

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

FABIANA YUKIKO MORITANI

Proposta de classes de resistência para peças estruturais de madeira:
Eucalyptus urograndis, Pinus taeda e Schizolobium amazonicum (Paricá)

São Carlos

2018

FABIANA YUKIKO MORITANI

**Proposta de classes de resistência para peças estruturais de madeira:
Eucalyptus urograndis, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá)**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil (Estruturas).

Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Junior

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE
ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os
dados inseridos pelo(a) autor(a).

M862p

Moritani, Fabiana Yukiko

Proposta de classes de resistência para peças estruturais de madeira: Eucalyptus urograndis, Pinus taeda e Schizolobium amazonicum (Paricá) / Fabiana Yukiko Moritani; orientador Carlito Calil Junior. São Carlos, 2018.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Classes de resistência. 2. Classificação. 3. Caracterização de peças estruturais de madeira. 4. Madeira estrutural. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **FABIANA YUKIKO MORITANI**.

Título da dissertação: "Proposta de classes de resistência para peças estruturais de madeira: *Eucalyptus urograndis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá)".

Data da defesa: 19/06/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Carliño Calil Junior (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Sergio Augusto Rodrigues**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP -
Botucatu)

APROVADO

Prof. Dr. **Adriano Wagner Ballarín**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP -
Botucatu)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):

Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me proporcionar luz e perseverança, principalmente, nos momentos mais difíceis da minha vida.

Aos meus pais e meus irmãos, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao meu namorado Allan, pelo amor cultivado todos os dias, compreensão, companheirismo e por sempre me fazer feliz.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlito Calil Junior, pela oportunidade para que esse trabalho pudesse ser realizado, pelos ensinamentos e todo apoio nesses anos de mestrado.

Aos professores, Dr. Adriano Wagner Ballarin, Dr. Antonio Alves Dias e Dr. Sergio Augusto Rodrigues pela disponibilidade e valiosa contribuição no trabalho.

Ao Jaime, que não mediu esforços para me ajudar por vários dias de ensaios.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) e do Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira (LaMEM) que estiveram sempre dispostos a ajudar no que fosse possível, em especial, ao Samuel e ao Arnaldo pela dedicação na realização dos ensaios.

Aos colegas e amigos do LaMEM, em especial ao Leonardo, Felipe, Marcos, Rodrigo e Tiago pela disponibilidade e pelas trocas de conhecimentos.

Aos meus amigos da ME-05, Emerson, Francielle e Tito pelo companheirismo e por estarem presentes nos dias felizes e mais difíceis do mestrado. E ao Felipi que sempre esteve conosco em muitos momentos.

Ao Tiago Morkis, pela amizade e por toda a ajuda.

Aos amigos do SET, Mariana, Alex, Giovane, Rafaella, Vanessa e Yagho.

À AMATA pelo material concedido.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade de São Paulo pela oportunidade do mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado concedida.

RESUMO

MORITANI, F. Y. **Proposta de classes de resistência para peças estruturais de madeira:** *Eucalyptus urograndis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá). 2018. 176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A madeira de floresta plantada se destaca no setor florestal e da construção civil, diante das restrições para o uso em larga escala das espécies tropicais. Devido ao rápido crescimento e as características inerentes às árvores, as propriedades mecânicas de espécies de floresta plantada são influenciadas pelas características de secagem e de crescimento. A norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997 está em fase de revisão e, dentre os itens discutidos pela comissão científica estão os métodos de classificação visual e mecânica e a caracterização de resistência para peças em dimensões estruturais. O trabalho teve como objetivo propor classes de resistência de três espécies de madeira de floresta plantada (*Eucalyptus urograndis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá)) para uso estrutural. Foram realizados os ensaios de classificação visual e mecânica para peças estruturais e os ensaios de caracterização de resistência para que fosse possível estimar as propriedades mecânicas por meio da classe de resistência atribuída na classificação visual e mecânica. Os resultados foram testados estatisticamente para avaliar as propriedades mecânicas das classes de resistência de cada espécie e compará-las com as normas estrangeira e internacional. Com base nos resultados obtidos e nas análises estatísticas realizadas, foram propostas três classes de resistência para o *Eucalyptus urograndis*, duas classes de resistência para o *Schizolobium amazonicum* (Paricá) e para o *Pinus taeda*.

Palavras-chave: Classes de resistência. Classificação. Caracterização de peças estruturais de madeira. Madeira estrutural.

ABSTRACT

MORITANI, F. Y. **Proposal for strength classes for structural timber:** *Eucalyptus urograndis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá). 2018. 176f. Dissertation (MSc. in Civil Engineering (Structures)) – Department of Structural Engineering, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

Timber from reforestation species are been used for civil construction, considering the restrictions on the large-scale use of tropical species. The mechanical properties of reforestation species are influenced by the drying and growth characteristics, due to the fast growth and the inherent characteristics of the trees. The Brazilian standard ABNT NBR 7190: 1997 is under review and among the items is being discussed by the scientific committee are the methods of visual and mechanical grading and the full-size testing for structural elements. The aim of this work was to propose strength classes of three timber species from reforestation species (*Eucalyptus urograndis*, *Pinus taeda* and *Schizolobium amazonicum* - Paricá) for structural use. Grading tests based on the visual and mechanical characteristics were performed and compared with the strength and stiffness properties making possible to estimate the mechanical properties by of the strength classes assigned in the visual and mechanical grading. The results were statistically tested to evaluate the mechanical properties for the strength classes of each species and to compare them with the foreign and international standards. According to the results obtained and the statistical analysis three strength classes were proposed for *Eucalyptus urograndis*, two strength classes for *Schizolobium amazonicum* (Paricá) and *Pinus taeda*.

Keywords: Strength classes. Grading. Strength graded timber. Structural timber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nós em peças estruturais	46
Figura 2 – Inclinação das fibras (i)	47
Figura 3 – (a) Fissura não passante, (b) Fissura passante	48
Figura 4 – (a) Encurvamento, (b) Arqueamento, (c) Torcimento, (d) Encanoamento ..	48
Figura 5 - Esmoado.....	49
Figura 6 – Lotes de <i>Eucalyptus urograndis</i> (a), <i>Schizolobium amazonicum</i> (Paricá) (b) e <i>Pinus taeda</i> (c).....	54
Figura 7 – Ensaio de vibração transversal	55
Figura 8 – Esquema de ensaio para medir a resistência e rigidez à flexão	56
Figura 9 – Ensaio de flexão estática	56
Figura 10 – Esquema de ensaio para medir a resistência à tração paralela às fibras	58
Figura 11 – Máquina de ensaio de tração Metriguard 422 <i>Tension Proof Testers</i>	58
Figura 12 – Esquema de ensaio para medir a resistência à tração normal às fibras	59
Figura 13 – Ensaio de tração normal	60
Figura 14 – Ensaio de compressão paralela.....	61
Figura 15 – Esquema de ensaio para a determinação da resistência à compressão e rigidez normal às fibras	62
Figura 16 – Ensaio de compressão normal às fibras.....	62
Figura 17 – Gráfico de carga aplicada x deslocamento	63
Figura 18- Esquema de ensaio para medir a resistência ao cisalhamento paralela às fibras	64
Figura 19 – Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	65
Figura 20 – Estimativa dos limites inferior e superior do 5-percentil de resistência da amostra	69
Figura 21 – Peças com defeitos de fissuras detectados no <i>Eucalyptus urograndis</i>	79
Figura 22 – Peça com defeito de encurvamento detectado no <i>Pinus taeda</i>	79
Figura 23 – Peça com defeitos de torcimento, fissura não passante e encanoamento encontrados no <i>Eucalyptus urograndis</i>	80
Figura 24 – Peça com defeito de torcimento detectado no <i>Eucalyptus urograndis</i>	80
Figura 25 – Peça com defeito de encanoamento detectado no <i>Eucalyptus urograndis</i> ..	80
Figura 26 – Peça com defeito de arqueamento acentuado no <i>Pinus taeda</i>	81

Figura 27 – Peça com presença de esmoado encontrado no <i>Pinus taeda</i>	81
Figura 28 – Peças com presença de nós no <i>Pinus taeda</i>	81
Figura 29 – Boxplot dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din})	84
Figura 30 – Boxplot dos resultados de MOE	87
Figura 31 – Boxplot dos resultados de MOR	88
Figura 32 – Boxplot dos resultados de tração paralela às fibras	92
Figura 33 – Boxplot dos resultados da resistência a tração normal às fibras	94
Figura 34 – Boxplot dos resultados da resistência a compressão paralela às fibras	97
Figura 35 – Boxplot dos resultados da a compressão normal às fibras (f_{c90}).....	100
Figura 36 – Boxplot dos resultados da rigidez na compressão normal às fibras (K_{c90})	100
Figura 37 – Boxplot dos resultados da resistência a compressão normal às fibras no limite de plastificação (f_{c90y})	101
Figura 38 – Modo de ruptura apresentado por cisalhamento	105
Figura 39 – Modo de ruptura apresentado por tração	105
Figura 40 – Boxplot dos resultados da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})	107
Figura 41 – Análise da distribuição das propriedades por meio do diagrama de boxplot para as peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	109
Figura 42 – Análise da distribuição das propriedades por meio do diagrama de boxplot para as peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	110
Figura 43 – Análise da distribuição das propriedades por meio do diagrama de boxplot para as peças de <i>Pinus taeda</i>	110
Figura 44 – Dendograma da análise de agrupamento das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	119
Figura 45 – Gráfico do comportamento da soma de quadrados dentro dos grupos para as peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	121
Figura 46 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC2 para as peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	122
Figura 47 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC3 para as peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	123
Figura 48 – Dendograma da análise de agrupamento das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	125

Figura 49 – Gráfico do comportamento da soma de quadrados dentro de grupos para as peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	127
Figura 50 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC2 para as peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	128
Figura 51 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC3 para as peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	129
Figura 52 – Dendograma da análise de agrupamento das peças de <i>Pinus taeda</i>	130
Figura 53 – Gráfico do comportamento da soma de quadrados dentro de grupos para as peças de <i>Pinus taeda</i>	132
Figura 54 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC2 para as peças de <i>Pinus taeda</i>	133
Figura 55 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC3 para as peças de <i>Pinus taeda</i>	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados estatísticos da área de florestas plantadas (ha), por cultura, em 2016	29
Tabela 2 - Valores médios de propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de <i>Eucalyptus</i>	31
Tabela 3 – Valores médios das propriedades da madeira de lotes de <i>Eucalyptus</i> obtidos nos ensaios segundo a ABNT NBR 7190: 1997.....	32
Tabela 4 – Valores médios, mínimos e máximos das propriedades físicas e mecânicas do <i>E. urophylla</i>	33
Tabela 5 – Tabela de Classes de Resistência definida para a amostra total	33
Tabela 6 - Valores médios de propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de <i>Pinus</i> (ABNT NBR 7190:1997)	34
Tabela 7 – Propriedades mecânicas de peças estruturais de <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i> agrupados.....	35
Tabela 8 – Propriedades mecânicas de peças estruturais de <i>Pinus spp.</i>	36
Tabela 9 – Propriedades mecânica e densidade aparente (12%) da madeira de espécies de <i>Pinus</i> tropicais e <i>Pinus taeda</i>	36
Tabela 10 – Propriedades mecânicas de peças estruturais de <i>Pinus spp.</i>	37
Tabela 11 – Propriedades mecânicas e peso específico do gênero <i>Schizolobium</i>	39
Tabela 12 - Valores característicos de resistência para o <i>Schizolobium amazonicum</i> (Paricá).....	39
Tabela 13 – Classes de resistência das coníferas com valores na condição-padrão de referência U=12%	40
Tabela 14 – Classes de resistências das dicotiledôneas com valores na condição-padrão de referência U=12%	41
Tabela 15 – Classes de resistência para as espécies <i>softwood</i> (ISO 16598: 2014).....	42
Tabela 16 – Classes de resistência para as espécies <i>hardwood</i> (ISO 16598: 2014).....	43
Tabela 17 - Classes de resistência para as espécies <i>softwood</i> (prEN 338: 2012)	43
Tabela 18 - Classes de resistência para as espécies <i>hardwood</i> (prEN 338: 2012)	44
Tabela 19 - Quantidades de peças para cada lote das espécies avaliadas.....	53
Tabela 20 – Quantidades de peças classificadas visualmente	75

Tabela 21 – Tabela de classificação visual e mecânica para peças estruturais de <i>Eucalyptus urograndis</i>	76
Tabela 22 – Tabela de classificação visual e mecânica para peças estruturais de <i>Schizolobium amazonicum</i> (Paricá)	77
Tabela 23 – Tabela de classificação visual e mecânica das peças estruturais de <i>Pinus taeda</i>	78
Tabela 24 – Estatística descritiva dos resultados da densidade aparente	82
Tabela 25 – Densidade aparente média em cada uma das classes de resistência das espécies ensaiadas	82
Tabela 26 – Estatística descritiva dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din})	83
Tabela 27 – Módulo de elasticidade dinâmico médio em cada uma das classes de resistência das espécies ensaiadas	84
Tabela 28 – Estatística descritiva dos resultados do módulo de elasticidade à flexão (MOE)	85
Tabela 29 – Módulo de elasticidade médio em cada uma das classes de resistência das espécies ensaiadas	86
Tabela 30 – Estatística descritiva dos resultados do módulo de resistência à flexão (MOR)	87
Tabela 31 – Valores característicos do módulo de ruptura à flexão (MOR) das classes de resistência	89
Tabela 32 – Estatística descritiva dos resultados da resistência a tração paralela às fibras (f_{t0})	90
Tabela 33 – Valores característicos da resistência a tração paralela às fibras (f_{t0}) das classes de resistência	91
Tabela 34 – Estatística descritiva dos resultados da resistência a tração normal às fibras (f_{t90})	93
Tabela 35 – Valores característicos da resistência a tração normal às fibras (f_{t90}) das classes de resistência	94
Tabela 36 – Estatística descritiva dos resultados da resistência a compressão paralela às fibras (f_{c0})	95
Tabela 37 – Valores característicos da resistência a compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) das classes de resistência	96

Tabela 38 – Estatística descritiva dos resultados da resistência a compressão normal às fibras (f_{c90})	98
Tabela 39 – Estatística descritiva dos resultados da rigidez na compressão normal às fibras (K_{c90}).....	98
Tabela 40 – Estatística descritiva dos resultados da resistência a compressão normal às fibras no limite de plastificação (f_{c90y}).....	98
Tabela 41 – Valores característicos da resistência a compressão normal às fibras ($f_{c90,k}$) das classes de resistência	101
Tabela 42 – Valores característicos da resistência compressão normal às fibras no limite de plastificação ($f_{c90y,k}$).....	102
Tabela 43 – Valores médios da rigidez na compressão normal às fibras em cada uma das classes de resistência das espécies ensaiadas	103
Tabela 44 – Estatística descritiva dos resultados da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}).....	103
Tabela 45 - Modos de ruptura dos corpos de provas do ensaio de cisalhamento	104
Tabela 46 – Valores característicos da resistência cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v0,k}$)	106
Tabela 47 – Valores das propriedades mensuradas em cada classe da proposta: média (desvio padrão) e mediana para <i>Eucalyptus urograndis</i>	111
Tabela 48 – Valor-p para o teste de Dunn, nas comparações entre as classes de resistências (C1, C2 e C3)	112
Tabela 49 – Valores das propriedades mensuradas em cada classe da proposta: média (desvio padrão) e mediana para <i>Schizolobium amazonicum</i>	113
Tabela 50 – Valores das propriedades mensuradas em cada classe da proposta: média (desvio padrão) e mediana para <i>Pinus taeda</i>	113
Tabela 51 – Correlação de Spearman entre as propriedades do <i>Eucalyptus urograndis</i>	114
Tabela 52 – Correlação de Spearman entre as propriedades do <i>Schizolobium amazonicum</i>	115
Tabela 53 – Correlação de Spearman entre as propriedades do <i>Pinus taeda</i>	117
Tabela 54 – Matriz de classificação das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	120
Tabela 55 – Média e desvio padrão das variáveis originais para a análise de agrupamento das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	120

Tabela 56 – Associação das variáveis com as propriedades principais das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	122
Tabela 57 – Matriz de correlação para <i>Eucalyptus urograndis</i>	123
Tabela 58 – Valores das propriedades mensuradas para cada grupo (G1, G2 e G3) da análise de agrupamento: média (desvio padrão) e mediana para <i>Eucalyptus urograndis</i>	124
Tabela 59 – Valor-p para o teste de Dunn, nas comparações entre os agrupamentos (G1, G2 e G3).....	124
Tabela 60 – Matriz de classificação das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	126
Tabela 61 – Média e desvio padrão das variáveis originais para a análise de agrupamento das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	126
Tabela 62 – Associação das variáveis com as propriedades principais das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	128
Tabela 63 – Matriz de correlação para <i>Schizolobium amazonicum</i>	129
Tabela 64 – Matriz de classificação das peças de <i>Pinus taeda</i>	131
Tabela 65 – Média e desvio padrão das variáveis originais para a análise de agrupamento das peças de <i>Pinus taeda</i>	131
Tabela 66 – Associação das variáveis com as propriedades principais das peças de <i>Pinus taeda</i>	133
Tabela 67 – Matriz de correlação para <i>Pinus taeda</i>	134
Tabela 68 – Valores obtidos para o teste de Anderson-Darling para normalidade....	135
Tabela 69 – Tabela de classes de resistência para peças estruturais de <i>Eucalyptus urograndis</i>	136
Tabela 70 – Tabela de classes de resistência para peças estruturais de <i>Schizolobium amazonicum</i> (Paricá).....	136
Tabela 71 – Tabela de classes de resistência para peças estruturais de <i>Pinus taeda</i> .	137
Tabela.72 – Resultados obtidos da densidade aparente das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	149
Tabela 73 – Resultados obtidos da densidade aparente das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	150
Tabela 74 – Resultados obtidos da densidade aparente das peças de <i>Pinus taeda</i>	150
Tabela.75 – Resultados obtidos do Módulo de elasticidade dinâmica (E_{din}) das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	151
Tabela 76 – Resultados obtidos do Módulo de elasticidade dinâmica (E_{din}) das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	152

Tabela 77 – Resultados obtidos do Módulo de elasticidade dinâmica (E_{din}) das peças de <i>Pinus taeda</i>	152
Tabela 78– Resultados obtidos dos Módulos de elasticidade estático (MOE) das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	153
Tabela 79 – Resultados obtidos do Módulo de ruptura à flexão (MOR) das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	154
Tabela 80 – Resultados obtidos dos Módulos de elasticidade estático (MOE) das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	155
Tabela 81 – Resultados obtidos do Módulo de ruptura à flexão (MOR) das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	156
Tabela 82 – Resultados obtidos dos Módulos de elasticidade estático (MOE) das peças de <i>Pinus taeda</i>	156
Tabela 83 - Resultados obtidos do Módulo de ruptura à flexão (MOR) das peças de <i>Pinus taeda</i>	157
Tabela 84 – Resultados obtidos da resistência a tração paralela às fibras das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	159
Tabela 85 – Resultados obtidos da resistência a tração paralela às fibras das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	159
Tabela 86 - Resultados obtidos da resistência a tração paralela às fibras das peças de <i>Pinus taeda</i>	160
Tabela 87 – Resultados obtidos da resistência a tração normal às fibras das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	161
Tabela 88 – Resultados obtidos da resistência a tração normal às fibras das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	162
Tabela 89 - Resultados obtidos da resistência a tração normal às fibras das peças de <i>Pinus taeda</i>	163
Tabela 90 – Resultados obtidos para a resistência a compressão paralela às fibras das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	165
Tabela 91 – Resultados obtidos para a resistência a compressão paralela às fibras das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	166
Tabela 92 - Resultados obtidos para a resistência a compressão paralela às fibras das peças de <i>Pinus taeda</i>	167
Tabela 93 – Resultados obtidos da resistência a compressão normal às fibras das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	169

Tabela 94 – Resultados obtidos para o limite de plastificação das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	170
Tabela 95 – Resultados obtidos para a rigidez na compressão normal às fibras das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	171
Tabela 96 – Resultados obtidos da resistência a compressão normal às fibras das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	171
Tabela 97 – Resultados obtidos para o limite de plastificação das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	172
Tabela 98 – Resultados obtidos para a rigidez na compressão normal às fibras das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	172
Tabela 99 – Resultados obtidos da resistência a compressão normal às fibras das peças de <i>Pinus taeda</i>	172
Tabela 100 – Resultados obtidos para o limite de plastificação das peças de <i>Pinus taeda</i>	173
Tabela 101 – Resultados obtidos para a rigidez na compressão normal às fibras das peças de <i>Pinus taeda</i>	173
Tabela 102 – Resultados obtidos da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das peças de <i>Eucalyptus urograndis</i>	175
Tabela 103 – Resultados obtidos da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das peças de <i>Schizolobium amazonicum</i>	176
Tabela 104 – Resultados obtidos da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das peças de <i>Pinus taeda</i>	176

LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho_{ap(12\%)}$	Densidade aparente (12% de umidade);
ρ_{bas}	Densidade básica;
$\rho_{bas,m}$	Densidade média básica;
b	Largura da seção transversal;
CV_{tail}	Coefficiente de variação da distribuição de Weibull;
E_{c0}	Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras;
$E_{c0,m}$	Módulo de elasticidade médio a compressão;
f_{c0}	Resistência a compressão paralela às fibras;
f_{c90}	Resistência a compressão normal às fibras;
f_{c90y}	Resistência a compressão normal às fibras no limite de plastificação;
$f_{data,0,05}$	Valor do 5-percentil;
$f_{data,0,05,1}$	Valor do limite inferior do 5-percentil;
f_k	Resistência característica;
f_{t0}	Resistência a tração paralela às fibras;
f_{t90}	Resistência a tração normal às fibras;
$F_{0,1h}$	Carga correspondente a um deslocamento de 0,1h mm;
F_{ult}	Carga de ruptura;
f_v	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
h	Altura da seção transversal;
L	Vão livre entre os apoios;
MOE	Módulo de elasticidade à flexão;
E_{din}	Módulo de elasticidade dinâmico;
MOR	Módulo de resistência à flexão;
N	Tamanho da amostra;
p_i	Percentil do i -ésimo elemento.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	7
RESUMO.....	9
SUMÁRIO.....	25
1 INTRODUÇÃO	27
1.1 Considerações iniciais.....	27
1.2 Motivação	28
1.3 Objetivo	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 Madeiras de florestas plantadas	29
2.1.1 Gênero <i>Eucalyptus</i>	30
2.1.2 Gênero <i>Pinus</i>	34
2.1.3 <i>Schizolobium amazonicum</i> (Paricá)	38
2.2 Classificação estrutural da madeira (<i>timber grading</i>).....	40
2.2.1 Classificação visual.....	45
2.2.2 Classificação mecânica	50
3 MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 Material experimental	53
3.1.1 Características gerais.....	53
3.1.2 Preparação dos corpos de prova – ensaios laboratoriais	54
3.2 Métodos	54
3.2.1 Classificação visual.....	54
3.2.2 Avaliação não destrutiva do módulo de elasticidade	55
3.2.3 Avaliação destrutiva das propriedades mecânicas	55
3.3 Análises estatísticas	65

3.3.1	Teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis e teste de Dunn	66
3.3.2	Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney	67
3.3.3	Análise de agrupamento	67
3.3.4	Análise de componentes principais	69
3.4	Determinação do valor característico	69
3.4.1	ISO 13910: 2005.....	69
3.4.2	UNE-EN 14358: 2016	71
3.4.3	ABNT NBR 7190: 1997	72
3.5	Proposta de tabela de classes de resistência	73
4	RESULTADOS OBTIDOS	75
4.1	Classificação visual	75
4.2	Propriedades mecânicas das peças estruturais.....	83
4.2.1	Módulo de elasticidade dinâmico pelo método da vibração transversal ..	83
4.2.2	Flexão estática	85
4.2.3	Tração paralela às fibras	90
4.2.4	Tração normal às fibras	92
4.2.5	Compressão paralela às fibras	95
4.2.6	Compressão normal às fibras.....	97
4.2.7	Cisalhamento paralelo às fibras	103
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	109
5.1	Análise das propriedades mecânicas entre as classes de resistência	109
5.1.1	Boxplot	109
5.1.2	Testes não-paramétricos	111
5.2	Correlação simples entre propriedades mecânicas e físicas	114
5.3	Técnica hierárquica de agrupamento.....	118
5.3.1	Eucalyptus urograndis	118
5.3.2	Schizolobium amazonicum	125

5.3.3 Pinus taeda	130
5.4 Tabela de classes de resistência	135
6 CONCLUSÕES.....	139
7 REFERÊNCIAS	143
Apêndice 1 – Densidade Aparente.....	149
Apêndice 2 – Módulo de elasticidade dinâmico (E_{din})	151
Apêndice 3 – Ensaio de flexão estática	153
Apêndice 4 – Ensaio de tração paralela às fibras	159
Apêndice 5 – Ensaio de tração normal às fibras.....	161
Apêndice 6 – Ensaio de compressão paralela às fibras	165
Apêndice 7 – Ensaio de compressão normal às fibras.....	169
Apêndice 8 – Ensaio de cisalhamento paralela às fibras	175

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A madeira é valorizada por suas características intrínsecas e por ser renovável e de baixo consumo energético para a sua produção. É matéria-prima para a indústria de papel e celulose, siderurgia a carvão vegetal, indústria moveleira e indústrias de madeira serrada, painéis reconstituídos, compensados e laminados, entre outros.

As florestas plantadas de eucaliptos e pinus estão se tornando cada vez mais importante no setor florestal, visto que a madeira é uma matéria-prima vital para a indústria e fonte cada vez mais competitiva de bioenergia, além de contribuir para a preservação das florestas nativas.

As propriedades mecânicas da madeira possuem grande variabilidade, mesmo em elementos estruturais de espécies iguais por ser um material heterogêneo, anisotrópico e vulnerável aos agentes externos e ao processamento industrial. As características de crescimento da madeira, como os nós, inclinação das fibras, medula, esmoado e os defeitos provenientes do método de secagem ou do processamento inadequado da madeira, como os empenamentos e fissuras, influenciam na resistência da madeira e são comumente encontrados em árvores de rápido crescimento, que é o caso de muitas madeiras de floresta plantada.

A norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997 disponibiliza tabelas com valores referenciais de propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies, obtidos a partir de ensaios em corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos. Assim, no dimensionamento é levado em conta o coeficiente parcial de modificação K_{mod3} que é referente a qualidade da peça de madeira a ser utilizada.

Com o uso de elementos estruturais de madeira serrada vinda de floresta plantada, é importante realizar a classificação visual e mecânica peça a peça para determinar a classe de resistência na incidência dos defeitos de crescimento e de secagem, cujas propriedades mecânicas podem sofrer grande variabilidade entre as peças do lote, inviabilizando a classificação do lote como homogêneo, como é recomendada pela norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997.

Atualmente, a norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997 está em fase de revisão, e a comissão técnica responsável pela proposição e revisão da norma brasileira de madeira e estruturas de madeira propõe o projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018 que

apresenta os critérios de classificação visual e mecânica para peças estruturais de florestas plantadas e a ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018 que normaliza os ensaios de caracterização de resistência para peças estruturais de madeira.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe classes de resistência para peças estruturais de três espécies de florestas plantadas a partir da caracterização de resistência e classificação visual e mecânica (não-destrutiva), de acordo os projetos de norma projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018 – Critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira e ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018 – Método de ensaio de caracterização de peças estruturais de madeira.

1.2 Motivação

As indústrias no setor florestal investem cada vez mais em plantações de *Schizolobium amazonicum* (Paricá) e de novos clones de *Eucalyptus* e *Pinus*, cuja utilização na construção civil se torna viável a partir do conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dessas espécies de madeira para o melhor aproveitamento do material.

No Brasil, são escassos os estudos e, principalmente, a divulgação da importância da classificação estrutural da madeira em dimensões comerciais e próprias para fins estruturais. Consequentemente, os valores característicos das propriedades mecânicas não são conhecidos adequadamente, tornando o material não confiável para seu uso.

O trabalho surgiu da necessidade de avaliar as propriedades físicas e mecânicas de três espécies de madeira serrada de florestas plantadas no uso estrutural e propor tabelas de classes de resistência.

1.3 Objetivo

1.4 O objetivo principal do presente trabalho foi propor classes de resistência para *Eucalyptus urograndis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá) no uso estrutural, atribuindo classes de resistência a partir da classificação visual e mecânica e obter as propriedades mecânicas pelo ensaio de caracterização de resistência das peças estruturais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Madeiras de florestas plantadas

Os produtos de origem florestal estão presentes em segmentos que utilizam a madeira como matéria-prima sendo eles o de celulose e papel, o de laminados, serrados e compensados, o de siderurgia a carvão vegetal e o de energia e, no setor de bens de consumo como as indústrias gráficas, moveleira, química e a construção civil. Assim, a crescente demanda por madeira, energia e fibras tem encarado a floresta como um bem precioso e estratégico (IBÁ, 2016).

Para o alívio da exploração das florestas nativas diante do aumento da demanda por matéria-prima e energia, o Brasil passou a cultivar madeiras de florestas plantadas, principalmente as espécies dos gêneros de *Eucalyptus* e *Pinus*.

Segundo os dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) de 2016 compilados na Tabela 1, a área de floresta plantada no Brasil era de 7,8 milhões de hectares. Os gêneros *Eucalyptus* e o *Pinus* se destacaram, ocupando cerca de 5,7 milhões e 1,6 milhões de hectares, respectivamente e representando cerca de 93% de toda a área de florestas plantadas. Acácia, Araucária, Paricá, Seringueira, Teca, Pópulus e outras representaram os 7% restantes.

