações significativas com a massa específica, propriedades de resistência entre outros fatores. No lenho tardio o processo fisiológico gera uma maior quantidade de material lenhoso por unidade de volume, quando comparado com o lenho inicial. Em função disso, espera-se que quanto maior o percentual de lenho tardio maior será a massa específica de uma seção ou árvore inteira (BRITO; BARRICHELO, 1979). Klock (2000) e Florsheim (2010) acrescentam que a variação do percentual de lenho tardio relaciona-se com a da massa específica, tanto no sentido transversal como no sentido longitudinal da árvore, diminui com a altura e aumenta no sentido medula-casca, esta relação é ainda mais acentuada para espécies do gênero *Pinus*.

Muñiz (1993) estudando a porcentagem de lenho tardio de *P. elliottii* e *P. taeda*, observou que os primeiros anéis formados em árvores de rápido crescimento, são largos e a faixa de lenho tardio é estreita, na direção medula casca. À medida que se aproxima da casca, a porcentagem de lenho tardio aumenta de maneira significativa, sendo mais proeminente na região da base da árvore.

De acordo com Larson (1963), em um povoamento fechado, a porcentagem de lenho tardio varia em função da classe e do desenvolvimento da copa. Uma árvore dominante com copa vigorosa deverá produzir faixas relativamente largas de lenho inicial. Entretanto, árvores dominantes com copa vigorosa e uma porção longa do fuste isenta de galhos, produzem largas faixas de lenho tardio. Árvores de extratos inferiores possuem maior percentual de lenho tardio,

portanto, possuem madeira com maior massa específica do que as dos estratos superiores do mesmo povoamento.

Segundo Larson et al. (2001) a zona dos traqueídes de transição entre o lenho inicial e tardio, além de ser uma característica de distinção do lenho juvenil, é um importante fator indicativo da qualidade da madeira, pois, uma vez que os traqueídes de lenho inicial possuem lumes largos, paredes finas e são estruturalmente fracos, uma redução na formação desse lenho pode contribuir para um aumento na qualidade da madeira. O lenho inicial sempre é mais afetado que o lenho tardio, com a redução da largura dos anéis de crescimento. Entretanto, a quantidade de lenho tardio não necessariamente aumenta, apesar de aumentar a sua porcentagem.

O lenho tardio e os anéis de crescimento são algumas das variáveis características de crescimento, utilizadas em alguns países na classificação visual. A classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça estrutural são diferentes das propriedades mecânicas de corpos de prova ensaiados em laboratório isentos de defeitos, em função da presença de características de crescimento. Com o auxílio de regras de classificação, estas características de crescimento são usadas para separar a madeira em classes de qualidade (CARREIRA, 2003).

Na América do Norte, grande parte das espécies é separada em grupos, sendo que a madeira obtida de espécies de um mesmo grupo é tratada como equivalente. As espécies são geralmente agrupadas quando têm as mesmas propriedades mecânicas ou são semelhantes anatomicamente ou, ainda, por conveniência de mercado, segundo Green et al. (1999). Desta forma, *P. elliotii* e *P. taeda* fazem parte do grupo Southern Pine e são classificados visualmente de acordo com as regras do Southern Pine Inspection Bureau - SPIB (1994).

3.5 Propriedades físicas da madeira

As propriedades físicas são as características da madeira que definem a sua natureza física como um material. A determinação dessas propriedades é de grande importância, porque podem influenciar a resistência da madeira. Segundo Calil, Lahr e Dias (2003) as propriedades da madeira podem ser influenciadas por diversas razões, tais como: clima, composição e

umidade do solo, temperatura, posição da árvore no talhão, massa específica do povoamento, o tipo de manejo aplicado e a precipitação.

3.5.1 Massa específica da madeira

A massa específica básica é definida pela razão entre a massa seca da amostra e o respectivo volume nas condições de total saturação. Massa específica aparente é determinada pela razão entre a massa e o volume de corpos de prova para um dado teor de umidade (U%) (CALIL; LAHR; DIAS, 2003).

A massa específica básica da madeira é importante em todos os setores florestais. Na tecnologia relaciona-se as características do produto final (rendimento em celulose, resistências físico-mecânicas do papel e da madeira, produção e qualidade do carvão, etc.). No melhoramento florestal evidencia o potencial de seleção das espécies e procedências; no manejo florestal é determinante do tipo de prática silvicultural a ser aplicada em função do produto final (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1989).

A massa específica é um importante índice de qualidade, pois ela está relacionada diretamente com outras propriedades da madeira, influenciando a higroscopicidade, estabilidade dimensional, propriedades mecânicas, acústicas, térmicas, elétricas, entre outras, assim como, as propriedades relacionadas ao processamento da madeira (CHIES, 2005). A variabilidade da maior parte das propriedades mecânicas da madeira pode ser estimada com base na variação da massa específica (PANSHIN E DE ZEEUW, 1980; LOBÃO, 2004).

Estão incluídos entre os fatores associados a variação na massa específica, genéticos, do meio, silviculturais, além dos aspectos morfológicos como a porcentagem de lenho tardio e largura dos anéis de crescimento. Também ocorre a variação da massa específica dentro da árvore (sentido longitudinal e radial), entre madeira juvenil e adulta, entre cerne e alburno, etc. (SHIMOYAMA; BARRICHELO; 1989).

Segundo Zobel e Buijtenen (1989) ¹apud Oliveira Júnior (2011), existem três padrões de variabilidade da massa específica em uma mesma árvore. A primeira é decorrente das

¹ ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. V. Wood variation: its causes and control. New York: Springer-Verlag, 1989. 363 p.

diferenças existentes no anel de crescimento entre suas distintas camadas, o segundo é observado no sentido medula-casca e o último refere-se a diferentes alturas ao longo do fuste.

Baker e Shottafer (1970) desenvolveram um experimento com *Pinus resinosa* Ait., onde os resultados apontaram uma tendência de aumento na massa específica com o aumento do espaçamento. Roque e Ledzema (2003), após um experimento realizado com Teca (*Tectona grandis* Lf), também observaram que com maior espaçamento houve um aumento significativo na massa específica básica. Garcia (1991), por outro lado, realizou estudos com *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. e *Eucalyptus saligna* Sm. e encontrou uma diminuição da massa específica com o aumento do espaçamento. Chies (2005), estudando propriedades físicas de *P. taeda*, citou que a massa específica básica apresentou valores decrescentes com o aumento do espaçamento. Vital e Della Lucia (1987) não encontraram efeitos significativos entre o espaçamento e a massa específica em um estudo com *E. grandis* e *E. saligna*. Mendonça (1982) constatou que a massa específica básica decresce da base para o ápice da árvore, independentemente da idade.

3.6 Propriedades mecânicas da madeira

As propriedades mecânicas da madeira avaliam a aptidão da madeira a suportar esforços. Elas estão diretamente relacionadas com a massa específica básica (LOBÃO et al., 2004, SHIMOYAMA, 1990), mais especificamente com percentual de madeira juvenil, largura dos anéis de crescimento, ângulo das microfibrilas, inclinação da grã, quantidade de extrativos, teor de umidade, dentre outros (EVANS et al., 2000).

A determinação das propriedades tecnológicas, a partir de ensaios mecânicos é importante para verificar sua eficiência no processamento industrial e estrutural, assim como, para conhecer os usos mais indicados para cada espécie (SANTINI et al., 2000). Ensaios de resistência mecânica permitem conhecer a capacidade do material resistir a tensões externas ou sofrer deformações, sendo importantes para sua adequada utilização (ROCHA et al., 1988).

De acordo com Panshin e De Zeeuw (1980), as propriedades mecânicas estão associadas as características de elasticidade e resistência. Definida pelo comportamento do material sob aplicação de força externa, onde varia de acordo com o tipo de força exercida na madeira e no sentido em que é aplicada. O módulo de elasticidade é uma propriedade inerente do material e depende tanto da

rigidez das ligações anatômicas como da densidade das ligações (FERRANTE, 2002), o qual pode ser obtido a partir do ensaio de flexão estática, tração e compressão (TRIANOSKI, 2012). A elasticidade significa que as deformações produzidas em um material resultante de baixas tensões, voltam ao seu estado normal após a retirada da carga. As propriedades elásticas são características de um material sólido até determinado limite de força, após esse limite ocorrerão deformações plásticas, ou seja, irreversíveis (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

Resistência de um material é a capacidade de uma estrutura em resistir às cargas (GERE, 2003), e está associada à sua composição (FERRANTE, 2002). É também definida como a força máxima que ocorre antes da ruptura (MATOS, 1997; TRIANOSKI, 2012). Na realização dos ensaios de resistência da madeira, mesmo utilizando corpos de prova procedentes de uma mesma espécie com mesmas dimensões, e condições físicas de climatização, podem apresentar uma variação significativa nos resultados. Esta variabilidade pode ser explicada pelo fato de existir elementos anatômicos em diversos tamanhos e proporções, diferentes composições químicas e arranjos estruturais (TRIANOSKI, 2012).

A madeira apresenta propriedades mecânicas diferentes nos três sentidos de crescimento (axial, tangencial e radial), resultando em um material anisotrópico (TSOUMIS, 1991). Os ensaios mais comumente utilizados na caracterização mecânica da madeira são os de compressão paralela às fibras, flexão, cisalhamento e dureza.

A compressão paralela às fibras é avaliada com a aplicação de uma carga que efetua pressão na seção transversal axial do corpo de prova, sendo que o ensaio é realizado com velocidade controlada até a ruptura do corpo de prova (FMESCHI, 2012). No ensaio de compressão paralela às fibras, a resistência e a rigidez da madeira à compressão são parâmetros que determinam condições importantes para a aplicação estrutural da madeira (LIN et al., 2007). Essa propriedade é importante na utilização da madeira como material de construção (telhados, caibros, pilares, etc.).

No ensaio de flexão, uma carga é aplicada no meio do corpo de prova sobre dois apoios, causa tensões no seu interior e uma deformação até a ruptura (DALCIN, 2007). Nesse ensaio é avaliado a resistência a flexão estática, por meio do módulo de ruptura (f_M) e a rigidez por meio do módulo de elasticidade (E_M). As propriedades da madeira a flexão são utilizadas para dimensionamento de peças como vigas, além de ser utilizado na comparação entre espécies, arqueamento, etc. (MELO, 2002).

O cisalhamento consiste na separação das fibras por um esforço no sentido paralelo as mesmas (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). O valor das tensões de cisalhamento depende principalmente

dos sentidos de crescimento da madeira. No sentido tangencial há influência da diferença entre os lenhos inicial e tardio. No plano radial há grande influência dos raios, madeiras com raios largos resultam em baixa resistência ao cisalhamento (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; MORESCHI, 2005). É de grande importância em madeiras utilizadas para vigas, treliçadas, roletes, polias, postes, etc., ou seja, que sofrerão pressões de cargas apoiadas sobre um determinado local que poderá romper no contato entre suas fibras, como em telhados que se apoiam sobre vigas (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

A dureza é definida como a resistência requerida para um corpo sólido penetrar em outro por meio de esforço, ou como a resistência oferecida pelo material testado à penetração de certo dispositivo (FMESCHI, 2012). Tsoumis (1991) afirmou que a dureza no topo da madeira é quase duas vezes maior do que no sentido radial e tangencial. Na madeira, esta propriedade é importante para avaliar a trabalhabilidade com ferramentas e para o emprego em móveis, pisos, aparelho de esporte, entalhes, tacos, etc. (MORESCHI, 2012).

3.7 Estatística multivariada

A estatística multivariada é indicada para uso com dados variáveis medidos simultaneamente em cada unidade experimental, ou seja, em cada unidade experimental são avaliadas diversas variáveis respostas (MINGOTI, 2005). A análise multivariada permite o estudo global dessas variáveis, colocando em evidência ligações, semelhanças ou diferenças entre elas (QUEIROZ, 2008; FERREIRA, 2018). A análise de variância multivariada (Manova) e análise discriminante são exemplos de técnicas multivariadas.

A análise de variância multivariada (Manova) consiste em uma análise de variância para mais de uma variável ao mesmo tempo, considerando a correlação entre elas (FIELD, 2005). A hipótese H_0 testada pela Manova é de que não há diferença na média das variáveis dependentes. As estatísticas avaliadas nesta análise são o Traço de Pillai, Lambda de Wilks, Traço de Hotelling, Maior Raiz de Roy, sendo o Wilk's Lambda o mais utilizado (PALLANT, 2007).

A análise discriminante tem como um de seus objetivos verificar a contribuição de cada variável na separação dos grupos/tratamentos, sendo recomendada após identificar diferença entre os tratamentos na Manova (FIELD, 2005). A análise discriminante consiste no escalonamento dos autovetores (e) associados aos autovalores (λ) extraídos da matriz $W^{-1}\hat{B}_0$, por meio da

multiplicação por uma constante k . A combinação linear do autovetor com a variável será denominada função discriminante: $\underline{C}'_1 X = \underline{e}'_1 X$ (FERREIRA, 2018).

De modo geral, as variáveis medidas em uma mesma unidade experimental estão relacionadas entre si, e quanto maior o número de variáveis, mais trabalhosa torna-se a análise por métodos comuns de estatística univariada (PALLANT, 2007). Sendo assim, a utilização da Manova em trabalhos científicos vem crescendo cada vez mais.

Batistela (2013) utilizou a Anova e a Manova na diferenciação de duas espécies puras e um híbrido de eucaliptos, utilizando dados da massa específica básica. A vantagem obtida na análise multivariada é que os três grupos estudados se mostraram diferentes a nível de significância de 5%. Na análise univariada também foi possível demonstrar que os três grupos se diferenciam, em determinados discos, mas num nível de significância “inflacionado”, indicando algumas falhas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

Os dados utilizados neste estudo são provenientes de um plantio florestal localizado na Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), *Campus* de Irati, estado do Paraná a Latitude: 25° 28' 3" Sul, Longitude: 50° 39' 4" Oeste, a 836 metros de altitude. O plantio foi implantado em maio de 2003. Foram coletados dados em duas abordagens, nas idades de 13 e 15 anos, nos talhões 2, 3 e 5 (Figura 3).

Figura 3: Localização do plantio no Campus Universitário da UNICENTRO em Irati, Paraná.



Fonte: Google Earth, 2010.

Tais talhões foram selecionados por apresentarem espaçamentos mais comumente utilizados na área florestal (3,0 x 2,0 m; 4,0 x 2,0 m e 2,0 x 2,0 m). Na Tabela 2 são apresentadas informações sobre o plantio de cada um dos talhões.

Tabela 2: Espaçamento, taxa de mortalidade inicial e tratamentos silviculturais.

Talhão	Área (ha)	Espaçamento (m x m)	Taxa de mortalidade inicial (%)	Tratos Silviculturais		
				Replanteio	Roçada	Desrama
2	0,76	3,0 x 2,0	0,87	jun/2003	fev/2004	jul/2007
3	1,12	4,0 x 2,0	1,14	jun/2003	fev/2004	jul/2007
5	1,27	2,0 x 2,0	0,69	jun/2003	fev/2004	jul/2007

4.2 Material

Foi realizado um inventário com parcelas temporárias para identificação e seleção das árvores de estudo. Com base nas informações fornecidas pelo inventário, foram colhidas três árvores por espaçamento em cada período (idade). Estas árvores foram selecionadas nas três classes diamétricas centrais (19,5 cm; 22,5 cm e 25,5 cm).

As árvores foram selecionadas e abatidas. Foram retiradas duas toras de 1.0 m de cada árvore, a primeira tora foi cortada a 0.10 m do chão para tentar captar toda a variação de idade da madeira. As toras foram desdobradas em pranchões com aproximadamente 5 cm de espessura e 1 m de comprimento. Posteriormente, as amostras foram identificadas e secas de forma natural. (Figura 4).

Figura 4: a) Toras. b) Identificação e secagem dos pranchões.



(a)



(b)

Os pranchões permaneceram empilhados para uma secagem lenta e gradual ao ar livre, até atingirem umidade de equilíbrio com o ambiente (aproximadamente 15%). Após esse

período, o material foi encaminhado à marcenaria para confecção dos corpos de prova para os ensaios físicos e mecânicos da madeira.

4.3 Confecção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados em uma marcenaria, nas dimensões recomendadas pelas normas técnicas. Foram descartadas as peças com a presença de nós, defeitos e medula, que pudessem interferir nos resultados. Foram confeccionados 90 corpos para determinação de cada propriedade mecânica, sendo 45 corpos de prova para cada idade (13 e 15 anos) e 30 para cada espaçamento avaliado, ou seja, foram retirados 15 corpos de prova de cada árvore.

O procedimento de confecção e acondicionamento dos corpos de prova, bem como os procedimentos de ensaios para determinação das propriedades físico-mecânicas, seguiram as normas D 143-94 (ASTM, 2000) e NBR 7190 (ABNT, 1997). Os corpos de prova para determinação do módulo elástico (E_M) e módulo de ruptura (f_M) na flexão estática foram adaptados, com o objetivo de facilitar a leitura do tamanho médio dos anéis de crescimento e a porcentagem de lenho tardio. Dessa forma, foram confeccionados nas dimensões de 5 x 2,5 x 41 cm (largura x espessura x comprimento), medida que já foi utilizada por Rall (2006).

Após a confecção, os corpos de prova foram acondicionados em câmara climatizada a uma temperatura de $20^\circ\text{C} \pm 3$ e $65\% \pm 1$ de umidade relativa, até atingir a umidade de equilíbrio com o ambiente para serem submetidos aos ensaios.

4.4 Propriedades físicas

Para a determinação do teor de umidade e da massa específica aparente no teor de umidade de equilíbrio (15%), foram utilizados os corpos de prova dos ensaios mecânicos.

4.4.1 Massa específica aparente

A massa específica aparente (15% de umidade) foi determinada para cada corpo de prova, utilizando a equação (1). Sendo a razão entre a massa e o volume ao teor de umidade de equilíbrio (TUE).

$$\rho \text{ aparente} = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Em que: ρ aparente: massa específica aparente (TUE) (g/cm^3); M: massa (TUE) (g); V: volume (TUE) (cm^3).

Os corpos de prova permaneceram acondicionados em câmara climatizada até teor de umidade constante. Para determinação da massa, utilizou-se uma balança analítica, enquanto que o volume foi obtido com o auxílio de um paquímetro e uma régua graduada.

4.4.2 Teor de umidade

Assim que os corpos de prova foram ensaiados, foram colocados na estufa até seu peso permanecer constante, e ser possível determinar o teor de umidade exato no momento do ensaio pela equação 2:

$$U(\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que: U (%): umidade; P_i : Peso inicial da amostra; P_f : Peso final da amostra após secagem em estufa a $103^\circ \pm 2^\circ \text{C}$, até peso constante.

4.5 Caracterização dos anéis de crescimento

4.5.1 Tamanho do anel e porcentagem de lenho tardio

Foram obtidas medidas do tamanho do anel de crescimento e da porcentagem de lenho tardio de cada corpo de prova utilizado na determinação das propriedades mecânicas, conforme metodologia já utilizada por (MELLO,2018). Após serem ensaiados, os corpos de prova

tiveram suas faces lixadas e medidas (Figura 5). A medição foi realizada em ambas as faces para obtenção da média.

Figura 5: Medição dos anéis de crescimento.



Primeiramente, foi medida a dimensão total da face transversal do corpo de prova no sentido perpendicular aos anéis de crescimento, em seguida, foram obtidas as dimensões do lenho inicial e lenho tardio, que corresponde ao tamanho do anel. Para o cálculo da porcentagem de lenho tardio e tamanho médio dos anéis foram utilizadas as equações (3) e (4):

$$\%LT = \frac{\sum LT}{DT} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que: %LT: Porcentagem de lenho tardio (%); \sum LT: Somatória do lenho tardio (cm); DT: Dimensão total da face do corpo de prova no sentido perpendicular aos anéis de crescimento (cm).

$$TM = \frac{DT}{N} \quad (4)$$

Em que: TM: Tamanho médio dos anéis (cm); DT: Dimensão total da face do corpo de prova no sentido perpendicular aos anéis de crescimento (cm); N: Número de anéis de crescimento na face do corpo de prova.

4.6 Propriedades mecânicas

Os ensaios foram realizados ao teor de umidade em equilíbrio (15%), na Máquina Universal de Ensaio Mecânicos EMIC – DL 30.000. Em seguida os resultados de resistência e rigidez foram corrigidos para o teor de umidade de 12%.

4.6.1 Flexão estática

As variáveis obtidas desse ensaio foram o módulo de ruptura (f_M) e o módulo de elasticidade (E_M). O mesmo foi realizado de acordo com a norma D 143-94 (ASTM, 2000) (Figura 6).

Figura 6: Ensaio de flexão estática.



Procedimentos do ensaio

- a) O corpo de prova foi disposto sobre dois apoios, com distância de 14 vezes a altura do CP, ou seja, 35 cm de vão.
- b) A dimensão do corpo de prova foi informada na entrada de dados do software TESC trb 3.04.
- c) A célula de carga que foi utilizada é de 500 kgf e a aplicação de carga contínua e velocidade constante de 1,3 mm/min até ruptura do corpo de prova.

d) Os resultados do ensaio (carga de ruptura, tensão de ruptura, módulo de elasticidade e limite de proporcionalidade) foram registrados automaticamente pelo sistema de relatório do Software TESC trb 3.

Foi possível obter o gráfico de tensão x deformação na realização de cada ensaio, sendo o (f_M) e (E_m) calculados pelas equações (5) e (6):

$$f_M = \frac{3P_m \cdot L}{2b \cdot h^2} \quad (5)$$

Em que: f_M : Módulo de ruptura (MPa); P_m : Carga máxima obtida (N); L : Vão entre apoios; b : Largura do corpo de prova (mm); h : Altura do corpo de prova (mm).

$$E_M = \frac{P_2 \cdot L^3}{4d \cdot b h^3} \quad (6)$$

Em que: E_M : Módulo de elasticidade (MPa); P_2 : Carga no limite de proporcionalidade (N); L^3 : Vão entre os apoios (mm); d : Deformação (mm); b : Largura do corpo de prova (mm); h : Altura do corpo de prova (mm).

4.6.2 Compressão paralela às fibras

Neste ensaio foram obtidas as propriedades de resistência a compressão paralela às fibras (f_{co}) e o módulo de elasticidade em compressão (E_{co}) na compressão paralela às fibras. Os corpos de prova utilizados nestes ensaios tiveram formato prismático com 20 cm de comprimento e seção transversal quadrática de 5 cm de largura, conforme recomendações da norma D 143-94 (ASTM, 2000) (Figura 7).

Figura 7: Ensaio de compressão paralela as fibras.



Procedimentos do ensaio

- a) O corpo de prova foi disposto na máquina e a este foi acoplado um extensômetro para mensurar sua deformação.
- b) A dimensão do corpo de prova foi informada na entrada de dados do software TESC trb 3.04.
- c) A célula de carga que foi utilizada é de 30.000 kgf e aplicação de carga contínua e velocidade constante de 0,6 mm/min até a ruptura.
- d) Os resultados foram registrados automaticamente pelo sistema de relatório do Software TESC trb 3.04. A resistência à compressão paralela e o módulo de elasticidade em compressão foram calculadas pelas equações 7 e 8.

$$f_{co} = \frac{P_1}{S} \quad (7)$$

Em que: f_{co} : Resistência à compressão paralela às fibras (MPa); P_1 : Carga na ruptura (N); S : Área da seção transversal comprimida (cm²).

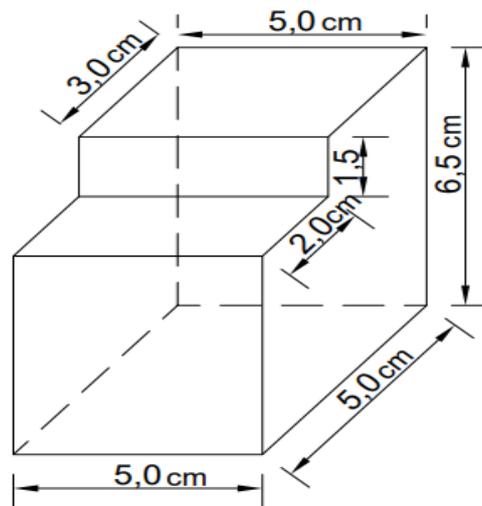
$$E_{co} = \frac{P_1 * L}{S * d} \quad (8)$$

Em que: E_{co} : Módulo de elasticidade em compressão (MPa); P_1 : Carga no limite proporcional (N); L : Distância entre as extremidades do extensômetro (mm); S : Área da seção transversal comprimida (cm²); d : Deformação (mm).