Tabela 1 – Dados estatísticos da área de florestas plantadas (ha), por cultura, em 2016

Espécie	Área (ha)	% ocupada
Eucalipto	5.673.784	72,30%
Pinus	1.584.333	20,19%
Acácia	159.877	2,04%
Araucária	11.114	0,14%
Paricá	90.047	1,15%
Seringueira	229.964	2,93%
Teca	87.502	1,11%
Pópulus	4.216	0,05%
Outras	6.641	0,08%
Total Geral	7.847.478	100,00%

Fonte: (IBÁ, 2016).

Essas plantações atendem a demanda das indústrias de madeira no Brasil e devido à alta produtividade das plantações, custos de produção relativamente baixos, extensa área de terra e de tecnologia avançada no país proporcionam vantagens e competitividade no estabelecimento de florestas plantadas, aumentando a importância do país no segmento dos produtos florestais (CALIL NETO, 2011).

As madeiras de florestas plantadas têm a vantagem de terem rápido crescimento, cujas propriedades mecânicas são influenciadas pelas propriedades físicas do material, dos quais se destacam a densidade, o teor de umidade, a variação dimensional e principalmente as características de crescimento da árvore e defeitos provenientes do processo de secagem da madeira.

A seguir, são detalhados sobre as propriedades físicas e mecânicas das espécies de *Eucalyptus*, *Pinus* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá) encontrados na literatura.

2.1.1 Gênero *Eucalyptus*

O *Eucalyptus* pertence à família *Myrtaceae* e nativo da Austrália, Tasmânia e ilhas próximas. São mais de 700 espécies conhecidas botanicamente, por isso, essas espécies possuem propriedades químicas e físicas tão distintas que os usos dessa madeira são diversos.

Atualmente, o gênero *Eucalyptus* é o mais cultivado pela sua alta produtividade e potencialidade de adaptação em várias regiões do país. Este gênero é conhecido por ter alta taxa de crescimento, plasticidade, forma retilínea do fuste, desrama natural e madeira com variações tecnológicas adaptadas às mais variadas condições de uso (OLIVEIRA et al., 1999).

Segundo Carvalho (2000), a presença de altas tensões internas de crescimento nos eucaliptos de rápido crescimento é a principal fonte de empenamentos e fissuras responsável por grande parte da rejeição das peças nas indústrias de madeira serrada no Brasil. Kubler (1987) define as tensões de crescimento como forças encontradas no interior das árvores em crescimento, que podem ocorrer nas direções radial, tangencial e longitudinal, oferecendo a sustentação da árvore.

A ocorrência de rachaduras ocasionais de topo no abate, considera que a fase de desdobro é a que mais viabiliza a manifestação das tensões de crescimento, provocando abaulamento, empenamentos e rachaduras a partir da medula (CHAFE, 1979).

Rosso (2006) comenta que o gênero de *Eucalyptus* se caracteriza como madeira de secagem devagar devido à anatomia de difícil deslocamento da água por capilaridades, cujas

tensões de crescimento na árvore e retrações diferenciadas da madeira causam os defeitos de secagem, caso o processo não for bem executado. O autor avaliou a qualidade da madeira de três espécies de *Eucalyptus* na combinação de métodos de secagem ao ar livre e convencional durante as estações de inverno e verão e, a eficiência dessa combinação com relação à taxa de secagem e ao tempo. Os defeitos observados no estudo foram fissuras, empenamentos, colapso e endurecimento superficial. O método de secagem combinada foi apresentado como alternativa para minimizar as deficiências que foram encontradas nos dois métodos quando realizados isoladamente.

A norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997 disponibiliza no Anexo E os valores médios de densidade e resistências de espécies já estudadas com corpos de provas de pequenas dimensões e isentos de defeitos. A Tabela 2 mostra os valores médios das propriedades de espécies de *Eucalyptus*.

Tabela 2 - Valores médios de propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de *Eucalyptus*

Nome comum	Nome científico	$\rho_{ap(12\%)}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)
<i>E. Alba</i>	<i>Eucalyptus alba</i>	705	47,3	69,4	4,6	9,5
<i>E. Camaldulensis</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	899	48,0	78,1	4,6	9,0
<i>E. Citriodora</i>	<i>Eucalyptus citriodora</i>	999	62,0	123,6	3,9	10,7
<i>E. Cloeziana</i>	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	822	51,8	90,8	4,0	10,5
<i>E. Dunnii</i>	<i>Eucalyptus dunnii</i>	690	48,9	139,2	6,9	9,8
<i>E. Grandis</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>	640	40,3	70,2	2,6	7,0
<i>E. Maculata</i>	<i>Eucalyptus maculata</i>	931	63,5	115,6	4,1	10,6
<i>E. Maidene</i>	<i>Eucalyptus maidene</i>	924	48,3	83,7	4,8	10,3
<i>E. Microcorys</i>	<i>Eucalyptus microcorys</i>	929	54,9	118,6	4,5	10,3
<i>E. Paniculata</i>	<i>Eucalyptus paniculata</i>	1.087	72,7	147,4	4,7	12,4
<i>E. Propinqua</i>	<i>Eucalyptus propinqua</i>	952	51,6	89,1	4,7	9,7
<i>E. Punctata</i>	<i>Eucalyptus punctata</i>	948	78,5	125,6	6,0	12,9
<i>E. Saligna</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>	731	46,8	95,5	4,0	8,2
<i>E. Tereticornis</i>	<i>Eucalyptus tereticornis</i>	899	57,5	115,9	4,6	9,7
<i>E. Triantha</i>	<i>Eucalyptus triantha</i>	755	53,9	100,9	2,7	9,2
<i>E. Umbra</i>	<i>Eucalyptus umbra</i>	899	42,7	90,4	3,0	9,4
<i>E. Urophylla</i>	<i>Eucalyptus urophylla</i>	739	46,0	85,1	4,1	8,3

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Rodrigues (2002) estudou a variabilidade das propriedades físicas e mecânicas de doze lotes de madeira serrada de eucalipto, das quais foram retirados corpos de prova isentos de

defeitos, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997. Os valores da Tabela 3 são referentes aos valores médios de cada lote. Os lotes foram classificados e enquadrados nas quatro classes indicadas pela norma brasileira (C20, C30, C40 e C60). Verificou-se que os lotes de madeira serrada não puderam ser classificados em uma mesma classe de resistência para todas as propriedades mecânicas. Foi observada grande variabilidade nos valores obtidos para cada propriedade mecânica, assim, o autor sugere uma maior investigação das classes de resistência para o gênero em questão.

Tabela 3 – Valores médios das propriedades da madeira de lotes de *Eucalyptus* obtidos nos ensaios segundo a ABNT NBR 7190: 1997

Lotes	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_v (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	ρ_{bas} (g/cm³)	ρ_{ap(12%)} (g/cm³)
1G	59,72	20591	10,22	106,87	18642	0,540	0,671
2H	80,39	25598	13,35	148,32	25088	0,653	0,842
3G	66,70	20060	12,58	116,20	20371	0,561	0,702
3S	62,03	18250	11,26	107,88	18127	0,545	0,684
4G	74,07	28219	9,99	141,90	20529	0,596	0,763
4C	67,89	23741	15,25	154,83	22830	0,736	0,897
4S	73,76	27688	13,49	138,09	20471	0,700	0,763
5B	81,81	22860	14,98	150,70	21988	0,805	0,883
5V	68,62	20027	15,56	118,53	15658	0,659	0,764
6V	63,65	18589	14,43	107,03	13796	0,721	0,905
7V	70,90	21250	15,10	143,49	20870	0,757	0,849
8V	54,12	11685	17,49	98,55	12328	0,801	1,030

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2002)

Scanavaca Junior e Garcia (2004) determinaram as propriedades físicas e mecânicas da madeira *Eucalyptus urophylla* aos 19 anos. Foram selecionadas 120 árvores e de cada árvore foi extraída uma tora de 4m. Foi utilizado o cerne para a retirada de 4 corpos de provas isentos de defeitos de cada árvore. Foram obtidos valores de densidade básica, retratibilidade, módulo de resistência à flexão estática, módulo de elasticidade à flexão estática e resistência ao cisalhamento tangencial aos anéis de crescimento e à compressão paralela às fibras. Na Tabela 4 são mostrados os valores médios, máximos e mínimos das propriedades físicas e mecânicas do *E. urophylla*. Os resultados permitiram classificar a espécie como de média a alta resistência mecânica, alta retratibilidade e moderadamente pesada. As propriedades mecânicas não

apresentaram diferenças estatísticas e uma explicação para a grande homogeneidade dos dados é a maturidade das árvores, no qual pode exercer um efeito considerável nas propriedades da madeira, sendo decisiva para a finalidade do material.

Tabela 4 – Valores médios, mínimos e máximos das propriedades físicas e mecânicas do *E. urophylla*

Propriedade	Valor médio	Mínimo	Máximo
ρ_{bas} (g/cm ³)	0,655	0,484	0,793
f_v (MPa)	18,64	14,79	22,43
f_{c0} (MPa)	64,34	42,19	84,14
MOR (MPa)	126,65	69,13	170,08
MOE (MPa)	17.738	9.494	25.340

Fonte: Adaptado de Scanavaca Junior e Garcia (2004)

Marcolin (2017) propôs uma tabela de classes de resistência para peças roliças perfiladas estruturais de *Eucalyptus urograndis*, na qual foram determinadas seis classes de resistências com módulo de resistência à flexão iniciando em 50MPa até 100MPa, mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela de Classes de Resistência definida para a amostra total

	D50	D60	D70	D80	D90	D100
Propriedades de resistência em N/mm²						
MOR _k	50	60	70	80	90	100
$f_{c0,k}$	37	38	39	40	42	44
$f_{v0,k}$	5	5	5	5	6	6
Propriedades de rigidez em kN/mm²						
MOE _m	10	11	12	13	14	15
MOE _k	8,5	9	9,5	10	11	12
E _{c0,m}	14	14	14	14	14	14
E _{c0,k}	7,8	7,5	8	8,5	9	9,5
Densidade em kg/m³						
$\rho_{ap,k}$	520	525	535	575	585	607
$\rho_{ap,m}$	610	620	625	650	670	680

Fonte: Marcolin (2017)

O autor destacou a influência do diâmetro, região de crescimento e idade de corte nos valores de resistência e rigidez da amostra, por isso, os grupos de amostras foram separados por

esses três parâmetros. Os principais valores de correlação linear entre as propriedades avaliadas foram: f_{v0} x diâmetro (-0,61), MOE x ρ_{ap} (0,60), MOE x MOR (0,56) e MOR x ρ_{ap} (0,51).

2.1.2 Gênero *Pinus*

Pertencentes à família *Pináceas*, as espécies do gênero *Pinus* são, depois do *Eucalyptus*, as mais cultivadas no Brasil, uma vez que se adaptou muito bem nas regiões Sul e Sudeste. O *Pinus taeda* é, dentre as espécies de *Pinus*, uma das mais plantadas, visto que são amplamente utilizadas nas indústrias de madeira, de serrados, de chapas, de madeiras reconstituídas (MDF, MDP e OBS) e produção de papel e celulose.

Pelo rápido crescimento de muitas espécies de *Pinus*, estas árvores atingem dimensões para a comercialização ainda muito jovem. Segundo Bendtsen e Senft (1986), árvores jovens caracteriza-se por baixas densidades e baixas resistência e rigidez devido ao maior ângulo de fibrilas, fibras curtas com paredes celulares finas e baixa porcentagem de lenho tardio. Pearson e Gilmore (1980) estudaram diferentes taxas de crescimento para a espécie de *Pinus taeda*, com idades de 15 ,25 e 41 anos e, ao comparar as árvores mais velhas, afirmaram que as árvores juvenis apresentam propriedades mecânicas geralmente inferiores, configurando uma fonte de variabilidade nos resultados.

A Tabela 6 mostra os valores médios de densidade e resistências de algumas espécies de *Pinus* estudadas a partir de corpos de provas isentos de defeitos apresentados na norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997, do Anexo E.

Tabela 6 - Valores médios de propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de *Pinus* (ABNT NBR 7190:1997)

Nome comum	Nome científico	$\rho_{ap}(12\%)$ (kg/m^3)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{190} (MPa)	f_v (MPa)
Pinho do Paraná	<i>Araucaria angustifolia</i>	580	40,9	93,1	1,6	8,8
<i>Pinus caribea</i>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>caribea</i>	579	35,4	64,8	3,2	7,8
<i>Pinus bahamensis</i>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>bahamensis</i>	537	32,9	52,7	2,4	6,8
<i>Pinus hondurensis</i>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>hondurensis</i>	535	42,3	50,3	2,6	7,8
<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	560	40,4	66,0	2,5	7,4

Tabela 6 - Valores médios de propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de *Pinus* (ABNT NBR 7190:1997)

Nome comum	Nome científico	$\rho_{ap(12\%)}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)
<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Pinus oocarpa shiede</i>	538	43,6	60,9	2,5	8,0
<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda L.</i>	645	44,4	82,8	2,8	7,7

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Carreira (2003) estudou os critérios para a classificação visual de peças estruturais de *Pinus ssp.* que inclui a espécie *Pinus elliotti* e *Pinus taeda*. Para isso, foi realizada a caracterização de algumas propriedades mecânicas dessas espécies. Foram classificadas visualmente 600 peças distribuídas em quatro classes. (SS-D, SS-ND, N°2-D, N°2-ND) e os valores das propriedades mecânicas podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas de peças estruturais de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* agrupados

Classe	Amostra em estudo		<i>Southern Pine</i> Norte Americano	
	MOR _k (MPa)	MOE _m (MPa)	MOR _k (MPa)	MOE _m (MPa)
N°2-ND	21,9	7608	19,9	9520
N°2-D	28,7	9182	25,0	11560
SS-ND	79,5	9899	40,6	11560
SS-D	107,6	14303	46,6	12920

Fonte: Carreira (2003)

Nos Estados Unidos a *Southern Pine Inspection Bureau* é o órgão responsável por escrever as regras de classificação visual das espécies *Pinus elliottii*, *Pinus taeda*, *Pinus palustris* e *Pinus echinata* que são unidas no grupo *Southern Pine*. Para os valores de MOR, todas as classes apresentaram valores superiores aos *Southern Pine*. Com exceção da classe SS-D que obteve valor de MOE acima do MOE do *Southern Pine*, as demais classes apresentaram valores inferiores e próximos aos *Southern Pine*, assim, o autor sugere que as propriedades apresentadas para *Southern Pine* podem ser utilizadas como indicadores das propriedades mecânicas de peças estruturais de *Pinus* vindas de florestas plantadas no Brasil.

O mesmo autor avaliou ainda a relação da densidade com o módulo de resistência a flexão (MOR). Constatou-se que a densidade de SS-ND e N°2-ND são estatisticamente equivalentes e coerentes com a *Southern Pine*, sendo a diferença entre as classes evidenciada pela presença de defeitos que reduziu significativamente a resistência.

Freitas (2004) realizou a classificação visual, pela norma ASTM D 198: 1994, classificação mecânica não-destrutivos por tensões (MSR) e ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras em peças estruturais de *Pinus spp.* Os valores estatísticos constam na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas de peças estruturais de *Pinus spp.*

	MOE	MOR	f_{c0}	E_{c0}
N	79	79	150	150
Média (MPa)	9.693	28,7	38,0	7.816

Fonte: Freitas (2004)

Trianoski *et al.* (2014) realizaram um estudo das propriedades mecânicas de sete espécies de *Pinus* tropicais e comparou com as propriedades da madeira de *Pinus taeda*, por ser a espécie mais plantada e utilizada industrialmente. Foram selecionadas cinco árvores por espécie e retiradas quatro toras de 2,6m de comprimento por árvore, do quais foram extraídos as pranchas e pranchões para a realização dos ensaios de flexão estática, compressão paralela às fibras e cisalhamento. Na Tabela 9 são apresentados os valores médios das propriedades mecânica e da massa específica aparente das espécies de *Pinus* tropicais e *Pinus taeda*.

Tabela 9 – Propriedades mecânica e densidade aparente (12%) da madeira de espécies de *Pinus* tropicais e *Pinus taeda*

Espécie	MOR (MPa)	MOE (MPa)	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{v0} (MPa)	ρ_{ap} (g/cm³)
<i>Pinus caribaea var. bahamensis</i>	65	7.187	30	9.189	10,64	0,491
<i>Pinus caribaea var. caribaea</i>	58	6.060	28	9.447	9,10	0,435
<i>Pinus caribaea var. hondurensis</i>	62	7.106	34	10.956	10,49	0,502
<i>Pinus chiapensis</i>	59	7.293	33	10.060	8,72	0,435

Tabela 9 – Propriedades mecânica e densidade aparente (12%) da madeira de espécies de *Pinus* tropicais e *Pinus taeda*

Espécie	MOR (MPa)	MOE (MPa)	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{v0} (MPa)	ρ_{ap} (g/cm³)
<i>Pinus maximinoi</i>	70	8.943	37	12.990	11,37	0,533
<i>Pinus oocarpa</i>	70	7.993	39	12.212	11,95	0,552
<i>Pinus tecunumanii</i>	71	8.943	39	14.049	11,42	0,557
<i>Pinus taeda</i>	64	8.234	37	12.432	10,52	0,527

Fonte: Trianoski *et al.* (2014)

Ballarin (2016) estudou as normas vigentes relacionadas à classificação visual da madeira serrada para uso estrutural e realizou a classificação visual e mecânica, além da caracterização de resistência de peças estruturais de *Pinus spp.* e, contribuindo na adequação da norma brasileira com metodologias simplificadas de classificação visual. Na classificação visual foram utilizados três critérios, a SPIB, a proposta LaMEM e a norma argentina IRAM 9662-1:2013. Na Tabela 10 mostra os valores das propriedades mecânicas obtidos nos ensaios.

Tabela 10 – Propriedades mecânicas de peças estruturais de *Pinus spp.*

	MOE_{din} (MPa)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Valor médio	7932	22,53	26,69	7,43	36,87
Desvio padrão	2567	5,87	20,04	2,15	15,18
Coef. variação	32,36%	26,07%	75,06%	28,95%	41,17%
Valor mínimo	3631	12,52	10,21	3,52	12,88
Valor máximo	17.855	33,09	91,93	13,31	84,80
Quantidade de peças	171	26	27	58	58
Valor característico (C1)	4.839,60	18,78	13,88	-	29,52
Valor característico (C2)	4.427,00	14,79	11,09	-	20,97
Valor característico (C3)	4.543,31	12,43	10,16	-	13,82

Fonte: Ballarin (2016)

2.1.3 *Schizolobium amazonicum* (Paricá)

O uso do *Schizolobium amazonicum* (Paricá) vem crescendo em indústrias de laminados e compensados, sendo uma boa opção, pois oferece vantagens como o crescimento rápido, baixa densidade e propriedades mecânicas favoráveis para seu uso. De acordo com os dados do IBÁ (2016), o *Schizolobium amazonicum* (Paricá) abrangeu uma área de 90 mil hectares em 2016 (Tabela 1), cultivada na Amazônia do Brasil, Venezuela, Colômbia, Peru e Bolívia, e no Brasil onde é encontrada, principalmente, nos estados do Pará, Mato Grosso, Amazonas e Rondônia (CALIL NETO, 2011; CARVALHO, 1994).

Pertencente à família *Leguminosae*, esta espécie, pioneira e nativa da Amazônia, despertou o interesse no setor florestal por substituir outras espécies nativas pela qualidade, rendimento, boa adaptação aos plantios e rápido incremento volumétrico (30m³/ha/ano) e, mesmo sem melhoramento genético, pode ser colhida aos seis anos de idade (URBINATI, 2013).

A árvore pode alcançar altura entre 15 a 40m e DAP¹ entre 50 a 100cm, sendo indicada para plantios comerciais, sistemas agroflorestais e reflorestamento de áreas degradadas (SILVA, et al., 2011). O tronco é cilíndrico e reto. A casca é esverdeada e delgada quando jovem, tornando-se mais tarde acinzentada, espessa, dura, rugosa e com carreiras verticais de lenticelas. A madeira tem o cerne creme-avermelhado e o alburno creme-claro. Apesar da textura média a grossa, o processamento é fácil e recebe um bom acabamento. É considerada mole, de baixa densidade, na faixa de 0,30 g/cm³ e possui baixa durabilidade natural, sendo suscetível ao ataque biológico. Essa madeira é utilizada na fabricação de palitos de fósforo, saltos de calçados, brinquedos, maquetes, embalagens leves, canoas, forros, miolo de painéis e portas, formas de concreto, laminados, compensados, celulose e papel (CALIL NETO, 2011; URBINATI, 2013).

Esta espécie se destaca no uso de tecnologia para a construção civil, como a Madeira Laminada Colada (MLC) devido a sua coloração clara, uniforme e desprovida de nós e boa aceitação de tratamentos e adesivos. Alguns autores têm estudado o desempenho do *Schizolobium amazonicum* (Paricá) em elementos estruturais de MLC, como Terezo (2010), Calil Neto (2011), Cavalheiro (2014).

Na Tabela 11 são apresentados os valores de propriedades mecânicas do gênero *Schizolobium*, na condição verde (V) e seca (S) de duas variedades da espécie *Schizolobium*

¹ DAP: é uma medida de diâmetro da árvore a 1,30m de altura em relação ao solo.

parahyba. Para a *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* é possível observar a diferença de 104% da densidade básica entre as duas procedências – Carajás-PA e Tapajós-PA (TEREZO, 2010).

Tabela 11 – Propriedades mecânicas e peso específico do gênero *Schizolobium*

Espécie	Massa específica ¹ (g/cm ³)	Condição (verde e seca) ²	MOR (MPa)	MOE (MPa)	f _{c0} (MPa)	f _{c90} (MPa)	f _{t90} (MPa)	f _{v0} (MPa)
Guapuruvu <i>Schizolobium parahyba</i>	0,32	V	30,5	5.100	13,8	10,5	2,9	4,7
		S	42,2	-	19,6	-	-	-
Paricá grande (Carajás-PA) <i>Schizolobium amazonicum</i>	0,24	V	29,4	6.100	18,0	1,9	1,6	4,2
		S	32,7	6.500	21,0	2,2	1,6	4,5
Paricá (Tapajós-PA) <i>Schizolobium amazonicum</i>	0,49	V	54,3	9.300	23,6	4,4	3,4	7,4
		S	56,2	8.200	34,7	4,6	2,7	11,1

1: Peso seco estufa/vol. verde

2: Teor de umidade seco considerado é de 15%

Fonte: TEREZO, 2010.

Almeida *et al.* (2013) determinaram as propriedades de resistência das peças estruturais de *Schizolobium amazonicum* (Paricá) e a classificação visual para a determinação dos defeitos da peça. Assim, concluiu-se que a madeira de *Schizolobium amazonicum* (Paricá) se encontra na classe C20 das dicotiledôneas e uma boa relação entre a densidade aparente e a resistência a compressão paralela às fibras, em comparação a espécies de *Pinus*. Pela classificação visual, foi possível perceber que as peças estruturais dessa espécie possuem pequenos índices de defeitos, pequena quantidade de nós, grã direito e poucos empenamentos. Na Tabela 12 são apresentados os valores característicos de resistência e densidade aparente para o *Schizolobium amazonicum* (Paricá).

Tabela 12 - Valores característicos de resistência para o *Schizolobium amazonicum* (Paricá)

Espécie	ρ_{ap} (kg/m ³)	f _{c0} (MPa)	f _{c90} (MPa)	f _{t0} (MPa)	f _{t90} (MPa)	f _{v0} (MPa)
<i>Schizolobium amazonicum</i>	300	21	2	35	1	6

Fonte: Almeida *et al.* (2013)

2.2 Classificação estrutural da madeira (*timber grading*)

As suas propriedades da madeira possuem alta variabilidade, por isso é importante que se realize a classificação para que as propriedades sejam atendidas ao uso, garantindo a qualidade do material. Algumas peças de madeira serrada podem ser isentas de defeitos, outras com nós, inclinação de fibras, fendas, esmoado, áreas de decomposição entre outras características de redução da resistência. Devido a essa variedade de características de uma peça para outra, é necessário separar a madeira em classes de resistência com base na classificação visual e mecânica (BODIG e JAYNE, 1993).

A classificação de madeira tem sua importância, principalmente, na escolha do material e elaboração dos projetos estruturais para o emprego de madeiras com propriedades padronizadas das espécies disponíveis na região de aplicação do material.

Estabelecer as classes de resistência de uma espécie de madeira visa o estudo das propriedades mecânicas inerente a essa espécie e a separação em grupos com valores limites que represente cada classe de resistência. Dessa forma, a determinação das classes de resistência de madeiras nativas e cultivadas traz uma contribuição importante na utilização da madeira como material estrutural, aumentando a competitividade da madeira frente a outros materiais como o aço e o concreto (SALES e CALIL JUNIOR, 2005).

A atual norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997 utiliza a resistência a compressão paralela, módulo de elasticidade à compressão e a densidade como parâmetros para a determinação da classe de resistência, sendo três classes de resistências para as coníferas (Tabela 13) e quatro classes para as dicotiledôneas (Tabela 14).

Tabela 13 – Classes de resistência das coníferas com valores na condição-padrão de referência U=12%

Classes	f_{c0k} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m³)	ρ_{ap} (kg/m³)
C 20	20	4	3.500	400	500
C 25	25	5	8.500	450	550
C 30	30	6	14.500	500	600

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Tabela 14 – Classes de resistências das dicotiledôneas com valores na condição-padrão de referência U=12%

Classes	f_{c0k} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m³)	ρ_{ap} (kg/m³)
C 20	20	4	9.500	500	650
C 30	30	5	14.500	650	800
C 40	40	6	19.500	750	950
C 60	60	8	24.500	800	1.000

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Os dados obtidos de ensaios de amostras de pequenas dimensões e isentas de defeitos não são adequadas para determinar as propriedades mecânicas de peças de madeira em dimensões estruturais, madeira laminada colada e compensados, por isso é importante realizar ensaios em tamanhos reais em que levem em consideração o efeito de defeitos, umidade, espécies e tamanho da peça (BODIG e JAYNE, 1993).

O projeto de norma brasileira PN 02_126 10-001_3: 2018 especifica os procedimentos de ensaios em dimensões estruturais das propriedades físicas e mecânicas de madeira serrada e o projeto da norma brasileira PN 02:126 10-001-1: 2018 propõe a classificação visual e mecânica, em que é atribuída a classe de resistência para cada peça estrutural, e não por lote, como é recomendado pela norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997. Uma vez que o uso de madeira serrada estrutural é baseado em seus valores característicos de resistência e rigidez, e a madeira exibe grande variabilidade, por razões econômicas e técnicas apontam para a necessidade de um método de classificação baseado em uma inspeção peça por peça (GLOS, 1995).

De acordo com Carreira (2003), na classificação visual da madeira, a peça é avaliada individualmente pelo tipo, localização e tamanho dos defeitos que poderão afetar a resistência da madeira para fins estruturais. Já a classificação mecânica é estimada a resistência da peça de madeira por meio das propriedades de densidade e rigidez à flexão.

O projeto da norma brasileira ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018 orienta que a atribuição de uma classe de resistência a cada peça de um lote de madeira é realizada mediante a classificação visual e mecânica e a mensuração da densidade da madeira. A classificação visual é realizada pela inspeção visual nas faces da peça por uma pessoa qualificada e treinada ou por equipamentos que quantificam e qualificam os defeitos detectados. Pela classificação visual é atribuída uma classe visual para cada peça.

A classificação mecânica é realizada com a avaliação do módulo de elasticidade à flexão (MOE) e densidade da madeira, no qual o valor do MOE é obtido pelo ensaio de flexão estático ou ensaio dinâmico de precisão e acurácia comprovada em peças de dimensões estruturais. Assim, é atribuída uma classe mecânica para cada peça.

Com a classe visual e a classe mecânica da peça, a classe de resistência é, portanto, a pior classe entre as duas classes (visual e mecânica). Com isso, é possível estimar outros valores de resistências características pela tabela de classes de resistência para a espécie analisada. No projeto da norma brasileira ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018 é disponibilizado duas tabelas de classes de resistências das espécies de *Pinus spp.* e do híbrido *Eucalyptus urograndis*.

As tabelas de classes de resistências para peças estruturais disponibilizadas pela norma internacional ISO 16958: 2014 (Tabela 15 e Tabela 16) e a norma europeia prEN 338: 2012 (Tabela 17 e Tabela 18) são separadas para espécies que diferem significativamente em suas propriedades como coníferas (*Softwoods*) e folhosas (*Hardwoods*).

Segundo a norma internacional ISO 16358: 2014, na alocação de uma classe de resistência a uma população de espécie de madeira, os valores característicos das propriedades primárias devem ser iguais ou superiores aos valores da classe a ser alocada. Além disso, as propriedades derivadas devem ser qualificadas para serem alocadas a uma classe somente se seus valores característicos forem iguais ou superiores aos valores estimados para cada classe de resistência.

Tabela 15 – Classes de resistência para as espécies *softwood* (ISO 16598: 2014)

Propriedades	S10	S16	S20	S24	S28	S32	S36	S40
Flexão (MPa) $F_{m,k}$	10	16	20	24	28	32	36	40
Tração Paralela (MPa) $F_{t,0,k}$	5	8	11	13	15	17	19	21
Tração Perpendicular (MPa) $F_{t,90,k}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Compressão Paralela (MPa) $F_{c,0,k}$	13	17	19	21	22	22	23	24
Compressão Perpendicular (MPa) $F_{c,90,k}$	2	2,5	3	3,5	3,5	4	4,5	5
Cisalhamento Paralelo (MPa) $F_{v,k}$	1,5	2,5	2,5	3	3	3,5	3,5	3,5
MOE Médio Paralelo (GPa) $E_{0,m}$	7	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5
Densidade (g/cm^3) $\rho_{ap,m}$	0,33	0,36	0,39	0,41	0,44	0,46	0,49	0,51

Fonte: Adaptado de ISO 16598: 2014.

Tabela 16 – Classes de resistência para as espécies *hardwood* (ISO 16598: 2014)

Propriedades	H14	H18	H24	H30	H40	H50	H60	H70
Flexão (MPa) $F_{m,k}$	14	18	24	30	40	50	60	70
Tração Paralela (MPa) $F_{t,0,k}$	7	9	12	15	20	25	30	35
Tração Perpendicular (MPa) $F_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão Paralela (MPa) $F_{c,0,k}$	16	18	21	22	24	28	35	41
Compressão Perpendicular (MPa) $F_{c,90,k}$	4	4,5	5,5	6,5	8	9,5	11	12,5
Cisalhamento Paralelo (MPa) $F_{v,k}$	2	2,5	3	3	3,5	4,5	5	6,5
MOE Médio Paralelo (GPa) $E_{0,m}$	8	8,5	10	11	13	15	17	19
Densidade (g/cm ³) $\rho_{ap,m}$	0,46	0,48	0,55	0,60	0,69	0,78	0,87	0,96

Fonte: Adaptado de ISO 16598: 2014.

Tabela 17 - Classes de resistência para as espécies *softwood* (prEN 338: 2012)

Classe		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propriedades de resistência em N/mm²													
Flexão	$f_{m0,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tração Paralela	$f_{t0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tração Perpendicular	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compressão Paralela	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressão Perpendicular	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
Cisalhamento Paralelo	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propriedades de rigidez em kN/mm²													
Módulo de elasticidade médio paralelo na flexão	$E_{m0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,5	15,0	16,0	16,5
Módulo de elasticidade característico paralelo na flexão	$E_{m0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	9,0	10,1	10,7	11,1
Módulo de elasticidade médio paralelo na tração	$E_{t0,mean}$	6,5	7,3	8,3	8,7	9,2	10,1	10,6	11,5	12,4	13,8	14,7	15,1
Módulo de elasticidade médio perpendicular	$E_{m90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,45	0,50	0,53	0,55
Módulo de elasticidade médio no cisalhamento	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,84	0,94	1,00	1,03

Tabela 17 - Classes de resistência para as espécies *softwood* (prEN 338: 2012)

Classe		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Densidade em kg/m³													
Densidade característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Densidade média	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520

Fonte: Adaptado de prEN 338: 2012.

Tabela 18 - Classes de resistência para as espécies *hardwood* (prEN 338: 2012)

Classe		D18	D24	D27	D30	D35	D40	D45	D50	D55	D60	D65	D70	D75	D80
Propriedades de resistência em N/mm²															
Flexão	$f_{m0,k}$	18	24	27	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Tração Paralela	$f_{t0,k}$	11	14	16	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	42
Tração Perpendicular	$f_{t90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão Paralela	$f_{c0,k}$	18	21	22	23	25	26	28	29	30	32	33	34	35	36
Compressão Perpendicular	$f_{c90,k}$	7,5	7,8	7,7	8,0	8,1	8,3	8,7	9,3	9,9	10,5	12,0	13,5	13,5	13,5
Cisalhamento Paralelo	$f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0	5,0	5,0	5,0
Propriedades de rigidez em kN/mm²															
Módulo de elasticidade médio paralelo na flexão	$E_{m0,mean}$	9,5	10,0	10,5	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	22,0	24,0
Módulo de elasticidade característico paralelo na flexão	$E_{m0,k}$	8,0	8,5	8,8	9,2	10,1	10,9	11,3	11,8	13,0	14,3	15,5	16,8	18,5	16,8
Módulo de elasticidade médio paralelo na tração	$E_{t0,mean}$	8,7	9,2	9,7	10,1	11,0	12,0	12,4	12,9	14,3	15,6	17,0	18,4	20,2	22,1
Módulo de elasticidade médio perpendicular	$E_{m90,mean}$	0,63	0,67	0,70	0,73	0,80	0,86	0,90	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,47	1,33
Módulo de elasticidade médio no cisalhamento	G_{mean}	0,59	0,63	0,66	0,69	0,75	0,81	0,84	0,88	0,97	1,06	1,16	1,25	1,38	1,25

Tabela 18 - Classes de resistência para as espécies *hardwood* (prEN 338: 2012)

Classe		D18	D24	D27	D30	D35	D40	D45	D50	D55	D60	D65	D70	D75	D80
Densidade em kg/m³															
Densidade característica	ρ_k	475	485	510	530	540	550	580	620	660	700	800	900	900	900
Densidade média	ρ_{mean}	570	580	610	640	650	660	695	740	790	840	960	1080	1080	1080

Fonte: Adaptado de prEN 338: 2012.

2.2.1 Classificação visual

Kretschmann e Green (1999) considera que a classificação visual leva em consideração que as propriedades mecânicas das peças estruturais de madeira se diferem em relação às mesmas propriedades mecânicas da madeira isenta de defeito devido às características de crescimento que podem ser vistas e julgadas visualmente em peças estruturais.

A variação do teor de umidade não controlada durante o processo de secagem causa a alteração dimensional da peça em diferentes proporções pelo comportamento anisotrópico do material caracterizada pelas propriedades de retração e de inchamento nas três direções principais: axial (ou longitudinal), radial e tangencial. O efeito da retração radial combinada com a tangencial pode distorcer as dimensões da peça de madeira, devido ao encolhimento e às diferenças nos tamanhos dos anéis, surgindo defeitos de empenamentos (encurvamento, arqueamento, torcimento e encanoamento). A madeira é considerada estável nas suas dimensões quando o teor de umidade é menor do que o ponto de saturação da madeira (CALIL JUNIOR, LAHR e DIAS, 2003; GLASS e ZELINKA, 2010).

As características de crescimento e os defeitos de secagem encontrados na madeira têm influência no comportamento mecânico de peças estruturais, que limita ou inviabiliza a sua utilização. Dentre as causas para o surgimento desses defeitos podem ser citadas (CALIL JUNIOR, LAHR e DIAS, 2003):

- ✓ Pela estrutura anatômica da árvore: presença de bolsas de resina, medula, nós, esmoado ou inclinação das fibras;

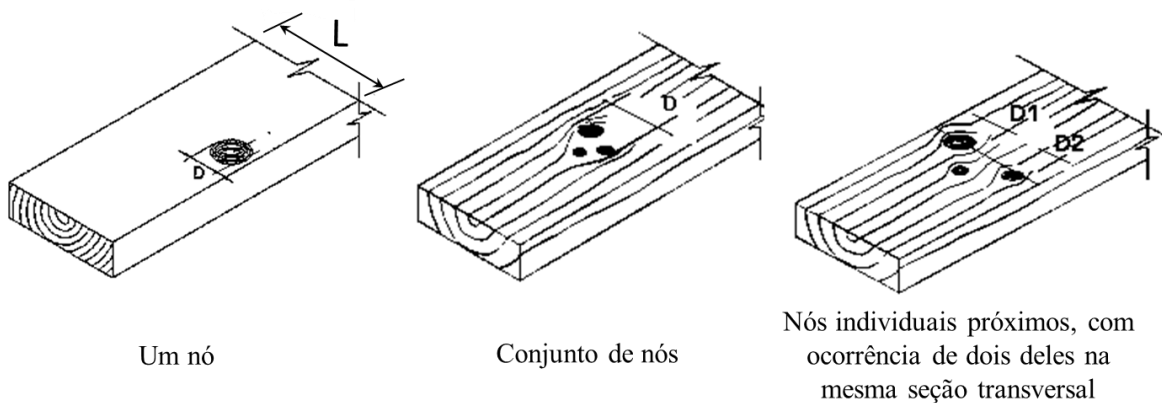
- ✓ Pelo processo de secagem e cuidados insuficientes no armazenamento: encurvamento, arqueamento, encanoamento, torcimento, presença de escamas e fissuras;
- ✓ Por ataques biológicos: insetos e fungos;
- ✓ Pelo processamento (manutenção, transporte, armazenagem e desdobro da madeira): arestas quebradas e variação da seção transversal.

Johansson (2003) explica que a intensidade desses defeitos no uso estrutural não importa somente em quanto pode reduzir a resistência, mas também com que frequência elas se manifestam.

Nós e desvio das fibras são os principais defeitos que influenciam na rigidez e resistência das peças de madeira em escala estrutural. Dependendo do tamanho, forma e disposição dos nós, algumas propriedades mecânicas permanecem inalteradas ou afetam significativamente (LUKACEVIC e FÜSSL, 2014).

Os nós (Figura 1) podem interferir drasticamente na resistência devido a redução da seção transversal e o desvio das fibras ao redor dos nós. De acordo com o projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018, a ocorrência de nó é expressa pela relação entre o diâmetro do nó (D) e a dimensão da face considerada (L), dada em mm/mm. Em um conjunto de nós, a medida D é considerada como um único nó, no qual se adota o diâmetro de um conjunto de nós definido por limites mais extremos do conjunto. Quando nós próximos ocorrer na mesma seção transversal, o diâmetro D é obtido pela soma dos diâmetros individuais.

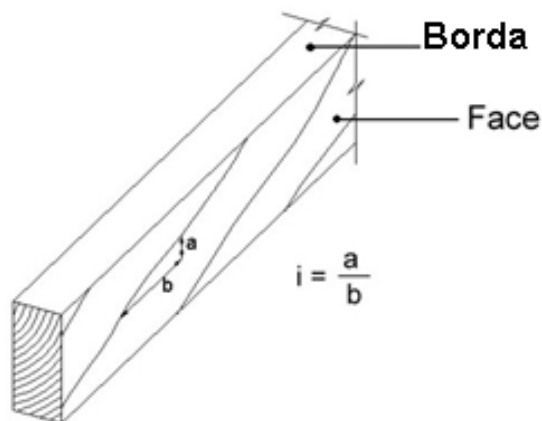
Figura 1 – Nós em peças estruturais



Segundo Carreira (2003) as fibras diagonais (Figura 2) são causadas pela maneira como a peça foi cortada do tronco, não caracterizando como um defeito inerente à árvore. No entanto, sempre há uma variação na inclinação das fibras, pois as células não são perfeitamente paralelas ao longo do comprimento da peça. A influência da inclinação das fibras se manifesta em elementos submetidos à flexão, cuja a ruptura ocorre por tensões de tração normal que é muito baixa. Em solicitações à compressão, a resistência é enfraquecida pela presença de fibras inclinadas, em que a baixa resistência à compressão normal às fibras e ao cisalhamento paralelo às fibras antecipam a ruptura da peça de madeira.

O projeto da norma brasileira ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018 recomenda que a inclinação das fibras seja avaliada ao longo da face da peça, no local onde apresentar a maior inclinação e desconsiderando os desvios das fibras próximos aos nós. O valor da proporção (1:3, 1:6, ..., 1:12) é obtido pela relação mostrada na Figura 2.

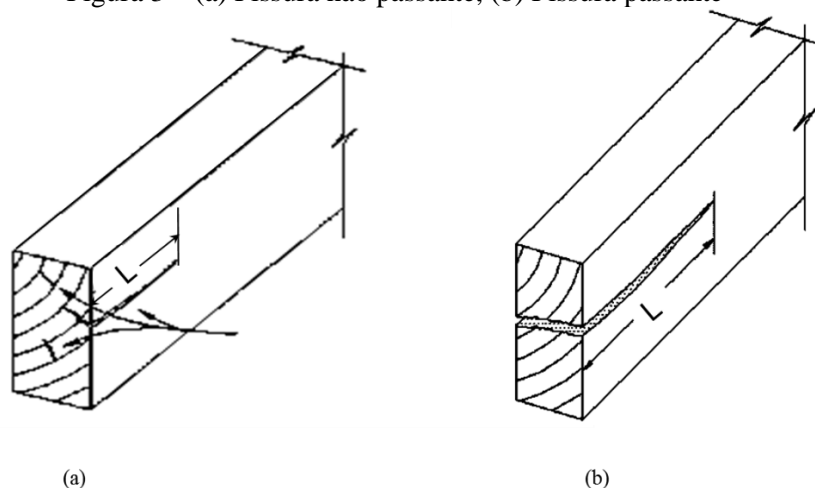
Figura 2 – Inclinação das fibras (i)



Fonte: ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018.

As fissuras ou fendas (Figura 3), sendo elas passantes e não passantes aparecem perpendicularmente em relação aos anéis de crescimento causando a separação longitudinal da peça de madeira, normalmente, devido ao processo de secagem após o corte da árvore, nas quais as tensões internas são resultantes da variação dimensional da peça nas direções radial e tangencial durante a secagem. A influência das fissuras se manifesta, principalmente, na resistência ao cisalhamento em elementos submetidos a flexão, assim, a classificação restringe a dimensão da fissura no local onde as tensões de cisalhamento são maiores. Em elementos estruturais que são solicitados a tração ou compressão, essas fissuras não afetam significativamente (CARREIRA, 2003).

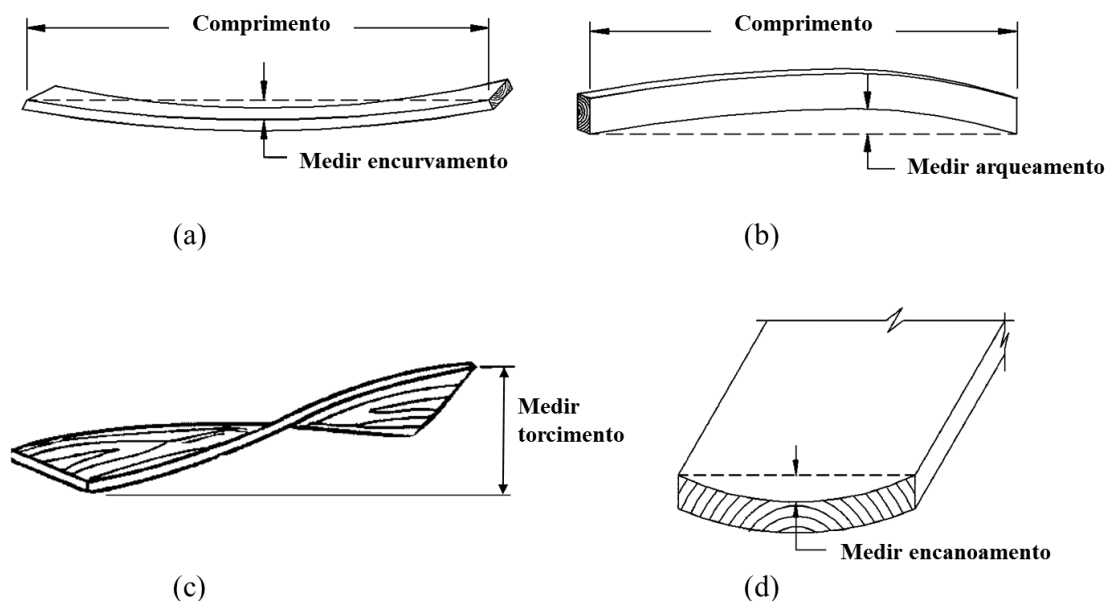
Figura 3 – (a) Fissura não passante, (b) Fissura passante



Fonte: ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018.

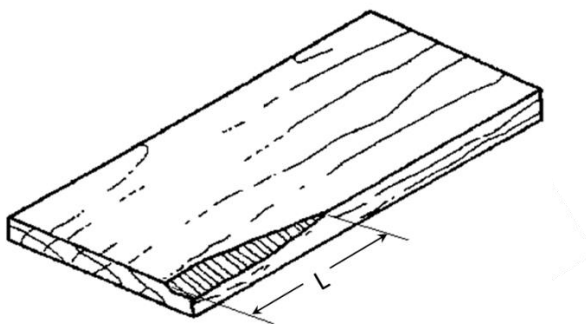
O encurvamento (Figura 4 (a)) é um tipo de empenamento da peça que ocorre em relação ao seu eixo de menor inércia e o arqueamento (Figura 4 (b)) ocorre em relação ao seu eixo de maior inércia. O torcimento (Figura 4 (c)) é uma combinação de empenamentos em relação aos eixos de maior e menor inércia, no qual a peça fique na forma espiralada. O encanoamento (Figura 4 (d)) é um empenamento da peça que configura uma face côncava e outra face convexa. O esmoado (Figura 5) é a ausência de madeira causada pela presença da casca da árvore ou pelo processamento industrial.

Figura 4 – (a) Encurvamento, (b) Arqueamento, (c) Torcimento, (d) Encanoamento



Fonte: ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018

Figura 5 - Esmoado



Fonte: ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018

Dentre as normas estrangeiras referentes a classificação visual de madeira, podem ser citadas: projeto da norma brasileira ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018, norma norte-americana ASTM D245: 2011; norma chilena NCh 1207: 2005; revisão da norma argentina IRAM 9662: 2013 e o projeto da norma europeia prEN 14081: 2013.

Carreira (2003) verificou o método norte-americano de classificação visual do *Southern Pine Inspection Bureau* (SPIB) com base na norma ASTM D245: 1993 para a classificação estrutural de madeira no gênero *Pinus*, na qual a classe é descrita pelo seu nível de qualidade visual (SS², N°1, N°2, N°3) seguida da densidade da madeira (D e ND³). Aplicou-se o método em 600 peças de *Pinus sp.* provenientes de florestas plantadas e os critérios de classificação visual adotados no estudo se mostraram adequados para o *Pinus sp* por ser um método barato e eficaz. Pelos resultados apresentados, percebeu-se que as densidades eram estatisticamente equivalentes para cada classe e, por isso, a presença de defeitos foi muito mais significativa na redução de resistência do que a baixa densidade.

Piter, Zerbino e Blaß (2004) avaliaram a influência das principais características de redução de resistência e de rigidez em amostras de tamanhos estruturais de madeira serrada de *Eucalyptus grandis*. Foram realizados ensaios de flexão, tração e compressão paralela às fibras e, foi obtida uma correlação fraca entre os nós e as resistências a flexão e a tração, apesar dessa relação ser altamente significativa em outros casos relatados pelos autores. A presença de medula e grandes fissuras reduziram significativamente a resistência a flexão, módulo de elasticidade na flexão e resistência a tração, porém registrou-se pouca influência na resistência a compressão. Em muitos casos, a identificação dos anéis de crescimento foi praticamente

² SS – *Select Structural*;

³ D-densa e ND-não densa: a densidade é medida pelo número de anéis de crescimento medidos em uma linha radial representativa de 2,5cm (1") (CARREIRA, 2003).

impossível e a inclinação das fibras apresentou valores muito baixos, por isso essas duas características foram desconsideradas como parâmetros de classificação visual para este estudo.

2.2.2 *Classificação mecânica*

Na classificação mecânica, os métodos não-destrutivos são os mais adequados pois por meio de uma análise quantitativa a peça é classificada pelo valor do módulo de elasticidade à flexão (MOE) e caracterizada em função do módulo de resistência à flexão (MOR), quando for possível correlacionar estatisticamente estes valores (FREITAS, 2004).

Segundo Ross e Pellerin (1994) a hipótese fundamental para os testes não-destrutivos aplicados a madeira foi iniciada por Jayne (1959), no qual autor propôs que as propriedades de energia armazenada e dissipada da madeira podem ser medidas por meios não-destrutivos, em que são controladas pelas mesmas propriedades que determinam o comportamento estático de tal material. Como consequência, as relações matemáticas entre estas propriedades de resistência e elasticidade podem ser alcançadas por meio de análise estatística de regressão.

Dentre os métodos não-destrutivos para a avaliação das propriedades mecânicas da madeira, algumas se destacam em trabalhos científicos:

- Ensaio de flexão estática;
- Método de vibração transversal;
- Método de vibração longitudinal;
- Método de ondas de tensão;
- Método de ondas de ultrassom.

Os valores de módulo de elasticidade dinâmico obtidos pelos métodos de ondas de tensão e por vibração geralmente apresentam altas correlações, porém os valores são maiores do que o módulo de elasticidade pelo ensaio de flexão estática. Isso acontece devido à influência das tensões de cisalhamento na deformação da peça, no caso de relações entre vão livre e a altura da seção transversal das peças (L/h) menores do que 18 (RAYMOND, JOE, *et al.*, 2007; MACK, 1979; ROCCO LAHR, 1983).

De acordo com Carreira (2003), a técnica de vibração transversal apresentou-se como um método expedito, elevada confiabilidade e com menor variabilidade na estimativa do MOE (módulo de elasticidade à flexão) do que a máquina MSR, visto que o valor coeficiente angular

da reta de regressão é muito próximo de 1,0 e o coeficiente de determinação (R^2) obtido com o equipamento de vibração transversal igual a 0,981.

Calil Junior e Miná (2003) também mostraram a boa correlação linear (0,98) que o método não-destrutivo por vibração transversal tem em relação ao módulo de elasticidade dinâmico obtido por esse método e o módulo de elasticidade estático proveniente do ensaio de flexão estática. Foram ensaiadas 326 peças de madeira da espécie *Southen Pine*, e comprovou a eficiência do método de vibração transversal para a classificação de peças estruturais de madeira.

Freitas (2004) utilizou o MSR (*Machine Stress Rate*) para a classificação mecânica não-destrutiva de peças estruturais de *Pinus spp.*, analisando a influência da velocidade de ensaio e a intensidade da carga aplicada nos valores das propriedades mecânicas da peça. De acordo com os resultados obtidos, o autor ressaltou a importância da classificação visual e mecânica para a espécie.

Ballarin e Nogueira (2005) utilizaram o ultrassom como forma de determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda*. Os corpos-de-prova foram ensaiados destrutivamente a compressão paralela às fibras e os resultados mostraram boa sensibilidade do método não-destrutivo na avaliação desse parâmetro mecânico tanto para a madeira juvenil como adulta, com valores superiores a 89% para o coeficiente de determinação das regressões entre a constante dinâmica (C_{LL}) e o módulo de elasticidade à compressão paralela (E_{c0}). Foi verificado que os valores das constantes dinâmicas foram entre 34 e 40% mais elevados que os valores dos módulos de elasticidade à compressão paralela, conforme esperado, considerando a natureza viscoelástica da madeira.

Em Hanhijärvi e Ranta-Maunus (2008) são apresentadas técnicas combinadas de classificação estrutural, como por exemplo, o escaneamento por raio-X, medição de frequências longitudinais, ultrassom, escaneamento visual de placas, medição de frequências naturais de placas, medição acústico-ultrassônica de placas e medição de densidade por escala.

Yang *et al.* (2015) compararam três tipos de ensaios não-destrutivos aplicados a 343 peças de madeiras de *Pinus*, entre os ensaios realizados, incluem, *Continuous proof bending evaluation (Metriguard Model 7200 High Capacity Lumber Tester)*, vibração transversal (*Metriguard E-Computer*) e dois equipamentos para *Stress Waves (Falcon A-Grader e Carter Holt Harvey Diretor HM200)*. Para cada ensaio realizado, foram comparados com os resultados do módulo de elasticidade pelo ensaio de flexão estática segundo ASTM D-198. O valor do coeficiente de determinação (R^2) encontrado entre o módulo de elasticidade à flexão estática (MOE) e o valor do módulo de resistência à flexão (MOR) variou entre 0,30 e 0,46 para os

grupos de seções transversais com dimensões de 38 x 140 mm², 38 x 186 mm², 38 x 236 mm² e 38 x 287 mm². Os valores de R² entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de resistência à flexão variaram entre 0,17 e 0,43 para o ensaio de *Continuous proof bending*, entre 0,19 e 0,35 para o ensaio de vibração transversal e entre 0,23 e 0,34 para o *Stress Waves*. Os autores constataram que para as peças de grandes dimensões, como foi o caso do grupo de peças com dimensões de 38 x 287 mm², a acurácia dos resultados foi menor, isto porque apresentaram maiores concentrações de defeitos, como os nós.

Andrade Junior (2016) apresentou um estudo sobre classificação estrutural de peças de madeira de *Pinus elliottii* utilizando o aparelho portátil *Brookhuis Micro Timber Grader* (MTG) para estimar o módulo de elasticidade por meio de ensaios não-destrutivos de vibração longitudinal. Foram realizados ensaios de flexão estática para comparação dos resultados, e verificou-se que o módulo de elasticidade dinâmico médio para o lote completo foi 13,27% superior aos valores de módulo de elasticidade à flexão estática. A técnica mostrou-se eficaz na classificação mecânica de peças de madeira pelo baixo custo de instalação e alta velocidade de execução, podendo ser utilizado nas serralherias a fim de obter produtos classificados mecanicamente.

Pošta *et al.* (2016) realizaram uma comparação entre diferentes métodos destrutivos e não-destrutivos que incluem as máquinas de classificação mecânica: *Goldeneye 702* e *Metriguard HCLT 7200* e, os dispositivos portáteis: *Sylvatest*, *Fakopp microsecond timber* e *Timber grader MTG*. A comparação foi realizada entre os módulos de elasticidades dinâmicos e estáticos da madeira e as diferentes classes de resistência, na qual o maior valor de correlação encontrado foi para o dispositivo *Timber Grader MTG* (0,97), seguido dos dispositivos de métodos acústicos que também mostraram altos valores de correlação, *Fakopp* (0,95) e *Sylvatest* (0,95). As máquinas de classificação obtiveram valores de correlação próximos aos anteriores, 0,94 para *Metriguard HCLT 7200* e 0,80 para *Goldeneye 702*. Os autores observaram que o módulo de elasticidade estático sendo o que melhor define as classes de resistência da madeira foi cerca de 25% menor do que o módulo de elasticidade dinâmico. Isto foi confirmado pelos valores obtidos dos métodos acústicos *Sylvatest* e *Fakopp*.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de caracterização e de classificação visual e mecânica das peças estruturais de três espécies de madeira de floresta plantada (*Eucalyptus urograndis*, *Schizolobium amazonicum* e *Pinus taeda*) foram realizados no LaMEM (Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).

3.1 Material experimental

As peças estruturais foram fornecidas pela empresa AMATA, nas quais haviam sido passadas pelo processo de secagem. A caracterização e a produção dos corpos de prova para cada ensaio seguiram as recomendações do projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018.

3.1.1 Características gerais

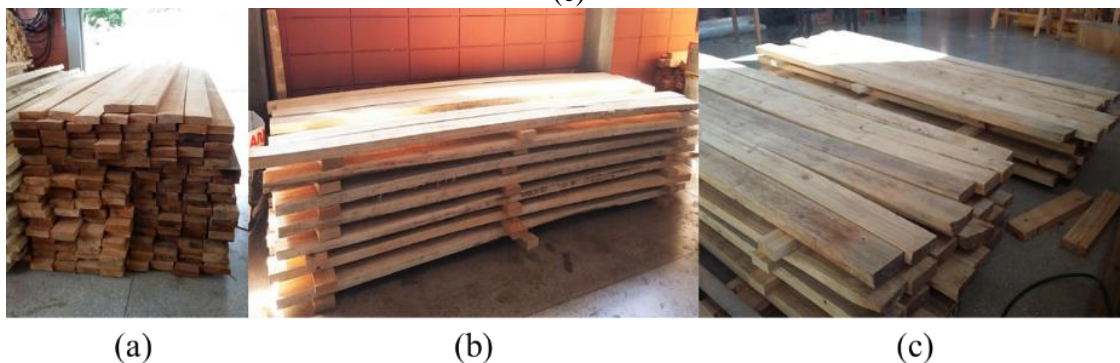
Foram fornecidas 235 peças estruturais de *Eucalyptus urograndis*, *Schizolobium amazonicum* (Paricá) e *Pinus taeda* (Figura 6) com dimensões de 4 cm de espessura, 12 cm de largura e 260 cm de comprimento e, com teor de umidade de aproximadamente 12%. As quantidades podem ser observadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Quantidades de peças para cada lote das espécies avaliadas

Espécie	Quantidades
<i>Eucalyptus urograndis</i>	142
<i>Schizolobium amazonicum</i> (Paricá)	49
<i>Pinus taeda</i>	44

Fonte: Autoria própria.

Figura 6 – Lotes de *Eucalyptus urograndis* (a), *Schizolobium amazonicum* (Paricá) (b) e *Pinus taeda* (c)



Fonte: Autoria própria.

Para cada peça foi determinada a densidade aparente por meio da medição com o paquímetro da altura e largura em três posições ao longo do comprimento e a pesagem na balança com precisão de 50g.

3.1.2 Preparação dos corpos de prova – ensaios laboratoriais

A preparação dos corpos de prova dos ensaios de caracterização das peças estruturais foi realizada de acordo com o projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018.

Para os ensaios de flexão estática e de tração paralela às fibras foram utilizadas as peças estruturais nas suas dimensões assim como foi entregue ao laboratório. Para o restante dos ensaios, os corpos de prova foram retirados a partir das peças rompidas a flexão estática. As dimensões dos corpos de prova são fornecidas no item 3.2.3.

3.2 Métodos

3.2.1 Classificação visual

Foi realizada a classificação visual das peças estruturais de acordo com as recomendações dadas pelo projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018. Em seguida, foi proposta uma tabela de classificação visual e mecânica apropriada para cada espécie em análise.

Dentre os defeitos que foram verificados nas peças estruturais, se destacam, a presença de medula e de nós, fissuras passantes e não passantes, esmoado e os empenamentos, sendo eles, o encurvamento, arqueamento, torcimento, encanoamento.