4.6.3 Cisalhamento

Para a realização do ensaio de cisalhamento seguiu-se os procedimentos normativos da D 143 – 94 (ASTM, 2000). O corpo de prova utilizado no ensaio de cisalhamento, bem como suas dimensões estão apresentadas na Figura 8. Para esse ensaio (Figura 9) foi obtida a resistência ao cisalhamento (f_{vo}).

Figura 8: Dimensões do corpo de prova de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de D 143 – 94 (ASTM, 2000).

Figura 9: Ensaio de cisalhamento.



Procedimentos do ensaio

- a) O corpo de prova foi disposto na máquina com o acessório necessário para a realização do ensaio.
- b) A área de cisalhamento foi informada na entrada de dados do software TESC trb 3.04.
- c) A célula de carga que foi utilizada é de 3000 kgf com aplicação de carga contínua e velocidade constante de 0,6 mm/min até o momento que ocorreu a ruptura na área de cisalhamento do CP.
- d) Os resultados do ensaio foram registrados automaticamente pelo sistema de relatório do Software TESC trb 3.04. A resistência ao cisalhamento foi calculada pela fórmula (9):

$$Fvo = \frac{P}{S} \quad (9)$$

Em que: Fvo : Resistência ao cisalhamento (MPa); P: Carga máxima suportada pelo corpo de prova (N); S: área de cisalhamento do corpo de prova (mm²).

4.7 Correção da umidade

A NBR 7190 (1997) recomenda que os valores de propriedades de resistência e rigidez da madeira, sejam corrigidos para a umidade de 12%, visto que o material é ensaiado com diferentes teores de umidade, em um intervalo de 10 a 20%. Para a correção dos valores foram utilizadas as equações (10) e (11):

$$f_{12} = fu\% \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (10)$$

Em que: f_{12} = Resistência a 12% de umidade (MPa); $fu\%$ = Resistencia do corpo de prova (MPa); $U\%$ = Umidade que o material se encontra.

$$E_{12} = Eu\% \left[1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad (11)$$

Em que: E_{12} = Rigidez a 12% de umidade (MPa); $E_{u\%}$ = Rigidez do corpo de prova (MPa);
 $U\%$ = Umidade que o material se encontra.

4.8 Delineamento experimental

O delineamento experimental se constitui de seis tratamentos, diferenciando entre eles a combinação entre espaçamentos e idades (Tabela 3).

Tabela 3: Delineamento experimental.

Tratamento	Espaçamento	Idade (anos)	Corpos de prova
1	3,0 x 2,0 m	13	15
2	3,0 x 2,0 m	15	15
3	4,0 x 2,0 m	13	15
4	4,0 x 2,0 m	15	15
5	2,0 x 2,0 m	13	15
6	2,0 x 2,0 m	15	15

4.9 Análise estatística

4.9.1 Análise de variância multivariada (Manova)

Foi realizada a análise de variância multivariada (Manova), a fim de avaliar mais de uma variável ao mesmo tempo e a correlação entre elas. Esta análise facilita a percepção dos resultados obtidos e possibilita a análise em conjunto.

A hipótese H_0 testada pela Manova é de que não há diferença na média das variáveis dependentes, neste caso, para flexão estática (ρ aparente, TM, %LT, f_M e E_M), compressão (ρ aparente, TM, %LT, f_{co} e E_{co}), cisalhamento (ρ aparente, TM, %LT, f_{vo}) em função das variáveis independentes, que nesta situação é a combinação de três espaçamentos com duas idades. Portanto, se H_0 é aceita, a Manova indica que não há diferença entre as variáveis independentes, caso contrário, se H_0 for rejeitada ($p < 0,05$) existe diferença em pelo menos uma das variáveis. As estatísticas avaliadas nesta análise foram Traço de Pillai,

Lambda de Wilks, Traço de Hotelling, Maior Raiz de Roy, todos ao nível de 5% probabilidade de erro. Para a realização das análises foi utilizado o software IBM SPSS.

4.9.2 Análise Discriminante

Quando a análise de variância multivariada revelou que existe diferença estatística em pelo menos um dos tratamentos (H_0 rejeitada) é possível identificar qual o tratamento difere por meio da análise discriminante. Esta análise tem por objetivo entender a diferença que existe entre os tratamentos, separando-os a partir das medidas que os indivíduos têm para cada variável. A hipótese H_0 testada é de que as variáveis para flexão estática (ρ aparente, TM, %LT, f_M e E_M), compressão (ρ aparente, TM, %LT, fco e Eco), cisalhamento (ρ aparente, TM, %LT, fvo) (independentes) não discriminam os tratamentos (dependentes). Os dados foram padronizados a fim de remover o efeito da escala de cada variável nos resultados.

Para avaliação das funções discriminantes foi calculado o coeficiente de correlação canônica da função com a variável original. O coeficiente de correlação canônica fica entre 0 e 1 e indica o grau de associação da variável original com sua respectiva função discriminante. Quanto mais próximo de 1, mais associada a variável está com a função discriminante, e melhor será o desempenho da função ao explicar parte da variabilidade dos dados.

O desempenho das funções discriminantes ao alocar cada indivíduo, foi verificado por meio dos resultados da matriz de confusão, que mostra a porcentagem de indivíduos que foram alocados corretamente no seu respectivo grupo.

Foi realizada a análise gráfica dos resultados encontrados, demonstrando visualmente a localização do centróide calculado para cada grupo, bem como a distribuição dos indivíduos no espaço discriminante gerado pelas funções.

4.9.3 Análise de variância (Anova) e Análise de correlação de Pearson

Após realizar a análise de variância multivariada (Manova), percebeu-se a importância de se obter uma análise mais criteriosa dos resultados de cada variável em cada espaçamento (médias), com isso foi realizado a análise de variância univariada (Anova).

Os dados foram submetidos ao teste de Bartlett ($\alpha = 1\%$) para verificar a homogeneidade das variâncias. Ao atender esta premissa estatística (ou seja, que as variâncias são homogêneas), realizou-se a ANOVA, para verificar as possíveis diferenças estatísticas e interações entre os tratamentos. As análises foram realizadas no delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 3, sendo duas idades e três espaçamentos. Nos casos em que a ANOVA detectou diferenças entre os tratamentos ($\alpha = 1\%$), as médias foram comparadas pelo teste Tukey ($\alpha = 1\%$) no software IBM SPSS. Assim como todas as variáveis foram submetidas a correlação de Pearson, para a determinação do grau de associação entre as variáveis.

4.9.4 Análise de Regressão

Foi ajustada uma equação de Regressão linear, utilizando o método Stepwise, tendo como variáveis independentes a massa específica aparente (ρ aparente), porcentagem de lenho tardio (LT) e tamanho médio de anel (TM). Também foi utilizando o método Stepwise, sem a variável (ρ aparente), apenas porcentagem de lenho tardio (LT) e tamanho médio de anel (TM), por ser uma variável de mais difícil acesso. As variáveis dependentes foram f_M , E_M , f_{CO} , E_{CO} , e f_{VO} . Por esse procedimento, qualquer variável que originar uma contribuição não-significativa é removida do modelo. As equações foram avaliadas com base nas seguintes medidas de acurácia: maior coeficiente de determinação (R^2 aj) e menor erro padrão da estimativa (Syx %).

Para determinar se a equação é adequada foi realizada a análise gráfica dos resíduos, a partir dos gráficos de *Half normal plot* e *qqplot* onde é possível observar se os resíduos se distribuem normalmente e se são homocedáticos. Foram realizados os testes de Breusch-Pagan e Shapiro-Wilk para confirmar a homocedasticidade e normalidade dos resíduos.

O objetivo do ajuste de modelos para estimar a resistência e rigidez da madeira, é para que, no momento em que a madeira esteja na serraria, ela possa ser classificada a partir das equações ajustadas. Na serraria é possível medir algumas variáveis como o comprimento do anel de crescimento, e a porcentagem de lenho tardio e assim utilizar uma equação para estimar a resistência e rigidez média da madeira, sem a necessidade de tirar amostras e realizar ensaios mecânicos em laboratório.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Algumas das análises realizadas encontrasse em apêndices, como a análise descritiva dos dados, análise de variância (ANOVA), Funções discriminantes, gráficos *Half normal plot* e *qqplot*, e Histogramas.

5.1 Flexão estática

5.1.1 Análise Multivariada

Os resultados da análise de variância multivariada (Manova) para o arranjo fatorial dos espaçamentos e idades, para as variáveis relativas aos testes de flexão estática, estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados da análise de variância multivariada para os testes Traço de Pillai, Lambda de Wilks, Traço de Hotelling e Maior Raiz de Roy na verificação da existência de diferenças entre os fatores espaçamento, idade e a interação entre eles, para os ensaios de flexão estática.

Efeito		Valor	F	Hipóteses	Erro	p-valor
Espaçamento	Traço de Pillai	0,822	1,256	10	18	0,323
	Lambda de Wilks	0,249	1,608	10	16	0,192
	Traço de Hotelling	2,734	1,914	10	14	0,130
	Maior Raiz de Roy	2,626	4,726	5	9	0,021
Idade	Traço de Pillai	0,868	10,547	5	8	0,002
	Lambda de Wilks	0,132	10,547	5	8	0,002
	Traço de Hotelling	6,592	10,547	5	8	0,002
	Maior Raiz de Roy	6,592	10,547	5	8	0,002
Espaçamento x Idade	Traço de Pillai	0,651	0,868	10	18	0,577
	Lambda de Wilks	0,450	0,785	10	16	0,644
	Traço de Hotelling	0,997	0,698	10	14	0,713
	Maior Raiz de Roy	0,655	1,179	5	9	0,390

A partir dos resultados na Tabela 4, observa-se que apenas o fator idade apresentou diferenças significativas ao nível de 0,05 de significância para os ensaios de flexão estática. O

espaçamento foi a única característica que mostrou significância apenas pelo teste de Maior Raiz de Roy.

A interação representada pelo efeito conjunto das variáveis espaçamento e idade não foi significativa para flexão estática, sendo importante ressaltar que a significância estatística da interação foi feita com os mesmos critérios estatísticos usados para avaliar o impacto de efeitos principais.

As funções discriminantes ajustadas para as variáveis padronizadas (aquelas que possuem a mesma escala da distribuição normal padrão) são apresentadas abaixo na Tabela 5. Desta forma, ao ajustar as funções discriminantes para as variáveis, foi possível observar a partir da magnitude do peso discriminante padronizado que a primeira função discriminante explicou 89,2% da variação total, onde ao considerar a contribuição relativa, então a partir da ordem de grandeza variáveis que mais contribuem nesta função são: f_M , ρ aparente, E_M e TM , respectivamente. A medidas de lambda de Wilks foi significativa ao nível de 5% de probabilidade, validando assim, o poder discriminatório das funções discriminantes.

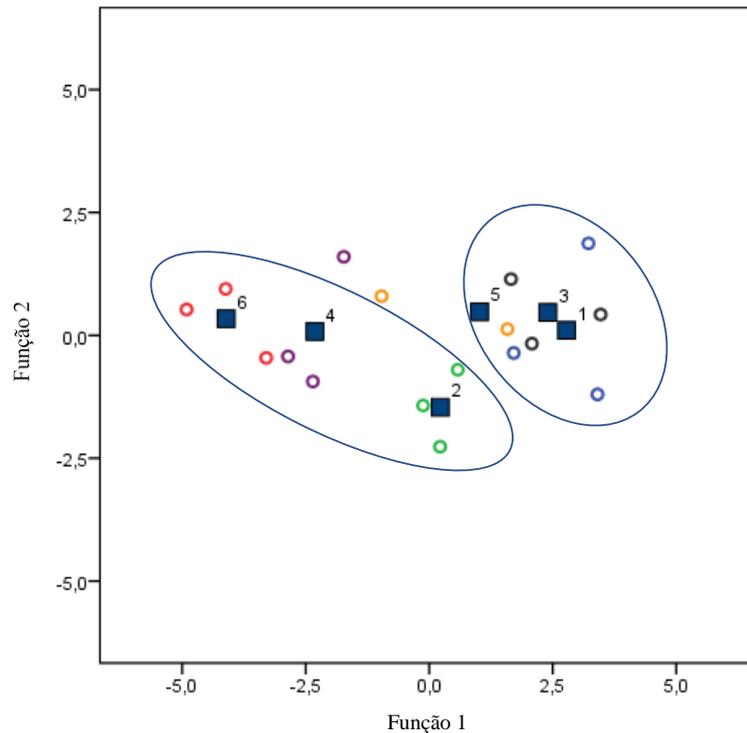
Tabela 5: Funções discriminantes para variáveis padronizadas, para os corpos de prova de flexão estática.

Variáveis	Funções discriminantes				
	FD1	FD2	FD3	FD4	FD5
ρ aparente (g/cm^3)	1,615	-1,277	-0,704	-0,249	0,233
LT (%)	1,189	0,622	0,043	1,534	-0,312
TM (cm)	1,482	0,411	1,036	0,353	-0,098
f_M (MPa)	-2,919	-0,203	1,211	-0,833	-0,869
E_M (MPa)	1,566	0,564	0,539	0,833	1,290
Lambda de Wilks	0,04*				
Variância Explicada FD1	89,20%				

Nota: FD: função discriminante; ρ aparente: massa específica aparente; LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; f_M : Módulo de ruptura; E_M : Módulo de elasticidade.

Os valores estimados pelas funções discriminantes FD1 e FD2 são apresentados na Figura 10. Pela análise dos resultados obtidos foram encontrados dois grupos, sendo que cada grupo corresponde a uma das idades.

Figura 10: Grupos obtidos a partir dos valores estimados pelas funções discriminantes FD1 e FD2 para as variáveis dos ensaios de flexão estática.



Pela análise da Figura 10 foi possível indentificar de forma clara a influência da idade nas propriedades de resistência a flexão da madeira, a partir da proximidade dos centroides. O primeiro grupo é formado pelos tratamentos 2, 4 e 6, que pertencem a idade de 15 anos e o segundo composto pelos tratamentos 1, 3 e 5, que pertencem a idade de 13 anos.

Dal Ponte Filho et al. (2004) concluíram que houve aumento da média dos valores da massa específica aparente, resistência à compressão paralela às fibras e resistência à flexão estática, de *P. taeda*, com o aumento da idade da população (9, 13 e 20 anos). Ballarin e Palma (2003) encontraram forte influência da idade na massa específica da madeira de *P. taeda*, sendo a madeira adulta mais densa que a madeira juvenil. Essa variação pode ser explicada, em parte, pela dimensão da parede celular e a maior proporção de lenho tardio, pois, essas características anatômicas influenciam diretamente na massa específica (SANTINI et al., 2000).

Oliveira et al. (2006) verificaram para madeira de *P. taeda* a mesma tendência, devido ao incremento em espessura das paredes dos traqueídes em função do aumento da idade das árvores. Moura e Brito (2001) afirmaram que, com o aumento da idade e a redução do ritmo de crescimento da árvore, ocorre maior acúmulo de macromoléculas de celulose nas paredes

secundárias das fibras, colaborando para que ocorra o aumento da espessura da parede celular, que irá incidir nos valores da massa específica da madeira.

5.1.2 Teste de médias e correlação

Os resultados médios das variáveis obtidas com os corpos de prova de flexão estática são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Ensaio de flexão estática para a madeira de *Pinus taeda* L.

Fator	Nível	ρ aparente (g/cm ³)	LT (%)	TM (cm)	f _M (MPa)	E _M (MPa)
Idade	13	0,456 a	22,84 b	1,82 a	41,45 b	4183 b
	15	0,476 a	26,43 a	1,23 b	58,78 a	5383 a
Esp.	2,0 x 2,0 m	0,451 b	25,38 a	1,36 a	52,39 a	5048 a
	3,0 x 2,0 m	0,494 a	25,55 a	1,61 a	50,52 a	4696 a
	4,0 x 2,0 m	0,453 b	22,98 a	1,61 a	47,41 a	4605 a
CV (%)		13,60	29,68	40,76	33,12	35,55
Interação	Esp. x Idade	2,4277 ^{ns}	0,0554 ^{ns}	0,4655 ^{ns}	2,5737 ^{ns}	1,0891 ^{ns}

Nota: Esp.: Espaçamento; LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; f_M: Módulo de ruptura; E_M: Módulo de elasticidade; ρ aparente: massa específica aparente; ^{ns} = não significativo ao nível de 1% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 1% de probabilidade de erro.

Em relação as idades de 13 e 15 anos, houve diferença estatística para a porcentagem de lenho tardio, tamanho médio de anel, módulo de ruptura e elasticidade. A idade das árvores influenciou positivamente nas propriedades mecânicas da sua madeira. O f_M apresentou aumento de 41% e o E_M de 28%, comparando madeiras cortadas com 15 anos com as madeiras de 13 anos de idade. Quanto ao espaçamento, apenas a massa específica aparente apresentou diferença estatística significativa.

A massa específica aparente, o tamanho médio de anel e a porcentagem de lenho tardio apresentaram valores superiores com o aumento da idade, conseqüentemente o módulo de resistência e o módulo de ruptura a flexão estática também aumentaram.

Essa relação pode ser explicada pelas características morfológicas dos traqueídes, pois sabe-se que o lenho tardio apresenta traqueídes de maior espessura de parede, proporcionando maior massa específica quando comparado ao lenho inicial. Essa diferença se deve pela formação da parede celular, onde os traqueídes de lenho inicial são células de paredes delgadas de grandes lumes e diâmetros radiais, enquanto traqueídes de lenho tardio são células de paredes espessas, de pequenos diâmetros radiais com lumes pequenos. Assim, uma relação entre o

aumento da porcentagem de lenho tardio pode ser estabelecida com o aumento da massa específica aparente, visto que ambos aumentam com o aumento da idade.

Klock (2000) encontrou valores de módulo de ruptura (f_M) e módulo de elasticidade (E_M) de 60,59 MPa e 7025 Mpa, respectivamente, para *P. taeda* com 11 anos de idade. Santini et al. (2000) estudando *P. taeda* em Quedas do Iguaçu, na região centro-oeste do Paraná, com 13 anos de idade, encontraram valores médios para f_M 56,60 MPa e E_M 5956 MPa, valores superiores aos encontrados nessa pesquisa, considerando a mesma idade.

Trianoski (2014) em trabalho com *P. taeda* de 17 anos de idade, encontrou valor para módulo de ruptura de 64 MPa e módulo de elasticidade de 8234 MPa, resultado próximo ao encontrado nesse trabalho para a idade de 15 anos. Oliveira et al. (2006) obtiveram valores médios de 53,14 MPa, 67,28 MPa e 79,97 MPa de resistência a flexão estática para *P. taeda* aos 9, 13 e 20 anos de idade, respectivamente.

Foelkel et. al. (1975) estudando *P. oocarpa* aos 6, 12 e 13 anos de idade, encontrou aumentos expressivos no comprimento da fibra e na sua espessura da parede celular, conforme aumentava a idade do povoamento. Igualmente, observou-se que a massa específica básica da madeira aumentou com a idade. É importante destacar que foi observado o aumento dessas propriedades citadas em apenas um ano de diferença da madeira (12 para 13 anos). Assim como nesse estudo a diferença de idade (13 para 15 anos) alterou de uma forma expressiva os resultados, considerando que ambas são madeiras juvenis.

Na Tabela 7 são apresentados os valores dos coeficientes de correlação de Person para o ensaio de flexão estática. Os módulos de ruptura e de elasticidade à flexão estática se relacionam significativamente de forma direta com a massa específica aparente, a porcentagem de lenho tardio e o tamanho médio de anéis de crescimento.

Tabela 7: Matriz de correlação de Person para a propriedade de flexão estática.

	ρ aparente (g/cm ³)	LT (%)	TM (cm)	f_M (MPa)	E_M (MPa)
ρ aparente (g/cm ³)	1				
LT (%)	0,446**	1			
TM (cm)	-0,294**	-0,663**	1		
f_M (MPa)	0,692**	0,453**	-0,465**	1	
E_M (MPa)	0,531**	0,352**	-0,517**	0,791**	1

Nota: LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; f_M : Módulo de ruptura; E_M : Módulo de elasticidade; ρ aparente: massa específica aparente; ** Correlação significativa a 1% de probabilidade de erro.

Houve correlação significativa alta entre as propriedades mecânicas e a massa específica aparente, o que demonstra a influência da massa específica aparente na resistência da madeira. A massa específica aparente também se correlacionou com a porcentagem de lenho tardio, mostrando que à medida que aumenta a porcentagem de lenho tardio consequentemente a massa específica aparente é maior. O tamanho médio do anel se correlacionou negativamente com a massa específica aparente e a porcentagem de lenho tardio. Ou seja, com o aumento do tamanho médio de anel, diminui a massa específica e lenho tardio.

Para a grande parte das coníferas e folhosas com porosidade difusa, quanto mais largo os anéis de crescimento, maior será a proporção de lenho inicial e menor será a massa específica da madeira (MORESCHI, 2005). Desta forma, a massa específica aparente da madeira com porosidade difusa aumenta com a diminuição da largura dos anéis de crescimento.

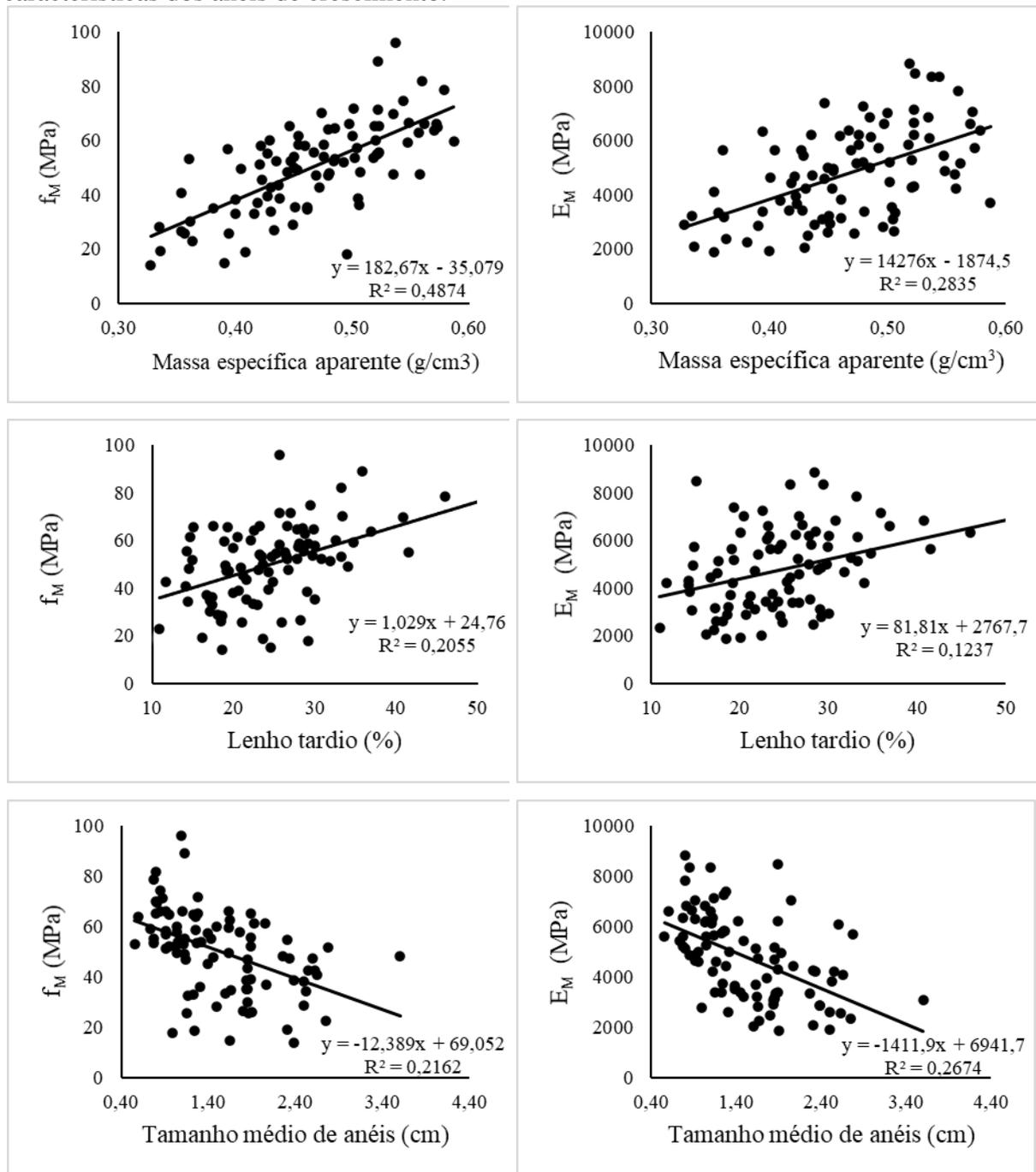
Muitos estudos relataram a correlação positiva entre massa específica e propriedades mecânicas da madeira (ANTAL et al., 1990, DIAS e LAHR 2004; CHRZAZVEZ et al., 2014). Larson et al. (2001) e Panshin e De Zeeuw (1964), destacam alta correlação entre f_M e E_M e a massa específica da madeira. A correlação negativa entre o lenho tardio e o tamanho médio do anel, já era esperada, quanto menor o tamanho do anel de crescimento maior a porcentagem de lenho tardio.

De acordo Larson et al. (2001), os módulos de elasticidade (E_M), e de ruptura (f_M) da madeira são altamente correlacionados com a massa específica e, portanto, são influenciados pela quantidade da madeira juvenil. Rall (2006), citou que para a madeira de *P. taeda* há grande correlação entre as características mensuradas no lenho (número de anéis por polegada e proporção de lenho tardio, analisadas conjuntamente) e seu desempenho físico-mecânico.

Biblis et al. (2004) concluíram que as características mais importantes da madeira na predição da resistência foi a massa específica (45%), seguida da porcentagem de lenho tardio (30%) e por fim, a largura dos anéis de crescimento (25%). Jiang et al. (2009) relataram no seu estudo que os resultados indicaram que a largura média dos anéis de crescimento foi inversamente proporcional à massa específica, f_M e E_M . Além disso, a massa específica média foi diretamente proporcional ao f_M e E_M .

Na Figura 11 são apresentadas graficamente as equações de regressões lineares ajustadas, entre as propriedades de resistência a flexão estática (módulo de ruptura e módulo de elasticidade), em função da massa específica aparente, porcentagem de lenho tardio e tamanho médio de anel de crescimento.

Figura 11: Módulo de ruptura e elasticidade, em função da massa específica aparente e das características dos anéis de crescimento.



Em relação a massa específica aparente, os coeficientes de determinação (R^2) encontrados para o módulo de ruptura foram maiores que os R^2 do módulo de elasticidade e isto indica que o módulo de ruptura é melhor explicado pela massa específica aparente. Os R^2 para o módulo de ruptura e elasticidade em função da porcentagem de lenho tardio, indicam que o lenho tardio apresenta influência sobre os módulos, porém de forma menos acentuada que a massa específica aparente. Em relação ao tamanho médio do anel de crescimento, pode-

se observar que houve uma relação negativa com os módulos de ruptura e elasticidade. À medida que aumenta o tamanho médio de anéis, diminui os módulos.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados das equações obtidas, com as respectivas variáveis selecionadas pelo método Stepwise (com a variável ρ aparente).

Tabela 8: Resultados da regressão linear para f_M e E_M em flexão estática nas idades de 13 e 15 anos com a variável ρ aparente.

Propriedades	Equação	R ² aj	Syx%	Breusch-Pagan	Shapiro-Wilk
f_M (13 anos)	$y = -34,703 + 166,920 * \rho$ aparente	0,494	24,16	0,6741	0,407
f_M (15 anos)	$y = -1,911 + 146,686 * \rho$ aparente + (-7,441) * TM	0,573	15,93	0,5067	0,1186
f_M (13+15 anos)	$y = -12,102 + 158,437 * \rho$ aparente + (-7,629) * TM	0,544	22,36	0,7099	0,0565
E_M (13 anos)	$y = -2455,469 + 14552,054 * \rho$ aparente	0,272	33,11	0,0265	0,3402
E_M (15 anos)	$y = 2745,741 + (-1449,176) * TM + 9295,825 * \rho$ aparente	0,371	23,18	0,149	0,201
E_M (13+15 anos)	$y = 1263,408 + 11084,506 * \rho$ aparente + (-1078,220) * TM	0,412	27,27	0,1155	0,5208

Nota: ρ aparente: massa específica aparente; TM: tamanho médio de anel; LT: porcentagem de lenho tardio; f_M : Módulo de ruptura; E_M : Módulo de elasticidade; Syx%: Erro padrão da estimativa; R² aj: Coeficiente de determinação ajustado.

Nos modelos ajustados para o módulo de ruptura e módulo de elasticidade a variável tamanho médio de anel, melhorou os ajustes para as idades de 15 anos e 13 e 15 anos juntas. A densidade aparente foi significativa para o modelo apenas para a idade de 13 anos.

Na Tabela 9, são apresentados os resultados sem a variável ρ aparente, para as propriedades de resistência à flexão estática (módulo de ruptura e módulo de elasticidade), para as duas idades separadamente (13 e 15 anos), bem como utilizando os valores obtidos para ambas as idades.

Tabela 9: Resultados da regressão linear para f_M e E_M em flexão estática nas idades de 13 e 15 anos sem a variável ρ aparente.

Propriedades	Equação	R ² aj	Syx%	Breusch-Pagan	Shapiro-Wilk
f_M (13 anos)	Ns	-	-	-	-
f_M (15 anos)	$y = 35,568 + 0,879 * LT$	0,229	21,40	0,5381	0,0550
f_M (13+15 anos)	$y = 47,636 + (-7,831) * TM + 0,587 * LT$	0,237	28,93	0,696	0,7463
E_M (13 anos)	$y = 5930,177 + (-958,308) * TM$	0,124	36,32	0,5381	0,0550
E_M (15 anos)	$y = 7614,298 + (-1804,914) * TM$	0,238	25,50	0,1509	0,0965
E_M (13+15 anos)	$y = 6942,503 + (-1411,736) * TM$	0,259	30,60	0,6206	0,0844

Nota: TM: tamanho médio de anel; LT: porcentagem de lenho tardio; f_M : Módulo de ruptura; E_M : Módulo de elasticidade; Syx%: Erro padrão da estimativa; R² aj: Coeficiente de determinação ajustado.

Ao retirar a variável massa específica aparente das variáveis independentes, nenhuma variável foi inserida no modelo para f_M (13 anos). Embora os coeficientes de determinação (R²

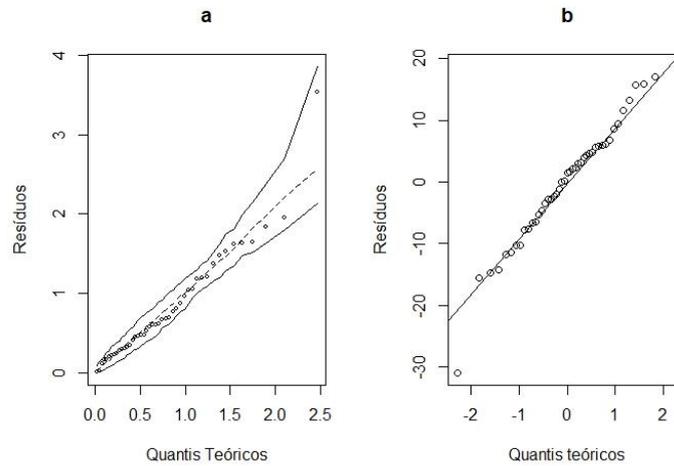
aj) registrados para as equações de estimativa possam ser considerados baixos, são característicos de madeira juvenil, uma vez que Ballarin e Palma (2003) ao avaliarem este tipo de lenho da madeira de *P. taeda* registraram para equações envolvendo a massa específica aparente o coeficiente de determinação (R^2) de 0,28 para o E_M e 0,26 para o f_M . Já, quando a relação foi avaliada para a madeira adulta, os mesmos coeficientes de determinação subiram para 0,55 e 0,44, respectivamente. Modes (2017) estudando *Pinus patula* Schltl & Cham aos 15 anos encontraram (R^2) 0,23 para E_M e 0,32 para f_M , também em função da massa específica aparente.

Mustefaga et al. (2019) ajustaram um modelo para as espécies de *P. taeda* e de *P. patula* aos 12 anos de idade, para estimar o módulo de resistência a flexão estática utilizando apenas a variável massa específica aparente e encontraram (R^2) de 0,70 e S_{yx} % de 10,54%. Biblis et al. (2004) estabeleceram regressões para *P. taeda* aos 40 anos de idade, para E_M em relação aos anéis de crescimento e a massa específica, com (R^2) 0,21, e para f_M em relação aos anéis de crescimento, massa específica e a porcentagem de lenho tardio, com (R^2) 0,25.

Haselein (2000) ajustou equações para as propriedades de f_M e E_M em razão do número de anéis de crescimento e da porcentagem de lenho tardio para *P. elliottii* com 30 anos de idade e encontrou R^2 aj para f_M e E_M de 0,71 e 0,79, respectivamente.

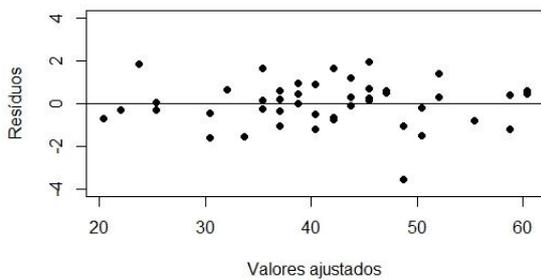
Na Figura 12 pode-se observar a distribuição residual da equação ajustada para o módulo de ruptura em flexão estática, aos 13 anos de idade com a variável massa específica aparente. É possível observar que o modelo é adequado para a estimativa do f_M , visto que os resíduos se distribuem dentro do intervalo de confiança. As demais equações ajustadas (Tabela 8 e 9) também seguiram essa mesma tendência para os resíduos, distribuídos dentro do envelope de confiança.

Figura 12: *Half normal plot* e *qqplot* para distribuição residual referente ao módulo de ruptura em flexão estática aos 13 anos de idade.

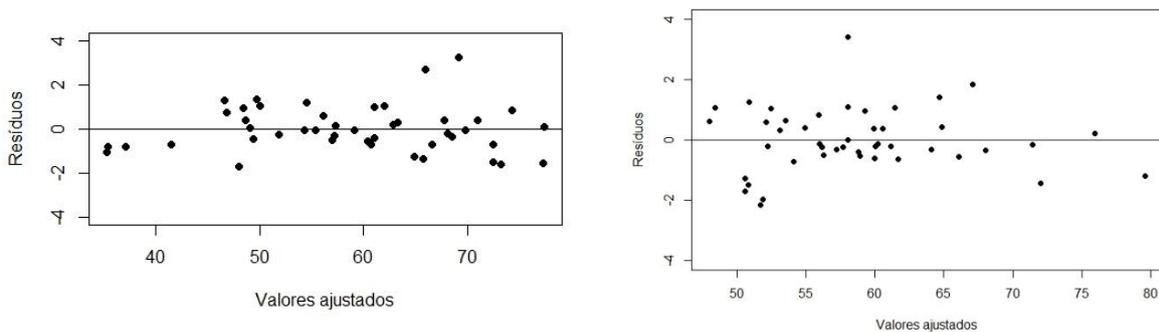


Na Figura 13 são apresentados os gráficos dos resíduos studentizados, para F_M aos 13 com ρ aparente, 15 anos e ambas as idades, com e sem a inclusão da variável ρ aparente na regressão utilizando o método Stepwise.

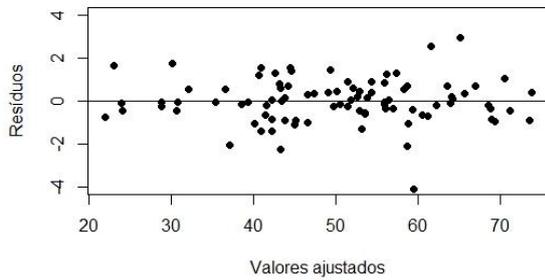
Figura 13: Distribuição dos resíduos studentizados referentes ao módulo de resistência aos 13, 15 anos e ambas as idades.



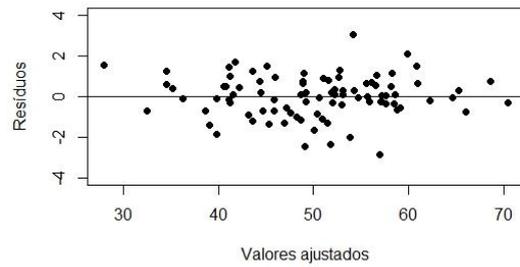
(a) F_M aos 13 anos com ρ aparente



(b) F_M aos 15 anos com ρ aparente



(c) F_M aos 15 anos sem ρ aparente



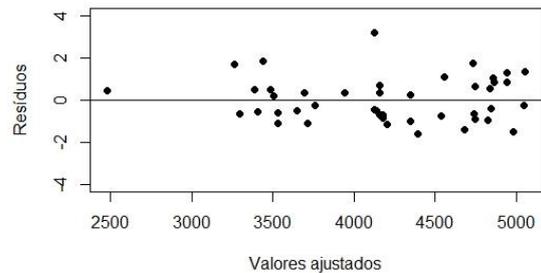
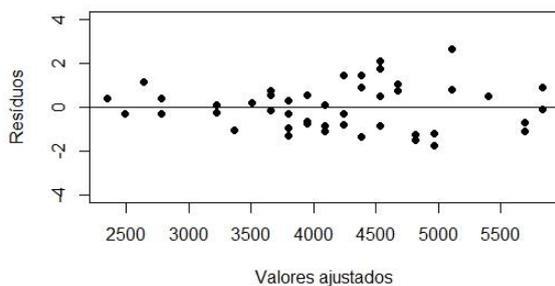
(d) F_M aos 13 e 15 anos com ρ aparente

(e) F_M aos 13 e 15 anos sem ρ aparente

Por meio das Figuras 12 e 13, é possível observar que os resíduos se distribuem normalmente e foram homocedáticos. Já a partir da Figura 14, nota-se que houve proporcionalidade entre as sub e superestimativas ao longo de todo o eixo das abcissas, ou seja, as equações não apresentam tendenciosidades.

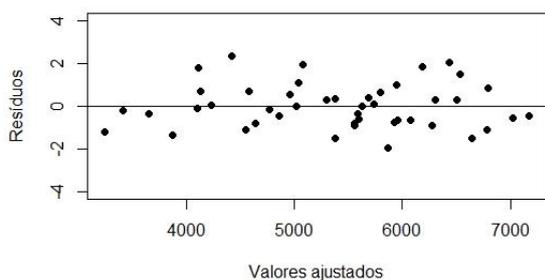
Na Figura 14 são apresentados os gráficos dos resíduos studentizados para E_M aos 13, 15 anos e ambas as idades, com e sem a inclusão da variável ρ aparente.

Figura 14: Distribuição dos resíduos studentizados referentes ao módulo de elasticidade aos 13, 15 anos e ambas as idades.

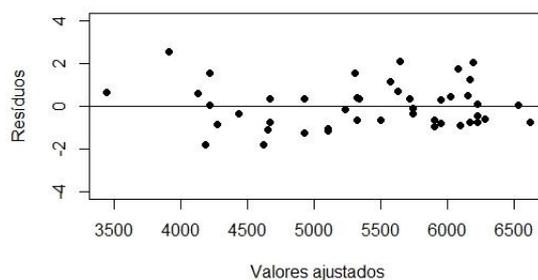


(a) E_M aos 13 anos com ρ aparente

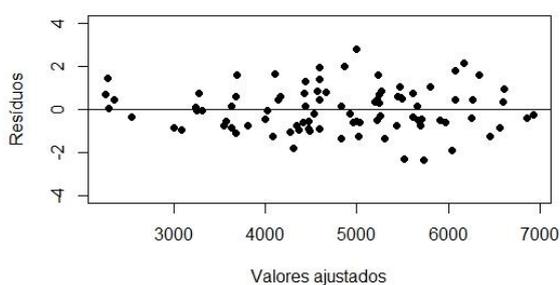
(b) E_M aos 13 anos sem ρ aparente



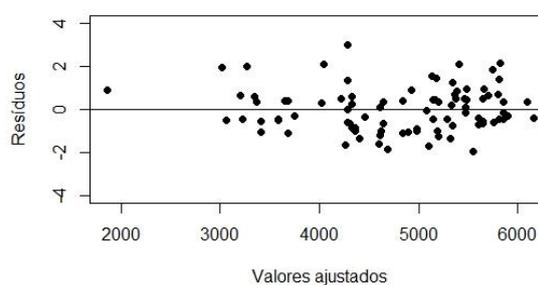
(c) E_M aos 15 anos com ρ aparente



(d) E_M aos 15 anos sem ρ aparente



(e) E_M aos 13 e 15 anos com ρ aparente



(f) E_M aos 13 e 15 anos sem ρ aparente

Os resíduos para os modelos do E_M se comportaram da mesma forma que os resíduos studentizados para F_M , apresentaram distribuição normal, homocedáticos, sem tendenciosidades.

5.2 Compressão paralela às fibras

5.2.1 Análise Multivariada

Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos na análise de variância multivariada (Manova) para as variáveis relativas aos testes de compressão, em arranjo fatorial dos espaçamentos e idades.

Tabela 10: Resultados da análise de variância multivariada para os testes Traço de Pillai, Lambda de Wilks, Traço de Hotelling e Maior Raiz de Roy na verificação da existência de diferenças entre os fatores espaçamento, idade e a interação entre eles, para os ensaios de Compressão.

Efeito		Valor	F	Hipóteses	Erro	p-valor
Espaçamento	Traço de Pillai	1,133	2,352	10	18	0,055
	Lambda de Wilks	0,098	3,504	10	16	0,013
	Traço de Hotelling	6,822	4,775	10	14	0,004
	Maior Raiz de Roy	6,457	11,623	5	9	0,001
Idade	Traço de Pillai	0,838	8,283	5	8	0,005
	Lambda de Wilks	0,162	8,283	5	8	0,005
	Traço de Hotelling	5,177	8,283	5	8	0,005
	Maior Raiz de Roy	5,177	8,283	5	8	0,005
Espaçamento x Idade	Traço de Pillai	0,956	1,647	10	18	0,172
	Lambda de Wilks	0,273	1,465	10	16	0,239
	Traço de Hotelling	1,833	1,283	10	14	0,326
	Maior Raiz de Roy	0,972	1,750	5	9	0,219

Segundo os resultados obtidos na Manova, não houve interação significativa entre os fatores avaliados, espaçamentos e idades, que são, desta forma, independentes. Os fatores idades e espaçamentos apresentaram, para todos os testes aplicados, diferenças significativas ($p < 0,05$), com exceção do teste Traço de Pillai para o fator espaçamento. Pode-se observar que para o ensaio de compressão, tanto o espaçamento como a idade, influenciam nessa propriedade.

A Análise discriminante para as variáveis dos testes de compressão (Tabela 11), indicou que a primeira função discriminante FD1 tem como variáveis mais importantes fco, LT e Eco, respondendo por 79,3% da variação total. Na segunda função discriminante FD2 a variável que possui maior valor discriminatório foi ρ aparente, enquanto que na função discriminante FD3 esse papel é desempenhado pelo LT.

Tabela 11: Funções discriminantes para variáveis padronizadas, para os corpos de prova de compressão.

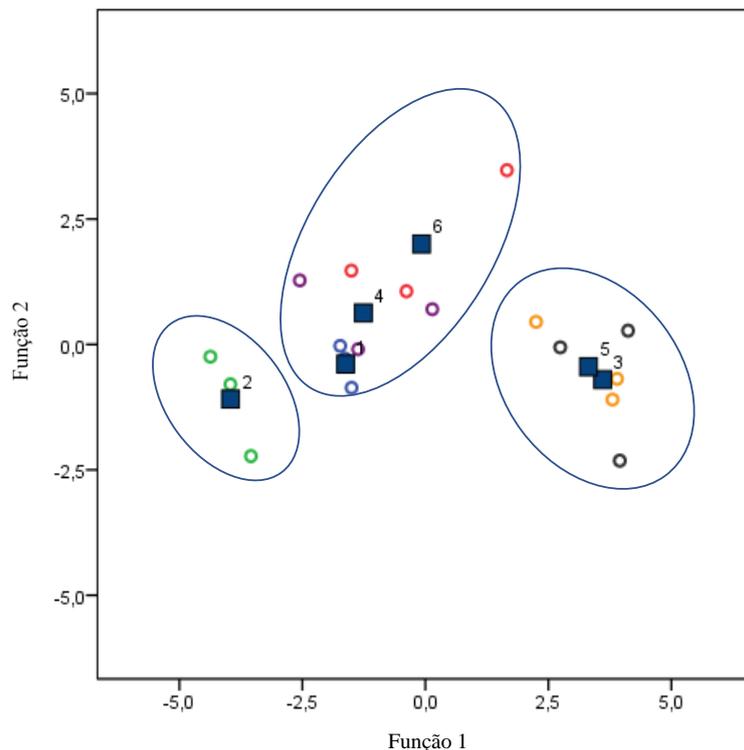
Variáveis	Funções Discriminantes				
	FD1	FD2	FD3	FD4	FD5
ρ aparente (g/cm ³)	0,679	-1,241	-0,494	-0,491	1,054
LT (%)	1,558	0,458	0,295	1,394	-0,206
TM (cm)	-0,041	-0,320	1,127	0,285	-0,109
fco (MPa)	-2,838	0,313	0,185	-0,135	-0,131
Eco (MPa)	1,111	0,843	0,926	0,040	0,218

Lambda de Wilks	0,012*
Variância Explicada FD1	79,3%

Em que: Nota: FD: função discriminante; ρ aparente: massa específica aparente; LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; fco: Resistência à compressão; Eco: Módulo de elasticidade em compressão; * = significativo à 5% de probabilidade de erro.

A análise da Figura 15, que representa os valores estimados pelas funções discriminantes FD1 e FD2, indicaram a existência de três grupos distintos. Um grupo é formado pela idade 15 anos e o espaçamento 3,0 x 2,0 m (T2). O segundo grupo é formado pelo espaçamento 3,0 x 2,0 m e a idade 13 anos (T1) e a idade 15 anos para os espaçamentos 4,0 x 2,0 e 2,0 x 2,0 m (T4 e T6). O último grupo (T3 e T5) foi formado pela idade 13 anos para os espaçamentos 4,0 x 2,0 e 2,0 x 2,0 m.

Figura 15: Grupos obtidos a partir dos valores estimados pelas funções discriminantes FD1 e FD2 para as variáveis dos ensaios de compressão.



No ensaio de compressão estática foi obtido um grupo a mais em relação ao ensaio de flexão. As variáveis que carregaram na FD1 do ensaio de flexão foram diferentes para o ensaio de compressão e isso pode ser explicado pela influência do espaçamento nesse ensaio, o que pode ter resultado no número de grupos diferentes.

5.2.2 Teste de médias e correlação

Os resultados médios obtidos para as variáveis massa específica aparente, lenho tardio, tamanho médio de anel, de resistência à compressão paralela as fibras (fco) e do módulo de elasticidade (Eco), são apresentados na (Tabela 12).

Tabela 12: Médias das variáveis estudadas em relação aos espaçamentos e as idades, para compressão.

Fator	Nível	ρ aparente (g/cm ³)	LT (%)	TM (cm)	fco (MPa)	Eco (MPa)
Idade	13	0,460 b	23,13 b	1,46 a	28,88 b	6310 a
	15	0,491 a	27,49 a	1,22 b	36,72 a	6855 a
Esp.	2,0 x 2,0 m	0,472 a	25,09 a	1,20 b	31,87 a	7982 a
	3,0 x 2,0 m	0,475 a	24,67 a	1,53 a	35,26 a	5607 b
	4,0 x 2,0 m	0,479 a	26,16 a	1,29 ab	31,26 a	6159 b
CV (%)		13,06	30,32	35,32	24,57	41,40
Interação	Esp. x Idade	1,5508 ^{ns}	0,7794 ^{ns}	2,3486 ^{ns}	0,3426 ^{ns}	3,6117 ^{ns}

Nota: Esp.: espaçamento; ρ aparente: massa específica aparente LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; fco: Resistência a compressão; Eco: Módulo de elasticidade em compressão; ^{ns} = não significativo ao nível de 1% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 1% de probabilidade de erro.