3.2.2 Avaliação não destrutiva do módulo de elasticidade

Adotou-se o método da vibração transversal para a classificação mecânica não-destrutiva, em que foi utilizado o modelo 340 da Metriguard para a medição da frequência natural e o peso, para então o programa instalado no computador fornecer o módulo de elasticidade dinâmico de cada peça. O ensaio é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Ensaio de vibração transversal



Fonte: Autoria própria.

Primeiramente, foi realizada a calibração do equipamento e a inserção dos dados da peça e, então, posicionou-se a peça sobre os tripés do equipamento, no qual um dos lados tem um suporte em formato de “lâmina” e o outro lado, um suporte pontual, que contém uma célula de carga para a aquisição do peso e da frequência natural da peça.

Em seguida, foi imposta uma vibração à peça, e coletou-se pelo menos dois valores de módulo de elasticidade dinâmico de cada elemento, para então obter um valor médio.

3.2.3 Avaliação destrutiva das propriedades mecânicas

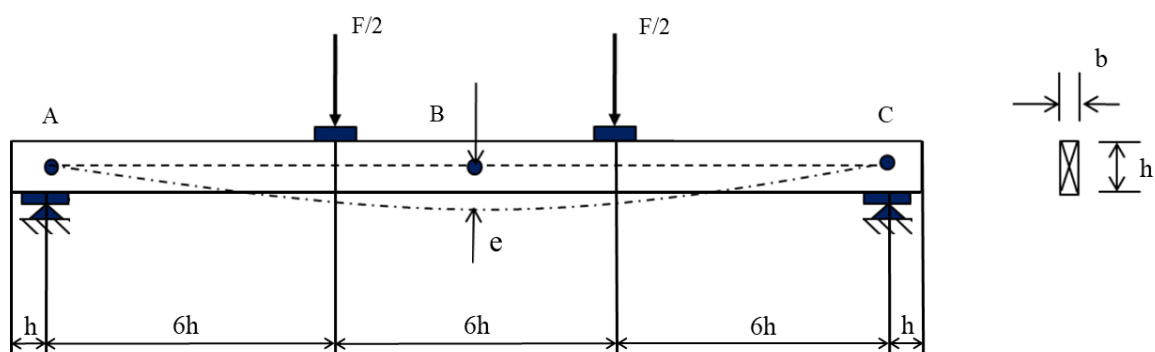
Para os ensaios de caracterização de resistência foi utilizado o projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018, que se baseia na norma internacional ISO 13910: 2014. Os ensaios

realizados consistem em: ensaios de flexão estática a quatro pontos, tração paralela e normal às fibras, compressão paralela e normal às fibras e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

3.2.3.1 Ensaio de flexão estática

O ensaio de flexão estática a quatro pontos busca a determinação do MOE (módulo de elasticidade à flexão) e MOR (módulo de resistência à flexão) de peças estruturais e, consiste em dois pontos de apoio com espaçamento de $18h$ e dois pontos de carga de $F/2$ igualmente espaçados, como podem ser observadas nas Figura 8 e Figura 9.

Figura 8 – Esquema de ensaio para medir a resistência e rigidez à flexão



Fonte: Adaptado ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018.

Figura 9 – Ensaio de flexão estática



Fonte: Autoria própria.

Foi utilizado o pórtico de reação, o cilindro hidráulico e o anel dinamômetro acoplado para a aplicação da carga e o relógio comparador para a leitura dos deslocamentos. Instalou-se dois conjuntos de contraventamentos distribuídos ao longo do vão da peça, a fim de evitar que a peça perca a estabilidade.

O módulo de elasticidade à flexão (MOE), foi determinado com a medição dos incrementos de deslocamentos verticais (Δe), no ponto central localizado em B da Figura 8 e na superfície inferior da viga com incrementos de cargas predeterminados (ΔF), até que a flecha atingisse o valor de $L/300$, pois esse valor garante que o material ainda se encontre no regime elástico-linear. Assim, o MOE foi obtido pela Equação (3.1):

$$MOE = \frac{23}{108} \cdot \left(\frac{L}{h}\right)^3 \cdot \left(\frac{\Delta F}{\Delta e}\right) \cdot \frac{1}{b} \quad (3.1)$$

Sendo:

L (mm): vão livre entre os apoios igual a $18h$;

h (mm): altura da seção transversal;

ΔF (N): incremento de carga;

Δe (mm): incremento de deslocamento;

b (mm): largura da seção transversal.

Alcançado o limite de $L/300$, o relógio comparador foi retirado e a carga foi aplicada gradativamente até que ocorresse a ruptura da peça. Assim, o MOR foi obtido pela Equação (3.2):

$$MOR = \frac{F_{ult} \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (3.2)$$

Sendo:

MOR (MPa): módulo de ruptura à flexão;

F_{ult} (N): carga de ruptura;

L (mm): vão livre entre os apoios igual a $18h$;

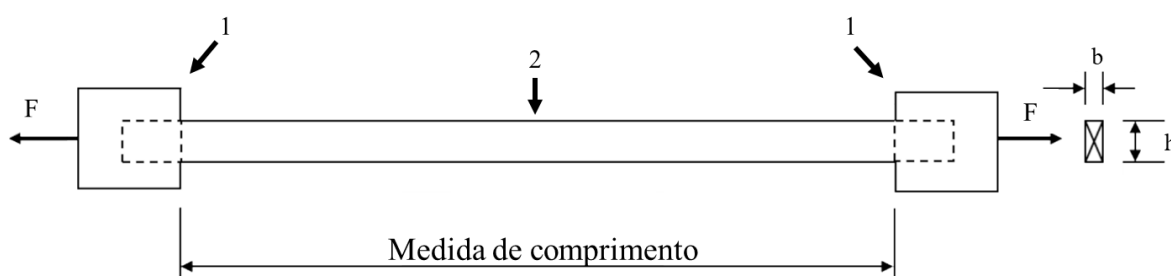
h (mm): altura da seção transversal;

b (mm): largura da seção transversal.

3.2.3.2 Ensaio de tração paralela às fibras

O ensaio de tração paralela às fibras (Figura 10) foi realizado na máquina de ensaio de tração Metriguard 422 *Tension Proof Testers* (Figura 11), sendo (1) representando as garras da máquina que pressiona as extremidades do corpo de prova (2) para que seja possível realizar a tração até a sua ruptura. O valor da carga de ruptura (F_{ult}) foi anotado para determinar a resistência à tração paralela às fibras.

Figura 10 – Esquema de ensaio para medir a resistência à tração paralela às fibras



Fonte: Adaptado ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018.

Figura 11 – Máquina de ensaio de tração Metriguard 422 *Tension Proof Testers*



Fonte: Autoria própria.

A resistência a tração paralela às fibras foi obtida pela Equação (3.3):

$$f_{t,0} = \frac{F_{ult}}{b \cdot h} \quad (3.3)$$

Sendo:

$f_{t,0}$ (MPa): resistência a tração paralela às fibras;

F_{ult} (N): carga de ruptura;

h (mm): altura da seção transversal;

b (mm): largura da seção transversal.

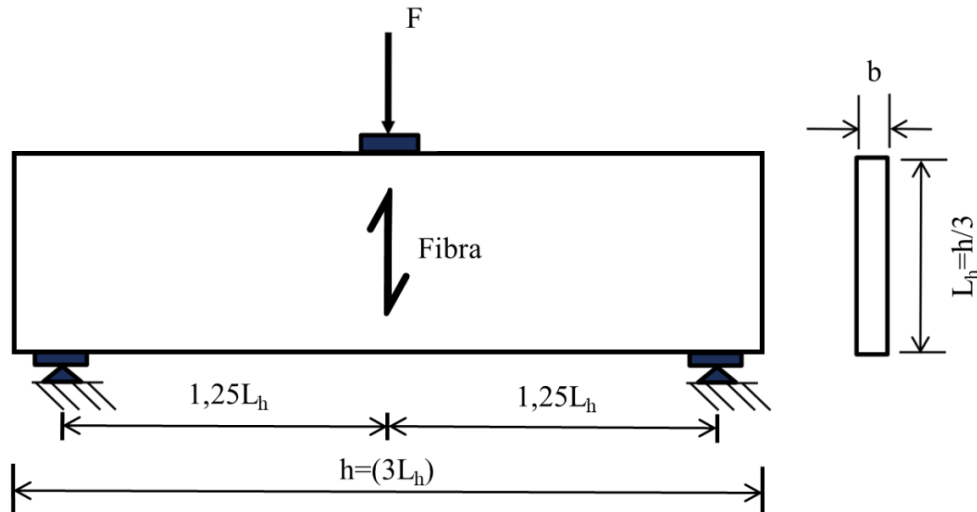
3.2.3.3 Ensaio de tração normal às fibras

O ensaio de tração normal às fibras foi realizado de acordo com o esquema da Figura 12. O ensaio foi realizado na máquina de ensaios da marca EMIC com capacidade de 30kN, mostrado na Figura 13.

Foram extraídos dois corpos de prova de cada peça com dimensão de L_h igual a $h/3$, retirado do comprimento da peça estrutural.

A carga foi aplicada no ponto central e aumentada gradativamente até a sua ruptura. O valor da carga de ruptura (F_{ult}) foi anotado para determinar a resistência à tração normal às fibras.

Figura 12 – Esquema de ensaio para medir a resistência à tração normal às fibras



Fonte: Adaptado ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018.

A resistência a tração normal às fibras foi calculada pela Equação (3.4):

$$f_{t,90} = \left(\frac{3,75 \cdot F_{ult}}{b \cdot h} \right) \cdot \left(\frac{0,03 \cdot b \cdot L_h^2}{800^3} \right)^{0,2} \quad (3.4)$$

Sendo:

$f_{t,90}$ (MPa): resistência a tração normal às fibras;

F_{ult} (N): carga de ruptura, h (m): comprimento do corpo de prova;

b (mm): largura da seção transversal do corpo de prova;

L_h (mm): altura da seção transversal do corpo de prova;

$\left(\frac{0,03 \cdot b \cdot L_h^2}{800^3} \right)^{0,2}$: é o fator que normaliza a resistência a tração para o valor equivalente a

um cubo de madeira com lado igual a 800mm.

Figura 13 – Ensaio de tração normal



Fonte: Autoria própria.

3.2.3.4 Ensaio de compressão paralela às fibras

Os ensaios de compressão paralela às fibras seguiram o processo alternativo do projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018. Foram extraídos dois corpos de prova de cada peça com o comprimento de $6b$. O corpo de prova foi submetido a compressão paralela às fibras até a sua ruptura na máquina universal de ensaios AMSLER, com capacidade de 25000 kgf (Figura 14).

A resistência à compressão paralela às fibras foi calculada pela Equação (3.5):

$$f_{c,0} = \frac{F_{ult}}{b \cdot h} \quad (3.5)$$

Sendo:

$f_{c,0}$ (MPa): resistência a compressão paralela às fibras;

F_{ult} (N): carga de ruptura;

h (mm): altura da seção transversal;

b (mm): largura da seção transversal.

Figura 14 – Ensaio de compressão paralela



Fonte: Autoria própria.

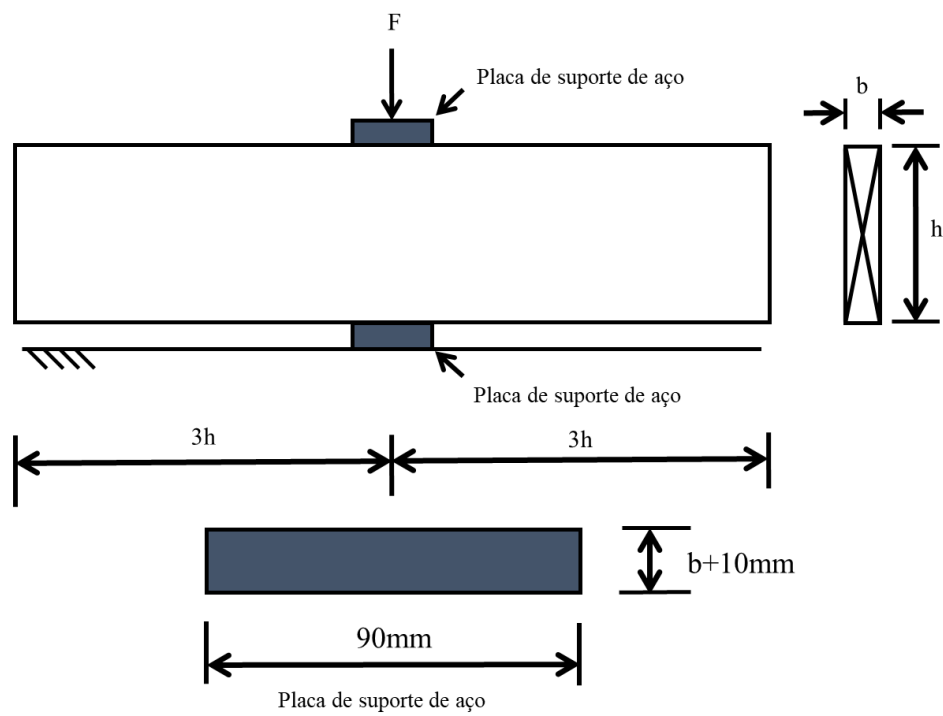
3.2.3.5 Ensaio de compressão normal às fibras

O esquema de ensaio para a determinação da resistência e rigidez à compressão normal às fibras é mostrado na Figura 15. O corpo de prova foi extraído de cada peça com o comprimento igual a $6h$. Foram necessárias duas de placas de aço com dimensões de 90mm de comprimento por $b + 10$ mm de altura posicionados nos apoios de aplicação da carga. A carga F foi aplicada no centro da placa de aço superior.

Utilizou-se um par de transdutores de deslocamento, um em cada lado do corpo de prova, e uma célula de carga para obter valores de carga e deslocamento, como mostrado na Figura 16, e assim, gerar o gráfico de carga aplicada x deslocamento (Figura 17). O corpo de prova foi carregado até que atingisse a ruptura ou o deslocamento máximo de $0,1h$ mm.

Pela geometria dos corpos de prova, foi importante utilizar dispositivos de contraventamento para evitar a instabilidade lateral do corpo de prova.

Figura 15 – Esquema de ensaio para a determinação da resistência à compressão e rigidez normal às fibras



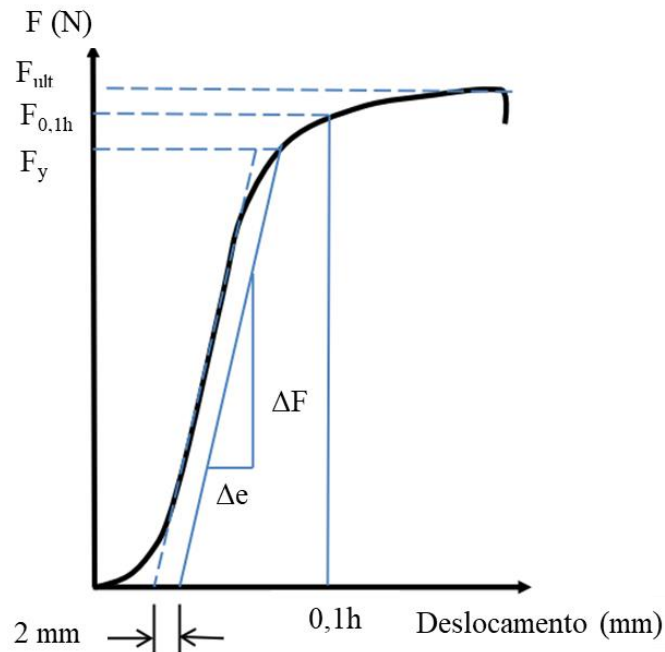
Fonte: Adaptado ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018.

Figura 16 – Ensaio de compressão normal às fibras



Fonte: A autoria própria.

Figura 17 – Gráfico de carga aplicada x deslocamento



Fonte: Adaptado ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018

A resistência a compressão normal às fibras foi calculada pelo menor valor dada pelas Equações (3.6):

$$f_{c,90} = \frac{F_{ult}}{90 \cdot b} \quad \text{ou} \quad f_{c,90} = \frac{F_{0,1h}}{90 \cdot b} \quad (3.6)$$

Sendo:

$f_{c,90}$ (MPa): resistência a compressão normal às fibras;

F_{ult} (N): carga de ruptura;

$F_{0,1h}$ (N): carga correspondente a um deslocamento de 0,1h mm;

b (mm): largura da seção transversal.

O limite de plastificação $f_{c,90y}$ (MPa) foi obtido pela Equação (3.7):

$$f_{c,90y} = \frac{F_y}{90 \cdot b} \quad (3.7)$$

Sendo:

F_y (N): valor da carga obtida na interseção da curva do gráfico (Figura 17) com uma reta paralela à inclinação da curva do ensaio correspondente ao regime elástico-linear deslocada em 2 mm;

b (mm): largura da seção transversal.

A rigidez na compressão normal às fibras $K_{c,90}$ (MPa/mm) foi calculada pela Equação (3.8):

$$K_{c,90} = \frac{\Delta F / \Delta e}{90 \cdot b} \quad (3.8)$$

Sendo:

$\Delta F / \Delta e$: o coeficiente de inclinação da reta correspondente ao regime elástico-linear do gráfico da Figura 17;

b (mm): largura da seção transversal.

3.2.3.6 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

O ensaio de cisalhamento paralelo às fibras foi realizado assim como mostrado nas Figura 18 e Figura 19. O corpo de prova foi extraído de cada peça com o comprimento igual a $7h$. Para este ensaio, foram necessárias três placas de aço com dimensões de 120 mm de comprimento e 20 mm de altura, posicionadas nos apoios e no ponto de aplicação da carga. A carga foi aplicada até que ocorresse a ruptura do corpo de prova. O método de ensaio também foi abordado nos estudos de Santos (2016).

Figura 18- Esquema de ensaio para medir a resistência ao cisalhamento paralela às fibras

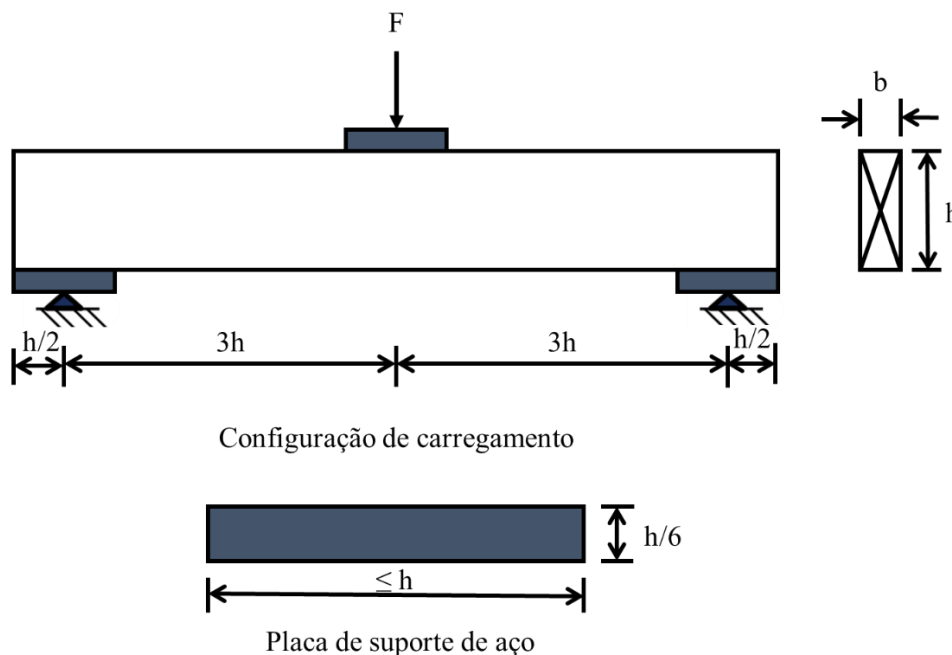


Figura 19 – Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras



Fonte: Autoria própria.

Alguns modos de ruptura não apresentaram o de cisalhamento, como por exemplo, a flexão ou compressão normal às fibras. Porém, todos os resultados foram anotados e utilizados para avaliar a resistência ao cisalhamento.

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras f_v (MPa) foi calculada pela Equação (3.9):

$$f_v = \frac{0,75 \cdot F_{ult}}{b \cdot h} \quad (3.9)$$

Sendo:

f_v (MPa): resistência ao cisalhamento paralela às fibras;

F_{ult} (N): carga de ruptura;

h (mm): altura da seção transversal;

b (mm): largura da seção transversal.

3.3 Análises estatísticas

Com a finalidade de analisar os resultados obtidos das propriedades mecânicas das três espécies de forma condensada, foram calculadas algumas medidas de posição e dispersão, como a média, desvio padrão e coeficiente de variação.

O boxplot é um gráfico utilizado para visualizar a distribuição empírica dos dados, formado pelos valores do limite inferior, primeiro quartil, mediana, terceiro quartil e limite superior. Por meio dele é possível identificar com facilidade valores discrepantes, tanto

máximos quanto mínimos, chamados de *outliers*. Assim, o boxplot foi utilizado com a intenção de observar a distribuição dos dados das propriedades mecânicas obtidos experimentalmente das peças estruturais agrupados em espécies e classes de resistência que foram propostas. Foi analisada a variabilidade de cada propriedade por meio de valores adimensionais inseridos em boxplot. Estes valores foram calculados pela divisão de cada valor experimental pela mediana correspondente a cada propriedade.

Foram realizados ainda, testes estatísticos como forma de extrair informações sobre as propriedades mecânicas das espécies analisadas. Para a análise da relação entre algumas propriedades físicas e mecânicas, foi realizada a análise de correlação simples (correlação de Spearman).

As tabelas foram detalhadas por propriedade mecânica sendo elas: módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}), módulo de elasticidade estático (MOE), módulo de ruptura à flexão (MOR), tração paralela às fibras (f_{t0}), tração normal às fibras (f_{t90}), compressão paralela às fibras (f_{c0}), compressão normal às fibras (f_{c90}) e cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}).

As análises dos resultados realizados nesse trabalho foram:

1. Tabela com a estatística descritiva de cada propriedade mecânica das peças estruturais analisadas (tamanho da amostra, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação);
2. Tabela com os valores de média, desvio padrão e os valores característicos (limite do 5-percentil inferior) de acordo com cada norma avaliada;
3. Boxplot;
4. Teste de normalidade (Andrade-Darling (AD));
5. Teste não-paramétrica de Kruskal-Wallis (três amostras) e Teste de Dunn para *E. urograndis* e teste de Wilcoxon-Mann-Whitney não-pareado (duas amostras) para *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*;
6. Análise de agrupamento;
7. Análise de componentes principais.

3.3.1 Teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis e teste de Dunn

O teste de Kruskal-Wallis é um teste não-paramétrico para a verificação quanto a diferença das medianas de três ou mais amostras, em que é utilizado quando as pressuposições de normalidade dos dados e a homocedasticidade de variância não for atendida.

Este teste foi realizado para a verificação das amostras das classes de resistência das peças de *Eucalyptus urograndis*. Adotou-se como a hipótese nula de que todas as amostras possuem valores de medianas estatisticamente iguais.

Um valor-p abaixo de 0,05 (a um nível de significância de 5%) indica que houve indícios de que pelo menos duas populações possuem distribuições diferentes, ou seja, pelo menos uma difere das demais.

Caso o teste de Kruskal-Wallis rejeite a hipótese nula, então, entende-se que houve uma diferença significativa entre pelo menos duas amostras. Para identificar quais as amostras que apresentaram diferenças, foi aplicado o teste de Dunn em pares de amostras, para a verificação das amostras responsáveis pela rejeição da hipótese nula.

3.3.2 *Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney*

O teste de Wilcoxon-Mann-Whitney é um teste não-paramétrico utilizado para a verificação se duas amostras não pareadas pertencem a uma mesma população, em que verifica se há diferenças das medianas. Este teste foi realizado nas amostras das classes de resistências de *Schizolobium amazonicum* e *Pinus taeda*. A hipótese nula adotada é de que as amostras apresentam igualdade de medianas. Para valor-p abaixo de 0,05 (a um nível de significância de 5%) indica que houve evidências de que as medianas das amostras são diferentes.

3.3.3 *Análise de agrupamento*

Emprega-se a análise de agrupamento cujas técnicas multivariadas tem como principal finalidade reunir objetos com base nas suas características e classificá-los em grupos pela similaridade. Os agrupamentos resultantes de objetos devem exibir elevada homogeneidade interna e elevada heterogeneidade externa (HAIR *et al.*, 2009). O uso dessa análise tem sido para fins exploratórios e confirmatórios, na qual as classes teóricas propostas foram comparadas com os grupos derivados da análise de agrupamento.

Foi realizada a padronização dos dados para eliminar os efeitos causados pela utilização de escalas de medida em grandezas diferentes, não apenas ao longo das variáveis, mas também para a mesma variável. Em geral, variáveis com maior dispersão têm maior interferência sobre o valor de similaridade final (HAIR *et al.*, 2009).

Como medida de similaridade foi escolhida a distância euclidiana e o método de agrupamento hierárquico de Ward, que estabelece os agrupamentos considerando a estrutura de variabilidade dentro dos grupos (BALLARIN *et al.*, 2018).

A distância euclidiana d_{ij} do elemento i ao elemento j é calculada pela Equação (3.10):

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (y_{ik} - y_{jk})^2} \quad (3.10)$$

Onde:

y_{ik} e y_{jk} são os valores observados da variável k , $k = 1, 2, \dots, p$ para os indivíduos i e j .

De acordo com Hair *et al* (2009) o método de Ward é o procedimento de agrupamento hierárquico cuja similaridade usada para juntar agrupamentos é calculada como a soma de quadrados entre os dois agrupamentos somados sobre todas as variáveis. Esse método busca formar agrupamentos de tamanhos aproximadamente iguais devido a minimização de variação interna.

O método baseia-se na formação dos grupos pela maximização da homogeneidade dentro dos grupos ou a minimização do total das somas de quadrados dentro dos grupos que é utilizada como medida de homogeneidade. Os grupos são formados em cada etapa, de modo que a solução tenha o menor valor da soma de quadrados dentro dos grupos, também conhecida como a soma de quadrados de erros (ESS) (SHARMA, 1996), calculada pela Equação (3.11):

$$EES = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (3.11)$$

Sendo:

n é o número de elementos do agrupamento e o x_i é o i -ésimo elemento do agrupamento (WARD JR, 1963).

O dendograma mostra graficamente como os agrupamentos são combinados em cada passo do procedimento hierárquico até que todos os elementos estejam unidos em um único agrupamento (HAIR *et al.*, 2009). Foram utilizados os dendogramas como representação gráfica do procedimento no qual cada elemento foi colocado no eixo horizontal e os níveis de similaridade no eixo vertical.

Para visualização do comportamento da soma de quadrados dentro dos grupos foram gerados os gráficos que definiram o número adequado de grupos que deveriam ser formados a um nível desejável de similaridade dentro dos grupos.

Pela matriz de classificação foi possível avaliar a concordância entre os elementos das classes de resistência propostas e os elementos dos grupos criados pela análise de agrupamento.

3.3.4 Análise de componentes principais

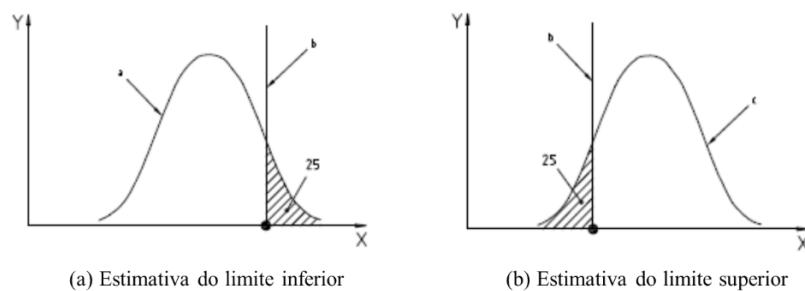
A análise de componentes principais é uma técnica estatística que permite redução das dimensões da matriz de dados com a menor perda possível da informação, por meio de combinações lineares entre as variáveis, transformando o conjunto de dados com variáveis correlacionadas entre si em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas, chamadas de “componentes principais” (SALES e ROCCO LAHR, 1996; BALLARIN, RODRIGUES, *et al.*, 2018; JOHNSON e WICHERN, 2007).

3.4 Determinação do valor característico

3.4.1 ISO 13910: 2005

Pela norma internacional ISO 13910: 2005 os valores característicos de resistência para cada amostra de espécies de madeira f_k estão relacionados com a estimativa do limite inferior ou superior do 5-percentil do valor de resistência. Ou seja, o limite inferior ($f_{data,0,05,l}$) está relacionado aos 25% de chance de ser maior do que o valor verdadeiro do 5-percentil da população de referência (Figura 20(a)), isto é, a chance de 25% de ser maior do que o valor de 5% da amostra e, o limite superior ($f_{data,0,05,u}$) está relacionado aos 25% de chance de ser menor do que o valor verdadeiro de 5-percentil da população de referência (Figura 20(b)).

Figura 20 – Estimativa dos limites inferior e superior do 5-percentil de resistência da amostra



x – Resistência; Y – Frequência; a – $f_{data,0,05,l}$ Estimativa do limite inferior do 5-percentil; b – Valor verdadeiro do 5-percentil da população de referência; c – $f_{data,0,05,u}$ Estimativa do limite superior do 5-percentil.

Fonte: Adaptado de ISO 13910: 2005.

Os dados de resistência foram ordenados em ordem crescente de magnitude e o valor do percentil p_i do i -ésimo corpo de prova foi calculado pela Equação (3.12):

$$p_i = \frac{(i - 0,5)}{N} \quad (3.12)$$

Sendo:

i : i -ésimo elemento, em ordem crescente;

N : tamanho da amostra.