É possível observar que a idade afetou significativamente a densidade aparente, as características dos anéis de crescimento (porcentagem de lenho tardio e tamanho médio de anéis) e a resistência a compressão (fco). O espaçamento afetou o tamanho médio de anel e a rigidez da madeira (Eco).

Santini et al. (2000) encontraram para a espécie de *P. taeda* com 13 anos de idade, valores médios de resistência a compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade, de 29 MPa e 7335 MPa, respectivamente. Observa-se que os valores obtidos por tais autores se encontram muito próximo aos do presente estudo.

Klock (2000) estudando madeira de *P. taeda* com 11 anos, encontrou valor médio para a resistência a compressão paralela às fibras de 24 MPa e módulo elástico de 6967,2 MPa, inferiores ao deste estudo. Tal diferença, pode ser em decorrência da menor idade estudada por esse autor.

Oliveira et al. (2006) encontraram para madeira de *P. taeda* com 20 anos de idade resistência a compressão paralela às fibras de 35 MPa. Trianoski (2014), estudando a mesma

espécie aos 17 anos de idade encontrou resultados de resistência a compressão de 37 MPa e 12432 MPa de módulo de elasticidade. Comparando com os dados encontrados nesse estudo, os valores de resistência e rigidez foram satisfatórios, levando em consideração a idade estudada.

A densidade aparente média da madeira das duas idades não permite enquadrá-las em nenhuma das classes apresentadas na norma NBR 7190 (ABNT, 1997), que trata da classificação de resistência para coníferas, onde exige mínimo de 0,50 g.cm⁻³. Por outro lado, com base nos dados do módulo de elasticidade, a madeira de *Pinus taeda* L, com 13 e 15 anos de idade foi classificada na classe C20. Já a resistência ao cisalhamento, as duas idades se enquadram na classe C 30. Mustefaga et al. (2019) encontrou essa mesma classificação, densidade aparente (0,41 g.cm⁻³), MOE e Rcis (7532 e 6,19 MPa) respectivamente, onde pode verificar que mesmo não atendendo o valor mínimo de densidade aparente, ambas as idades da madeira de *Pinus taeda* L, pode ser classificada como madeira estrutural, pela sua resistência mecânica, segundo a norma ABNT (BORTOLETTO, 2008). Na Tabela 13 são apresentados os valores de correlação de Person para as variáveis estudadas.

Tabela 13: Matriz de correlação de Person para a propriedade de compressão paralela.

	ρ aparente (g/cm ³)	LT (%)	TM (cm)	fco (MPa)	Eco (MPa)
ρ aparente (g/cm ³)	1				
LT (%)	0,769**	1			
TM (cm)	-0,498**	-0,596**	1		
fco (MPa)	0,733**	0,532**	-0,449**	1	
Eco (MPa)	0,354**	0,218**	-0,517**	0,462**	1

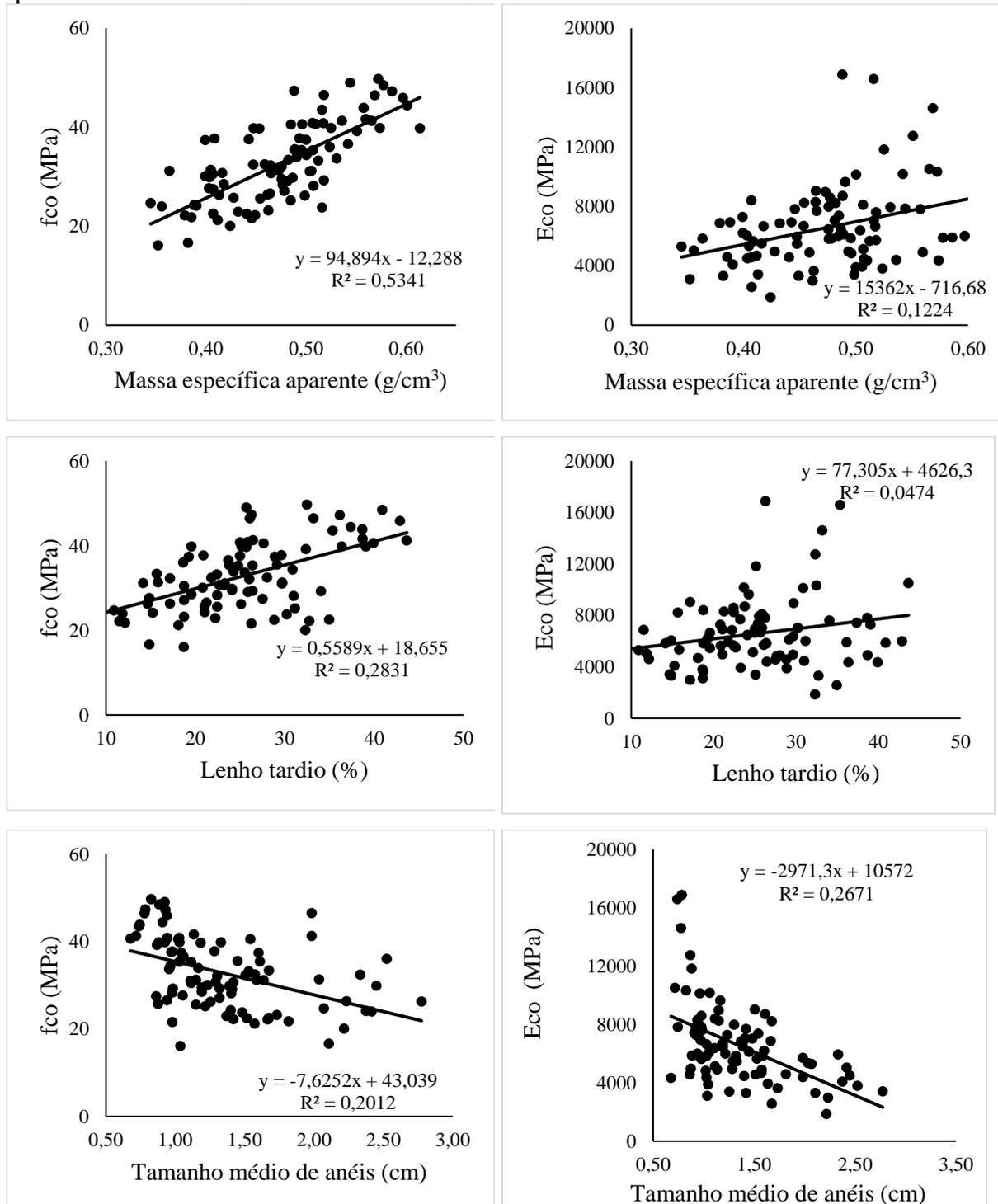
Nota: LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; fco: Resistência à compressão; Eco: Módulo de elasticidade em compressão; ρ aparente: massa específica aparente; ** Correlação significativa a 1% de probabilidade de erro.

Assim como no ensaio de flexão estática, houve correlação de uma magnitude razoável destas características de crescimento e as propriedades mecânicas. Nota-se que todas as características de crescimento e as propriedades mecânicas estão relacionadas com a massa específica aparente.

Klock (2000) estudando *P. taeda* com 11 anos encontrou correlações significativas entre a fco e a massa específica aparente ($r = 0,76$), e com a porcentagem de lenho tardio ($r = 0,62$). Para Eco com massa específica aparente ($r = 0,75$) e LT ($r = 0,59$).

Na Figura 16 são ilustrados graficamente as regressões lineares, entre as propriedades de resistência a compressão (módulo de ruptura e módulo de elasticidade em compressão), em função da massa específica aparente, porcentagem de lenho tardio e tamanho médio de anel de crescimento.

Figura 16: Módulo de ruptura e elasticidade em compressão, em função da massa específica aparente e das características dos anéis de crescimento.



Nos gráficos da Figura 16 é possível observar a distribuição dos dados. A resistência a compressão (fco), com exceção ao tamanho médio de anéis de crescimento, foi a que mais se correlacionou com lenho tardio de a massa específica aparente.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados das regressões lineares, com as variáveis selecionadas pelo método Stepwise com a variável ρ aparente e na Tabela 15, sem a variável ρ aparente, para as propriedades de compressão paralela às fibras (resistência a compressão e módulo de elasticidade em compressão), considerando as idades (13 e 15 anos) separadamente, bem como utilizando os valores de ambas as idades.

Tabela 14: Resultados da regressão linear para fco e Eco para o ensaio de compressão, considerando as idades de 13 e 15 anos com a variável ρ aparente.

Propriedades	Equação	R ² aj	Syx%	Breusch-Pagan	Shapiro-Wilk
fco (13 anos)	$y = -8,107 + 80,414 * \rho$ aparente	0,317	18,58	0,4407	0,02179
fco (15 anos)	$y = 19,686 + 0,620 * LT$	0,452	15,32	0,3356	0,5904
fco (13+15 anos)	$y = (-12,139) + 94,503 * \rho$ aparente	0,532	18,81	0,5344	0,515

Em que: LT: porcentagem de lenho tardio; ρ aparente: massa específica aparente TM: tamanho médio de anel; fco: Resistência a compressão; Eco: Módulo de elasticidade em compressão; Syx%: Erro padrão da estimativa; R² aj: Coeficiente de determinação ajustado.

É possível observar que o modelo de resistência a compressão aos 13 anos, a variável mais importante foi a densidade aparente e para a idade de 15 anos o lenho tardio. Isso pode ser explicado pela variação dos dados, onde o lenho tardio foi mais expressivo na idade de 15 anos.

Tabela 15: Resultados da regressão linear das variáveis fco e Eco para o ensaio de compressão, considerando as idades de 13 e 15 anos sem a variável ρ aparente.

Propriedades	Equação	R ² aj	Syx%	Breusch-Pagan	Shapiro-Wilk
fco (13 anos)	$y = 39,155 + (-7,030) * TM$	0,203	20,07	0,1928	0,2198
fco (15 anos)	$y = 19,686 + 0,620 * LT$	0,452	15,32	0,3356	0,5904
fco (13+15 anos)	$y = 18,657 + 0,559 * LT$	0,257	20,92	0,1122	0,6558
Eco (13 anos)	$y = 15112,676 + (-4161,907) * TM + (-117,624) * LT$	0,498	23,93	0,9656	0,5121
Eco (15 anos)	$y = 10320,916 + (-2831,010) * TM$	0,166	42,80	0,0157	0,0005
Eco (13+15 anos)	$y = 10567,244 + (-2967,572) * TM$	0,259	35,64	0,0036	0,0001

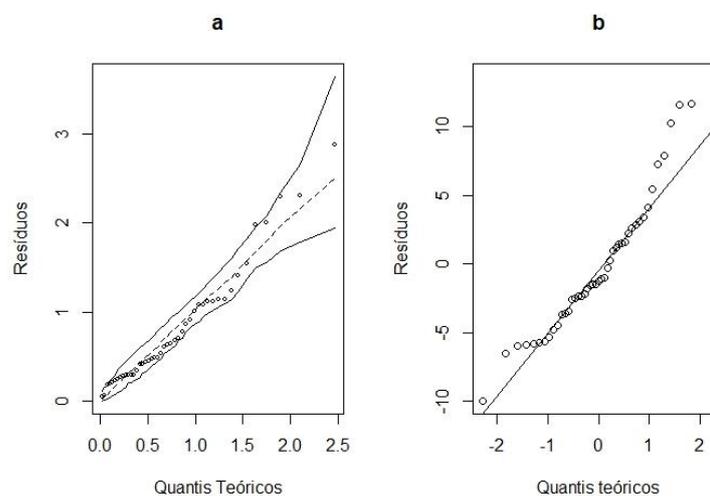
Em que: LT: porcentagem de lenho tardio; ρ aparente: massa específica aparente TM: tamanho médio de anel; fco: Resistência a compressão; Eco: Módulo de elasticidade em compressão; Syx%: Erro padrão da estimativa; R² aj: Coeficiente de determinação ajustado.

Comparando os ajustes para a resistência à compressão, as equações obtidas utilizando a variável ρ aparente apresentaram valores superiores (tabela 14). Nos ajustes para o módulo e elasticidade em compressão com a variável ρ aparente, nenhuma variável foi inserida no modelo. Foi possível observar que as equações obtidas para a estimativa da resistência à

compressão paralela às fibras, apresentaram ajustes melhores em relação ao módulo de elasticidade em compressão. Isso indica que o módulo de ruptura é melhor explicado pela massa específica aparente, porcentagem de lenho tardio e tamanho médio de anel de crescimento para os corpos de prova ensaiados em compressão paralela.

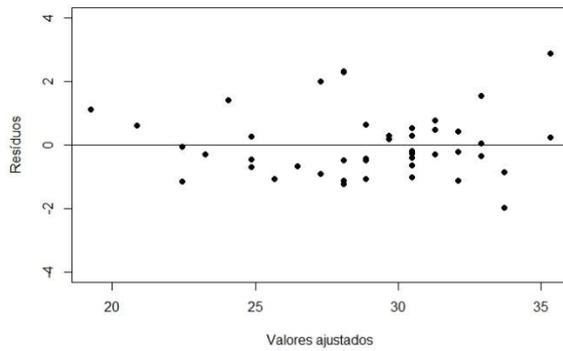
Na Figura 17 pode-se observar a distribuição residual do modelo ajustado para a resistência à compressão, aos 13 anos de idade com a variável massa específica aparente. Assim é possível observar que o modelo é adequado para a estimativa do f_{co} , visto que os resíduos se distribuem dentro dos envelopes de confiança.

Figura 17: *Half normal plot* e *qqplot* para distribuição residual da resistência a compressão aos 13 anos de idade com a variável massa específica aparente.

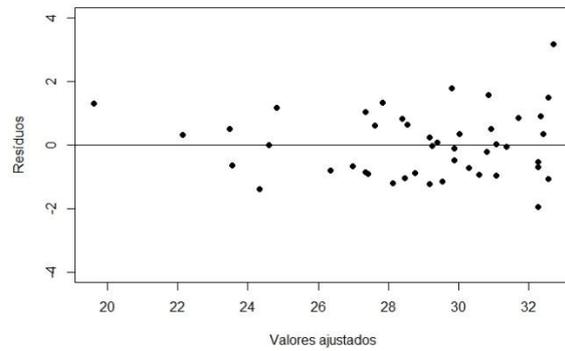


As demais equações obtidas para f_{co} e E_{co} também seguiram essa mesma tendência da distribuição residual, distribuídos dentro do envelope de confiança. Nas Figuras 18 e 19 são apresentadas as distribuições residuais para os modelos para f_{co} e E_{co} , com e sem a inclusão da variável massa específica aparente na Stepwise. Por meio das Figuras 17, 18 e 19, é possível observar que os resíduos apresentam distribuição normal, são homocedáticos e não apresentam tendências.

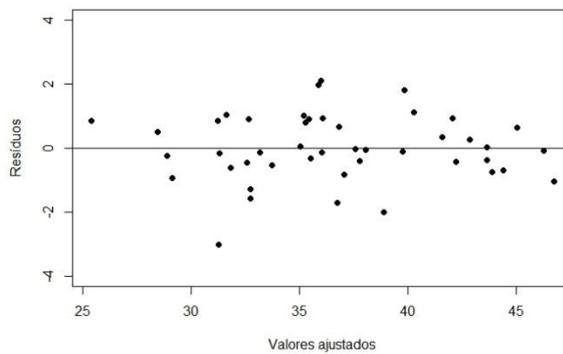
Figura 18: Distribuição residual referente à resistência a compressão aos 13, 15 anos e ambas as idades.



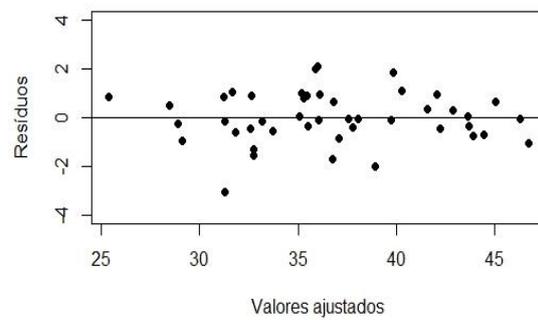
(a) fco aos 13 anos com ρ aparente



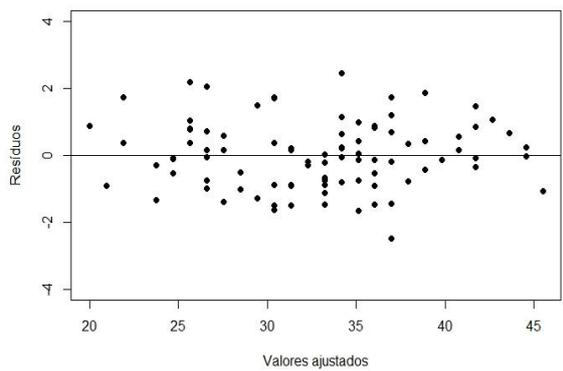
(b) fco aos 13 anos sem ρ aparente



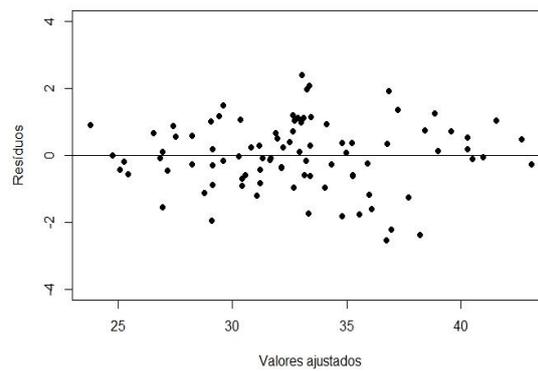
(c) fco aos 15 anos com ρ aparente



(d) fco aos 15 anos sem ρ aparente

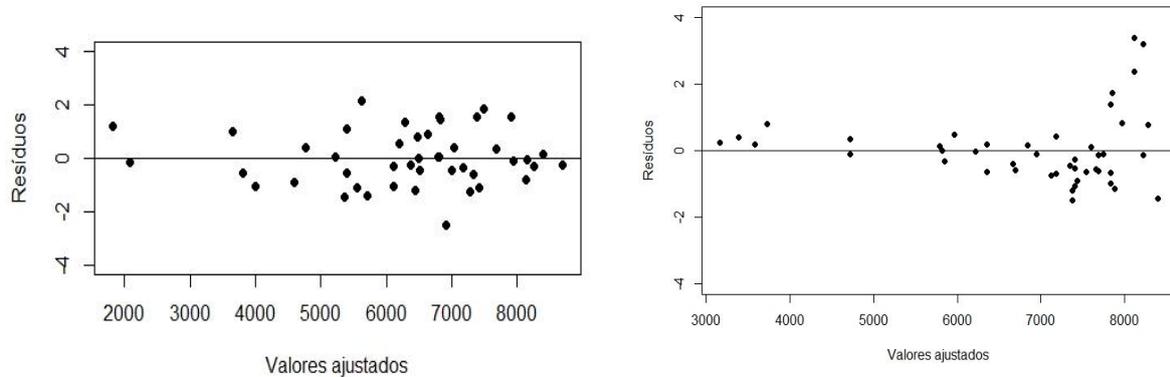


(e) fco aos 13 e 15 anos com ρ aparente



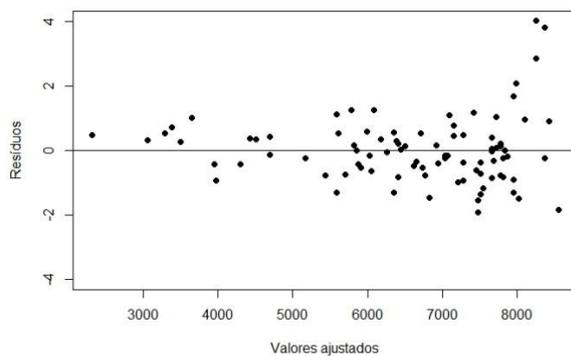
(f) fco aos 13 e 15 anos sem ρ aparente

Figura 19: Distribuição residual referente ao módulo de elasticidade em compressão aos 13, 15 anos e ambas as idades.



(a) Eco aos 13 anos sem ρ aparente

(b) Eco aos 15 anos sem ρ aparente



(c) Eco aos 13 e 15 anos sem ρ aparente

Mustefaga et al. (2019) também ajustaram um modelo para as espécies de *P. taeda* e de *P. patula* aos 12 anos de idade, para estimar a resistência à compressão paralela às fibras e o módulo elástico, utilizando apenas a variável massa específica aparente, e encontraram um R^2 de 0,574 e Syx % de 11,54 para fco e R^2 de 0,417 e Syx % 31,78 para Eco. É possível observar que o ajuste realizado para estimar a resistência foi melhor em relação a estimativa do módulo elástico, assim como ocorreu nesse estudo.

5.3 Cisalhamento

5.3.1 Análise Multivariada

Os resultados para o arranjo fatorial dos espaçamentos e idades, segundo a análise de variância multivariada (Manova), para as variáveis relativas aos testes de cisalhamento, são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Resultados da análise de variância multivariada para os testes Traço de Pillai, Lambda de Wilks, Traço de Hotelling e Maior Raiz de Roy na verificação da existência de diferenças entre os fatores espaçamento, idade e a interação entre eles, para os ensaios de Cisalhamento.

Efeito		Valor	F	Hipóteses	Erro	p-valor
Esp	Traço de Pillai	6,822	4,775	10	14	0,004
	Lambda de Wilks	6,457	11,623	5	9	0,001
	Traço de Hotelling	0,838	8,283	5	8	0,005
	Maior Raiz de Roy	0,162	8,283	5	8	0,005
Idade	Traço de Pillai	5,177	8,283	5	8	0,005
	Lambda de Wilks	5,177	8,283	5	8	0,005
	Traço de Hotelling	0,956	1,647	10	18	0,172
	Maior Raiz de Roy	0,273	1,465	10	16	0,239
Espaçamento * Idade	Traço de Pillai	1,833	1,283	10	14	0,326
	Lambda de Wilks	0,972	1,750	5	9	0,219
	Traço de Hotelling	6,822	4,775	10	14	0,004
	Maior Raiz de Roy	6,457	11,623	5	9	0,001

A Manova revelou por dois testes (Traço de Hotelling e Maior Raiz de Roy) que a interação entre as idades e os espaçamentos foi significativa ($p < 0,05$). No entanto, os testes Traço de Pillai e Lambda de Wilks não atestaram significância para esta interação. Este fato pode ser explicado pela interação não ser bem caracterizada para estas variáveis.

Para os fatores principais, a análise revelou existirem diferenças entre os espaçamentos por todos os testes e entre idades para os testes Traço de Pillai e Lambda de Wilks. O ensaio de

cisalhamento é afetado pela interação entre o espaçamento e a idade, ou seja, ambas influenciam a resistência ao cisalhamento.

Como os ensaios de cisalhamento só possuem quatro variáveis, só foram determinadas quatro funções discriminantes, apresentadas na Tabela 17. A primeira função discriminante FD1 sofre influência das variáveis TM, ρ aparente e fvo, enquanto que a função discriminante FD3 é influenciada pela variável LT. A FD1 explica 95,4%. As funções discriminantes ajustadas possibilitam 72,2% de acerto quando utilizadas para a classificação.