Foi traçado o gráfico de $\ln(f_i) \times \ln[-\ln(1-p_i)]$ utilizando os 15 valores mais baixos ou os 15% mais baixos (o que for maior) desse conjunto, onde \ln é o logaritmo natural. Em seguida, ignorando os dois valores mais baixos (devido a sua variabilidade), foi traçado uma linha de regressão com esses dados. Com o valor da inclinação dessa linha, denotada por (s), é calculado o coeficiente de variação (CV_{tail}), pela Equação (3.13), ajustado para a cauda de uma distribuição de Weibull.

$$CV_{tail} = s^{-0,92} \quad (3.13)$$

O valor característico (fk) é determinado como sendo o valor relativo ao limite inferior do 5-percentil, dado pela Equação (3.14):

$$fk = f_{data,0,05,l} = \left(1 - \frac{2,7 \cdot CV_{tail}}{\sqrt{N}}\right) \cdot f_{0,05,data} \quad (3.14)$$

Sendo:

CV_{tail} : coeficiente de variação da distribuição de Weibull;

N : tamanho da amostra;

$f_{0,05, data}$: valor do 5-percentil, obtido por interpolação linear entre os valores de p-percentil.

Dessa forma, foram determinados os valores característicos de resistência relacionados aos ensaios de caracterização de resistência referente às três espécies de madeira separados em classes de acordo com a classificação visual e mecânica.

3.4.2 UNE-EN 14358: 2016

Pela norma espanhola UNE-EN 14358:2016, o valor característico (m_k) de um parâmetro de resistência do material ou de uma resistência m dada em forma de variável aleatória, se define como o percentil de ordem p (5%) em uma função de distribuição de m , correspondente a uma série de ensaios supostamente infinita.

Considerando que um parâmetro de resistência tenha uma distribuição log-normal, o valor médio \bar{y} e o desvio padrão s_y foram determinados pelas Equação (3.15) e Equação (3.16), respectivamente:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad (3.15)$$

$$s_y = \text{máx} \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2} \\ 0,05 \end{array} \right. \quad (3.16)$$

Sendo:

\bar{y} : valor médio da amostra;

n : número de valores obtidos experimentalmente;

m_i : valor individual do ensaio i da variável aleatória m ;

s_y : valor do desvio padrão.

O valor característico da amostra para o percentil de 5% com distribuição log-normal foi determinado pela Equação (3.17):

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) \quad (3.17)$$

Sendo:

m_k : valor correspondente ao percentil de 5% da variável aleatória m ;

\bar{y} : valor médio da amostra;

$k_s(n)$: coeficiente utilizado para calcular os valores característicos das propriedades ensaiadas, sendo n o número de valores obtidos experimentalmente;

s_y : valor do desvio padrão.

Para a distribuição normal de um parâmetro de resistência, o valor médio \bar{y} e o desvio padrão s_y foram determinados pelas Equações (3.18) e (3.19):

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (3.18)$$

$$s_y = \text{máx} \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2}, 0,05 \right. \quad (3.19)$$

Sendo:

\bar{y} : valor médio da amostra;

n : número de valores obtidos experimentalmente;

m_i : valor individual do ensaio i da variável aleatória m ;

s_y : valor do desvio padrão.

O valor característico da amostra para o percentil de 5% com distribuição normal foi estimado pela Equação (3.20):

$$m_k = \bar{y} - k_s(n)s_y \quad (3.20)$$

Sendo:

m_k : valor correspondente ao percentil de 5% da variável aleatória m ;

\bar{y} : valor médio da amostra;

$k_s(n)$: coeficiente utilizado para calcular os valores característicos das propriedades ensaiadas, sendo n o número de valores obtidos experimentalmente;

s_y : valor do desvio padrão.

O valor de $k_s(n)$ foi obtido pela Equação (3.21):

$$k_s(n) = \frac{6,5n + 6}{3,7n - 3} \quad (3.21)$$

Sendo:

n : número de valores obtidos experimentalmente;

3.4.3 ABNT NBR 7190: 1997

Para a caracterização completa da resistência da madeira serrada, a norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997 recomenda uma amostragem mínima de 12 corpos-de-prova e 6

corpos-de-prova para a caracterização simplificada. Os valores característicos das propriedades da madeira devem ser estimados pela Equação (3.22):

$$x_{wk} = \left(2 \cdot \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - x_{\frac{n}{2}} \right) \cdot 1,1 \quad (3.22)$$

Onde os resultados das resistências obtidas experimentalmente devem colocados em ordem crescente ($x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$), desprezando o valor mais alto se o número de corpos-de-prova for ímpar. O valor de x_{wk} não deve ser menor do que o menor valor da amostra (x_1) e nem inferior a 0,7 do valor médio.

3.5 Proposta de tabela de classes de resistência

A proposta de classes de resistência para peças estruturais das três espécies em análise foi de acordo com a norma internacional ISO 16958: 2014, que disponibiliza uma metodologia de elaboração de um sistema de classes de resistência para madeira serrada. A população foi definida em termos de espécies (*Eucalyptus urograndis*, *Schizolobium amazonicum* e *Pinus taeda*), em que foi adotado o sistema de classificação visual e mecânica para a definição das classes de resistência.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Classificação visual

A partir dos resultados da densidade aparente, defeitos, pesagem e o ensaio de vibração transversal, foram elaboradas as tabelas de classificação visual e mecânica (Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23). Isso possibilita a classificação da peça de modo não-destrutivo para uso em escala industrial. A elaboração dessas tabelas para cada espécie, seguiu o projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018 e a norma argentina IRAM 9662: 2013 e, posteriormente, foram avaliadas a adequação do número de classes de resistência com a análise de agrupamento dos dados obtidos neste trabalho.

O resultado da classificação visual e mecânica das peças para as três espécies estudadas é apresentado na Tabela 20. As tabelas de classificação visual e mecânica utilizadas são apresentadas nas Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 20 – Quantidades de peças classificadas visualmente

<i>Espécie</i>	<i>Classe</i>	<i>Quantidade</i>	<i>%</i>
<i>Eucalyptus urograndis</i>	Classe 1	12	8,45
	Classe 2	37	26,06
	Classe 3	68	47,88
	Descarte	25	17,61
<i>Schizolobium amazonicum</i>	Classe 1	10	20,41
	Classe 2	25	51,02
	Descarte	14	28,52
<i>Pinus taeda</i>	Classe 1	8	18,18
	Classe 2	22	50,00
	Descarte	14	31,81

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21 – Tabela de classificação visual e mecânica para peças estruturais de *Eucalyptus urograndis*

Classificação visual			
Defeito	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	Não se admite		
Nós (mm)	Menor do que 1/5 da face larga	Menor do que 1/3 da face larga	Menor do que 1/2 da face larga
Inclinação das fibras	Menor do que 1:12	Menor do que 1:9	Menor do que 1:6
Fissuras não passantes (m)	O comprimento das fissuras não deve ser maior do que 1,0m e nem:		
	1/6 do comprimento da peça	1/5 do comprimento da peça	1/4 do comprimento da peça
Fissuras passantes (m)	Somente se permite as fissuras passantes nos extremos e seu comprimento não deve ser maior do que:		
	uma vez a largura	duas vezes a largura	três vezes a largura
Encurvamento e arqueamento (mm)	Menor do que 6mm a cada 1,0m de comprimento	Menor do que 8mm a cada 1,0m de comprimento	Menor do que 10mm a cada 1,0m de comprimento
Torcimento (mm/mm)	Menor do que 3mm a cada 25mm de largura	Menor do que 4mm a cada 25mm de largura	Menor do que 5mm a cada 25mm de largura
Encanoamento (mm)	Sem restrição para o encanoamento		
Esmoadado (mm/mm)	Transversalmente menor do que 1/5 da largura ou espessura da peça	Transversalmente menor do que 1/4 da largura ou espessura da peça	Transversalmente menor do que 1/3 da largura ou espessura da peça
Ataques biológicos	Não se admitem zonas atacadas por fungos causadores de podridão; Admitem-se zonas atacadas por fungos cromógenos; Admitem-se orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2mm.		
Madeiras de reação (mm/mm)	Menor ou igual a 1/5		
Outros	Danos mecânicos, presença de bolsas de resina e outros defeitos que se limitam por analogia com alguma característica similar.		
Classificação mecânica			
Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Densidade (kg/m ³)	>650	>600	>500
MOE (MPa)	>13.000	>12.000	>10.000

Tabela 22 – Tabela de classificação visual e mecânica para peças estruturais de *Schizolobium amazonicum* (Paricá)

Classificação visual		
Defeito	Classe 1	Classe 2
Medula	Não se admite	
Nós (mm)	Menor do que 1/4 da face larga	Menor do que 1/2 da face larga
Inclinação das fibras	Menor do que 1:12	
Fissuras não passantes (m)	O comprimento das fissuras não deve ser maior do que 1,0m e nem:	
	1/5 do comprimento da peça	1/4 do comprimento da peça
Fissuras passantes (m)	Somente se permite as fissuras passantes nos extremos e seu comprimento não deve ser maior do que:	
	uma vez a largura	duas vezes a largura
Encurvamento e arqueamento (mm)	Menor do que 10mm a cada 1,0m de comprimento	Menor do que 12mm a cada 1,0m de comprimento
Torcimento (mm/mm)	Menor do que 4mm a cada 25mm de largura	Menor do que 5mm a cada 25mm de largura
Encanoamento (mm)	Sem restrição para o encanoamento	
Esmoadado (mm/mm)	Transversalmente menor do que 1/4 da largura ou espessura da peça	Transversalmente menor do que 1/3 da largura ou espessura da peça
Ataques biológicos	Não se admitem zonas atacadas por fungos causadores de podridão; Admitem-se zonas atacadas por fungos cromógenos; Admitem-se orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2mm.	
Madeiras de reação (mm/mm)	Menor ou igual a 1/5	
Outros	Danos mecânicos, presença de bolsas de resina e outros defeitos que se limitam por analogia com alguma característica similar.	
Classificação mecânica		
Propriedade	Classe 1	Classe 2
Densidade (kg/m ³)	>350	>250
MOE (MPa)	>7.500	>5.000

Tabela 23 – Tabela de classificação visual e mecânica das peças estruturais de *Pinus taeda*

Classificação visual		
Defeito	Classe 1	Classe 2
Medula	Não se admite	
Nós (mm)	Menor do que 1/3 da face larga	Menor do que 2/3 da face larga
Inclinação das fibras (mm/mm)	Menor do que 1:9	Menor do que 1:7
Anéis de crescimento (mm)	Menor do que 10	Menor do que 15
Fissuras não passantes (m)	O comprimento das fissuras não deve ser maior do que 1,0m e nem: 1/4 do comprimento da peça 1/3 do comprimento da peça	
Fissuras passantes (m)	Somente se permite as fissuras passantes nos extremos e seu comprimento não deve ser maior do que: uma vez a largura duas vezes a largura	
Encurvamento e arqueamento (mm)	Menor do que 10mm a cada 1,0m de comprimento	Menor do que 12mm a cada 1,0m de comprimento
Torcimento (mm/mm)	Menor do que 3mm a cada 25mm de largura	Menor do que 4mm a cada 25mm de largura
Encanoamento (mm)	Sem restrição para o encanoamento	
Esmoadado (mm/mm)	Sem restrição para o comprimento do esmoado Transversalmente menor do que 1/5 da espessura ou largura da peça Transversalmente menor do que 1/4 da largura ou espessura da peça	
Ataques biológicos	Não se admitem zonas atacadas por fungos causadores de podridão;	Admitem-se zonas atacadas por fungos cromógenos;
Madeiras de reação (mm/mm)	Menor ou igual a 1/5	
Outros	Danos mecânicos, presença de bolsas de resina e outros defeitos que se limitam por analogia com alguma característica similar.	
Classificação mecânica		
Propriedade	Classe 1	Classe 2
Densidade (kg/m ³)	>420	>390
MOE (MPa)	>7.000	>5.500

As peças de *Eucalyptus urograndis* apresentaram empenamentos excessivos e grandes fissuras passantes e não passantes. O destarte e a limitação das classes ocorreram, principalmente, por esses defeitos visuais. Nas peças de *Schizolobium amazonicum* (Paricá), os empenamentos excessivos e a presença de medula foram os fatores que mais reprovaram e limitaram as classes de resistência das peças. O *Pinus taeda* apresentou grande limitação com relação, principalmente, à presença de nós nas peças e por empenamentos excessivos.

A inclinação das fibras não foi um defeito limitante para a classificação visual em nenhuma das espécies. Os limites do projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-1: 2018 e da norma argentina IRAM 9662: 2013 não foram atingidos nos casos estudados.

Nas Figura 21 até Figura 28 são apresentados os principais defeitos que reprovaram as peças estruturais das três espécies trabalhadas.

Figura 21 – Peças com defeitos de fissuras detectados no *Eucalyptus urograndis*



Fonte: Autoria própria.

Figura 22 – Peça com defeito de encurvamento detectado no *Pinus taeda*



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Peça com defeitos de torcimento, fissura não passante e encanoamento encontrados no *Eucalyptus urograndis*



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Peça com defeito de torcimento detectado no *Eucalyptus urograndis*



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Peça com defeito de encanoamento detectado no *Eucalyptus urograndis*



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Peça com defeito de arqueamento acentuado no *Pinus taeda*



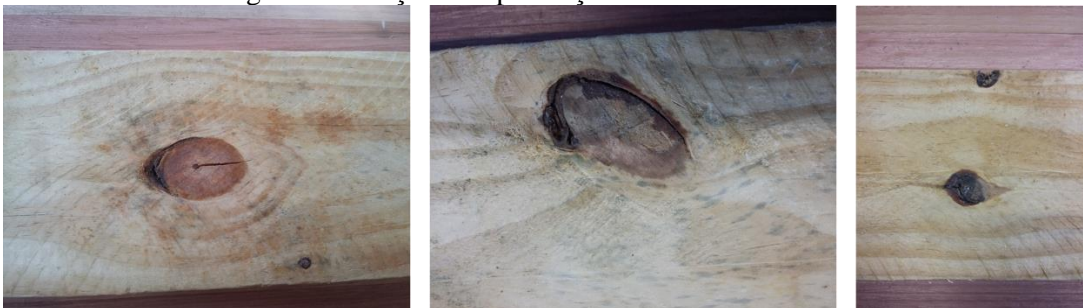
Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Peça com presença de esmoado encontrado no *Pinus taeda*



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Peças com presença de nós no *Pinus taeda*



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 24 é apresentada a estatística descritiva da densidade aparente das peças estruturais para as três espécies estudadas, nos quais os valores obtidos para cada peça são discriminados nas Tabela.72, Tabela 73 e

Tabela 74 (Apêndice 1 – Densidade aparente).

Tabela 24 – Estatística descritiva dos resultados da densidade aparente

Estatística descritiva	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valor médio (kg/m³)	645	325	497
Desvio padrão (kg/m³)	65	46	60
Mediana (kg/m³)	638	318	504
Coefficiente de variação (%)	10,06	14,10	12,04
Valor máximo (kg/m³)	885	480	611
Valor mínimo (kg/m³)	523	253	371
Quantidade de peças	142	49	44

Fonte: Autoria própria.

Os valores médios e os desvios padrão da densidade aparente para cada classe de resistência são mostrados na Tabela 25.

Tabela 25 – Densidade aparente média em cada uma das classes de resistência das espécies ensaiadas

<i>Espécie</i>	Classe	Quantidade	$\rho_{ap.m}$ (kg/m³)	Desvio padrão (kg/m³)
<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Classe 1</i>	12	718	63
	<i>Classe 2</i>	37	672	56
	<i>Classe 3</i>	68	628	59
<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Classe 1</i>	8	375	21
	<i>Classe 2</i>	27	309	28
<i>Pinus taeda</i>	<i>Classe 1</i>	8	535	43
	<i>Classe 2</i>	22	482	51

Fonte: Autoria própria.

4.2 Propriedades mecânicas das peças estruturais

4.2.1 Módulo de elasticidade dinâmico pelo método da vibração transversal

Na Tabela 26 é apresentada a estatística descritiva para os dados do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) obtidos no ensaio de vibração transversal com as três espécies estudadas. Nas Tabela.75, Tabela 76 e Tabela 77 (Apêndice 2 – Módulo de elasticidade dinâmico (E_{din})) são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de vibração transversal para cada espécie.

Tabela 26 – Estatística descritiva dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din})

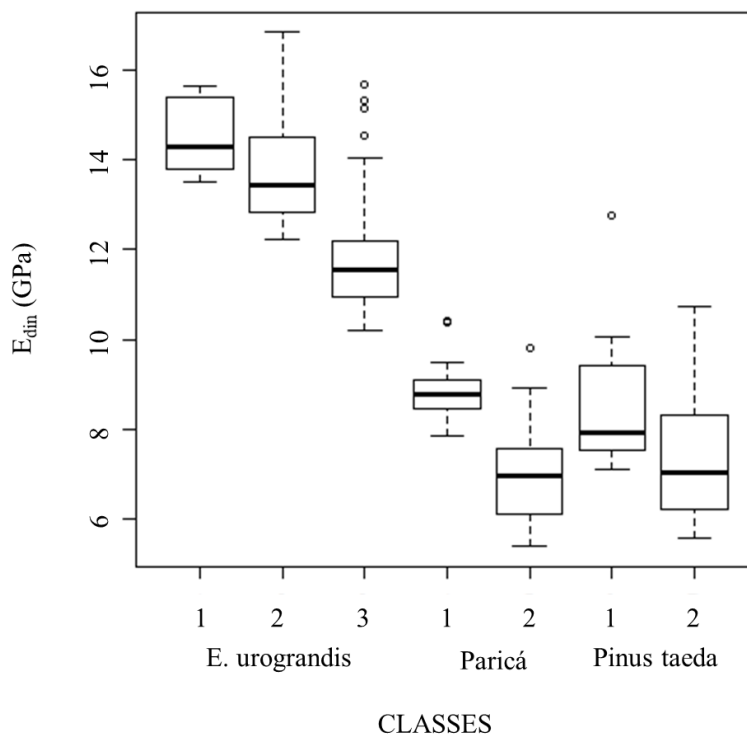
Estatística descritiva	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valor médio (MPa)	12.411	7.505	7.564
Desvio padrão (MPa)	1.746	1.516	1.926
Mediana (MPa)	12.280	7.370	7.370
Coefficiente de variação	14,06%	20,20%	25,46%
Valor máximo (MPa)	16.835	11.035	12.773
Valor mínimo (MPa)	8.260	4.675	3.463
Quantidade de peças	142	49	44

Fonte: Autoria própria.

O *Eucalyptus urograndis* apresentou o maior valor médio de E_{din} (12.411MPa) e o menor valor do coeficiente de variação (14,06%) dentre as três espécies analisadas. O *Schizolobium amazonicum* (Paricá) apesar da sua baixa densidade aparente, apresentou o valor médio de E_{din} muito próximo ao *Pinus taeda*.

Foi possível notar que a maior variabilidade ocorreu para o *Pinus taeda* de acordo com os valores do desvio padrão (1.926MPa) e o coeficiente de variação (25,46%). Ballarin (2016) obteve valor médio de E_{din} para o *Pinus ssp.* próximo de 7.932MPa com desvio padrão e coeficiente de variação de 2.567MPa e 32,36%, respectivamente, que são superiores aos valores da Tabela 26.

A distribuição dos valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) foram analisados por diagramas de boxplot em que foram separados por classes de resistência (Figura 29).

Figura 29 – Boxplot dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din})

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 27 são apresentados os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico de cada espécie separadas em classes de resistência.

Tabela 27 – Módulo de elasticidade dinâmico médio em cada uma das classes de resistência das espécies ensaiadas

<i>Espécie</i>	<i>Classe</i>	<i>Quantidade</i>	E_{din} médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)
<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Classe 1</i>	12	14.528	798
	<i>Classe 2</i>	37	13.688	1.305
	<i>Classe 3</i>	68	11.779	1.222
<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Classe 1</i>	8	9.051	851
	<i>Classe 2</i>	27	7.124	1.128
<i>Pinus taeda</i>	<i>Classe 1</i>	8	8.843	1.785
	<i>Classe 2</i>	22	7.447	1.392

Fonte: Autoria própria.

Para as três espécies observou-se que os maiores valores de módulos de elasticidade dinâmico pertencem a melhor classe (Classe 1) e os menores valores de módulos de elasticidade dinâmico pertencem a pior classe de cada espécie, assim como esperado.

4.2.2 Flexão estática

Na Tabela 28 é apresentada a estatística descritiva do módulo de elasticidade (MOE) obtido no ensaio de flexão estática em quatro pontos das três espécies estudadas, cujos valores experimentais para cada peça ensaiada são mostrados nas Tabela 78, Tabela 80 e Tabela 82 (Apêndice 3 – Ensaio de flexão estática).

Tabela 28 – Estatística descritiva dos resultados do módulo de elasticidade à flexão (MOE)

Estatística descritiva	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valor médio (MPa)	11.950	9.010	7.413
Desvio padrão (MPa)	1.398	1.205	1.907
Mediana (MPa)	11.724	8.952	7.036
Coefficiente de variação	11,70%	13,37%	25,72%
Valor máximo (MPa)	16.910	11.291	12.536
Valor mínimo (MPa)	9.170	6.832	4.668
Quantidade de peças	89	27	19

Fonte: Autoria própria.

Observou-se que o valor médio do MOE obtido para o *Pinus taeda* (7.413MPa) foi muito próximo ao valor médio do E_{din} (7.564MPa). O mesmo ocorreu para o *Eucalyptus urograndis*, com valores médios de MOE (11.950MPa) e E_{din} (12.411MPa) considerados bem próximos. Para ambas espécies foram obtidos valores superiores para os E_{din} em relação ao MOE.

Para a espécie de *Schizolobium amazonicum* foi obtido um valor médio superior para o MOE (9.010MPa) em relação ao E_{din} (7.505MPa). Isso, provavelmente, deve-se a influência dos defeitos de empenamentos excessivos na aferição da frequência natural no ensaio de vibração transversal. Terezo (2010) especificou valores de propriedades mecânicas para o gênero *Schizolobium*, com valores de MOE para a madeira seca de 6.500MPa e 8.200MPa para as densidades específicas de 0,24g/cm³ e 0,49g/cm³, respectivamente.

De modo geral, a diferença entre os valores de módulos de elasticidades também foi provocada pelo posicionamento da peça. No ensaio de vibração transversal a peça estrutural foi posicionada na menor inércia e, para o ensaio de flexão estática foi posicionada na maior inércia.

Na Tabela 29 são apresentados os valores médios do módulo de elasticidade (MOE) de cada espécie separadas em classes de resistência.

Tabela 29 – Módulo de elasticidade médio em cada uma das classes de resistência das espécies ensaiadas

<i>Espécie</i>	<i>Classe</i>	Quantidade	MOE médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)
<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Classe 1</i>	9	13.421	1.278
	<i>Classe 2</i>	28	12.950	1.230
	<i>Classe 3</i>	52	11.157	861
<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Classe 1</i>	6	9.798	1.467
	<i>Classe 2</i>	21	8.785	1.053
<i>Pinus taeda</i>	<i>Classe 1</i>	7	8.326	2.067
	<i>Classe 2</i>	11	6.749	1.550

Fonte: Autoria própria.

Pela Tabela 29 observou-se que os valores médios para cada classe de resistência se mostraram distintos e com valores mais altos para as melhores classes e valores mais baixos para as piores classes de resistência, assim como o esperado.

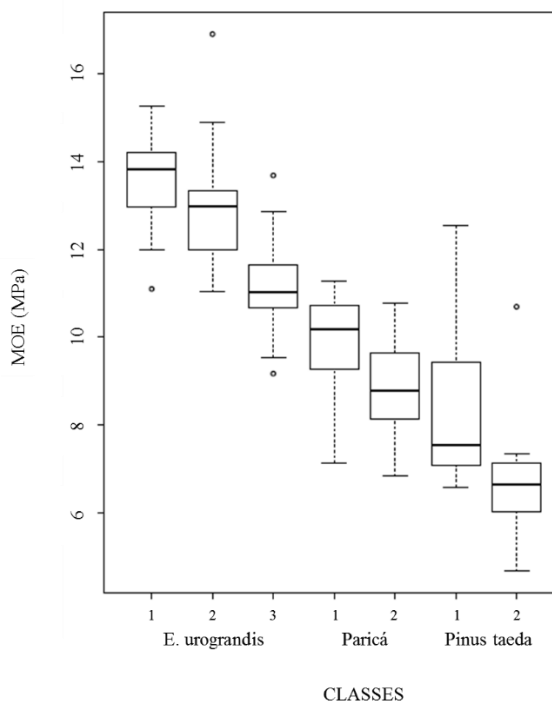
Os diagramas de boxplot dos conjuntos de dados obtidos para o módulo de elasticidade (MOE) de cada classe de resistência, são mostrados na Figura 30. A partir dos boxplot foi possível visualizar a distribuição e os valores discrepantes (*outliers*) dos dados experimentais.

Na Tabela 30 é apresentada a estatística descritiva para os dados do módulo de resistência a flexão (MOR) obtidos no ensaio de flexão estática das três espécies estudadas, cujos valores obtidos para cada peça ensaiada são apresentados nas Tabela 79, Tabela 81 e Tabela 83 (Apêndice 3 – Ensaio de flexão estática).

Observou-se que a influência de defeito na peça foi mais perceptível para os valores do módulo de resistência à flexão (MOR), principalmente para o *Pinus taeda*, pois a presença de nós na região central do vão da peça foi o que mais comprometeu na resistência a flexão. A influência dos nós nas peças de *Pinus taeda* foi evidenciada pela grande variabilidade dos resultados do MOR, principalmente pelos valores de coeficiente de variação e desvio padrão.

Freitas (2004), em seus ensaios de flexão estática pela ASTM D 198: 1994 para peças estruturais de *Pinus spp.*, obteve o valor médio de MOR igual a 28,7MPa que é menor, porém próximo ao valor encontrado neste trabalho (31,55MPa). Ballarin (2016) que realizou ensaios com peças estruturais de *Pinus spp* pela norma internacional ISO 13910: 2013 obteve valor médio superior de 36,87MPa e coeficiente de variação igual a 41,17%.

Figura 30 – Boxplot dos resultados de MOE



Fonte: Autoria própria.

Tabela 30 – Estatística descritiva dos resultados do módulo de resistência à flexão (MOR)

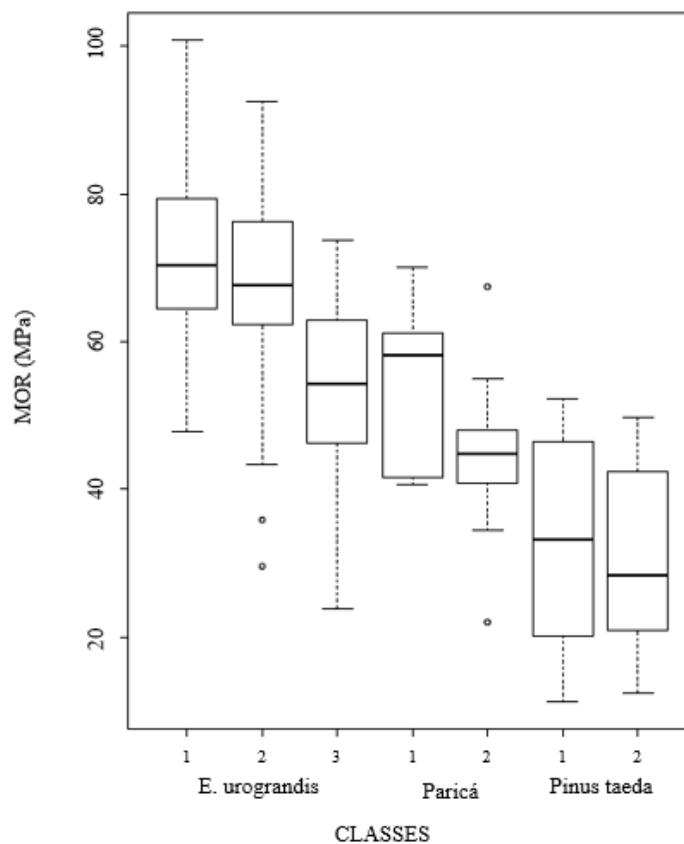
Estatística descritiva	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valor médio (MPa)	59,65	47,32	31,55
Desvio padrão (MPa)	14,57	10,32	13,89
Mediana (MPa)	61,77	45,54	28,42
Coeficiente de variação (%)	24,42	21,82	44,02
Valor máximo (MPa)	100,85	70,03	52,36
Valor mínimo (MPa)	23,91	22,04	11,21
Quantidade de peças	88	27	18

Fonte: Autoria própria.

Para as peças de *Eucalyptus urograndis*, observou-se que o valor médio de MOR (59,65MPa) obtido nos ensaios de flexão estática para peças estruturais foi menor do que os valores encontrados por Rodrigues (2002) e Scanavaca Junior e Garcia (2004) que realizaram ensaios com espécies de *Eucalyptus* a partir de corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, evidenciando a influência dos defeitos e da dimensão das peças estruturais para o módulo de resistência a flexão (MOR). Marcolin (2017) que realizou ensaio de flexão estática a três pontos com peças roliças estruturais de *Eucalyptus urograndis* obteve valores máximo (140,0MPa) e mínimo (26,5MPa) próximos aos encontrados neste trabalho, porém o valor médio (85,9 MPa) foi maior do que o valor calculado neste trabalho. Dentre as causas pela diferença nos valores é devido à diferença nas condições em que o ensaio foi realizado e maior amostragem da espécie estudada.

Os diagramas de boxplot dos conjuntos de dados obtidos para o módulo de resistência a flexão (MOR) de cada classe de resistência, são mostrados na Figura 31

Figura 31 – Boxplot dos resultados de MOR



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 31 são apresentados os valores característicos do módulo de ruptura a flexão (MOR) de cada espécie separadas em classes de resistência.

Tabela 31 – Valores característicos do módulo de ruptura à flexão (MOR) das classes de resistência

<i>Eucalyptus urograndis</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{m,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{m,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{m,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{m,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	9	72,13	15,25	37,33	44,39	39,01	51,81
Classe 2	28	66,31	15,05	29,52	38,93	37,93	46,42
Classe 3	52	54,04	11,28	32,68	34,76	33,64	38,57
<i>Schizolobium amazonicum</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{m,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{m,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{m,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{m,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	6	54,98	11,65	32,84	32,06	27,68	40,59
Classe 2	21	45,13	9,05	26,34	29,01	27,86	34,01
<i>Pinus taeda</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{m,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{m,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{m,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{m,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	7	32,25	16,40	10,74	16,35	8,89	23,02
Classe 2	11	31,05	13,53	14,17	10,08	11,12	21,73

¹ Distribuição Log-normal;

² Distribuição Normal;

Fonte: Autoria própria.

Os valores característicos de MOR das peças de *Eucalyptus urograndis* calculados pela norma espanhola UNE-EN 14538: 2016, tanto considerando a distribuição log-normal quanto a distribuição normal, apresentaram os maiores valores para a Classe 1 (44,39MPa e 39,01MPa, respectivamente) e os menores valores são para a Classe 3 (34,76MPa e 33,64 MPa, respectivamente), assim como ocorreu para os valores calculados pela norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997 com o maior valor (51,81MPa) para a Classe 1 e o menor valor (38,57MPa) para a Classe 3. Porém, os valores característicos de MOR calculados pela norma internacional ISO 13910: 2005 apresentaram o maior valor (37,33MPa) para a Classe 1 e o menor valor (29,52MPa) para a Classe 2.

Para as peças de *Schizolobium amazonicum*, os valores característicos calculados evidenciaram maiores valores para a Classe 1 e menores valores para a Classe 2. Com exceção, aos valores característicos calculados pela norma espanhola UNE-EN 14358: 2016 para a

distribuição normal, em que o maior valor (27,86MPa) foi para a Classe 2 e o menor valor (27,68MPa) para a Classe 1, porém os valores obtidos foram muito próximos.

Alguns valores característicos calculados não corresponderam à premissa de maiores valores de resistência à Classe 1 e menores valores de resistência à Classe 2, como ocorreu para o equacionamento apresentado pela ISO 13910: 2005 e UNE-EN 14358: 2016. Para as peças de *Pinus taeda*, de maneira geral, os valores característicos calculados foram abaixo dos valores obtidos por autores referenciados na revisão bibliográfica. Ballarin (2016) encontrou valores de 29,52MPa, 20,97MPa e 13,82MPa, respectivamente para as classes C1, C2 e C3. Carreira (2003) obteve valores característicos de MOR igual a 21,9MPa (N°2-ND), 28,7MPa (N°2-D), 79,5MPa (SS-ND) e 107,6MPa (SS-D).

4.2.3 Tração paralela às fibras

Na Tabela 32 apresenta a estatística descritiva para os dados da resistência a tração paralela às fibras com as três espécies estudadas, cujos resultados obtidos para cada peça são apresentados nas Tabela 84, Tabela 85 e Tabela 86 (Apêndice 4 – Ensaio de tração paralela às fibras).

Tabela 32 – Estatística descritiva dos resultados da resistência a tração paralela às fibras (f_{10})

Estatística descritiva	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valor médio (MPa)	55,91	25,54	20,74
Desvio padrão (MPa)	18,69	12,31	11,01
Mediana (MPa)	56,09	24,48	15,80
Coefficiente de variação (%)	33,43	48,18	53,10
Valor máximo (MPa)	86,57	43,41	37,10
Valor mínimo (MPa)	15,23	9,52	7,46
Quantidade de peças	27	8	14

Fonte: Autoria própria.

A resistência à tração paralela às fibras sofreu grande influência dos defeitos, destacados pelos valores do coeficiente de variação, especialmente para o *Pinus taeda*, pela presença dos nós que causam a diminuição da seção transversal e o desvio das fibras próximos aos nós.

A Tabela 33 apresenta os valores característicos da resistência a tração paralela às fibras ($f_{t0,k}$) de cada espécie separadas em classes de resistência.

Tabela 33 – Valores característicos da resistência a tração paralela às fibras (f_{t0}) das classes de resistência

<i>Eucalyptus urograndis</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{t0,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{t0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{t0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{t0,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	3	67,24	14,68	27,78	31,82	20,98	50,91
Classe 2	8	59,37	17,36	17,67	25,18	20,41	41,56
Classe 3	16	52,06	19,71	18,70	18,97	13,08	36,44
<i>Schizolobium amazonicum</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{t0,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{t0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{t0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{t0,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	2	41,58	2,59	33,13	31,74	30,40	39,75
Classe 2	6	20,20	8,57	12,03	13,23	9,64	14,14
<i>Pinus taeda</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{t0,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{t0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{t0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{t0,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	5	21,18	11,25	6,35	9,36	1,85	19,13
Classe 2	9	13,82	8,16	4,59	5,75	0,76	10,58

¹ Distribuição Log-normal;

² Distribuição Normal;

Fonte: Autoria própria.

Os valores médios de resistência a tração paralela às fibras para cada classe de resistência tiveram valores com diferenças bem pronunciadas. Porém, entre os valores característicos, por outro lado, não ocorreu essa diferenciação dos valores para cada classe de resistência devido à grande dispersão dos resultados, que pode ser observado nos diagramas de boxplot na Figura 32.

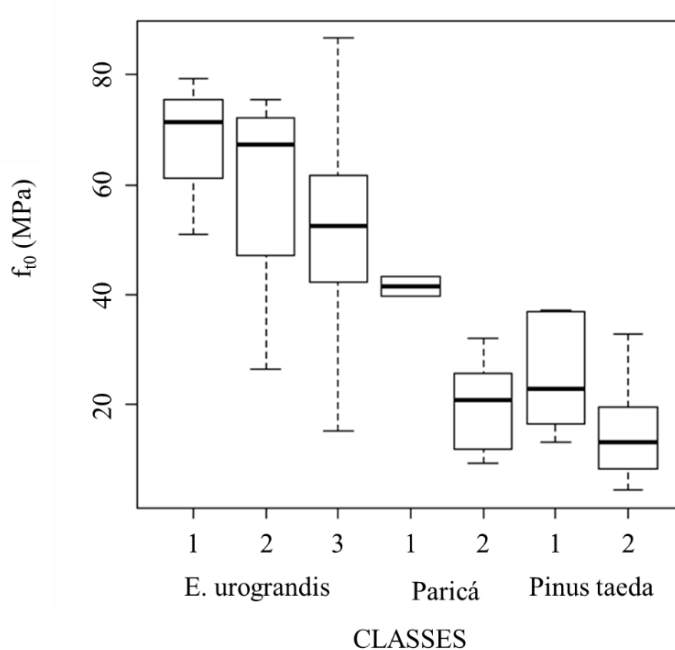
Os valores característicos calculados para a resistência a tração paralela às fibras para o *Pinus taeda* foram baixos pela dispersão dos resultados e pelo número pequeno de amostras disponíveis. Observou-se pelos valores médios de cada classe de resistência que a presença de

nós nas peças de *Pinus taeda* influenciou para que a resistência calculada fosse a mais baixa entre as três espécies estudadas.

Apesar da baixa densidade das peças de *Schizolobium amazonicum* (Paricá), seus valores característicos foram acima de 30MPa para a Classe 1, valores estes muito próximos às peças de *Eucalyptus urograndis*. Almeida et al. (2013) usou o método de ensaio da norma brasileira para corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, e obteve um valor característico de 35MPa, que é diferente do valor encontrado nesse trabalho devido ao ensaio que considera a dimensão e defeitos inerentes às peças estruturais de madeira.

Pelos diagramas de boxplot dos conjuntos de dados obtidos para a resistência a tração paralela às fibras de cada classe de resistência (Figura 32), é possível observar a dispersão dos dados representada pela diferença entre o terceiro quartil e o primeiro quartil e, ainda, pela amplitude dos valores máximos e mínimos.

Figura 32 – Boxplot dos resultados de tração paralela às fibras



Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Tração normal às fibras

Na Tabela 34 é apresentada a estatística descritiva para os dados da resistência a tração normal às fibras com as três espécies estudadas, cujos resultados obtidos para cada peça ensaiada são mostrados nas Tabela 87, Tabela 88 e Tabela 89 (Apêndice 5 – Ensaio de tração normal às fibras).

Tabela 34 – Estatística descritiva dos resultados da resistência a tração normal às fibras (f_{t90})

Estatística descritiva	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valor médio (MPa)	0,221	0,099	0,128
Desvio padrão (MPa)	0,055	0,030	0,036
Mediana (MPa)	0,225	0,097	0,122
Coefficiente de variação (%)	24,96	30,86	27,89
Valor máximo (MPa)	0,348	0,196	0,252
Valor mínimo (MPa)	0,078	0,061	0,077
Quantidade de peças	82	26	44

Fonte: Autoria própria.

Os valores de resistência a tração normal às fibras foram extremamente baixos. As peças de *Eucalyptus urograndis* tiveram o maior valor médio, seguido das peças de *Pinus taeda* e de *Schizolobium amazonicum* (Paricá).

Na Tabela 35 são apresentados os valores característicos da resistência a tração normal às fibras ($f_{t90,k}$) de cada espécie separadas em classes de resistência. Foi possível observar pela tabela que os valores característicos não se diferenciaram significativamente para cada classe de resistência, confirmando a tendência adotada pelas normas prEN 338: 2012 e ISO 16598: 2014 de se considerar valores iguais de resistência a tração normal às fibras para todas as classes de resistência.

Percebeu-se que os valores obtidos para a resistência a tração normal às fibras (f_{t90}) foram abaixo dos encontrados em normas. De acordo com a norma internacional ISO 16598: 2014, os valores característicos são iguais a 0,5MPa e 0,6MPa, respectivamente, para coníferas e para a dicotiledôneas. Para a norma europeia prEN 338: 2012, os valores característicos para essa propriedade são iguais a 0,4MPa e 0,6MPa, respectivamente, para coníferas e para a dicotiledôneas.

Os diagramas de boxplot dos conjuntos de dados obtidos para a resistência a tração normal às fibras de cada classe de resistência (Figura 33) mostram maiores variações nos corpos de prova de *Eucalyptus urograndis*.

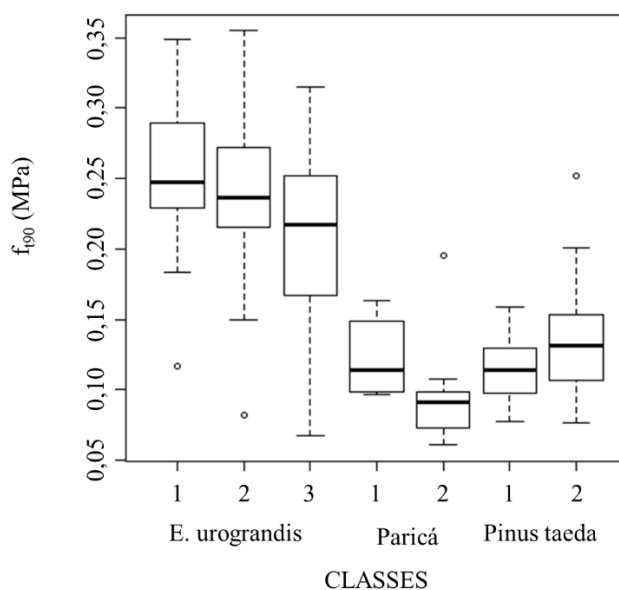
Tabela 35 – Valores característicos da resistência a tração normal às fibras (f_{t90}) das classes de resistência

<i>Eucalyptus urograndis</i>							
Classe	N	Média	Desvio padrão	$f_{t90,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{t90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{t90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{t90,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	9	0,252	0,050	0,121	0,151	0,144	0,184
Classe 2	26	0,239	0,051	0,186	0,159	0,160	0,200
Classe 3	47	0,206	0,054	0,104	0,116	0,110	0,145
<i>Schizolobium amazonicum</i>							
Classe	N	Média	Desvio padrão	$f_{t90,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{t90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{t90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{t90,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	6	0,123	0,027	0,078	0,077	0,066	0,096
Classe 2	20	0,092	0,028	0,060	0,055	0,039	0,065
<i>Pinus taeda</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{t90,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{t90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{t90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{t90,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	14	0,114	0,023	0,073	0,078	0,073	0,086
Classe 2	30	0,134	0,039	0,067	0,074	0,067	0,094

¹ Distribuição Log-normal;² Distribuição Normal;

Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Boxplot dos resultados da resistência a tração normal às fibras



Fonte: Autoria própria.

4.2.5 Compressão paralela às fibras

Na Tabela 36 é apresentada a estatística descritiva para os dados da resistência a compressão paralela às fibras com as três espécies estudadas, cujos resultados obtidos para cada peça ensaiada são expostos nas Tabela 90, Tabela 91 e Tabela 92 (Apêndice 6 – Ensaio de compressão paralela às fibras).

Tabela 36 – Estatística descritiva dos resultados da resistência a compressão paralela às fibras

Estatística descritiva	(f _{c0})		
	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valor médio (MPa)	43,82	25,51	33,31
Desvio padrão (MPa)	6,23	4,84	6,06
Mediana (MPa)	44,57	25,58	32,68
Coefficiente de variação (%)	14,22	18,97	18,20
Valor máximo (MPa)	58,29	35,46	48,42
Valor mínimo (MPa)	16,91	17,32	19,66
Quantidade de peças	87	27	47

Fonte: Autoria própria.

Notou-se que a variabilidade dos resultados foi menor para essa propriedade, com valores médios muito próximos entre as classes de resistências (Tabela 37). Foi adotado o método alternativo da norma internacional ISO 13910: 2014, com a dimensão do corpo de prova igual a 24cm, por isso não foi possível analisar a influência dos defeitos de empenamentos e a dimensão estrutural das peças solicitadas a compressão paralelas às fibras. Comparando com os valores médios de resistência a compressão paralela às fibras pela norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997 para algumas espécies do gênero *Eucalyptus* mais usuais no Brasil, verifica-se que os valores são bem próximos ao encontrado para o *Eucalyptus urograndis*. Para a espécie de *Pinus taeda*, a norma brasileira apresenta o valor médio da resistência a compressão paralela às fibras superior (44,4MPa) em relação ao encontrado neste trabalho (33,31MPa).

Nos ensaios de compressão paralela às fibras realizados por Ballarin (2016) para o *Pinus spp.*, foi adotado o método principal da norma internacional ISO 13910: 2014 que considera a dimensão total da peça. Os resultados e os modos de ruptura de cada classe de resistência evidenciaram a influência dos defeitos na resistência a compressão paralela às fibras. O valor médio encontrado pelo autor foi igual a 22,53MPa, um valor inferior ao obtido neste trabalho.

Percebeu-se que houve uma gradual redução das resistências médias e dos valores característicos.

Para a espécie de *Schizolobium amazonicum* (Paricá), o valor médio da resistência a compressão paralela às fibras foi próximo ao encontrado na literatura. Terezo (2010) apresenta valores de resistência a compressão paralela às fibras para a espécie *Schizolobium amazonicum*. Para madeira seca (12%) com a densidade de 0,24g/cm³ a resistência foi igual a 21,0MPa.

Na Tabela 37 são apresentados os valores característicos da resistência a compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) de cada espécie separadas em classes de resistência.

Tabela 37 – Valores característicos da resistência a compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) das classes de resistência

<i>Eucalyptus urograndis</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{c0,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{c0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{c0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{c0,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	9	46,74	6,03	29,97	34,51	33,66	43,74
Classe 2	27	46,94	6,33	32,06	35,78	34,97	41,49
Classe 3	51	41,66	5,34	33,27	30,88	31,99	37,32
<i>Schizolobium amazonicum</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{c0,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{c0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{c0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{c0,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	6	29,11	5,37	19,25	21,92	21,08	26,49
Classe 2	21	24,48	4,27	17,78	18,76	18,09	21,36
<i>Pinus taeda</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{c0,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{c0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{c0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{c0,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	14	37,19	5,51	26,25	28,82	27,98	32,40
Classe 2	33	31,66	5,57	22,05	23,44	22,47	26,74

¹ Distribuição Log-normal;

² Distribuição Normal;

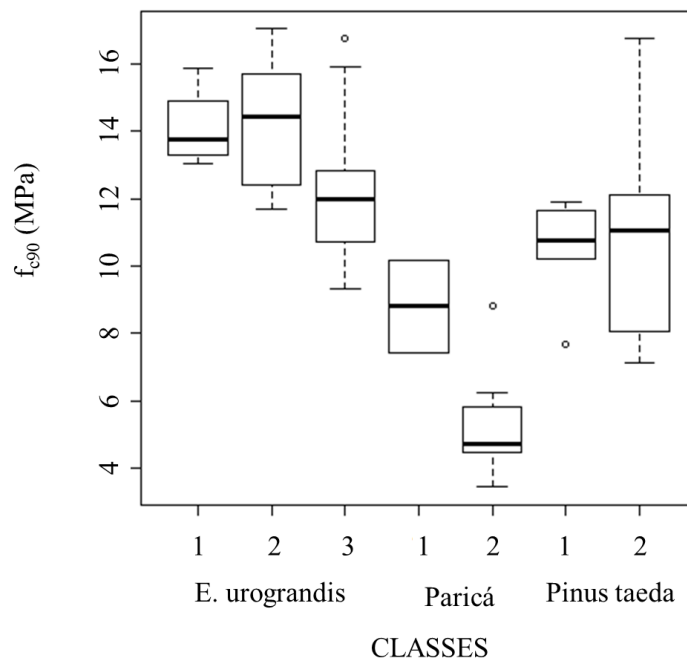
Fonte: Autoria própria.

De modo geral, foi possível observar que os valores característicos foram distintos para cada classe de resistência. Almeida *et al.* (2013), nos seus ensaios com peças de *Schizolobium amazonicum* (Paricá), obteve valor característico para a resistência a compressão paralela às

fibras igual a 21MPa, cujo valor é próximo aos valores encontrados na Tabela 37. Os valores de característicos para o *Pinus taeda* foram superiores aos obtidos por Ballarin (2016), devido a diferença no método de ensaio realizado e a influência dos defeitos nos esforços gerados no ensaio principal apresentado pela norma internacional ISO 13910: 2014.

Na Figura 34 é apresentado o diagrama de boxplot dos conjuntos de dados da resistência a compressão paralela às fibras de cada classe de resistência, por meio dele foi possível visualizar a distribuição e os valores discrepantes dos dados.

Figura 34 – Boxplot dos resultados da resistência a compressão paralela às fibras



Fonte: Autoria própria.

4.2.6 Compressão normal às fibras

Nas Tabela 38, Tabela 39 e Tabela 40 são apresentadas as estatísticas descritivas para os dados do ensaio a compressão normal às fibras com as três espécies estudadas, cujos resultados obtidos para cada peça ensaiada são expostos nas Tabela 93 até a Tabela 101 (Apêndice 7 – Ensaio de compressão normal às fibras).

Tabela 38 – Estatística descritiva dos resultados da resistência a compressão normal às fibras (f_{c90})

Estatística descritiva	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valor médio (MPa)	12,87	5,85	10,54
Desvio padrão (MPa)	1,98	2,15	2,36
Mediana (MPa)	12,43	4,99	10,86
Coefficiente de variação (%)	15,41	36,83	22,42
Valor máximo (MPa)	17,04	10,19	16,74
Valor mínimo (MPa)	9,34	3,44	7,10
Quantidade de peças	39	11	22

Fonte: A autoria própria.

Tabela 39 – Estatística descritiva dos resultados da rigidez na compressão normal às fibras (K_{c90})

Estatística descritiva	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valor médio (MPa/mm)	5,05	1,91	3,63
Desvio padrão (MPa/mm)	1,12	0,65	0,96
Mediana (MPa/mm)	4,95	1,76	3,71
Coefficiente de variação (%)	22,17	34,05	26,49
Valor máximo (MPa/mm)	8,73	3,30	6,20
Valor mínimo (MPa/mm)	2,60	1,15	2,40
Quantidade de peças	39	11	22

Fonte: A autoria própria.

Tabela 40 – Estatística descritiva dos resultados da resistência a compressão normal às fibras no limite de plastificação (f_{c90y})

Estatística descritiva	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valor médio (MPa)	9,59	4,02	7,89
Desvio padrão (MPa)	1,41	1,65	2,04
Mediana (MPa)	9,52	3,95	7,73

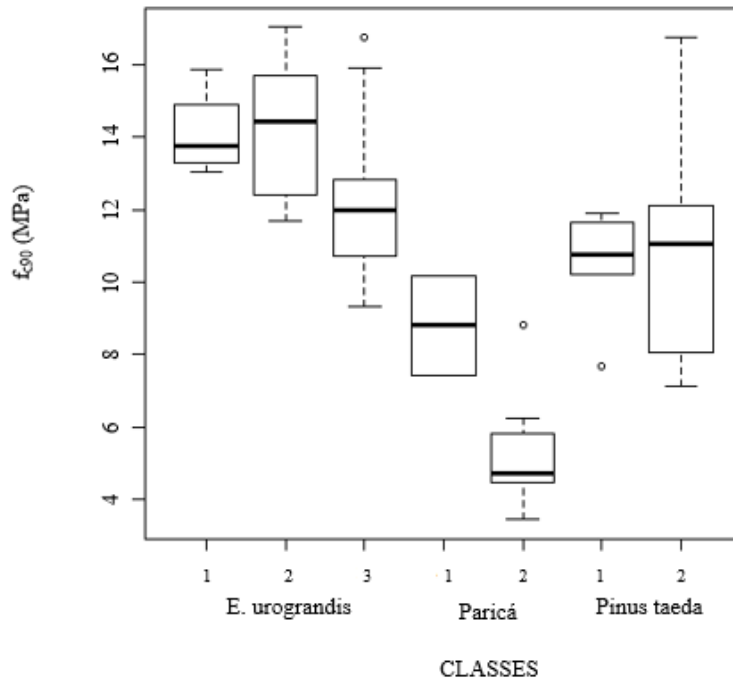
Tabela 40 – Estatística descritiva dos resultados da resistência a compressão normal às fibras no limite de plastificação (f_{c90v})

Estatística descritiva	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Coefficiente de variação (%)	14,75	41,06	25,84
Valor máximo (MPa)	13,66	7,11	11,81
Valor mínimo (MPa)	6,27	2,01	4,11
Quantidade de peças	39	11	22

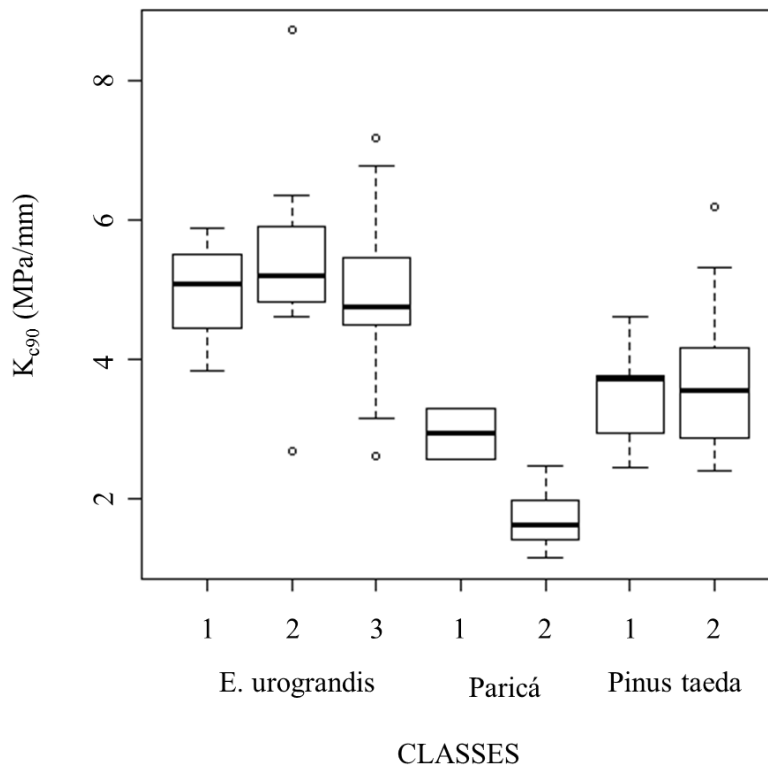
Fonte: Autoria própria.

Em solicitação de compressão normal às fibras, a madeira apresenta valores de resistência menores do que a solicitação de compressão paralela às fibras, pois a carga é aplicada na direção normal em relação às fibras, provocando o esmagamento da madeira (CALIL JUNIOR, LAHR e DIAS, 2003). As peças de *Eucalyptus urograndis* apresentaram maiores resultados de resistência e rigidez e menor variabilidade de seus dados. O *Schizolobium amazonicum* (Paricá) foi a espécie que apresentou menores resultados de resistência e rigidez e maior variabilidade de seus dados. Observou-se durante os ensaios a grande influência da heterogeneidade da madeira e dos defeitos das peças na resistência e na rigidez a compressão normal às fibras, devido a diferença na deformação da peça na face comprimida e a instabilidade agravada pelo encanoamento e torcimento da peça.

Os diagramas de boxplot para as propriedades de resistência e rigidez a compressão normal às fibras são apresentados nas Figura 36, Figura 37 e Figura 40. Por esses diagramas foi possível perceber a distribuição dos dados e amplitude dos valores máximos e mínimos obtidos nos ensaios para as peças de cada classe de resistência e, que afetaram os valores característicos calculados. Percebeu-se que houve maior dispersão dos dados para as peças de classes de resistência inferiores, destacando a interferência dos defeitos das peças nos resultados do ensaio.

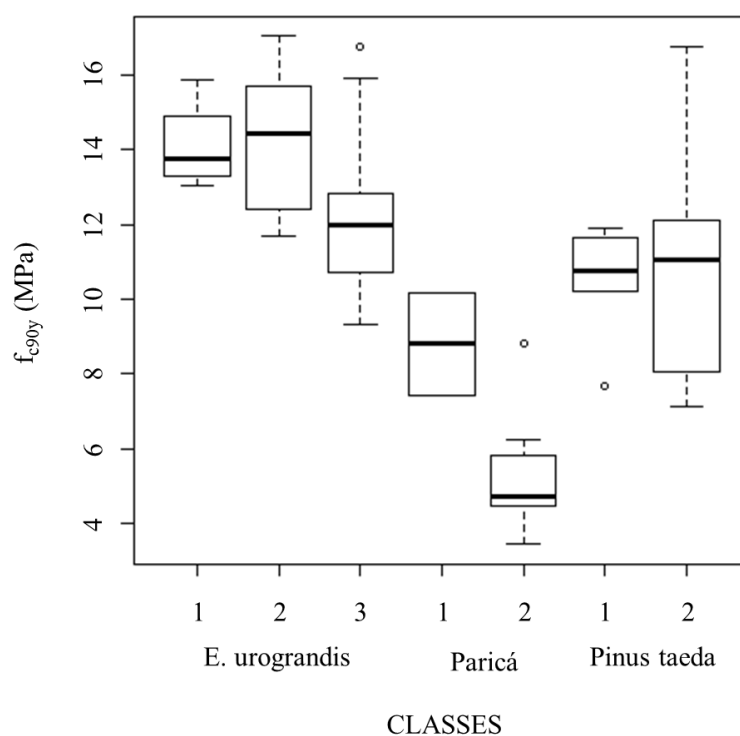
Figura 35 – Boxplot dos resultados da a compressão normal às fibras (f_{c90})

Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Boxplot dos resultados da rigidez na compressão normal às fibras (K_{c90})

Fonte: Autoria própria.

Figura 37 – Boxplot dos resultados da resistência a compressão normal às fibras no limite de plastificação (f_{c90y})



Fonte: Autoria própria.

Nas Tabela 41 e Tabela 42 são apresentados os valores característicos da resistência a compressão normal às fibras ($f_{c90,k}$) e resistência a compressão normal às fibras no limite de plastificação (f_{c90y}) e na Tabela 43 são apresentados os valores médios da rigidez na compressão normal às fibras para cada espécie separadas em classes de resistência.

Tabela 41 – Valores característicos da resistência a compressão normal às fibras ($f_{c90,k}$) das classes de resistência

<i>Eucalyptus urograndis</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{c90,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{c90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{c90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{c90,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	4	14,10	1,24	10,56	12,44	10,63	13,76
Classe 2	10	14,25	1,78	10,19	11,16	10,52	11,73
Classe 3	25	12,13	1,80	9,88	9,99	8,71	10,48
<i>Schizolobium amazonicum</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{c90,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{c90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{c90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{c90,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	2	8,80	1,96	3,72	3,30	0,36	7,42
Classe 2	9	5,19	1,62	2,90	2,72	2,18	3,63

Tabela 41 – Valores característicos da resistência a compressão normal às fibras ($f_{c90,k}$) das classes de resistência

<i>Pinus taeda</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{c90,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{c90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{c90,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{c90,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	6	10,50	1,53	7,75	7,14	6,92	7,83
Classe 2	16	10,56	2,65	6,28	6,32	5,37	7,39

¹ Distribuição Log-normal;² Distribuição Normal;

Fonte: Autoria própria.