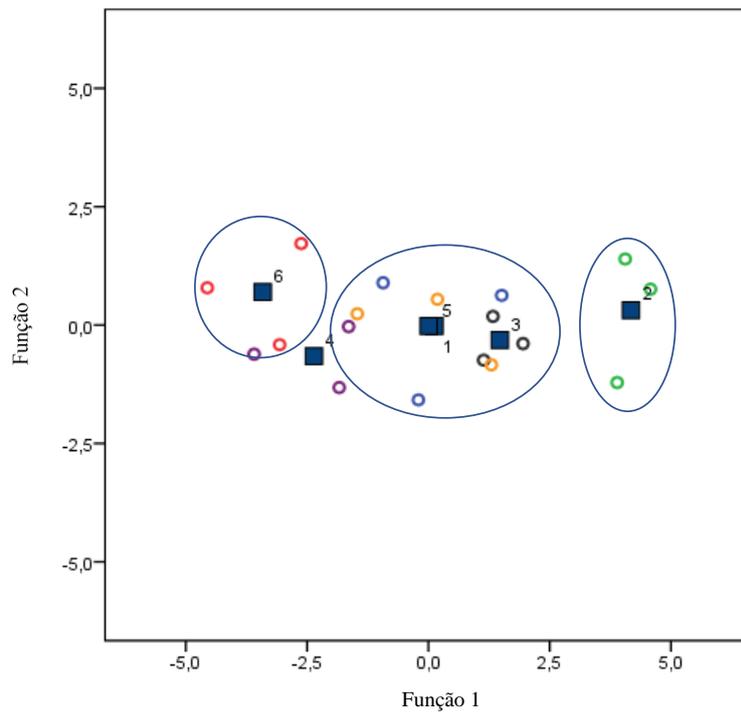
Tabela 17: Funções discriminantes para variáveis padronizadas, para os corpos de prova de cisalhamento.

Variáveis	Funções Discriminantes			
	FD1	FD2	FD3	FD4
ρ aparente (g/cm ³)	1,899	0,080	-1,215	-0,432
LT (%)	1,293	0,670	1,873	1,217
TM (cm)	2,592	-0,142	0,440	1,301
fvo (MPa)	-1,685	0,288	-0,699	0,275
Lambda de Wilks				0,065 ^{ns}
Variância Explicada FD1				95,4%

Nota: FD: função discriminante; ρ aparente: massa específica aparente; LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; fvo: Resistência ao cisalhamento; ^{ns} = não significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Foram encontrados três grupos distintos quando as funções discriminantes FD1 e FD2 são representadas graficamente (Figura 20). Os grupos encontrados foram, grupo 1 composto pelo pela idade 15 anos e o espaçamento 2,0 x 2,0 m (T6), grupo 2 pela idade 15 anos e o espaçamento 3,0 x 2,0 m (T2) e grupo 3 pelos tratamentos 1, 3, 4 e 5, que são formados pela idade 13 anos e os espaçamentos 3,0 x 2,0; 4,0 x 2,0 e 2,0 x 2,0 m, e idade 15 anos com o espaçamento 4,0 x 2,0 m. O tratamento 4 foi o único que não se agrupou por idade. O fato dos grupos 1 e 2 conterem somente um tratamento explica a existência da interação significativa revelada pela Manova.

Figura 20: Grupos obtidos a partir dos valores estimados pelas funções discriminantes FD1 e FD2 para as variáveis dos ensaios de cisalhamento.



A separação dos grupos para o ensaio de cisalhamento diferiu do ensaio de compressão e flexão estática, isso pode ser explicado pela interação significativa entre o espaçamento e a idade revelados pela Manova para o ensaio de cisalhamento.

5.3.2 Teste de médias e correlação

Os resultados médios obtidos para as variáveis, massa específica aparente, lenho tardio, tamanho médio de anel, de resistência ao cisalhamento (fvo), são apresentados na (Tabela 18).

Tabela 18: Médias das variáveis estudadas em relação aos espaçamentos e as idades, para cisalhamento.

Fator	Nível	ρ aparente (g/cm ³)	LT (%)	TM (cm)	fvo (MPa)
Idade	13	0,458 a	24,12 a	1,47 a	9,11 b
	15	0,456 a	24,56 a	1,50 a	10,02 a
Esp	2,0 x 2,0 m	0,450 b	26,76 a	1,19 b	9,96 a
	3,0 x 2,0 m	0,487 a	25,79 a	1,59 a	9,48 a
	4,0 x 2,0 m	0,433 b	20,47 b	1,68 a	9,27 a
CV (%)		12,57	33,08	43,92	20,98
Interação	Esp x Idade	12,5003**	2,7110 ^{ns}	1,3340 ^{ns}	9,3844 **

Nota: Esp: espaçamento; ρ aparente: massa específica aparente LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; fvo: Resistência ao cisalhamento; ** significativo a 1% de probabilidade de erro; ^{ns} = não

significativo ao nível de 1% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 1% de probabilidade de erro.

Houve diferença estatística significativa entre as idades apenas para resistência ao cisalhamento. Em relação ao espaçamento, houve diferenças para massa específica aparente, porcentagem de lenho tardio e tamanho médio de anéis de crescimento.

Santini et al. (2000) encontraram para *P. taeda* com 13 anos de idade, valor de 8,7 MPa para a resistência ao cisalhamento. Klock (2000), para a mesma espécie, mas com idade de 11 anos, encontrou resultado de 8,23 MPa. Ambos estudos obtiveram valores inferiores aos encontrados no presente estudo. Trianoski (2014) encontrou valor médio de 10,52 MPa para resistência ao cisalhamento para a madeira de *P. taeda* com 17 anos.

Na Tabela 19, são apresentados os valores referentes a correlação de Person para as propriedades de cisalhamento.

Tabela 19: Matriz de correlação de Person para a propriedade de cisalhamento.

	ρ aparente (g/cm³)	LT (%)	TM (cm)	Fvo
ρ aparente (g/cm³)	1			
LT (%)	0,641 **	1		
TM (cm)	-0,516**	-0,689**	1	
fvo (MPa)	0,110 ^{ns}	0,182 ^{ns}	-0,40 ^{ns}	1

Nota: LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; fvo: Resistência ao cisalhamento; ρ aparente: massa específica aparente; ** Correlação significativa a 1% de probabilidade de erro.

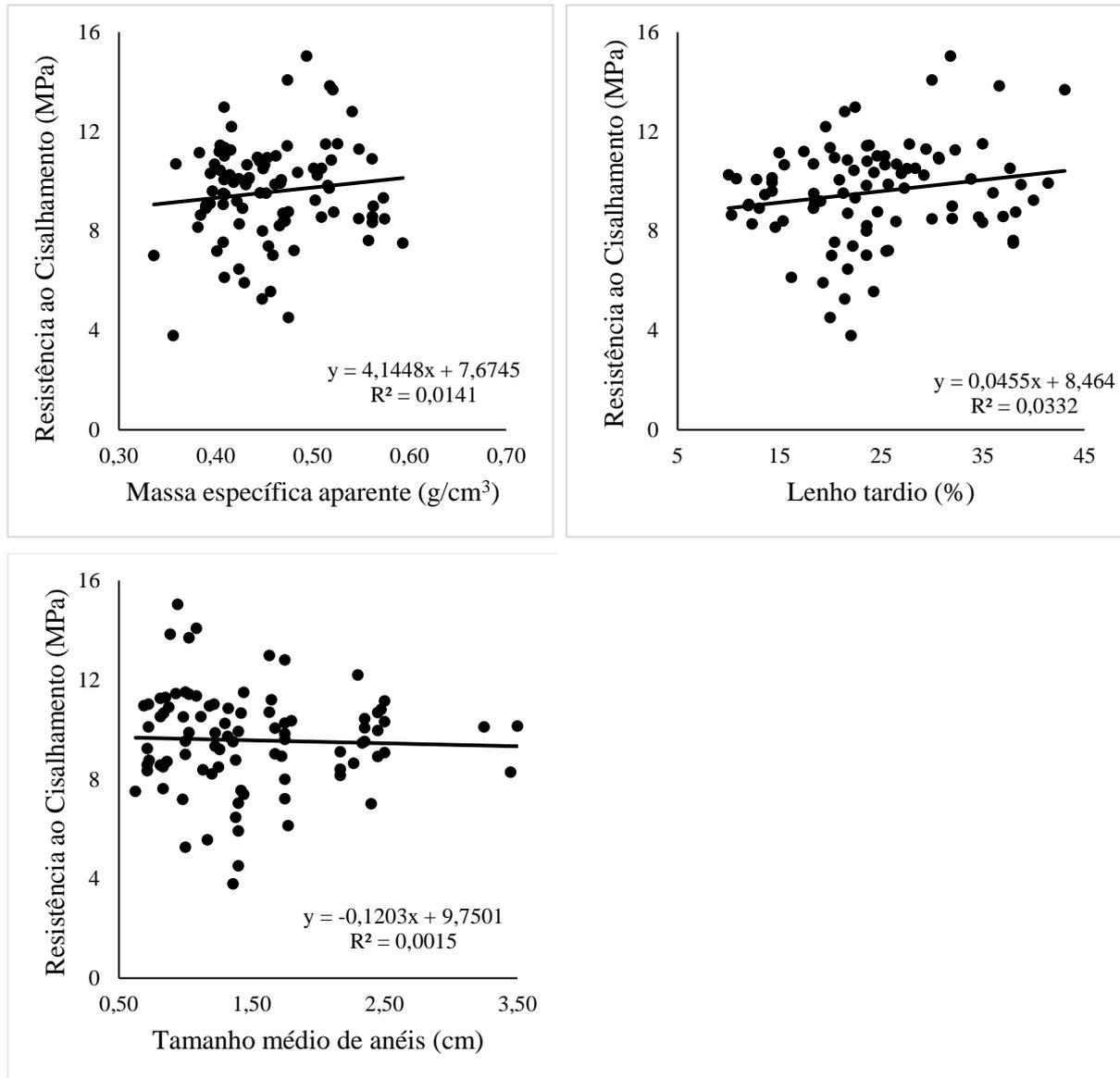
Da mesma forma que para os corpos de prova dos ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras, verifica-se que houve correlação entre as características de crescimento e a massa específica da madeira, sendo todas superiores a $r = 0,5$. Por outro lado, não houve correlação entre a resistência ao cisalhamento e qualquer uma dessas variáveis (massa específica, tamanho do anel e percentual de lenho tardio), devido a ruptura frágil que ocorre nesse ensaio.

Mustefaga et al. (2019) encontraram correlação não significativa entre a resistência ao cisalhamento e a massa específica básica, para *P. taeda* aos 12 anos de idade. Da mesma forma que Lucas Filho (1997) obteve, para *P. taeda* com 21 anos de idade, correlação não significativa entre a massa específica e a tensão máxima no sentido radial. Trianoski et al. (2014) obtiveram correlações significativas e superiores ao presente estudo entre a massa específica aparente (TU=12%) e a resistência ao cisalhamento de ($r = 0,79$). Segundo Lucas Filho (1997), a

resistência ao cisalhamento é mais afetada pela madeira juvenil, do que a resistência a flexão estática e à compressão paralela às fibras.

Na Figura 21 pode-se visualizar as regressões lineares da propriedade de resistência ao cisalhamento, com a massa específica aparente e as características dos anéis de crescimento.

Figura 21: Resistência ao cisalhamento em função da massa específica aparente, porcentagem de lenho tardio e tamanho médio de anel de crescimento dos corpos de prova testados.



Os gráficos obtidos para o ensaio de cisalhamento apresentaram regressão, mas com coeficientes de determinação baixos. Klock (2000) encontrou coeficiente de 0,62 entre massa específica e a resistência ao cisalhamento, e de 0,43 entre o lenho tardio e a resistência ao

cisalhamento, a partir da caracterização da madeira de *Pinus maximinoi* H. E. Moore com 10 anos de idade.

Na Tabela 20 são apresentados os resultados das regressões lineares para a propriedade de resistência ao cisalhamento, para a idade de 13 anos com e sem a variável ρ aparente no modelo.

Tabela 20: Resultados da regressão linear para o ensaio de cisalhamento.

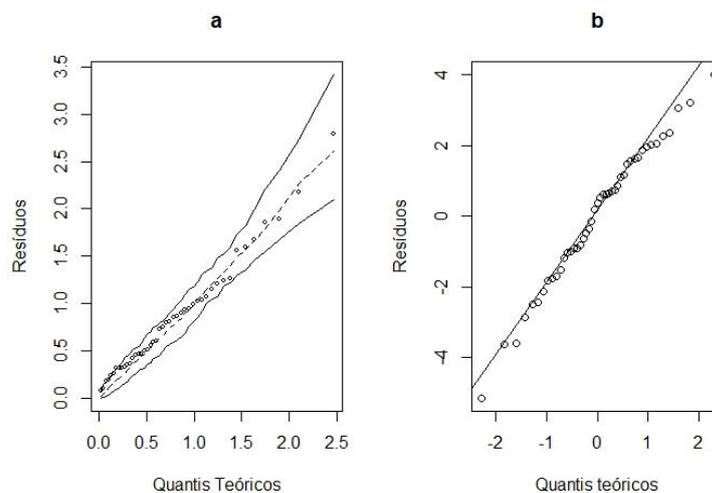
Propriedades	Equação	R ² aj	Syx%	Breusch-Pagan	Shapiro-Wilk
fvo (13 anos)	$y = (-2,314) + 24,931 * \rho$ aparente	0,235	22,00	0,5285	0,8235
fvo (13 anos)	$y = 6,848 + 0,094 * LT$	0,077	24,16	0,3667	0,4283

Nota: LT: porcentagem de lenho tardio; ρ aparente: massa específica aparente; fvo: Resistência ao cisalhamento; Syx %: Erro padrão da estimativa; R² aj: Coeficiente de determinação ajustado.

Ao realizar o método Stepwise, apenas a idade de 13 anos apresentou regressão significativa. O fato de não haver correlação entre a resistência ao cisalhamento e as características de crescimento, ou entre esta propriedade mecânica e a massa específica, ocasionou os baixos valores do coeficiente de determinação das regressões lineares obtidas pelo método Stepwise. Mesmo assim, as regressões lineares para a idade de 13 anos foram significativas, embora expressem pouca variação da propriedade.

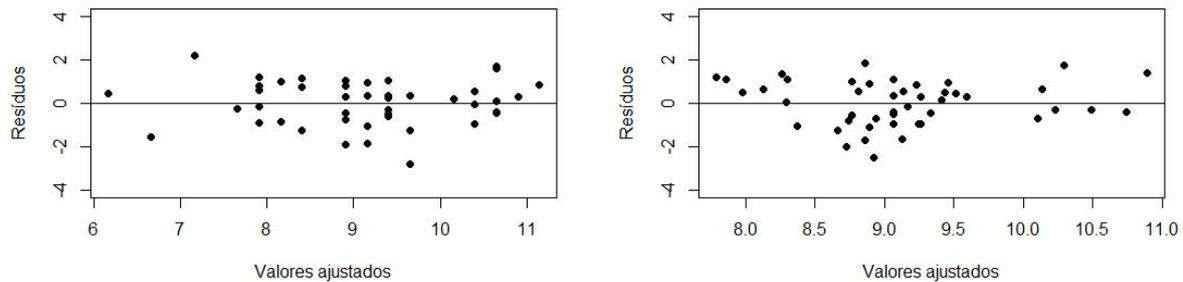
Os resíduos se distribuem dentro dos intervalos de confiança (Figura 22) para os dois modelos ajustados para fvo, ou seja, os modelos são adequados para a estimativa do fco para essa idade, sendo que os resíduos se distribuem normalmente e são homocedáticos.

Figura 22: *Half normal plot* e *qqplot* para distribuição residual referente à resistência ao cisalhamento com 13 anos de idade com a variável ρ aparente.



Os modelos não apresentam tendenciosidades. Paralelamente as Figuras 22 e 23, foram realizados os testes de *Breusch-Pagan* e *Shapiro-Wilk* para confirmar a homocedasticidade e normalidade dos resíduos.

Figura 23: Distribuição dos resíduos studentizados para resistência ao cisalhamento aos 13 anos.



(a) fvo aos 13 anos com ρ aparente

(b) fvo aos 13 anos sem ρ aparente

5.4 Considerações sobre os resultados

Analisando globalmente os resultados, é possível observar os espaçamentos analisados não foram suficientes para mostrar diferenças nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, deste modo, os espaçamentos analisados tendem a proporcionar qualidades semelhantes até as idades observadas neste estudo (13 e 15 anos).

Nos casos em que foram registrados o efeito do espaçamento sobre as propriedades da madeira, não foi possível definir claramente tendências entre o espaçamento mais amplo ou entre o mais reduzido, dificultando a explicação.

Ao contrário do espaçamento, o efeito da idade foi claro nas propriedades mecânicas com exceção apenas para o módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras, que não apresentou diferença estatística. Essa diferença de idade também não afetou a massa específica aparente, mas sim o tamanho médio de anéis de crescimento e a porcentagem de lenho tardio, ou seja, com o aumento da idade ocorreu a diminuição do tamanho médio de anéis, e por consequência o aumento da porcentagem de lenho tardio.

As propriedades mecânicas foram influenciadas pelo tamanho médio de anéis de crescimento e porcentagem de lenho tardio. A correlação entre as propriedades mecânicas e as características visuais de crescimento mostra a importância de cada característica como indicadora da qualidade da madeira. Mas a utilização dessas variáveis nos modelos para a estimativa de resistência e rigidez, não foram satisfatórias nesse estudo, isso pode ser explicado pela presença de madeira juvenil.

A correlação entre as propriedades mecânicas e as características visuais de crescimento mostra a importância de cada característica como indicadora da qualidade da madeira. Mas a utilização dessas variáveis nos modelos para a estimativa de resistência e rigidez, não foram satisfatórias nesse estudo, isso pode ser explicado pela presença de madeira juvenil.

6 CONCLUSÕES

Os espaçamentos de plantio avaliados não causaram alterações significativas sobre as propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* L aos 13 e 15 anos.

A idade não influenciou a massa específica aparente da madeira, mas influenciou nas propriedades mecânicas, com exceção ao módulo elástico em compressão, e nas características de crescimento (tamanho médio de anéis de crescimento e porcentagem de lenho tardio). Com o aumento da idade de corte de 13 para 15 anos, ocorreu o aumento significativo da resistência e da rigidez da madeira.

Houve correlação significativa entre as características de crescimento da madeira e a maior parte de suas propriedades mecânicas, o que sugere que esse parâmetro seja mais estudado e utilizado para estimativa de resistência e de rigidez.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941: Determinação de massa específica, 6p, Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de Estruturas de Madeira, 107p, Rio de Janeiro, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D 143 -94. **Standard methods of testing small clear specimens of timber**. Philadelphia: ASTM. 2000. 31 p.

ANTAL, M. J.; MOK, W. S. L. Review of methods for improving the yield of charcoal from biomass. **Energy e fuels**, v.4, n.3, p. 221-225. 1990.

BAKER, G.; SHOTTAFER, J., The effect of tree spacing in a red pine plantation on tree growth and wood quality. Part II – Wood quality. **College of Life Science and Agriculture Experiment Station**. v. 685, 38p. 1970.

BALDWIN JUNIOR, V. C.; PETERSON, K. D.; CLARK III, A.; FERGUSON, R. B.; STRUB, M. R.; BOWER, D.R.; The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38 year old loblolly pine. **Forest Ecology and Management**. v. 137, p. 91-102, 2000.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**. v.27, n. 3, p. 371-380. 2003.

BARBOSA, O.; Anéis de crescimento. In: SEMINÁRIO APRESENTADO NO CURSO SOBRE BOTÂNICA APLICADA. 78., 1982, São Paulo. **Anais...** Departamento de botânica da USP, 1982.

BARRICHELO, L. E. G.. **Estudo das características físicas, anatômicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea* Fm. Var. *hondurensis* Barr. E Golf. Para a produção de celulose Kraft**. 1979. 167 p. Tese (Livre-Docência em Ciências Florestais) – Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP.

BATISTELA, G. C; PADOVANI, C. Diferenciação entre espécies de eucaliptos utilizando análise de variância univariada e multivariada. In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 2013. **Anais...** Campinas, Galoá, 2013.

BIBLIS, E. et al. Predicting flexural properties of dimension lumber from 40-year-old loblolly pine plantation stands. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 12, p. 109-113, 12 2004.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. **Estudo de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de Pinus merkusii**. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 237-243, 2008.

BOTELHO, S. A. Espaçamento. In: SCOLFORO, J. R. S. **Manejo florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. p. 381- 406.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Nobel S.A, 1991. 154 p.

CALIL, C. J., DIAS, A. A.; LAHR, F. A. R. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. 1. ed. Barueri: Manole, 2003. 152p.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte americano às espécies de *Pinus* sp plantadas no Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 67, p.78- 87, abr. 2005.

CARGNIN, O. **Alternativas das florestas de Pinus**. [on line]. 2005. Disponível em: <<http://noticias.ambientebrasil.com.br/artigos/2005/09/27/21014-alternativas-das-florestas-de-Pinus.html>> Acesso em: 10 de out. 2018.

CHIES, D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento de madeira serrada de Pinus taeda L**. 2005. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR.

CHRZAZVEZ, J.; THÉRY-PARISOT, I.; FIORUCCI, G.; TERRAL, J. F.; THIBAUT, B. Impacto of post-depositional processes on charcoal fragmentation ond archaeobotanical implications: experimental approach combining charcoal analysis and biomechanics. **Journal of Archaeological Science, Elsevier**, n. 44, p. 30-42, 2014.

COUTINHO, R.; BESPALHOK, J.; FRITSCH NETO, R.; FRIZZO, C. Viabilidade da seleção precoce de *Pinus taeda* L. em diâmetro a altura do peito em programa de melhoramento genético. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 113, p. 205-219, mar. 2017.

DALCIN, G. B. **Ensaio dos materiais**. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Santo Ângelo, 2007.

DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R.; RODRIGUES, A. L.; MACHADO, S. do A.; NETTO, S. P.; FIGUEIREDO FILHO, A.; NOGUEIRA, G.S. **Atualidades em mensuração florestal**. Paraná: Curitiba; 2014. 420 p.

DAL PONTE FILHO, J. L.; OLIVEIRA, F. L de.; LIMA, I. L de.; GARCIA, J. N. Influência da idade em propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS APLICADAS DA FAEF, 7., 2004, Garça. **Anais...** Garça: FAEF, p. 133-138. 2004.

DANIEL, O. **Silvicultura sustentável: Métodos e práticas**. 2014. Disponível em: <<https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/silvicultura/livros/SILVICULTURA%20SUSTENTAVEL.pdf>>Acesso em: 16 jun. 2019.

DIAS, F.M.; LAHR, F.A.R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da massa específica aparente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.65, p.102-113, 2004.

EVANS II, J. W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. **Forest Product Journal**, v. 50, n. 7/8, p. 75-87, 2000.

FERRANTE, M. **Sele o de Materiais**, 2^a edi o, São Carlos, EDUFSCA, 2002, 286 p.

FERREIRA, D.F. **Estatística Multivariada**. Lavras: UFLA, 2018, 624p.

FIELD, A. **Discovering Statistics Using SPSS**. London: Sage Publications, 2005, 780p.

FLORSHEIM, S. M. B. **Curvas de isopropriedades da madeira de árvores de *Pinus caribaea* var. *bahamensis***. 2010. 225 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

FMESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. Curitiba: UFPR, 4^a edi o, 2012. 206 p.

FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G.; AMARAL, A. C. B.; VALLE, C. F. Varia es das Características da Madeira e Propriedades da Celulose Sulfato de *Pinus oocarpa* em Fun o da Idade do Povoamento Florestal. **IPEF**, Piracicaba, v.10, p.81-87, 1975.

GARCIA, C. H.; CORRADINE, L.; ALVARENGA, S. F. Comportamento florestal do *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em diferentes espaçamentos. **IPEF**, Circular Técnica n. 179, 1991.

GERE, J. M. **Mecânica dos Materiais**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning. 2003.

GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S.; LUCIA, R. M. D.; SARTORIO, R. C. Estudo de algumas propriedades mecânicas da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 501-509, 2009.

GREEN, D.W.; WINANDY, J.E.; KRETACHMANN, D.E. **Wood handbook: wood as an engineering material**. In: Mechanical properties of wood. Washington, D.C. USDA, chap.4. 1999, 509 p.

GULER, C.; COPUR, Y.; AKGUL, M.; BUYUKSARI, U.; Some chemical, physical and mechanical proprieties of juvenile wood from Black pine (*Pinus nigra* Arnold) plantations. **Journal of Applied Sciences**, v.7, n. 5, p.755- 758, 2007.

HARMS, W. R.; WHITESELL, C. D.; DEBELL, D. S. Growth and development of loblolly pine in a spacing trial planted in Hawaii. **Forest Ecology and Management**, v.126, p. 23-24. 2000.

HASELEIN, C.R.; BERGER, R.; GOULART, M. Propriedades de flexão estática da madeira e umidade e a 12% de umidade de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob efeito do espaçamento e da adubação. **Ciência Florestal**, v.12, n.2, p.147-152, 2002.

IBÁ: Indústria brasileira de árvores. Brasília: IBÁ, ano base 2019. 80p.

JIANG, J.; LU, J.; REN, H.; LUO, X.; CHAO, L.; GUO, W.; Evaluation of modulus of elasticity for dimension lumber by three nondestructive techniques. **Journal of Zhejiang A&F University**. v. 3, n. 25, p. 277-281. 2008.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore**. 2000. 275 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

KNIGGE, W.; SCHULTZ, H. **Growndise der Forestbenutzung**. Verlag Paul Parey, Hamburg and Berlin. 1966. 91 p.

KOLLMANN, F. F. P., COTÊ J. R., W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: 2v. Springer, 1968.

KREMPL, H. Gewicht das Fichtenholzes in Osterich. **Allgemeine Forstzeitung**, v.88, n.4, p. 76-81, 1977.

KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R.H.; **A Cultura do *Pinus* no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005.

LARSON, P. R.; Evaluating the enviroment for studies the inheritance of wood properties. **World Consultation on forests genetics and tree improvement**, 2. Stockohlm. Proceedings. Rome FAO. Cap. 7/1. 1963.

LARSON, P. R.; KRETSCHMANM, D. E., CLARK III, A., ISEBRANDS, J. G. **Formation and properties of juvenile wood in Southern pines – a synopsis**. US Forest Products Laboratory. General technical report, FPL-GTR-129, Madison, 2001.

LASSERRE, J.P., MASON, E.G., WATT, M.S. The effects of different genetic populations and spacing on *Pinus radiata* corewood modulus of elasticity in an 11- year-old experiment. **Forest Ecology and Management**, v. 205, p. 375–383, 2005.

LASSERRE, J.P., MASON, E.G., WATT, M.S. Influence of the main and interactive effects of site, stand density and clone on *Pinus radiata* D. Don corewood modulus of elasticity. **Forest Ecology and Management**, v. 255, p. 3455–3459, 2008.

LASSERRE, J.P., MASON, E.G., WATT, M.S., MOORE, J. R. Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood. **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 1924–1931, 2009.

LATORRACA J.V.F., ALBUQUERQUE C.E.C. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**. v. 7, n. 1, p. 279 - 291, jan./dez. 2000.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; FMEIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, n.30, v.4, p.603-612, 2006.

LIMA, I. L.; MONTEIRO, B.F.S.; LONGUI, E.L. Influência do espaçamento em algumas propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* Linn, **Revista Cerne**, v. 15, n. 2, p. 244-250, 2009.

LIN, C. J.; TSAI, M. J.; LEE, C. J.; WANG, S. Y.; LIN, L. D. Effects of ring characteristics on the compressive strength and dynamic modulus of elasticity of seven softwood species. **Holzforschung**, New York, v. 61, p. 414–418, 2007.

LOBÃO, M. S.; DELLA LÚCIA, R. M.; FMEIRA, M. S. S.; GOMES, A.; Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004.

LUCAS FILHO, F.C. **Estudo da influência do teor de umidade e da massa específica aparente sobre a resistência das madeiras de *Pinus elliottii* var *elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L.** 1997. 101 f. Dissertação. (Mestrado em Ciências florestais) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.

MARCHIORI, J. N. C. **Dendrologia das gimnospermas.** Santa Maria: Ed. UFSM, 1996.

MATOS, J. L. M.; **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** 1997. 134 f. Tese. (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.

MELLO, T. V. **Propriedades físico-mecânicas da madeira de um povoamento de *Pinus taeda* L. atacado pelo macaco-prego.** 2018. 55 f. Dissertação. (Mestrado em Ciências florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste. Irati, PR.

MELO, J. E. **Madeira: características e aplicações.** Brasília, DF: IBAM, Laboratório de Produtos Florestais, 2002. 30 p.

MENDONÇA, M. A. **Característica da madeira de *Pinus elliottii* com diferentes idades e propriedades do papel.** 1982. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciências florestais) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada.** Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297 p.

MORESCHI, J. C. **Propriedades Tecnológicas da madeira.** 4^a edição. Curitiba: UTFPR, 2012. 208 p.

MOURA, L.F. de; BRITO, J.O. Influência da desrama artificial sobre a densidade básica, a composição química e as características dos traqueídeos da madeira de *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barr. Et Golf. Viçosa, **Revista Árvore**, v.25, n.3, p.369-374, 2001.

MUÑIZ, G. I. B. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. E *Pinus taeda* L.** 1993. 252 f. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.

MUSTEFAGA, E. C.; HILLIG, E.; TAVARES, EVERTON LORENZETT; SOZIM, P.; RUSCH, F. Caracterização físico-mecânica da madeira juvenil de *Pinus*. **IPEF**. Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 472-481, 2019.

OLIVEIRA, F. L.; LIMA, I. L.; GARCIA, J. N.; FLORSHEIM, S. M. B. Propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. em função da idade e da posição radial na tora. **Revista do Instituto Florestal**. São Paulo, v. 18, n. único, p. 59-70, 2006.

OLIVEIRA JUNIOR, E. F.; **Determinação das propriedades físicas e químicas da madeira de *Hevea brasiliensis* em relação ao painel de extração de látex.** 2011. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) mestrado; Faculdade de ciências agrônômicas da Unesp, Campus de Botucatu, São Paulo, SP.

OLIVEIRA NETO, S. N de., REIS, G. G dos.; REIS, M das G. F.; NEVES, J. C. L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. resposta a adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n.1, p.15-23, 2003.

PALLANT, J. **SPSS survival manual**. New York: Open University Press, 2007, 335 p.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; FERNANDES, J. S. C.; RESENDE, M. D. V. Avaliação e seleção precoce para crescimento de *Pinus taeda*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 12, p. 1719-1726, 2002.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 2.ed. New York: McGraw Hill, 1964. 643p. v.1.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 722p.

PAULESKI, D. T. **Influência do espaçamento sobre o crescimento e a qualidade da madeira de *Pinus taeda* L.** 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Estadual de Santa Maria, Santa Maria, RS.

RADTKE PJ, WESTFALL JA, BURKHART AW. Conditioning a distance-dependent competition index to indicate the onset of intertree competition. **Forest Ecology and Management**, v. 175, p. 17-30, 2003.

RALL, R. **Influência das características dos anéis de crescimento na densidade, resistência e rigidez da madeira de *Pinus taeda* L.** 2006. Dissertação (Mestrado em agronomia). Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP. Botucatu/SP.

REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M., BENEDETTI, V. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: **IPEF**, p. 135 – 166, 2000.

REMASA REFLORESTADORA S.A. **Plano de Manejo Florestal: Resumo Público.** 7 eds. Bituruna: Grupo Remasa, 2016. 26 p.

RETSLAFF, F. A. de S. **Simulador para prognose da produção de *Pinus taeda* com diagrama de manejo da densidade associado à modelagem em classes de diâmetro.** Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

ROCHA, J. S.; PAULA, E. V. C. M.; SIQUEIRA, M. L. Flexão estática em amostras pequenas livres de defeitos. **Acta Amazônia**, v. 18, n.1/2, p. 147- 162, 1988.

ROQUE, R. M.; LEDZEMA, R. M. Efecto del espaciamento en plantación sobre dos propiedades físicas de madera de teca a lo largo del fuste. **Madera y Bosques**, v. 9, n. 2, p. 15-27, 2003.

ROTH, B.E., LI, X., HUBER, D.A., PETER, G.F. Effects of management intensity, genetics and planting density on wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the southeastern USA. **Forest Ecology and Management**, v. 246, p. 155–162, 2007.

ROSA, R. A.; FRANÇA, L. C. A.; SEGUNDINHO, P. G. A.; LUBE, V. M.; PAES, J. B. Caracterização da madeira de maçaranduba (*Manilkara* p.) por métodos destrutivos e não destrutivos. **Ciência da Madeira**. Pelotas, v.05, n.01, p. 68-78, 2014.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C.R.; GATTO, D.A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, v.10, n.1, p.85-93 85, 2000.

SEITZ, R. A. **Critérios para a seleção de um regime de podas de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil**. 2000. 77 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná., Curitiba, PR.

SHIMIZU, J. Y. **Cultivo do *Pinus***. Disponível em: < [http:// sistemas de producao.cnptia.embrapa.br/ Fontes HTML/ Pinus/ Cultivo Pinus/ inex. htm](http://sistemas.de.producao.cnptia.embrapa.br/Fontes_HTML/Pinus/Cultivo_Pinus/inex.htm)>. Acesso em: 10 set. 2018.

SHIMIZU, J. Y. **Silvicultura de *Pinus* para o sul do Brasil**. REMADE, v.6, n.37, p.32-5, 1997.

SHIMOYAMA, V. R. S.; **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* sp.** 1990. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, SP.

SHIMOYAMA, V. R. de S.; BARRICHELLO, L. E. G. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. **Serie Técnica Ipef**, Piracicaba, v.6, n.20, p. 1-22, 1989.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 2002. 181 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

SPIB - SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU. Standard grading rules for Southern Pine lumber. Pensacola, 1994.

SUASSUNA, J. **Obtenção de Sementes**. REMADE, Ed. Especial, p.32-42. n.99, 2006.

TOMASELLI, I. Comparação da qualidade da madeira de *Araucaria angustifolia* e *Pinus spp* produzida em reflorestamentos. In: Encontro da IUFRO sobre problemas florestais do gênero Araucária. 1979, Curitiba. **Anais...** 1980. n. 18, p. 286-291.

TOMIO, G. F.; MODES, K. S.; SOZO, P.; VIVIAN, M. A.; PADILHA, E. Propriedade Física e Mecânica da Madeira de *Pinus patula* Schltld. & Cham. In: CBCTEM - Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2017, Florianópolis - SC. **Anais...** Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2017. v. 3. p. 1-1.

TRIANOSKI, R. **Avaliação da Qualidade da Madeira de Espécies de *Pinus* Tropicais por meio de Métodos Convencionais e Não Destrutivos**. 2012. 554 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S.; PRATA, J.G. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de pinus tropicais. **Scientia Florestalis**, v. 42, n. 101, p. 21-28, 2014.

TSOUMIS, George et al. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

USDA FOREST SERVICE. **Technologytransfer, *Pinus taeda***. Disponível em: <[http://www2.fpl.fs.fed.us/techsheets/softwoodNA/htmldocs/Pinus taeda. html](http://www2.fpl.fs.fed.us/techsheets/softwoodNA/htmldocs/Pinus%20taeda.html)>. Acesso em: 10 jan. 2018.

VIDAURRE, G. B., LOMBARDI, L. R., NUTTO L., FRANÇA, F. J. N., OLIVEIRA, J. T. S., ARANTES, M. D. C. Propriedades da Madeira de Reação. **Floresta e Ambiente**, Rio de janeiro, v. 20, n. 1, p. 26-37, jan./mar. 2013.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M. Efeito do espaçamento na produção em peso e na qualidade da madeira de *E. grandis* e *E. urophylla* aos 52 meses de idade. **Revista Árvore**, Viçosa, v.11, n. 2, p.132-145,1987.

WESTROCK. **Resumo Público do Plano de Manejo**. Três Barras: Divisão Florestal WestRock, 2017. 32 p.

WILL, R. E.; BARRON, G. A.; COLTER, B. E.; SHIVER, B.; TESKEY, R. O. Relationship between intercepted radiation, net photosynthesis, respiration, and rate of stem volume growth of *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different densities. **Forest Ecology and Management**, v. 154, p. 155-163, 2001.

APÊNDICES

Apêndices 1- Ensaio de flexão estática

Apêndices 1.1 Análise descritiva dos dados para o ensaio de flexão estática.

13 anos						15 anos				
p aparente	LT	TM	f _M	E _M		p aparente	LT	TM	f _M	E _M
3,0 x 2,0 m						3,0 x 2,0 m				
Média	0,46	24,08	1,85	40,04	3938	0,52	27,03	1,37	61,01	5455
Desv. Pad	0,08	5,86	0,58	17,13	1428	0,04	7,57	0,54	8,45	1417
CV (%)	17,39	24,34	31,35	42,78	36,26	7,69	28,01	39,42	13,85	25,98
Mínimo	0,32	14,17	0,91	13,98	2075	0,44	14,18	0,6	49,74	3203
Máximo	0,57	34	2,65	66,13	7030	0,59	40,81	2,31	81,86	7816
IC inferior	0,42	20,84	1,53	30,56	3148	0,50	22,83	1,07	56,34	4670
IC superior	0,51	27,33	2,17	49,53	4730	0,55	31,22	1,67	56,69	6240
4,0 x 2,0 m						4,0 x 2,0 m				
Média	0,46	21,17	1,98	43,44	4358	0,45	24,8	1,24	51,4	4854
Desv. Pad	0,04	4,71	0,74	13,788	2066	0,07	10,35	0,42	17,18	1794
CV (%)	8,70	22,25	37,37	31,74	47,41	15,56	41,73	33,87	33,42	36,96
Mínimo	0,39	4,34	1,12	14,85	1937	0,33	14,69	0,76	26,27	18,79
Máximo	0,52	28,57	3,6	65,37	8470	0,58	50,08	1,93	78,5	8839
IC superior	0,43	18,56	1,57	35,81	3214	0,4	19,07	1	41,88	3860
IC inferior	0,47	23,77	2,39	51,07	5502	0,49	30,53	1,47	60,92	5847
2,0 x 2,0 m						2,0 x 2,0 m				
Média	0,45	23,3	1,32	40,87	4254	0,46	27,47	1,1	63,93	5843
Desv. Pad	0,04	7,17	0,6	11,53	1372	0,05	6,15	0,32	13,67	1422
CV (%)	8,89	30,77	45,45	28,21	32,25	10,87	22,39	29,09	21,38	24,34
Mínimo	0,36	10,91	0,92	18,91	2345	0,36	19,3	0,55	45,3	3656
Máximo	0,51	33,28	2,75	57,9	6831	0,54	41,5	1,76	96,03	8352
IC superior	0,42	19,33	1,3	34,48	3494	0,43	24,07	0,92	56,36	5055
IC inferior	0,47	27,27	1,96	47,25	5014	0,48	30,88	1,27	71,5	6630

Nota: ρ aparente: massa específica aparente; LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; f_M : Módulo de ruptura; E_M : Módulo de elasticidade; Desv. Pad.: Desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); IC: intervalo de confiança;

Apêndices 1.2 Anova da massa específica aparente em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	,009	1	,009	2,301	,133
Within Groups	,352	88	,004		
Total	,361	89			

Apêndices 1.3 Anova da massa específica aparente em função do espaçamento.

	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	,035	2	,018	4,714	,011
Within Groups	,326	87	,004		
Total	,361	89			

Apêndices 1.4 Anova da porcentagem de lenho tardio em função da idade.

	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	289,229	1	289,229	5,693	,019
Within Groups	4470,565	88	50,802		
Total	4759,794	89			

Apêndices 1.5 Anova da porcentagem de lenho tardio em função do espaçamento.

	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	124,087	2	62,043	1,164	,317
Within Groups	4635,707	87	53,284		
Total	4759,794	89			

Apêndices 1.6 Anova do tamanho médio de anéis de crescimento em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7,750	1	7,750	25,444	,000
Within Groups	26,803	88	,305		
Total	34,553	89			

Apêndices 1.7 Anova do tamanho médio de anéis de crescimento em função do espaçamento.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1,194	2	,597	1,557	,217
Within Groups	33,359	87	,383		
Total	34,553	89			

Apêndices 1.8 Anova do módulo de ruptura em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	6758,960	1	6758,960	33,487	,000
Within Groups	17761,515	88	201,835		
Total	24520,475	89			

Apêndices 1.9 Anova do módulo de ruptura em função do espaçamento.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	379,910	2	189,955	,685	,507
Within Groups	24140,566	87	277,478		
Total	24520,475	89			

Apêndices 1.10 Anova do módulo de elasticidade em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	32419202,844	1	32419202,844	12,676	,001
Within Groups	225055347,778	88	2557447,134		
Total	257474550,622	89			

Apêndices 1.11 Anova do módulo de elasticidade em função da idade.

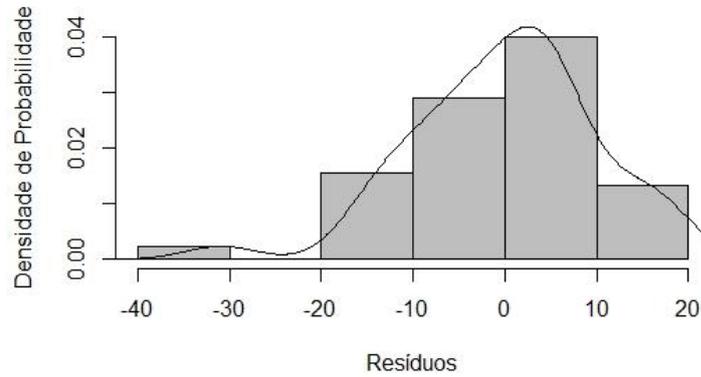
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3279241,756	2	1639620,878	,561	,573
Within Groups	254195308,867	87	2921785,159		
Total	257474550,622	89			

Apêndices 1.12 Resultados das correlações entre as variáveis originais e as variáveis discriminantes para flexão estática.

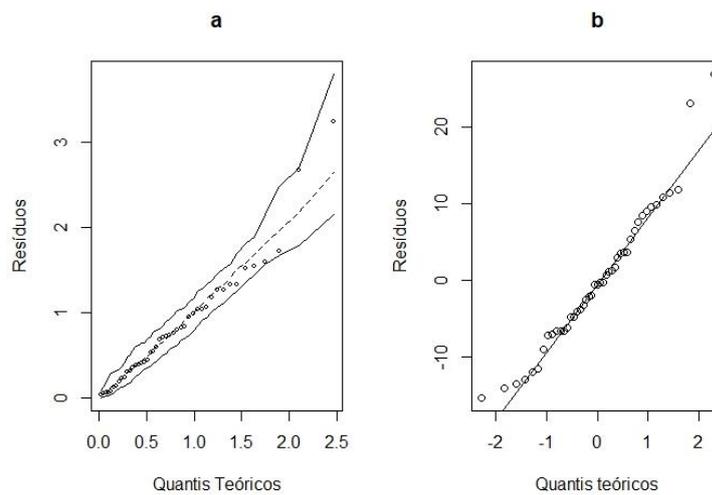
Matriz de estrutura					
Variáveis	Funções discriminantes				
	FD1	FD2	FD3	FD4	FD5
ρ aparente (g/cm^3)	0,032	-0,913*	0,202	0,350	0,050
f_M (MPa)	-0,261	-0,674*	0,486	0,482	0,097
LT (%)	-0,136	-0,405	0,036	0,872*	-0,236
TM (cm)	0,427	0,371	0,363	-0,584*	-0,455
E_M (MPa)	-0,182	-0,359	0,327	0,428	0,740*

Nota: ρ aparente: massa específica aparente LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; f_M : Módulo de ruptura; E_M : Módulo de elasticidade; ns = não significativo * = significativo à 5% de probabilidade;

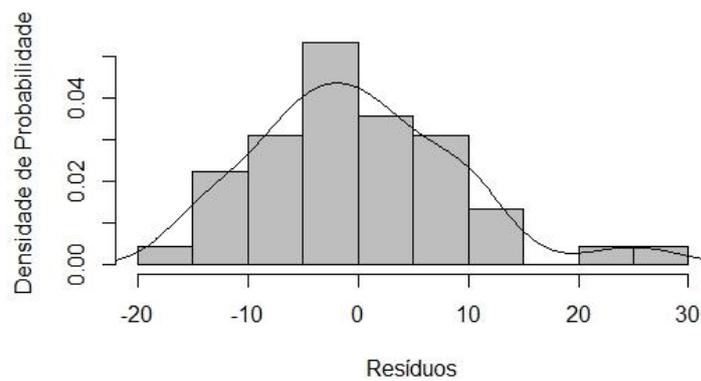
Apêndices 1.13 Histograma da resistência aos 13 anos com ρ aparente



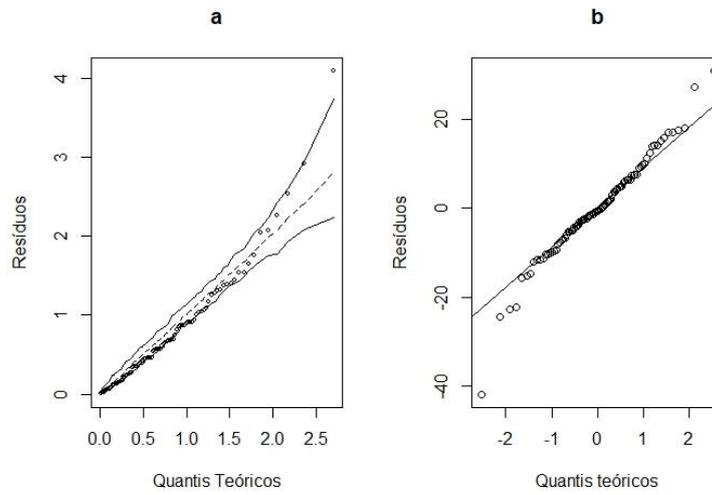
Apêndices 1.14 *Half normal plot* e *qqplot* para distribuição residual referente à resistência aos 13 anos de idade com a variável ρ aparente.



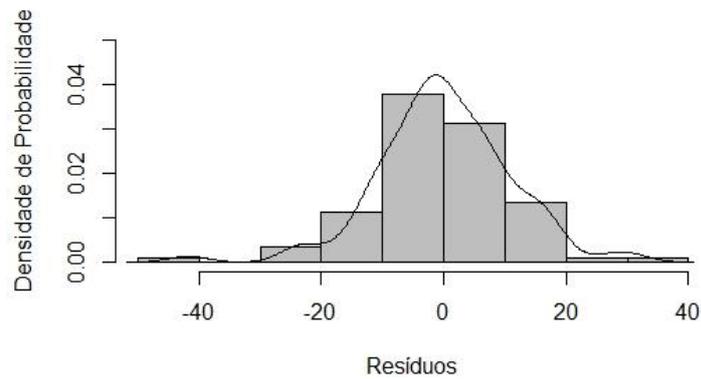
Apêndices 1.15 Histograma da resistência aos 15 anos com ρ aparente.



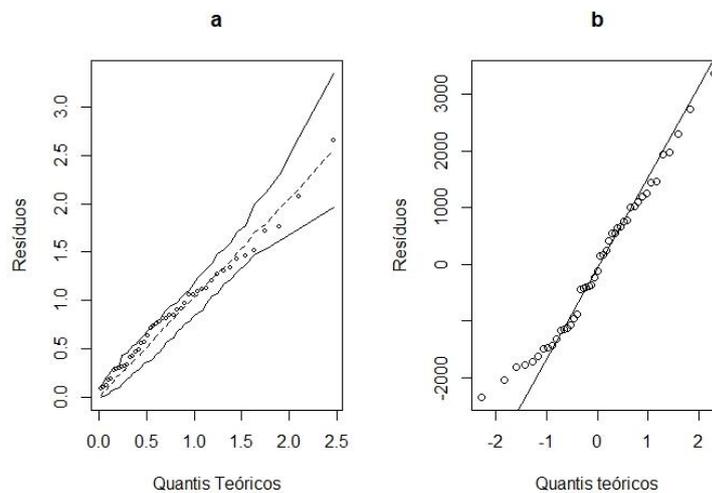
Apêndices 1.16 *Half normal plot e qqplot* para distribuição residual referente à resistência aos 13 e 15 anos de idade com a variável ρ aparente.



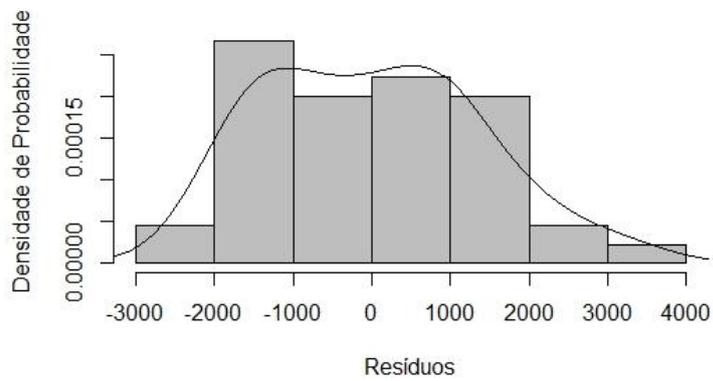
Apêndices 1.17 Histograma da resistência aos 13 e 15 anos com ρ aparente.