Tabela 42 – Valores característicos da resistência compressão normal às fibras no limite de plastificação ($f_{c90y,k}$)

<i>Eucalyptus urograndis</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{c90y,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{c90y,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{c90y,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{c90y,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	4	10,61	0,99	6,69	8,23	7,84	10,87
Classe 2	10	9,97	1,90	5,19	6,42	5,19	7,33
Classe 3	25	9,27	1,16	6,96	7,25	7,07	8,39

<i>Schizolobium amazonicum</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{c90y,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{c90y,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{c90y,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{c90y,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	2	6,23	1,26	2,77	2,56	0,79	5,34
Classe 2	9	3,53	1,31	1,26	1,53	0,74	2,47

<i>Pinus taeda</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{c90y,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{c90y,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{c90y,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{c90y,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	6	7,71	1,13	4,82	5,22	5,05	5,62
Classe 2	16	7,96	2,32	3,54	4,25	3,42	5,57

¹ Distribuição Log-normal;² Distribuição Normal;

Fonte: Autoria própria.

Tabela 43 – Valores médios da rigidez na compressão normal às fibras em cada uma das classes de resistência das espécies ensaiadas

<i>Espécie</i>	<i>Classe</i>	Quantidade	K_{c90} médio (MPa/mm)	Desvio padrão (MPa/mm)
<i>Eucalyptus</i>	<i>Classe 1</i>	4	4,98	0,84
<i>urograndis</i>	<i>Classe 2</i>	10	5,42	1,52
	<i>Classe 3</i>	25	4,91	0,97
<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Classe 1</i>	2	2,94	0,52
	<i>Classe 2</i>	9	1,68	0,41
<i>Pinus taeda</i>	<i>Classe 1</i>	6	3,54	0,75
	<i>Classe 2</i>	16	3,66	1,05

Fonte: Autoria própria.

Pelas tabelas dos valores característicos constata-se que não houve grande variação dos valores de resistência a compressão normal às fibras entre as classes de resistência, que é confirmada pelos valores disponíveis nas tabelas de classes de resistência da norma internacional ISO 16598: 2014 e norma europeia prEN 338: 2012.

4.2.7 Cisalhamento paralelo às fibras

Na Tabela 44 é apresentada a estatística descritiva para os dados da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras com as três espécies estudadas, cujos resultados obtidos para cada peça ensaiada são mostrados nas Tabela 102, Tabela 103 e

Tabela 104 (Apêndice 8 – Ensaio de cisalhamento paralela às fibras).

Tabela 44 – Estatística descritiva dos resultados da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})

Estatística descritiva	<i>Eucalyptus urograndis</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valor médio (MPa)	5,16	3,74	4,40
Desvio padrão (MPa)	1,30	0,85	1,27
Mediana (MPa)	5,15	3,75	4,22
Coefficiente de variação (%)	25,22	22,64	28,77
Valor máximo (MPa)	8,44	5,23	7,10
Valor mínimo (MPa)	2,70	2,72	2,03
Quantidade de peças	47	14	24

Fonte: Autoria própria.

Os valores médios de resistência ao cisalhamento foram inferiores aos encontrados na literatura, cujos métodos de ensaio leva em consideração corpos de prova isentos de defeitos e de pequenas dimensões. As três espécies obtiveram variabilidade de seus dados em torno de 25%, com maior valor médio alcançado pelas peças de *Eucalyptus urograndis* e, menor valor médio obtido pelas peças de *Schizolobium amazonicum* (Paricá).

O número de ocorrências de ruptura por tensões normais de tração e por tensões de cisalhamento foram quantificados e apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 - Modos de ruptura dos corpos de provas do ensaio de cisalhamento

<i>Eucalyptus urograndis</i>					
Modo de ruptura	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Total	%
Cisalhamento	2	7	12	21	44,7
Tração	3	10	13	26	55,3
<i>Schizolobium amazonicum</i>					
Modo de ruptura	Classe 1	Classe 2	Total	%	
Cisalhamento	0	0	0	0	
Tração	4	10	14	100	
<i>Pinus taeda</i>					
Modo de ruptura	Classe 1	Classe 2	Total	%	
Cisalhamento	3	6	9	37,5	
Tração	2	13	15	62,5	

Fonte: Autoria própria.

Tendo em vista que este ensaio consiste em uma peça solicitada a flexão simples, geram tensões de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e compressão normal às fibras nas regiões dos apoios e no ponto de aplicação do carregamento. Na ruptura, verifica-se o aparecimento de pequenas falhas de compressão, gerando o aumento da área comprimida na seção transversal e a redução da área tracionada, causando a ruptura por tração (CALIL JUNIOR, LAHR e DIAS, 2003). Foram contabilizadas as rupturas que ocorreram de dois modos: por tensões normais de tração na flexão no meio do vão e nas fibras inferiores, e por tensões de cisalhamento na flexão ao longo do comprimento da peça, criando uma linha de corte próximo a linha neutra da seção. Nas Figura 38 e Figura 39 são mostrados os modos de ruptura que foram obtidos com os ensaios de cisalhamento.

Como observado na Tabela 45 houve maior ocorrência de ruptura por tensões normais de tração pela flexão, porém, todos os valores de força última obtidos no ensaio foram considerados para o cálculo da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, como indicado pelo projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-3: 2018.

Em Moritani e Calil Junior (2018), foram realizados ensaios de resistência ao cisalhamento da espécie *Eucalyptus urograndis* para a comparação entre os métodos de ensaio com corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos da norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997 e para peças estruturais pela norma internacional ISO 13910:2014. Foram obtidos valores superiores para os corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, com uma diferença de 56,71%.

Almeida *et al.* (2013) utilizou o método de ensaio da norma brasileira de corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, obtendo o valor característico de 6MPa para o *Schizolobium amazonicum* (Paricá), que foi superior ao valor obtido nesse trabalho.

Figura 38 – Modo de ruptura apresentado por cisalhamento



Fonte: Autoria própria.

Figura 39 – Modo de ruptura apresentado por tração



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 46 são apresentados os valores característicos da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v0,k}$) de cada espécie separadas em classes de resistência.

Tabela 46 – Valores característicos da resistência cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v0,k}$)

<i>Eucalyptus urograndis</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{v0,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{v0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{v0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{v0,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	5	6,05	1,39	2,43	3,16	2,64	4,24
Classe 2	17	5,72	1,32	2,73	3,33	3,12	4,00
Classe 3	25	4,61	1,03	2,38	2,85	2,65	3,23
<i>Schizolobium amazonicum</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{v0,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{v0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{v0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{v0,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	3	4,14	0,83	4,07	4,03	3,99	2,91
Classe 2	10	3,58	0,84	2,19	2,20	1,83	2,72
<i>Pinus taeda</i>							
Classe	n	Média	Desvio padrão	$f_{v0,k}$ (ISO 13910: 2005)	$f_{v0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ¹	$f_{v0,k}$ (UNE-EN 14358: 2016) ²	$f_{v0,k}$ (NBR 7190: 1997)
Classe 1	5	5,73	1,22	2,49	3,14	2,69	4,01
Classe 2	19	4,05	1,05	1,78	2,24	2,04	2,84

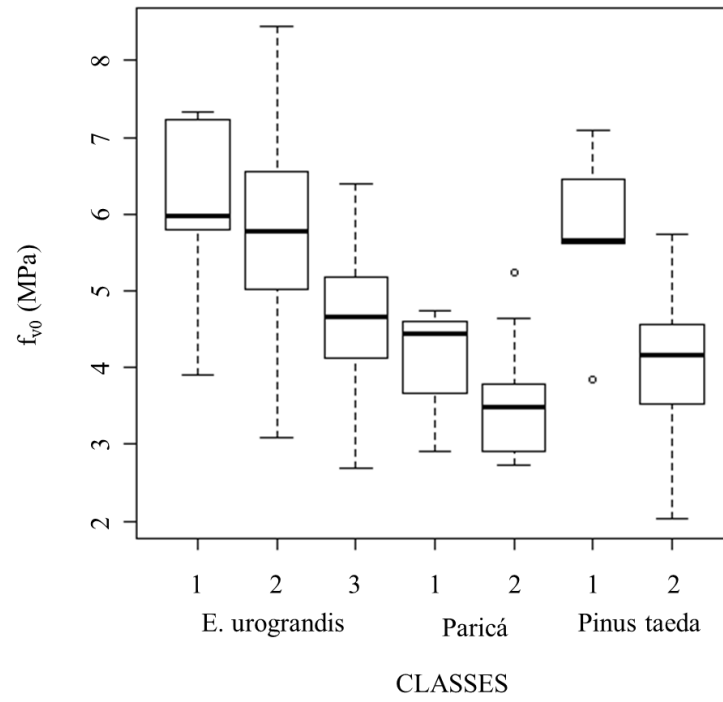
¹ Distribuição Log-normal;

² Distribuição Normal;

Fonte: Autoria própria.

Pelos valores médio e característicos pode-se observar, com exceção do *Eucalyptus urograndis*, que houve uma gradual redução a cada classe de resistência, sendo os maiores valores para as classes com menores defeitos e propriedades mecânicas superiores e os menores valores para as classes com maiores incidências de defeitos e propriedades mecânicas inferiores.

Na Figura 40 são mostrados os diagramas de boxplot dos resultados obtidos do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, que representam a distribuição dos dados para cada classe de resistência das três espécies analisadas.

Figura 40 – Boxplot dos resultados da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})

Fonte: Autoria própria.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

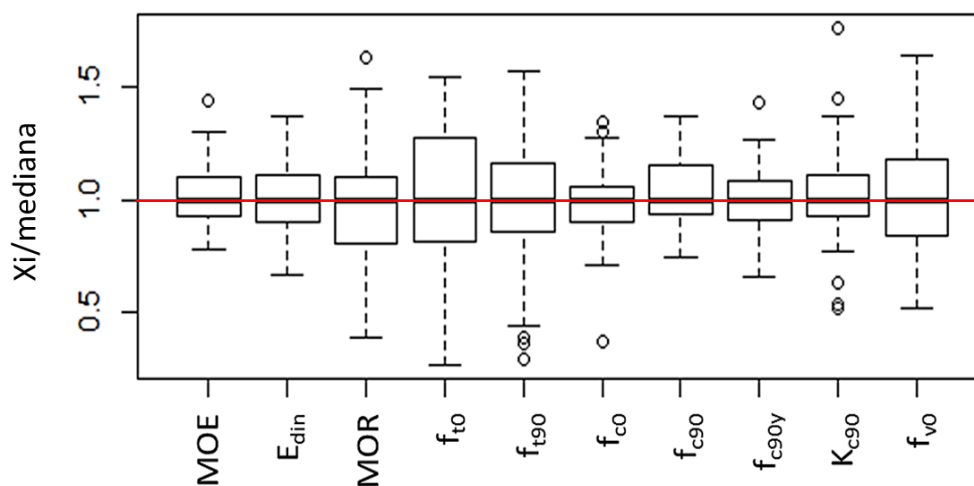
Foram realizadas análises estatísticas para a interpretação dos resultados obtidos nos testes da amostra coletada e aplicação da inferência estatística na população.

5.1 Análise das propriedades mecânicas entre as classes de resistência

5.1.1 Boxplot

Os diagramas de boxplot das Figura 41, Figura 42 e Figura 43 mostram a distribuição dos dados de cada propriedade, a partir dos valores adimensionais obtidos pela divisão dos valores experimentais pelo valor da mediana do respectivo conjunto de dados.

Figura 41 – Análise da distribuição das propriedades por meio do diagrama de boxplot para as peças de *Eucalyptus urograndis*

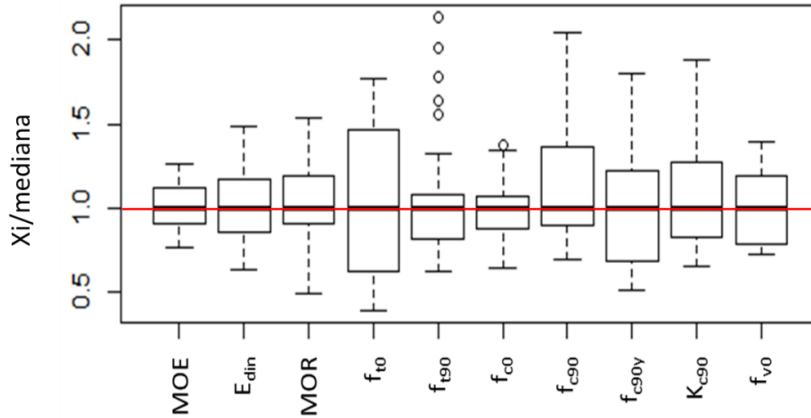


Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 41, foi possível observar os valores discrepantes (*outliers*) de algumas propriedades mecânicas das peças de *Eucalyptus urograndis*, principalmente, da rigidez à compressão normal às fibras (K_{c90}) e da resistência à tração normal às fibras (f_{t90}). As variáveis que apresentaram maiores dispersões foram: a resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) com o coeficiente de variação de 33,43%, e a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) com o coeficiente de variação de 25,22%. As variáveis que apresentaram menores dispersões foram:

o módulo de elasticidade à flexão (MOE) com o coeficiente de variação de 11,70% e o módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) com o coeficiente de variação de 14,06%.

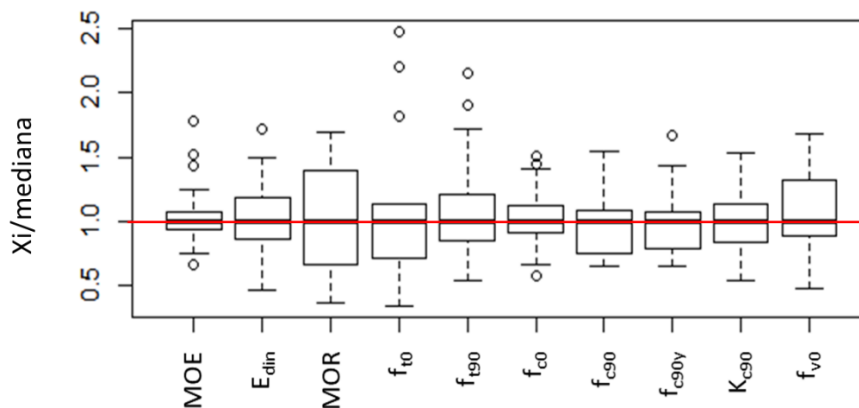
Figura 42 – Análise da distribuição das propriedades por meio do diagrama de boxplot para as peças de *Schizolobium amazonicum*



Fonte: Autoria própria.

Da Figura 42, a propriedade mecânica que apresentou maior quantidade de *outliers* nas peças de *Schizolobium amazonicum* (Paricá) foi a resistência à tração normal às fibras (f_{t90}). Dentre as propriedades que mostrou maior dispersão de seus dados foi a resistência à tração paralela às fibras com valor do coeficiente de variação igual a 48,18% e resistência à compressão normal às fibras no limite de plastificação (f_{c90y}) com o coeficiente de variação igual a 41,06%. E dentre as propriedades mecânicas que apresentaram menores dispersões de dados foi o módulo de elasticidade à flexão (MOE) com o coeficiente de variação igual a 13,37%, e a resistência a compressão paralela às fibras (f_{c0}) com o coeficiente de variação igual a 18,97%.

Figura 43 – Análise da distribuição das propriedades por meio do diagrama de boxplot para as peças de *Pinus taeda*



Fonte: Autoria própria.

Das peças de *Pinus taeda*, observou-se na Figura 43 que a propriedade mecânica que apresentou maiores quantidades de valores discrepantes foi o módulo de elasticidade à flexão (MOE). As variáveis que apresentaram maiores dispersões em seus dados foram para a resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) com o coeficiente de variação igual a 57,43%, e o módulo de resistência a flexão (MOR) com o coeficiente de variação igual a 44,02%. Essa dispersão dos resultados se destaca devido a presença dos nós nas regiões mais solicitadas, onde ocorreu a ruptura da peça. O restante das propriedades obteve valores de coeficientes de variação em torno de 20%, com os menores valores de 18,20% para a resistência a compressão paralela às fibras (f_{c0}) e 22,42% para a resistência a compressão normal às fibras (f_{c90}).

De maneira geral, as maiores dispersões dos dados experimentais foram para as peças de *Pinus taeda*. Percebeu-se que a influência da grande quantidade de nós, além dos empenamentos excessivos detectados, foi responsável pelos baixos resultados de resistências, principalmente, da resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) e módulo de resistência à flexão (MOR).

Observou-se que as propriedades que tiveram maior variabilidade dos dados foram aquelas de rupturas frágeis.

5.1.2 Testes não-paramétricos

Foi realizado o teste de Kruskal-Wallis para os dados de *Eucalyptus urograndis*. Caso a hipótese nula de que as amostras apresentam médias iguais, for rejeitada, então, pelo menos duas amostras apresentam diferenças. Para a comparação de duas amostras responsáveis pela rejeição da hipótese nula foi utilizado o teste de Dunn. O resultado do teste de Kruskal-Wallis aplicado nas propriedades mecânicas para a comparação das amostras para cada classe de resistência é mostrado na Tabela 47.

Tabela 47 – Valores das propriedades mensuradas em cada classe da proposta: média (desvio padrão) e mediana para *Eucalyptus urograndis*

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Valor-p
E_{din} (MPa)	14.528 (798) 14.293	13.750 (1.253) 13.445	11.793 (1.238) 12.280	1,210E-14
MOE (MPa)	13.421 (1.278) 13.828	12.950 (1.230) 12.994	11.157 (861) 11.690	2,304E-10
MOR (MPa)	72,13 (15,25) 70,31	66,31 (15,03) 67,73	54,04 (11,28) 62,89	2,262E-05

Tabela 47 – Valores das propriedades mensuradas em cada classe da proposta: média (desvio padrão) e mediana para *Eucalyptus urograndis*

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Valor-p
f_{c0} (MPa)	46,74 (6,02) 46,10	46,94 (6,34) 46,86	41,66 (5,34) 41,87	5,533E-09
f_{c90} (MPa)	15,92 (1,41) 15,61	15,86 (2,51) 16,00	13,09 (1,86) 12,92	5,079E-03
f_{t0} (MPa)	67,24 (14,68) 71,45	59,37 (17,36) 67,21	52,06 (19,71) 52,56	3,497E-01
f_{t90} (MPa)	0,25 (0,05) 0,26	0,24 (0,05) 0,24	0,20 (0,05) 0,21	1,483E-04
f_{v0} (MPa)	6,05 (1,39) 5,98	5,72 (1,32) 5,78	4,61 (1,03) 4,66	4,790E-03

Fonte: Autoria própria.

O teste estatístico apontou que, a um nível de significância de 0,05, as propriedades mecânicas analisadas apresentaram evidências estatísticas de que houve diferenças significativas entre pelo menos duas amostras, com exceção para a propriedade de resistência a tração paralela às fibras (f_{t0}).

Para determinar quais os pares de amostras eram diferentes, foi realizado o teste de Dunn após o teste de Kruskal-Wallis, cujos resultados foram apresentados na Tabela 48. Constatou-se que a Classe 3 foi a responsável pela rejeição da hipótese nula e, portanto, houve evidências de que entre pelo menos duas amostras seriam consideradas diferentes estatisticamente. Verificou-se que as diferenças encontradas foram entre as Classes 1 e 3 e, entre as Classe 2 e 3. Porém, o teste apontou evidências de que as Classes 1 e 2 não se diferenciam estatisticamente entre si.

Tabela 48 – Valor-p para o teste de Dunn, nas comparações entre as classes de resistências (C1, C2 e C3)

Comparação	E _{din}	MOE	MOR	f _{c0}	f _{c90}	f _{t90}	f _{v0}
C1 – C2	1,31E-01	4,91E-01	5,31E-01	2,72E-01	9,46E-01	5,9E-01	6,7E-01
C1 – C3	1,77E-08	6,79E-06	1,14E-03	9,48E-06	3,87E-02	2,5E-03	2,3E-02
C2 – C3	7,91E-12	6,37E-09	8,31E-05	2,37E-07	4,11E-03	3,5E-04	4,3E-03

Fonte: Autoria própria.

Para as amostras de *Schizolobium amazonicum* (Paricá) e *Pinus taeda* foi utilizado o teste de Wilcoxon não-pareado para duas amostras, em que os resultados foram apresentados na Tabela 49 e Tabela 50.

Tabela 49 – Valores das propriedades mensuradas em cada classe da proposta: média (desvio padrão) e mediana para *Schizolobium amazonicum*

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Valor-p
E_{din} (MPa)	9.051 (798) 8.708	7.124 (1.128) 6.950	2,257E-07
MOE (MPa)	9.798 (1.467) 10.181	8.785 (1.053) 8.794	0,0855
MOR (MPa)	54,98 (11,65) 58,20	45,13 (9,05) 44,90	0,0973
f_{c0} (MPa)	30,54 (4,41) 28,71	25,53 (3,77) 24,84	0,0566
f_{c90} (MPa)	10,07 (2,71) 10,07	5,92 (1,94) 5,32	0,0727
f_{t0} (MPa)	41,58 (2,59) 41,58	20,20 (8,57) 20,94	0,0714
f_{t90} (MPa)	0,12 (0,03) 0,11	0,09 (0,03) 0,09	0,0069
f_{v0} (MPa)	4,14 (0,83) 4,45	3,57 (0,26) 3,49	0,3736

Fonte: Aatoria própria.

Tabela 50 – Valores das propriedades mensuradas em cada classe da proposta: média (desvio padrão) e mediana para *Pinus taeda*

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Valor-p
E_{din} (MPa)	8.843 (1.785) 8.087	7.447 (1.392) 7.152	0,0141
MOE (MPa)	8.526 (2.148) 7.547	6.749 (1.550) 6.636	0,0441
MOR (MPa)	32,88 (16,40) 33,28	31,05 (13,53) 28,42	0,9298
f_{c0} (MPa)	37,19 (5,51) 38,28	31,66 (0,97) 31,77	0,0030
f_{c90} (MPa)	12,06 (1,40) 12,52	11,49 (2,89) 11,41	0,8577
f_{t0} (MPa)	21,18 (11,25) 21,18	13,82 (8,16) 12,71	0,0320
f_{t90} (MPa)	0,11 (0,02) 0,11	0,13 (0,04) 0,13	0,0941
f_{v0} (MPa)	5,73 (1,22) 5,65	4,05 (1,05) 4,16	0,0152

Fonte: Aatoria própria.

Para as amostras de *Schizolobium amazonicum* (Paricá), o teste estatístico mostrou evidências estatísticas de que houve diferença significativa para as propriedades de módulo de

elasticidade dinâmica (E_{din}) e resistência a tração normal às fibras (f_{t90}). Para as amostras de *Pinus taeda*, foram verificadas evidências estatísticas de diferença significativa para as propriedades de módulo de elasticidade dinâmica (E_{din}), módulo de elasticidade à flexão (MOE), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) e a resistência ao cisalhamento (f_{v0}).

5.2 Correlação simples entre propriedades mecânicas e físicas

Os resultados obtidos nas análises de correlação de Spearman entre as principais propriedades, com análise de toda a amostragem e separada por classes de resistência foram apresentados nas Tabela 51, Tabela 52 e Tabela 53.

Tabela 51 – Correlação de Spearman entre as propriedades do *Eucalyptus urograndis*

Classes	Associações	n	Coef. de correlação de Spearman	Valor-p
Todas as classes	MOE x E_{din}	89	0,794	0,000
	MOE x MOR	88	0,584	0,000
	E_{din} x MOR	89	0,613	0,000
	E_{din} x f_{t0}	27	0,582	0,001
	E_{din} x f_{t90}	156	0,203	0,066
	E_{din} x f_{c0}	167	0,476	0,000
	E_{din} x f_{c90}	41	0,484	0,001
	E_{din} x f_{v0}	47	0,450	0,001
	Densidade x MOE	89	0,582	0,000
	Densidade x MOR	88	0,464	0,000
	Densidade x f_{t0}	27	0,692	0,000
	Densidade x f_{t90}	156	0,246	0,025
	Densidade x f_{c0}	167	0,661	0,000
	Densidade x f_{c90}	41	0,587	0,000
	Densidade x f_{v0}	47	0,440	0,002
Classe 1	MOE x E_{din}	9	0,586	0,099
	MOE x MOR	9	0,817	0,007
	E_{din} x MOR	9	0,300	0,433
	E_{din} x f_{t0}	3	0,500	0,667
	E_{din} x f_{c0}	9	0,450	0,224

Tabela 51 – Correlação de Spearman entre as propriedades do *Eucalyptus urograndis*

Classes	Associações	n	Coef. de correlação de Spearman	Valor-p
Classe 2	MOE x E_{din}	28	0,792	0,000
	MOE x MOR	27	0,502	0,008
	E_{din} x MOR	27	0,556	0,003
	E_{din} x f_{t0}	8	0,119	0,779
	E_{din} x f_{c0}	27	0,375	0,054
Classe 3	MOE x E_{din}	52	0,411	0,002
	MOE x MOR	52	0,358	0,009
	E_{din} x MOR	52	0,390	0,004
	E_{din} x f_{t0}	16	0,609	0,012
	E_{din} x f_{c0}	51	0,135	0,344

Fonte: Autoria própria.

Os resultados do teste de correlação de Spearman para as peças de *Eucalyptus urograndis* apontam que para toda a amostragem, as maiores correlações ocorreram entre as propriedades de MOE e E_{din} (0,794). Outros valores de correlação relevantes foram: E_{din} x MOR (0,613), densidade aparente x f_{t0} (0,692) e densidade aparente x f_{c0} (0,661). Para a Classe 1 pode-se constatar a correlação estatisticamente significativa entre as propriedades de MOE e MOR (0,817). Para a Classe 2, a maior correlação ocorreu entre as propriedades de MOE e E_{din} (0,792). Para a Classe 3, a maior correlação constatada foi entre as propriedades E_{din} e f_{t0} (0,609).

Tabela 52 – Correlação de Spearman entre as propriedades do *Schizolobium amazonicum*

Classes	Associações	n	Coef. de correlação de Spearman	Valor-p
Todas as classes	MOE x E_{din}	27	0,447	0,019
	MOE x MOR	27	0,462	0,015
	E_{din} x MOR	27	0,313	0,112
	E_{din} x f_{t0}	8	0,952	0,000
	E_{din} x f_{t90}	26	0,385	0,052
	E_{din} x f_{c0}	27	0,720	0,000

Tabela 52 – Correlação de Spearman entre as propriedades do *Schizolobium amazonicum*

Classes	Associações	n	Coef. de correlação de Sperman	Valor-p
	$E_{din} \times f_{c90}$	11	0,645	0,032
	$E_{din} \times f_{v0}$	14	0,631	0,016
	Densidade x MOE	27	0,463	0,015
	Densidade x MOR	27	0,451	0,018
	Densidade x f_{t0}	8	0,905	0,002
	Densidade x f_{t90}	26	0,542	0,004
	Densidade x f_{c0}	27	0,651	0,000
	Densidade x f_{c90}	11	0,891	0,000
	Densidade x f_{v0}	14	0,780	0,001
Classe 1	MOE x E_{din}	6	0,371	0,468
	MOE x MOR	6	0,314	0,544
	E_{din} x MOR	6	0,371	0,468
	E_{din} x f_{c0}	6	0,257	0,623
Classe 2	MOE x E_{din}	21	0,371	0,097
	MOE x MOR	21	0,331	0,143
	E_{din} x MOR	21	0,145	0,529
	E_{din} x f_{t0}	6	0,943	0,005
	E_{din} x f_{c0}	21	0,623	0,003

Fonte: Autoria própria.

Para a análise de correlação realizada com as peças de *Schizolobium amazonicum* (Paricá), observou-se que os maiores valores de correlação foram obtidos entre as propriedades relacionadas a resistência a tração paralela (f_{t0}): E_{din} x f_{t0} (0,952) e densidade aparente x f_{t0} (0,905). Outros valores de correlação relevantes foram: E_{din} x f_{c0} (0,720), E_{din} x f_{c90} (0,645), E_{din} x f_{v0} (0,631), densidade aparente x f_{c0} (0,651), densidade aparente x f_{c90} (0,891) e densidade aparente x f_{v0} (0,780). Para a Classe 1 não foi possível obter resultados estatisticamente significativos para um nível de significância igual a 0,05. Entre os valores de correlação obtidos para a Classe 2, o maior valor foi obtido pela associação de E_{din} x f_{t0} (0,943).

Tabela 53 – Correlação de Spearman entre as propriedades do *Pinus taeda*

Classes	Associações	n	Coef. de correlação de Sperman	Valor-p
Todas as classes	MOE x E _{din}	18	0,505	0,033
	MOE x MOR	18	-0,038	0,880
	E _{din} x MOR	18	0,143	0,570
	E _{din} x f _{t0}	13	-0,126	0,681
	E _{din} x f _{t90}	44	-0,150	0,332
	E _{din} x f _{c0}	47	0,495	0,000
	E _{din} x f _{c90}	22	0,099	0,662
	E _{din} x f _{v0}	24	0,337	0,107
	Densidade x MOE	18	0,515	0,029
	Densidade x MOR	18	0,011	0,964
	Densidade x f _{t0}	13	0,330	0,271
	Densidade x f _{t90}	44	-0,096	0,534
	Densidade x f _{c0}	47	0,595	0,000
	Densidade x f _{c90}	22	0,555	0,007
	Densidade x f _{v0}	24	0,503	0,012
Classe 1	MOE x E _{din}	7	0,857	0,014
	MOE x MOR	7	0,571	0,180
	E _{din} x MOR	7	0,143	0,760
	E _{din} x f _{c0}	14	0,604	0,022
Classe 2	MOE x E _{din}	11	0,164	0,631
	MOE x MOR	11	-0,555	0,077
	E _{din} x MOR	11	0,064	0,853
	E _{din} x f _{t0}	11	-0,100	0,770
	E _{din} x f _{c0}	33	0,274	0,122

Fonte: Autoria própria.