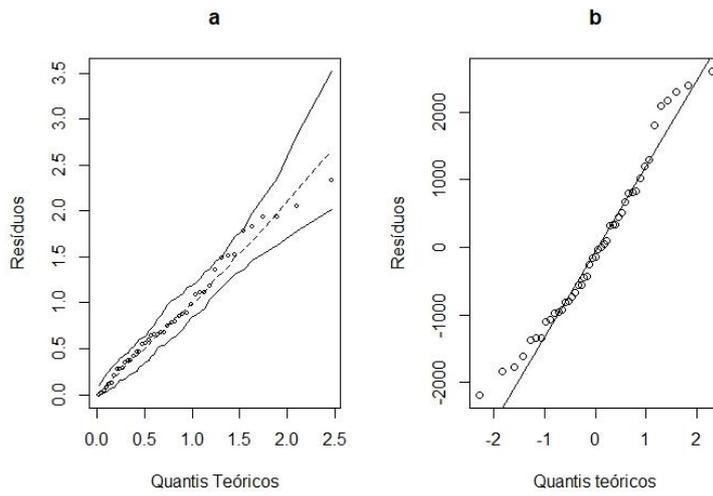
Apêndices 1.18 *Half normal plot e qqplot* para distribuição residual referente ao módulo de elasticidade aos 13 anos de idade com a variável ρ aparente.



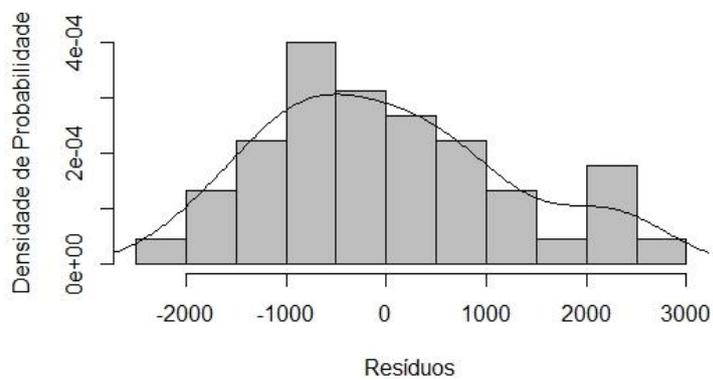
Apêndices 1.19 Histograma do módulo de elasticidade aos 13 anos com ρ aparente.



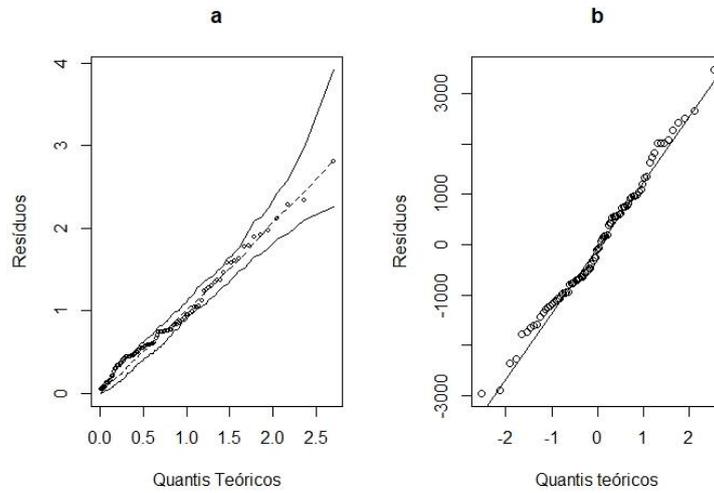
Apêndices 1.20 *Half normal plot* e *qqplot* para distribuição residual referente ao módulo de elasticidade aos 15 anos de idade com a variável ρ aparente.



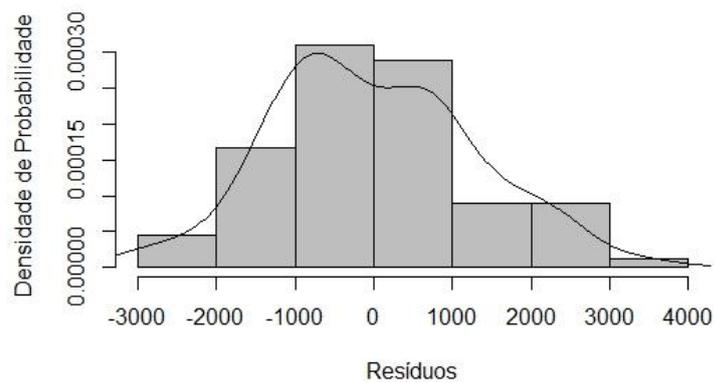
Apêndices 1.21 Histograma do módulo de elasticidade aos 15 anos com ρ aparente.



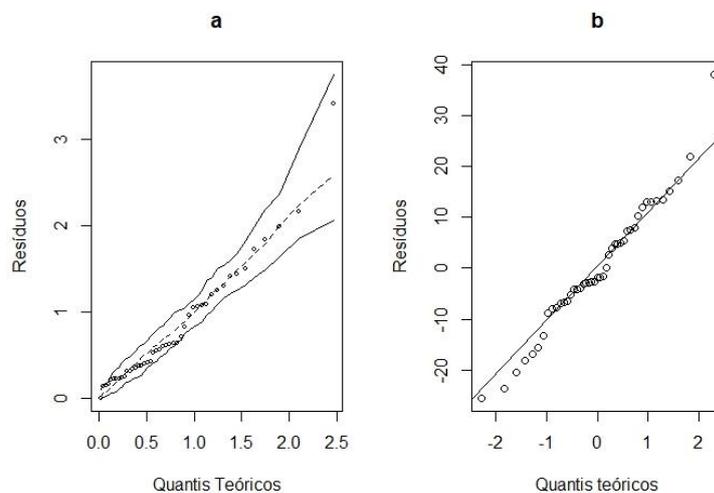
Apêndices 1.22 *Half normal plot e qqplot* para distribuição residual referente ao módulo de elasticidade aos 13 e 15 anos de idade com a variável ρ aparente.



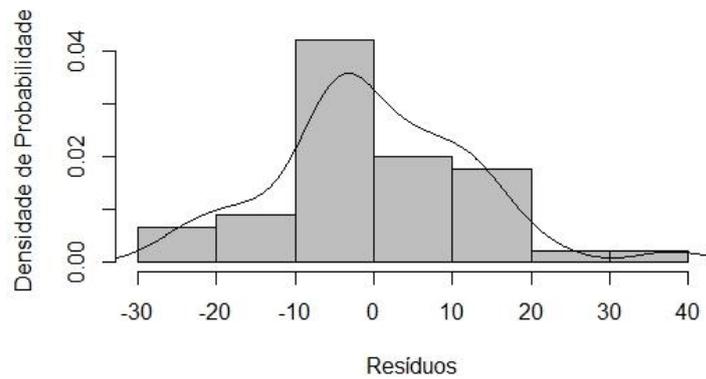
Apêndices 1.23 Histograma do módulo de elasticidade aos 13 e 15 anos com ρ aparente.



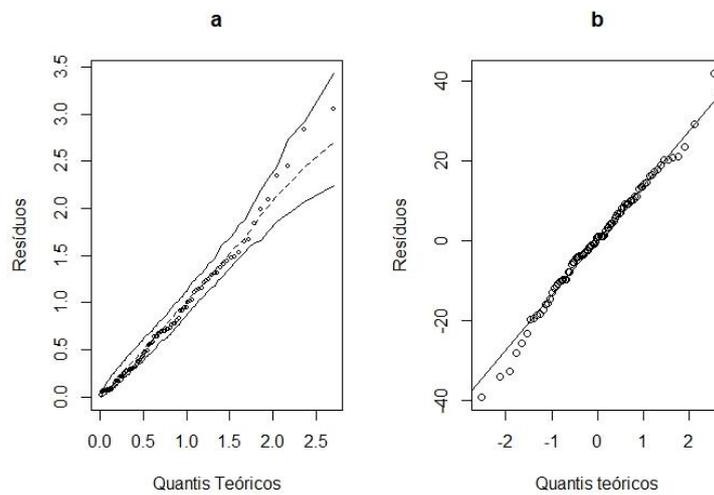
Apêndices 1.24 *Half normal plot e qqplot* para distribuição residual referente a resistência aos 15 anos de idade sem a variável ρ aparente.



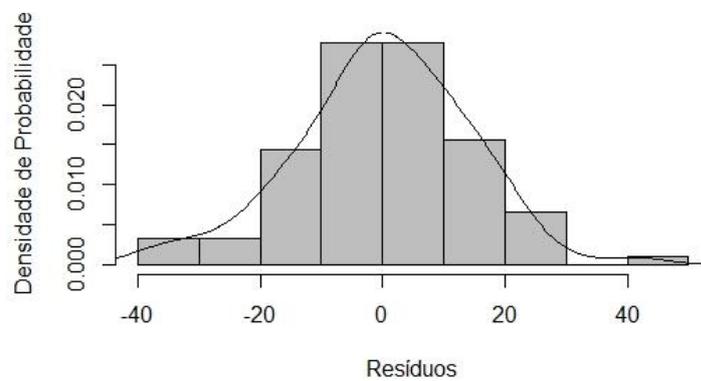
Apêndices 1.25 Histograma da resistência aos 15 anos sem ρ aparente.



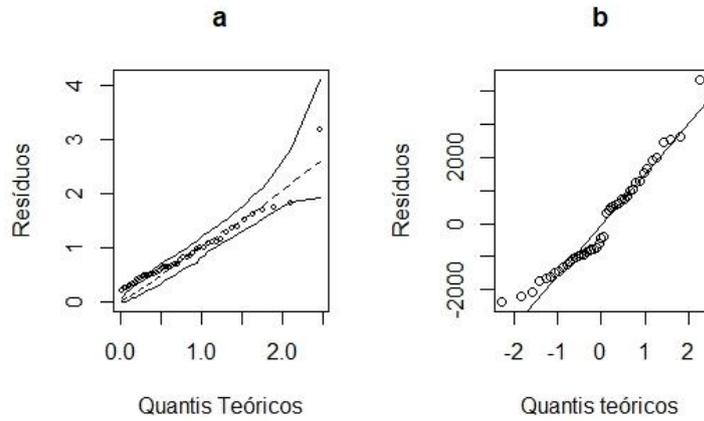
Apêndices 1.26 *Half normal plot* e *qqplot* para distribuição residual para a resistência aos 13 e 15 anos de idade sem a variável ρ aparente.



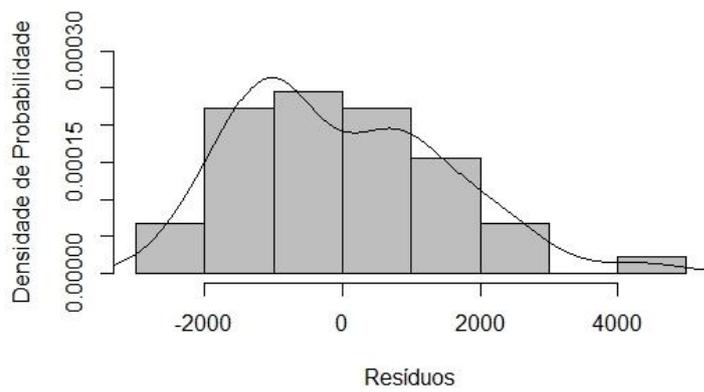
Apêndices 1.27 Histograma da resistência aos 13 e 15 anos sem ρ aparente.



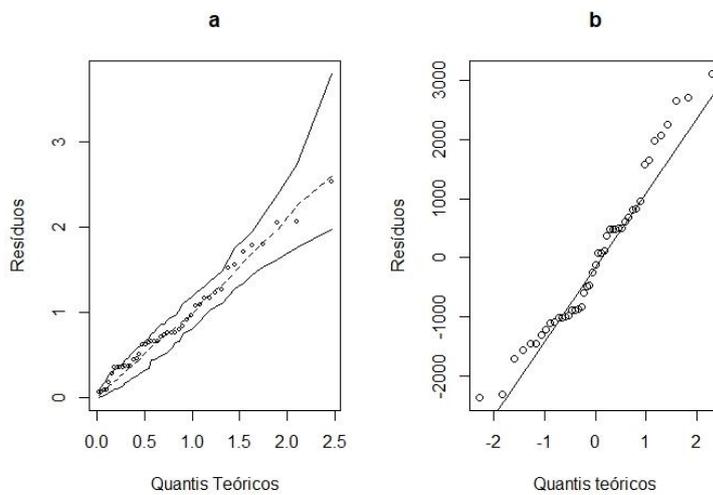
Apêndices 1.28 *Half normal plot e qqplot* para distribuição residual para o módulo de elasticidade aos 13 anos de idade sem a variável ρ aparente.



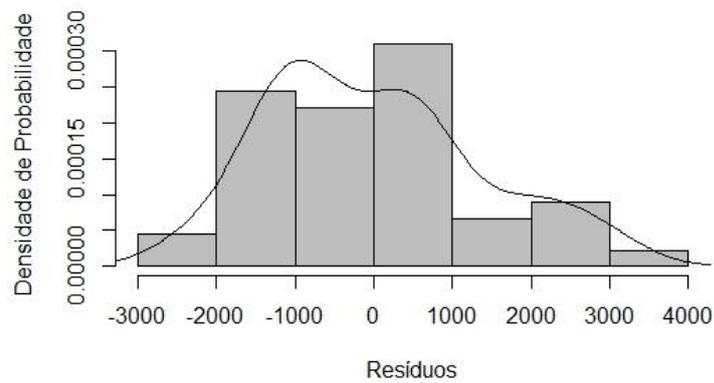
Apêndices 1.29 Histograma do módulo de elasticidade aos 13 anos sem ρ aparente.



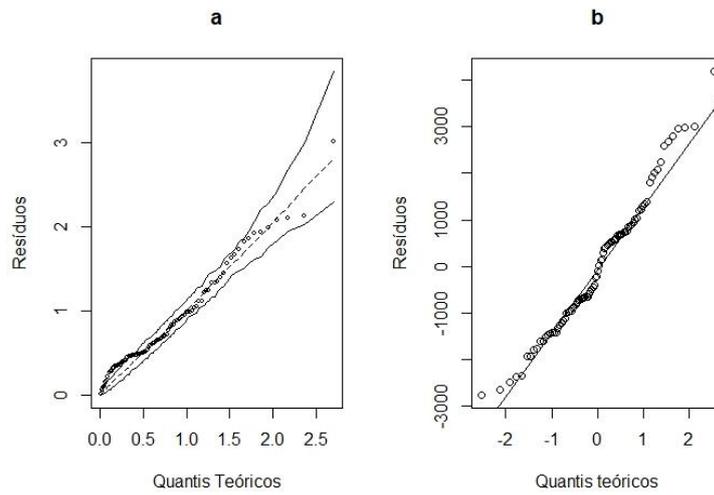
Apêndices 1.30 *Half normal plot e qqplot* para distribuição residual para o módulo de elasticidade aos 15 anos de idade sem a variável ρ aparente.



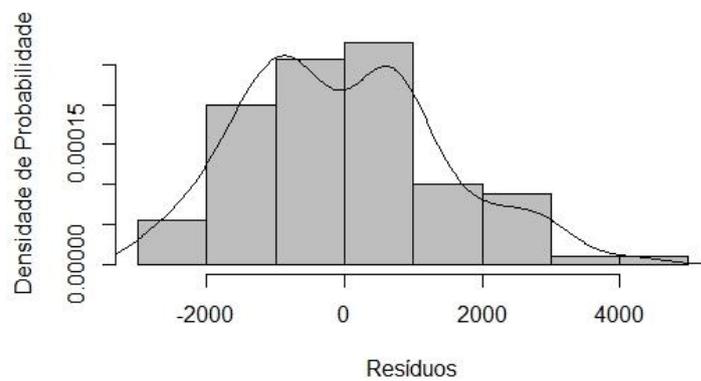
Apêndices 1.31 Histograma do módulo de elasticidade aos 15 anos sem ρ aparente.



Apêndices 1.32 *Half normal plot* e *qqplot* para distribuição residual para o módulo de elasticidade aos 13 e 15 anos de idade sem a variável ρ aparente.



Apêndices 1.33 Histograma do módulo de elasticidade aos 13 e 15 anos sem ρ aparente.



Apêndices 2- Ensaio de compressão paralela as fibras.

Apêndices 2.1 Análise descritiva dos dados para o ensaio de compressão paralela as fibras.

	13 anos					15 anos				
	ρ aparente	LT	TM	fco	Eco	ρ aparente	LT	TM	fco	Eco
	3,0 x 2,0 m					3,0 x 2,0 m				
Média	0,45	21,3	1,54	31,51	5885	0,5	28,06	1,52	39,02	5329
Desv. Pad	0,06	7,21	0,57	8,24	1317	0,05	8,94	0,61	4,78	1122
CV (%)	13,33	33,85	37,01	26,15	22,38	10,00	31,86	40,13	12,25	21,05
Mínimo	0,34	10,92	0,92	21,18	3400	0,4	9,18	0,68	29,82	3786
Máximo	0,54	34,06	2,76	48,97	8092	0,61	40,91	2,53	48,45	7351
IC inferior	0,41	17,30	1,22	26,95	5156	0,47	23,11	1,19	36,37	4708
IC superior	0,48	25,29	1,85	36,07	6615	0,54	33,01	1,86	41,67	5950
	4,0 x 2,0 m					4,0 x 2,0 m				
Média	0,46	25,19	1,54	28	6329	0,49	27,14	1,04	34,53	5991
Desv. Pad	0,04	6,63	0,4	5,74	2724	0,08	8,37	0,2	8,67	2027
CV (%)	8,70	26,32	25,97	20,50	43,04	16,33	30,84	19,23	25,11	33,83
Mínimo	0,38	11,5	0,96	16,62	1851	0,35	14,16	0,86	16,04	3090
Máximo	0,52	34,98	2,23	35,39	10121	0,6	42,9	1,59	47,2	11810
IC superior	0,44	21,52	1,32	24,82	4820	0,45	22,51	0,93	29,73	4868
IC inferior	0,48	29,87	1,76	31,18	7837	0,54	31,77	1,15	39,34	7114
	2,0 x 2,0 m					2,0 x 2,0 m				
Média	0,47	22,91	1,3	27,15	6717	0,47	27,28	1,11	36,61	9247
Desv. Pad	0,02	4,43	0,25	4,49	2182	0,07	8,33	0,44	8,53	4202
CV (%)	4,26	19,34	19,23	16,54	32,48	14,89	30,54	39,64	23,30	45,44
Mínimo	0,43	15,67	0,94	21,56	33,04	0,39	15,25	0,72	24,09	4080
Máximo	0,54	32,75	1,73	36,54	10154	0,57	43,66	2,38	49,68	16872
IC superior	0,46	20,46	1,16	24,66	5509	0,43	22,66	0,86	31,89	6920
IC inferior	0,49	25,37	1,44	29,63	7926	0,51	31,9	1,35	41,33	11574

Nota: ρ aparente: massa específica aparente; LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; fco: Resistência à compressão; Eco: Módulo de elasticidade em compressão; Desv. Pad.: Desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); IC: intervalo de confiança;

Apêndices 2.2 Anova da massa específica aparente em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	,022	1	,022	5,881	,017
Within Groups	,326	88	,004		
Total	,348	89			

Apêndices 2.3 Anova da massa específica aparente em função do espaçamento.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	,001	2	,000	,077	,926
Within Groups	,347	87	,004		
Total	,348	89			

Apêndices 2.4 Anova da porcentagem de lenho tardio em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	427,019	1	427,019	7,806	,006
Within Groups	4814,243	88	54,707		
Total	5241,262	89			

Apêndices 2.5 Anova da porcentagem de lenho tardio em função do espaçamento.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	35,423	2	17,712	,296	,745
Within Groups	5205,839	87	59,837		
Total	5241,262	89			

Apêndices 2.6 Anova do tamanho médio de anéis de crescimento em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1,265	1	1,265	5,923	,017
Within Groups	18,794	88	,214		
Total	20,059	89			

Apêndices 2.7 Anova do tamanho médio de anéis de crescimento em função do espaçamento.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1,706	2	,853	4,045	,021
Within Groups	18,352	87	,211		
Total	20,059	89			

Apêndices 2.8 Anova da resistência à compressão em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1382,349	1	1382,349	27,650	,000
Within Groups	4399,526	88	49,995		
Total	5781,875	89			

Apêndices 2.9 Anova da resistência à compressão em função do espaçamento.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	278,697	2	139,348	2,203	,117
Within Groups	5503,178	87	63,255		
Total	5781,875	89			

Apêndices 2.10 Anova do módulo de elasticidade em compressão em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	6690291,154	1	6690291,154	,900	,345
Within Groups	654420711,064	88	7436598,989		
Total	661111002,218	89			

Apêndices 2.11 Anova do módulo de elasticidade em compressão em função do espaçamento.

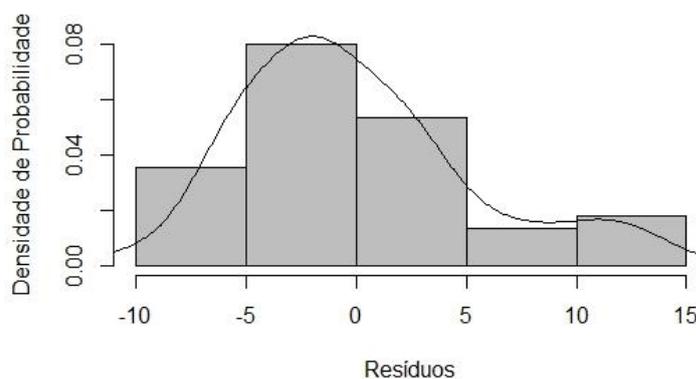
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	92676897,093	2	46338448,547	7,092	,001
Within Groups	568434105,124	87	6533725,346		
Total	661111002,218	89			

Apêndices 2.12 Resultados das funções discriminantes para compressão.

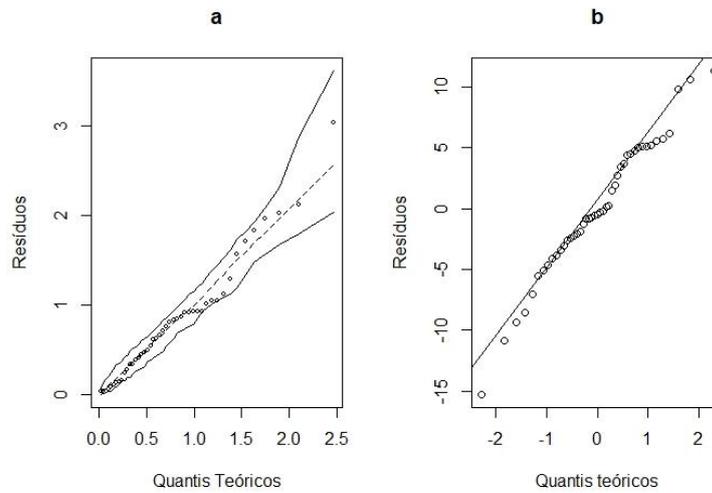
Matriz de estrutura					
Funções discriminantes					
Variáveis	FD1	FD2	FD3	FD4	FD5
TM (cm)	-0,006	-0,621	0,669*	0,009	-0,409
LT (%)	-0,063	0,086	-0,150	0,862*	0,473
ρ aparente (g/cm ³)	-0,074	-0,140	-0,019	0,272	0,949*
fco (MPa)	-0,379	0,258	0,020	0,448	0,767*
Eco (MPa)	0,064	0,602	0,299	-0,230	0,700*

Nota: TM: tamanho médio de anel; LT: porcentagem de lenho tardio; ρ aparente: massa específica aparente; RC: Resistência à compressão; EC: Módulo de elasticidade em compressão; ns = não significativo * = significativo à 5% de probabilidade.

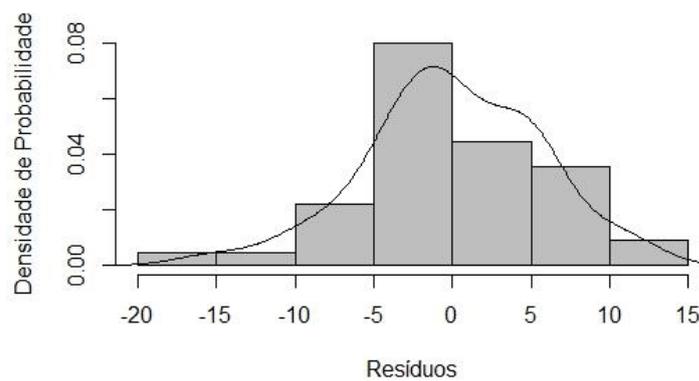
Apêndices 2.13 Histograma da resistência a compressão aos 13 anos de idade com a variável ρ aparente.



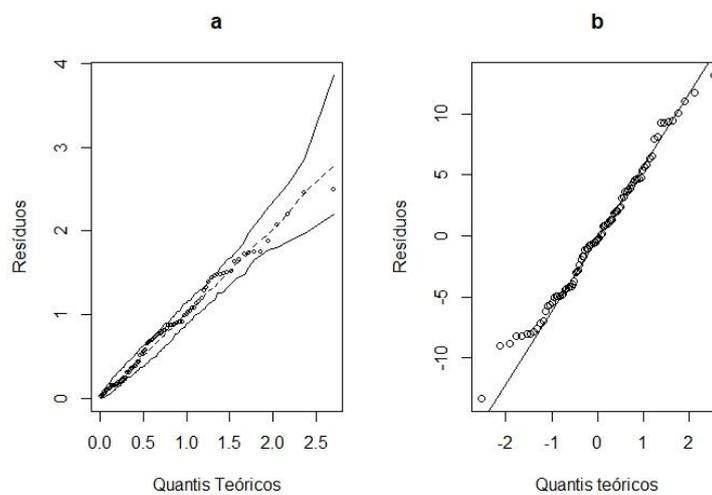
Apêndices 2.14 *Half normal plot e qqplot* para distribuição residual para resistência a compressão aos 15 anos de idade com a variável ρ aparente.



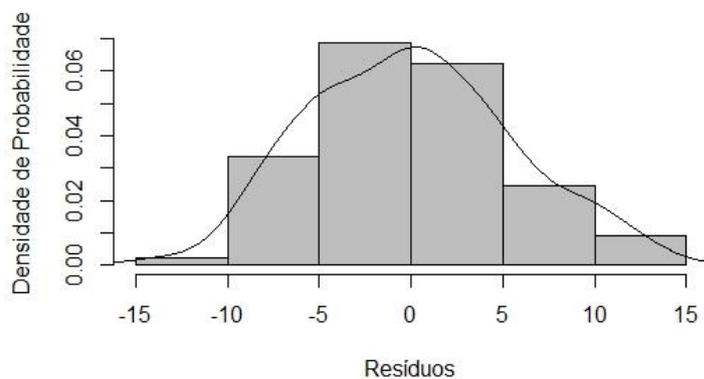
Apêndices 2.15 Histograma da resistência a compressão aos 15 anos de idade com a variável ρ aparente.



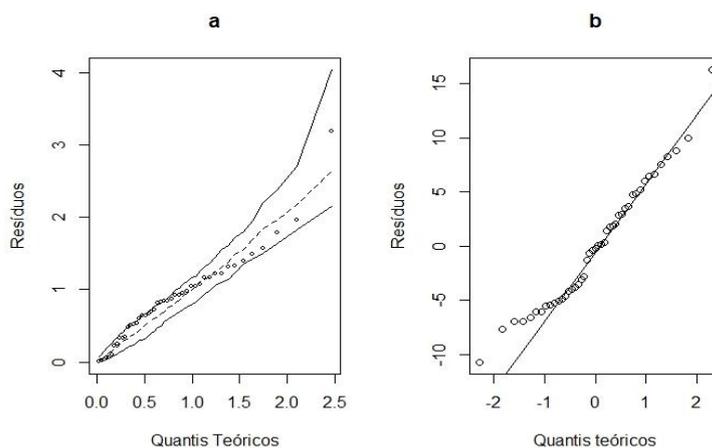
Apêndices 2.16 *Half normal plot e qqplot* para distribuição residual para resistência a compressão aos 13 e 15 anos de idade com a variável ρ aparente.



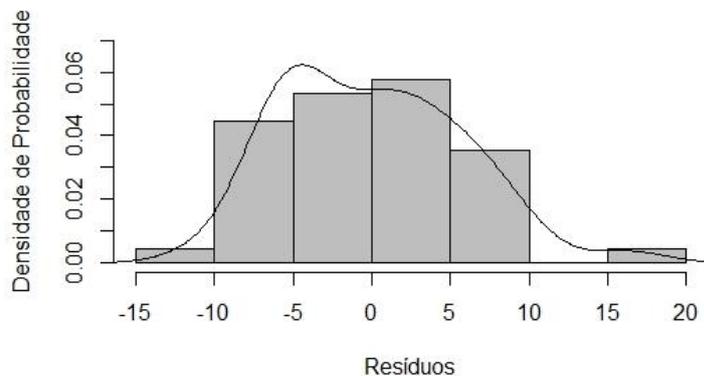
Apêndices 2.17 Histograma da resistência a compressão aos 13 e 15 anos de idade com a variável ρ aparente.



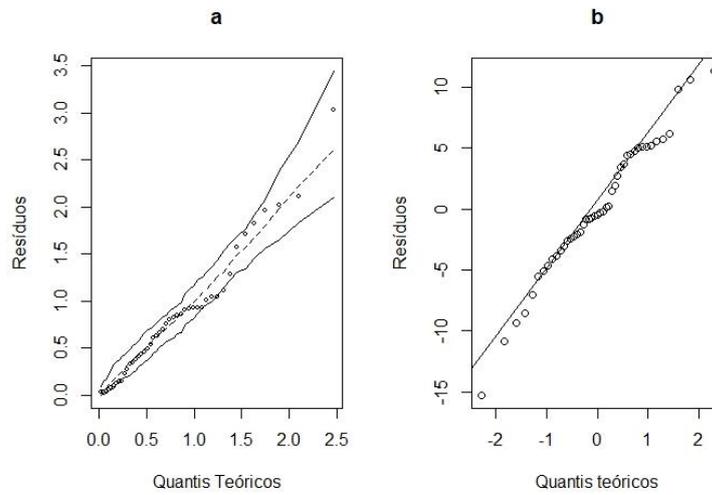
Apêndices 2.18 *Half normal plot* e *qqplot* para distribuição residual para resistência a compressão aos 13 anos de idade sem a variável ρ aparente.



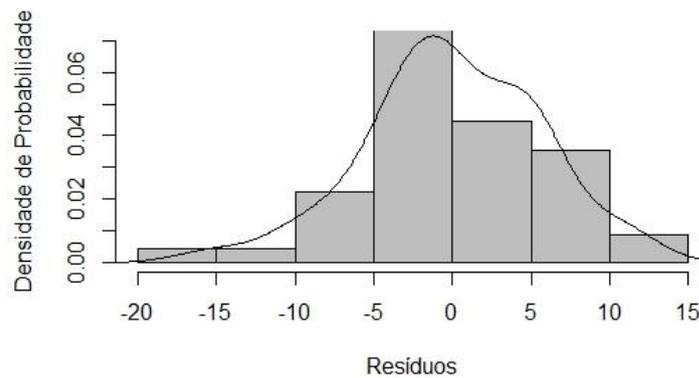
Apêndices 2.19 Histograma da resistência a compressão aos 13 de idade sem a variável ρ aparente.



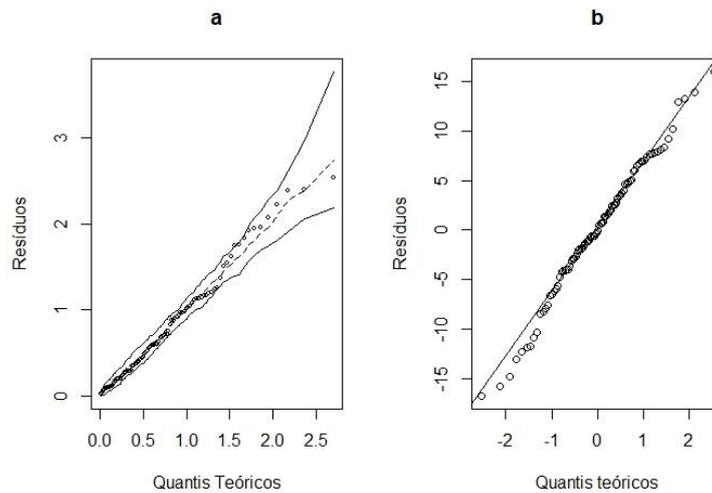
Apêndices 2.20 *Half normal plot e qqplot* para distribuição residual para resistência a compressão aos 15 anos de idade sem a variável ρ aparente.



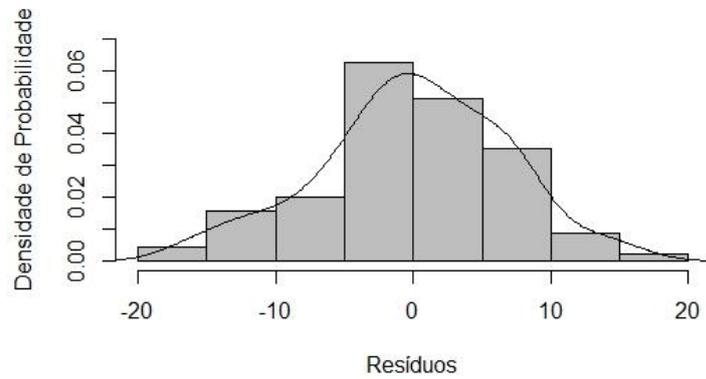
Apêndices 2.21 Histograma da resistência a compressão aos 15 de idade sem a variável ρ aparente.



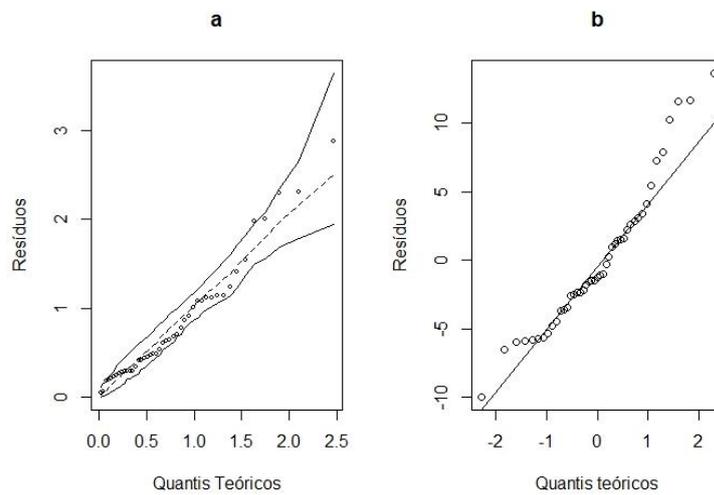
Apêndices 2.22 *Half normal plot e qqplot* para distribuição residual para resistência a compressão aos 13 e 15 anos de idade sem a variável ρ aparente.



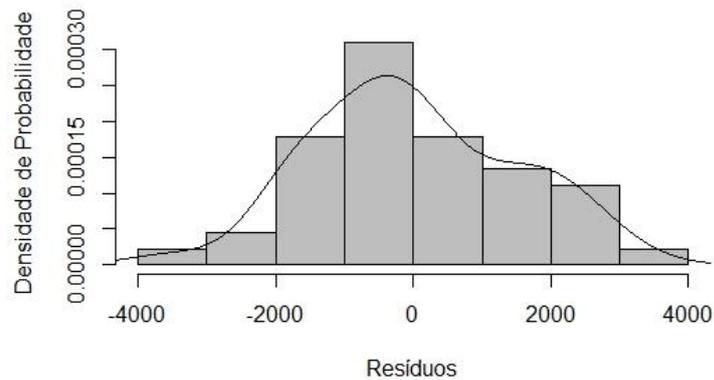
Apêndices 2.23 Histograma da resistência a compressão aos 13 e 15 de idade sem a variável ρ aparente.



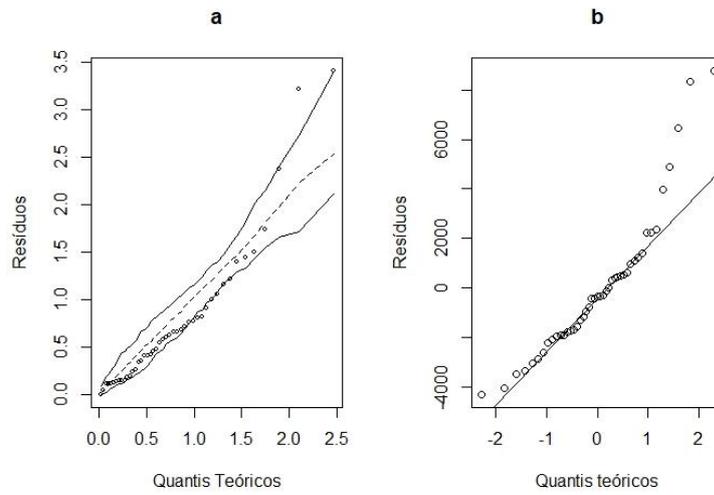
Apêndices 2.24 *Half normal plot* e *qqplot* para distribuição residual para módulo de elasticidade em compressão aos 13 anos de idade sem a variável ρ aparente.



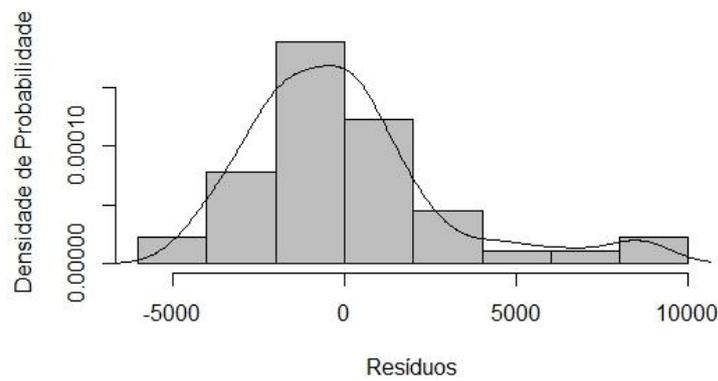
Apêndices 2.25 Histograma do módulo de elasticidade em compressão aos 13 de idade sem a variável ρ aparente.



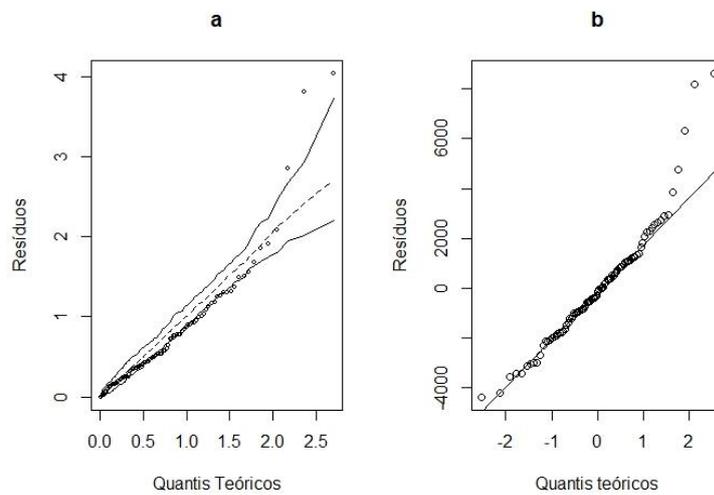
Apêndices 2.26 *Half normal plot* e *qqplot* para distribuição residual para módulo de elasticidade em compressão aos 15 anos de idade sem a variável ρ aparente.



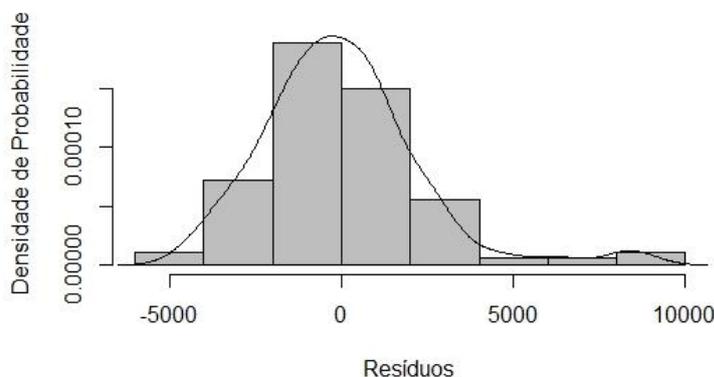
Apêndices 2.27 Histograma do módulo de elasticidade em compressão aos 15 de idade sem a variável ρ aparente.



Apêndices 2.28 *Half normal plot* e *qqplot* para distribuição residual para módulo de elasticidade em compressão aos 13 e 15 anos de idade sem a variável ρ aparente.



Apêndices 2.29 Histograma do módulo de elasticidade em compressão aos 13 e 15 de idade sem a variável ρ aparente.



Apêndices 3- Ensaio de cisalhamento.

Apêndices 3.1 Análise descritiva dos dados para o ensaio de cisalhamento.

	13 anos				15 anos			
	ρ aparente	LT	TM	fvo	ρ aparente	LT	TM	fvo
	3,0 x 2,0 m				3,0 x 2,0 m			
Média	0,46	23,38	1,66	10,14	0,51	28,21	1,52	8,82
Desv. Pad	0,06	0,58	0,58	2,22	0,06	10,02	1,03	0,75
CV (%)	13,04	2,48	34,94	21,89	11,76	35,52	67,76	8,50
Mínimo	0,34	10	0,81	7,01	0,42	12,32	0,63	7,52
Máximo	0,54	43,06	2,5	13,83	0,59	40	3,5	10,14
IC inferior	0,43	17,87	1,34	8,92	0,48	22,67	0,95	8,40
IC superior	0,50	28,89	1,99	11,37	0,55	33,76	2,09	9,23
	4,0 x 2,0 m				4,0 x 2,0 m			
Média	0,47	22,58	1,52	8,53	0,4	18,37	1,85	10,02
Desv. Pad	0,04	5,25	0,57	1,94	0,02	5,04	0,46	1,28
CV (%)	8,51	23,25	37,50	22,74	5,00	27,44	24,86	12,77
Mínimo	0,41	10,77	1	5,27	0,36	10,29	1,08	8,15
Máximo	0,52	29,23	3,25	11,5	0,45	27	2,5	12,98
IC superior	0,45	19,67	1,21	7,45	0,39	15,58	1,6	9,31
IC inferior	0,49	25,49	1,83	9,6	0,41	21,15	2,11	10,73
	2,0 x 2,0 m				2,0 x 2,0 m			
Média	0,45	26,42	1,25	8,68	0,46	27,11	1,14	11,25
Desv. Pad	0,03	6,86	0,23	2,47	0,05	6,44	0,62	1,56
CV (%)	6,67	25,97	18,40	28,46	10,87	23,76	54,39	13,87
Mínimo	0,36	19,29	0,98	3,79	0,4	12,76	0,69	8,71
Máximo	0,48	41,43	1,8	11,42	0,56	37,69	2,35	15,04
IC superior	0,43	22,63	1,13	7,31	0,43	23,55	0,8	10,38
IC inferior	0,46	30,22	1,38	10,04	0,49	30,68	1,49	12,11

Nota: ρ aparente: massa específica aparente; LT: porcentagem de lenho tardio; TM: tamanho médio de anel; Fvo: Resistência ao cisalhamento; Desv. Pad.: Desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); IC: intervalo de confiança;

Apêndices 3.2 Anova da massa específica aparente em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	,000	1	,000	,056	,813
Within Groups	,293	88	,003		
Total	,293	89			

Apêndices 3.3 Anova da massa específica aparente em função do espaçamento.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	,046	2	,023	8,038	,001
Within Groups	,248	87	,003		
Total	,293	89			

Apêndices 3.4 Anova da porcentagem de lenho tardio em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4,303	1	4,303	,066	,798
Within Groups	5767,838	88	65,544		
Total	5772,142	89			

Apêndices 3.5 Anova da porcentagem de lenho tardio em função do espaçamento.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	689,352	2	344,676	5,900	,004
Within Groups	5082,790	87	58,423		
Total	5772,142	89			

Apêndices 3.6 Anova do tamanho médio de anéis de crescimento em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	,016	1	,016	,037	,847
Within Groups	38,261	88	,435		
Total	38,277	89			

Apêndices 3.7 Anova do tamanho médio de anéis de crescimento em função do espaçamento.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4,065	2	2,033	5,169	,008
Within Groups	34,212	87	,393		
Total	38,277	89			

Apêndices 3.8 Anova da resistência ao cisalhamento em função da idade.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	18,660	1	18,660	4,824	,031
Within Groups	340,423	88	3,868		
Total	359,082	89			

Apêndices 3.9 Anova da resistência ao cisalhamento em função do espaçamento.

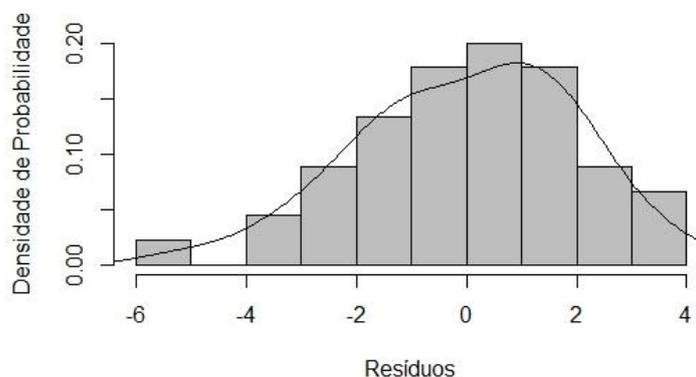
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7,511	2	3,756	,929	,399
Within Groups	351,571	87	4,041		
Total	359,082	89			

Apêndices 3.10 Resultados das funções discriminantes, para cisalhamento.

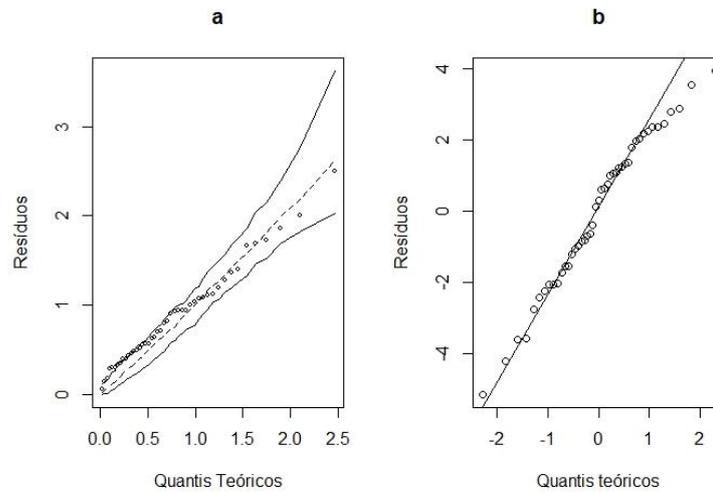
Matriz de estrutura				
Variáveis	Funções discriminantes			
	FD1	FD2	FD3	FD4
LT (%)	0,067	0,972*	0,202	-0,095
ρ aparente (g/cm^3)	0,234	0,884*	-0,304	-0,266
TM (cm)	0,056	-0,743	-0,189	0,640
fvo (MPa)	-0,193	0,600	-0,479	0,611*

Nota: LT: porcentagem de lenho tardio; ρ aparente: massa específica aparente TM: tamanho médio de anel; fvo: Resistência ao cisalhamento; ^{ns} = não significativo * = significativo à 5% de probabilidade.

Apêndices 3.11 Histograma da resistência ao cisalhamento aos 13 anos de idade com a variável ρ aparente.



Apêndices 3.12 *Half normal plot e qqplot* para distribuição residual para resistência ao cisalhamento aos 13 anos de idade sem a variável ρ aparente.



Apêndices 3.13 Histograma da resistência ao cisalhamento aos 13 anos de idade sem a variável ρ aparente.