Para a análise das associações com o *Pinus taeda*, os valores de correlação foram os mais baixos entre as espécies com o maior valor obtido para a associação entre densidade aparente x f_{c0} igual a 0,595 e várias associações apontaram não existir correlação significativa.

Os valores de correlação de MOE x E_{din} para as três espécies variaram de 0,857 a 0,371, porém vale lembrar que o uso do E_{din} como parâmetro de classificação mecânica das peças estruturais não é rejeitado pelos valores baixos de correlação, por ser um método já normalizado pelo projeto de norma ABNT PN 02:126 10-001.1: 2018 - Critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira e verificado em trabalhos científicos como: Calil Junior e Miná (2003), Carreira (2003), Calil Neto (2011), Almeida *et al.* (2016), Cavalheiro (2014), Yang *et al.* (2015), entre outros.

5.3 Técnica hierárquica de agrupamento

Para a análise de agrupamento foi realizada a padronização dos dados para que os resultados não sofressem os efeitos da medida de escalas diferentes entre as variáveis. Foi adotada como medida de similaridade a distância euclidiana e o método de Ward como o procedimento de agrupamento hierárquico.

Foram gerados dendogramas para cada análise de agrupamento e o gráfico do comportamento da soma de quadrados dentro dos grupos. A correspondência da análise de agrupamento pela matriz de classificação possibilitou a comparação dos grupos gerados com as classes de resistência propostas neste trabalho. A análise de componentes principais permitiu avaliar graficamente os agrupamentos gerados a partir da redução das variáveis originais com a menor perda possível da informação.

Para as três espécies foram consideradas as variáveis das propriedades de E_{din} , MOE, MOR e densidade aparente e, os defeitos mais pronunciados nas peças estruturais de cada espécie.

5.3.1 *Eucalyptus urograndis*

Para a análise de agrupamento consideraram-se as variáveis E_{din} , MOE, MOR, densidade aparente, fissuras e encurvamento, sendo adotadas 88 peças das 142 peças recebidas, cujas peças foram ensaiadas à flexão estática.

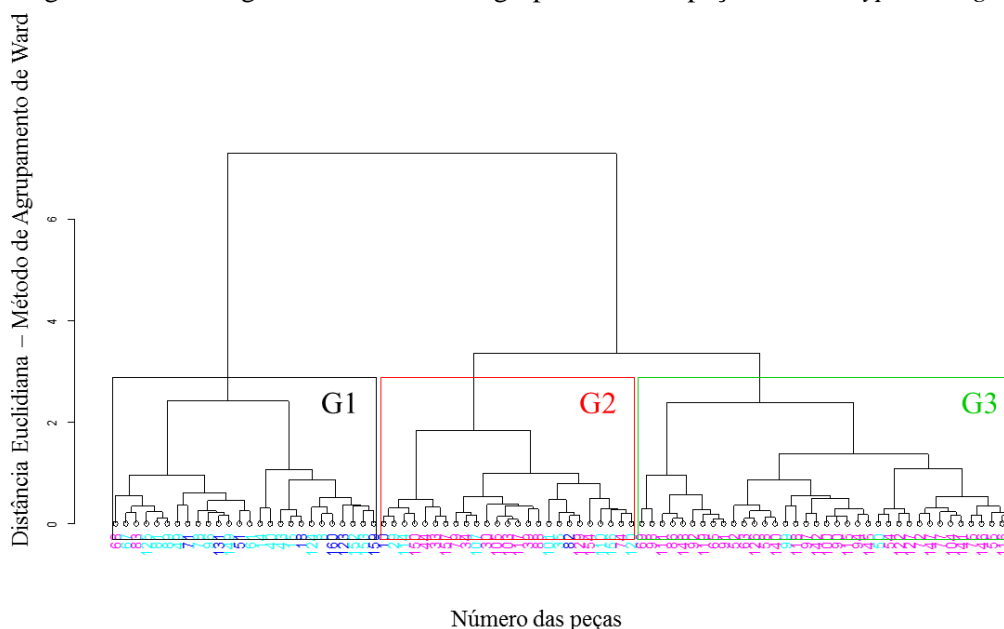
Os resultados obtidos na análise de agrupamento para as peças de *Eucalyptus urograndis* foram representados graficamente pelo dendograma da Figura 44 que evidenciaram a formação de três grupos: G1 (preto), G2 (vermelho) e G3 (verde). O gráfico é escalonado, em que as distâncias menores entre as combinações indicaram maior homogeneidade dentro dos

grupos. Cada peça foi identificada no eixo horizontal pelas três cores (azul escura, azul clara e rosa) que representam a Classe 1, Classe 2 e Classe 3 da classificação visual e mecânica. No eixo vertical foi apresentado o nível de similaridade.

Observou-se que o grupo G1 teve predominância das peças de cor azul clara (Classe 2) junto com peças da cor azul escura (Classe 1) e da cor rosa (Classe 3), porém vale destacar que a maioria das peças da cor azul escura e azul clara se encontram no grupo G1. O grupo G2 teve predominância das peças da cor rosa, mas também houve a presença de peças da cor azul clara e uma peça da cor azul escura. O grupo G3 teve predominância da cor rosa, o que foi o esperado, e duas peças da cor azul clara.

Pelo dendograma verificou-se maior similaridade entre as características das peças da Classe 1 e 2, assim como já confirmado anteriormente pelo teste de Dunn, em que não foi identificada diferença entre as duas classes. Para a Classe 3 percebeu-se que os elementos se diferenciaram dos elementos da Classe 1 e 2 e, ainda, os elementos dessa classe não apresentaram similaridade necessária para que permanecessem em um único grupo, sendo separados nos grupos G2 e G3.

Figura 44 – Dendograma da análise de agrupamento das peças de *Eucalyptus urograndis*



Fonte: Autoria própria.

A concordância da classificação visual e mecânica (Classe 1, Classe 2 e Classe 3) com os grupos da análise de agrupamento (G1, G2 e G3) pode ser observada pela matriz de classificação apresentada na Tabela 54. Esta matriz mostrou a frequência (em quantidades) das classes da classificação visual e mecânica em cada grupo formado na análise de agrupamento.

Tabela 54 – Matriz de classificação das peças de *Eucalyptus urograndis*

Classificação visual e mecânica	Análise de agrupamento			Total
	G1 (preto)	G2 (vermelho)	G3 (verde)	
Classe 1 (azul escura)	7 (77,8%)	2 (22,2%)	0 (0,0%)	9 (100,0%)
Classe 2 (azul clara)	17 (63,0%)	8 (29,6%)	2 (7,4%)	27 (100,0%)
Classe 3 (rosa)	2 (3,8%)	15 (28,8%)	35 (67,3%)	52 (100,0%)
Total	26 (29,5%)	25 (28,4%)	37 (42,0%)	88 (100,0%)

Fonte: Autoria própria.

Para a verificação da validação dos agrupamentos formados foi utilizado o coeficiente de correlação cofenético, que foi igual a 0,598. Quanto mais próximo do 1 for este valor, mais adequado o método de agrupamento estará para resumir a informação do conjunto de dados.

Pela matriz de classificação pode-se perceber que das 88 peças analisadas, 50 (56,8%) foram agrupadas nos grupos correspondentes às classes de resistência. No grupo G1 (dada pela cor preta), 77,8% das peças da Classe 1 foram inseridas nesse grupo, porém 65,4% das peças desse grupo são da Classe 2. No grupo G2, 29,3% das peças são da Classe 2. E no grupo G3, 67,3% são peças da Classe 3. Isto confirma a proposta de agrupar os dados em dois grupos para a redução da “contaminação” dos grupos G1 e G2.

Os valores médio e desvios-padrões dos grupos G1, G2 e G3 das peças estruturais de *Eucalyptus urograndis* são apresentados na Tabela 55.

Tabela 55 – Média e desvio padrão das variáveis originais para a análise de agrupamento das peças de *Eucalyptus urograndis*

Grupos formados	n	Médias e desvio padrão das variáveis originais					
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	E _{din} (MPa)	Densidade (kg/m ³)	Fissura (m)	Encurv. (mm)
G1 (preto)	26	13.466	73,60	14.315	679,48	0,08	8,38
		(1.156,66)	(10,50)	(1.148,94)	(52,32)	(0,07)	(5,35)
G2 (vermelho)	25	11.812	58,97	12.555	647,40	0,10	12,04
		(922,59)	(10,60)	(987,65)	(36,50)	(0,07)	(3,74)
G3 (verde)	37	10.952	50,31	11.271	589,01	0,11	7,32
		(745,95)	(11,45)	(739,22)	(22,88)	(0,09)	(4,48)

Fonte: Autoria própria.

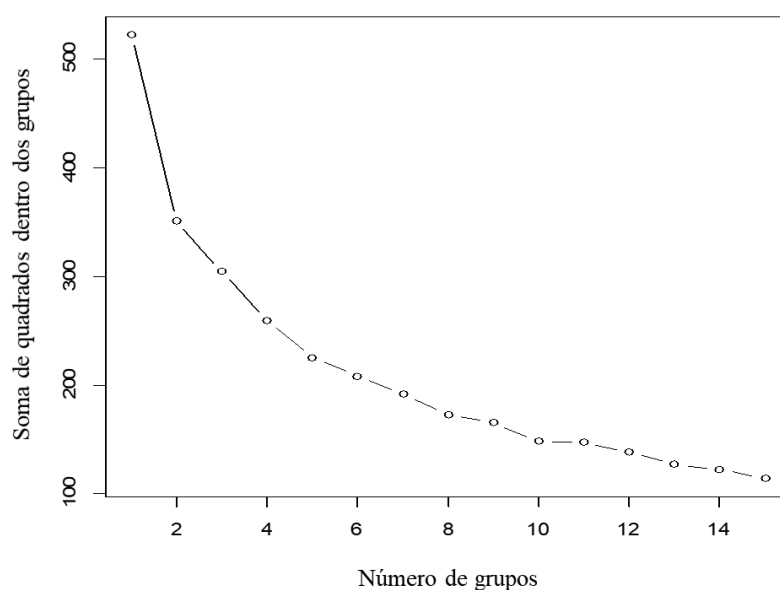
Os valores médios de MOE obtidos dos grupos na análise de agrupamento foram próximos aos valores médios das classes visuais, com diferenças de 0,34%, -8,79% e -1,84%, respectivamente para a Classe 1, Classe 2 e Classe 3. Para os valores médios de MOR, as diferenças foram de 2,04%, -11,07% e -6,90%, respectivamente. Para os valores de E_{din}, as

diferenças foram de -1,47%, -8,69% e -4,43%, respectivamente. Os valores médios da densidade tiveram diferenças de -5,32%, -3,66% e -5,45%, respectivamente. Verificou-se que os valores dos desvios-padrões dos grupos da análise de agrupamento apresentaram valores menores do que os valores obtidos para as classes de resistência.

A Figura 45 apresenta o gráfico do comportamento da soma de quadrados dentro dos grupos, para determinar o número adequado de grupos, de acordo com a análise de agrupamento. O eixo horizontal indicou os possíveis números de grupos finais na análise de agrupamento e o eixo vertical indicou as respectivas somas de quadrados dentro dos grupos.

Pelo gráfico foi possível observar que houve uma tendência da diminuição de cada ponto que indicam a soma dos quadrados dentro dos grupos com o aumento do número de grupos, estabilizando o gráfico conforme os grupos se tornaram cada vez mais homogêneos internamente. Houve uma queda acentuada na soma dos quadrados dentro do grupo quando o processo de agrupamento passou de um para dois grupos, assim como de três para quatro grupos. A queda do gráfico diminuiu significativamente quando o processo se alterou de cinco para seis grupos. Assim, a análise de agrupamento deveria ser estabelecida com cinco ou seis grupos. Porém, devido ao número reduzido de dados, isso não seria suficiente para realizar os testes estatísticos.

Figura 45 – Gráfico do comportamento da soma de quadrados dentro dos grupos para as peças de *Eucalyptus urograndis*



Fonte: Autoria própria.

Foi utilizada a análise de componentes principais, a fim de reduzir o espaço paramétrico (de 6 variáveis para 3 novas variáveis chamadas de Componentes Principais). Estas 3

componentes explicaram conjuntamente 82% da variabilidade total dos dados. De acordo com a Tabela 56, a componente PC1 está mais associada às variáveis de MOE, MOR e E_{din} e densidade aparente, e as componentes PC2 e PC3, mais associadas às variáveis de fissura e encurvamento.

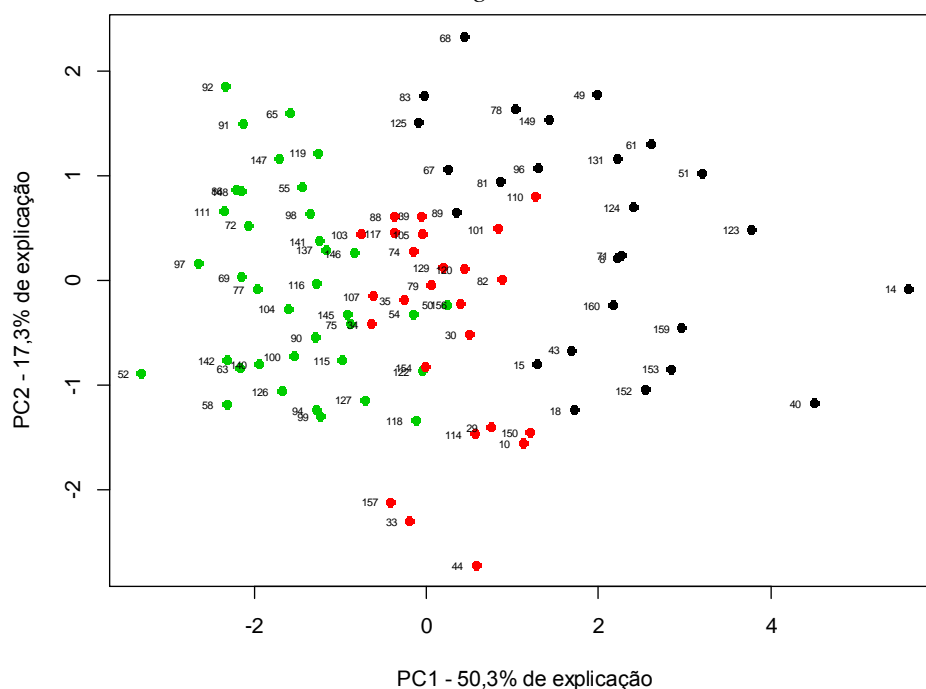
Tabela 56 – Associação das variáveis com as propriedades principais das peças de *Eucalyptus urograndis*

Variáveis	Correlações estimadas		
	PC1	PC2	PC3
MOE	0,493	-0,301	<0,100
MOR	0,452	-0,200	<0,100
E_{din}	0,516	-0,173	<0,100
Densidade aparente	0,449	0,151	0,138
Fissura	-0,208	-0,698	-0,602
Encurvamento	0,200	0,575	-0,784

Fonte: Autoria própria.

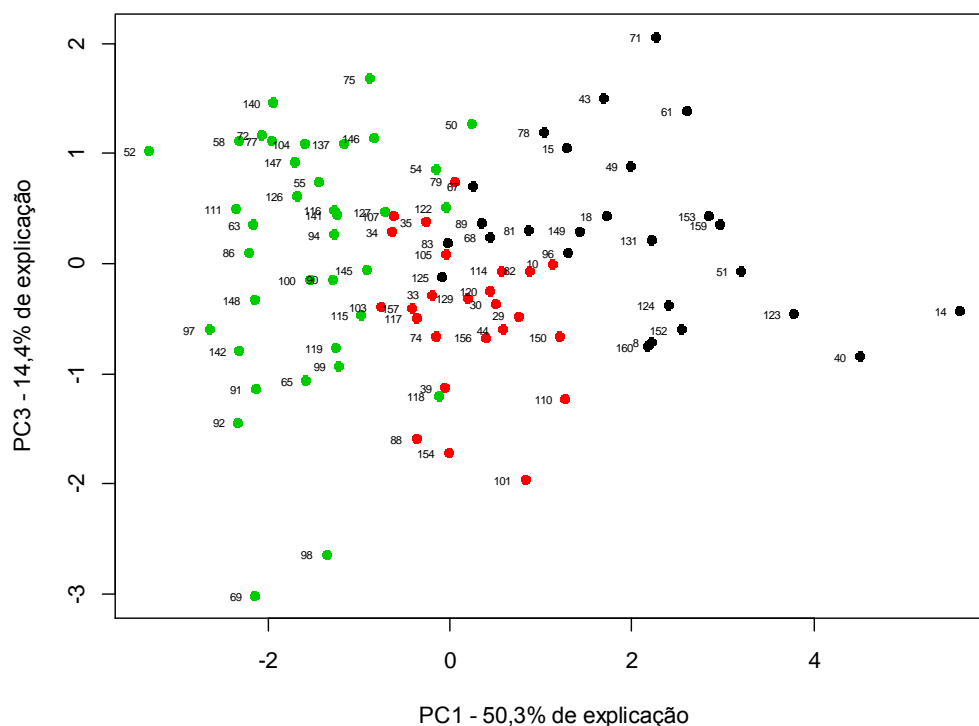
Nas Figura 46 e Figura 47 foram representadas a dispersão dos grupos da análise de agrupamento pela técnica de componentes principais (PC1, PC2 e PC3) em que cada ponto representou uma peça com suas identificações e as cores de cada grupo da análise de agrupamento, ou seja, G1 (verde), G2 (vermelho) e G3 (preto).

Figura 46 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC2 para as peças de *Eucalyptus urograndis*



Fonte: Autoria própria.

Figura 47 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC3 para as peças de *Eucalyptus urograndis*



Fonte: Autoria própria.

Foi possível perceber que pela Figura 46 e Figura 47 a componente PC1 permitiu a separação dos grupos G1 (preto) e G3 (verde), porém observou-se que na porção localizada pelo grupo G2 (vermelho) teve uma “contaminação” do grupo G1 e G3.

Na Tabela 57 é apresentada a matriz de correlação entre as variáveis consideradas para a análise de agrupamento das peças de *Eucalyptus urograndis*.

Tabela 57 – Matriz de correlação para *Eucalyptus urograndis*

Variáveis	MOE	MOR	E _{din}	Densidade	Fissura	Encurvamento
MOE	1	0,6227	0,8150	0,5268	-0,1413	0,1319
MOR	-	1	0,6194	0,4825	-0,1576	0,1806
E _{din}	-	-	1	0,6051	-0,1952	0,2343
Densidade	-	-	-	1	-0,3314	0,2345
Fissura	-	-	-	-	1	0,1489
Encurvamento	-	-	-	-	-	1

Fonte: Autoria própria.

Pela matriz de correlação, observou-se que os maiores valores de correlação ocorreram entre as propriedades mecânicas, com o maior valor de correlação entre as variáveis MOE e E_{din} (0,8150), e os menores valores de correlação ocorreram em relação aos defeitos visuais de

fissura e de encurvamento da peça. Com isso, constatou-se a baixa correlação dos defeitos visuais nas propriedades mecânicas e físicas avaliadas na análise de agrupamento.

Foi realizado o mesmo teste de Kruskal-Wallis para verificar as diferenças estatísticas entre os grupos formados pela análise de agrupamento (G1, G2 e G3), os resultados são apresentados na Tabela 58.

Tabela 58 – Valores das propriedades mensuradas para cada grupo (G1, G2 e G3) da análise de agrupamento: média (desvio padrão) e mediana para *Eucalyptus urograndis*

Propriedade	G1	G2	G3	Valor-p
E_{din} (MPa)	14.315 (1.149)	12.555 (988)	11.271 (739)	1.131E-11
	13.930	12.458	11.245	
MOE (MPa)	13.466 (1.157)	11.812 (923)	10.952 (746)	1.589E-10
	13.233	11.761	11.004	
MOR (MPa)	73,60 (10,50)	58,97 (10,60)	50,31 (11,45)	7.730E-09
	70,32	61,85	51,06	
f_{c0} (MPa)	46,97 (6,86)	44,31 (5,25)	41,12 (5,30)	4.535E-04
	47,23	45,23	41,39	
f_{c90} (MPa)	14,09 (1,65)	13,45 (2,52)	12,04 (1,59)	1.277E-02
	13,49	14,36	11,82	
f_{t90} (MPa)	0,23 (0,06)	0,22 (0,06)	0,21 (0,05)	3,169E-01
	0,23	0,23	0,21	
f_{v0} (MPa)	6,09 (1,25)	4,86 (1,07)	4,56 (1,15)	2.829E-03
	6,16	4,97	4,64	

Fonte: Autoria própria.

O teste de Kruskal-Wallis rejeitou a hipótese nula para as propriedades mecânicas, com exceção da resistência à tração normal às fibras (f_{t90}) e, portanto, houve evidências de diferenças estatísticas entre os grupos analisados. Para encontrar quais os grupos que foram responsáveis pela rejeição da hipótese nula e, quais os grupos que se diferenciam entre si, foi aplicado o teste de Dunn. Os resultados foram apresentados na Tabela 59.

Tabela 59 – Valor-p para o teste de Dunn, nas comparações entre os agrupamentos (G1, G2 e G3)

Comparação	E _{din}	MOE	MOR	f _{c0}	f _{c90}	f _{v0}
G1 – G2	3.128e-03	7.495e-04	1.336e-03	1,582E-01	3,757E-01	7.071E-03
G1 – G3	2.109e-12	1.944e-11	9.890e-10	1.192E-04	3.992E-03	1.378E-03
G2 – G3	1.309e-04	2.236e-03	7.952e-03	1.948E-02	1,405E-01	4,879E-01

Fonte: Autoria própria.

Para as propriedades mecânicas de E_{din}, MOE e MOR, as três comparações mostraram que os pares analisados se diferenciaram entre si, destacando a heterogeneidade entre os grupos

formados pela análise de agrupamento para essas propriedades mecânicas. Para as demais propriedades (f_{c0} , f_{c90} e f_{v0}) constatou-se diferenças e semelhanças entre os pares analisados.

5.3.2 *Schizolobium amazonicum*

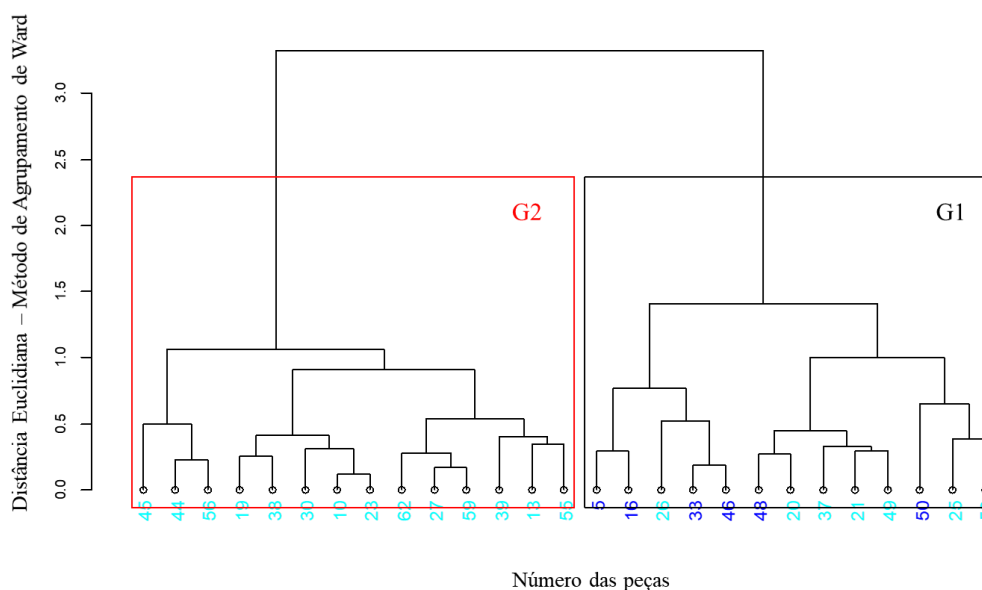
Das 49 peças recebidas foram consideradas 27 peças para a análise de agrupamento, cujas peças foram ensaiadas a flexão. As variáveis utilizadas foram: MOE, MOR, E_{din} , densidade aparente e encurvamento.

Os resultados obtidos da análise de agrupamento para as peças de *Schizolobium amazonicum* (Paricá) foram representados graficamente pelo dendograma da Figura 48. As identificações das peças foram apresentadas no eixo horizontal, na qual a cor azul escura representou a Classe 1 e a cor azul clara representou a Classe 2.

Pelo dendograma foi possível observar a formação de dois grupos: G1 (preto) e G2 (vermelho). Os grupos originados da análise de agrupamento foram comparados com as classes de resistência (Classe 1 e Classe 2) formadas pela classificação visual e mecânica.

No grupo G1, seis das treze peças foram de peças da Classe 1 e todas as peças do grupo G2 foram da Classe 2. Apesar da “contaminação” de 54% das peças da Classe 2 no grupo G1, a divisão de dois grupos foi o mais adequado pela similaridade das características das peças.

Figura 48 – Dendograma da análise de agrupamento das peças de *Schizolobium amazonicum*



Fonte: Autoria própria.

A concordância da classificação visual e mecânica (Classe 1 e Classe 2) com os grupos da análise de agrupamento (G1 e G2) pode ser verificada pela matriz de classificação mostrada na Tabela 60. Esta matriz mostrou a frequência (em quantidade) das classes da classificação visual e mecânica nos grupos formados na análise de agrupamento.

Tabela 60 – Matriz de classificação das peças de *Schizolobium amazonicum*

Classificação visual e mecânica	Análise de agrupamento		
	G1	G2	Total
Classe 1	6 (100%)	0 (0%)	6 (100%)
Classe 2	7 (33,3%)	14 (66,7%)	21 (100%)
Total	13	14	27

Fonte: Autoria própria.

Para a verificação da validação dos agrupamentos formados foi utilizado o coeficiente de correlação cofenético, que foi igual a 0,560. Quanto mais próximo do 1 for este valor, mais adequado o método de agrupamento estará para resumir a informação do conjunto de dados.

A matriz de classificação confirmou a proposta de considerar duas classes para a classificação visual e mecânica, pois das 27 peças analisadas, 20 (74,1%) foram agrupados nos grupos correspondentes às classes de resistência. Além disso, todas as peças da Classe 1 foram agrupadas no grupo G1 e 66,7% das peças do grupo G2 são da Classe 2.

Os valores médios e desvios padrão dos grupos G1 e G2 foram calculados e apresentados na Tabela 61.

Tabela 61 – Média e desvio padrão das variáveis originais para a análise de agrupamento das peças de *Schizolobium amazonicum*

Grupos formados	n	Médias e desvio padrão das variáveis originais				
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	E _{din} (MPa)	Densidade (kg/m ³)	Encurvamento (mm)
G1 (preto)	13	9.693	51,43	8.846	356	24
		(1.192)	(11,48)	(920)	(32,4)	(4,8)
G2 (vermelho)	14	8.375	43,50	6.644	302	19
		(831)	(7,67)	(542)	(21,8)	(5,8)

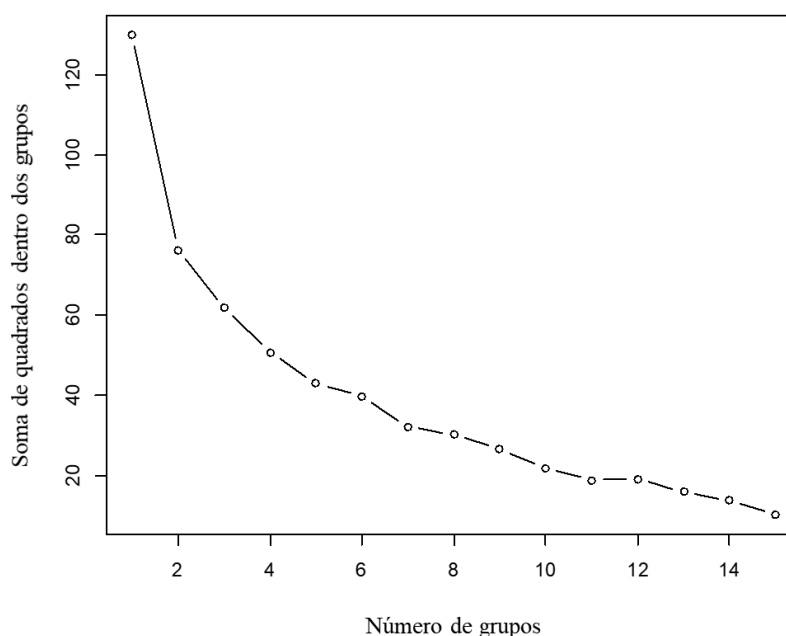
Fonte: Autoria própria.

Os valores médios de MOE para os grupos formados na análise de agrupamento foram próximos aos valores médios obtidos das classes visuais de resistência, com diferenças de 8,70% e -2,14%, para a Classe 1 e Classe 2, respectivamente. Para os valores médios de MOR,

as diferenças foram de 16,48% e -7,26%. Para os valores médios de E_{din} , as diferenças foram de 3,39% e 1,83%. E para os valores médios de densidade aparente, as diferenças foram de 2,12% e 1,06%.

Com gráfico do comportamento da soma de quadrados dentro de grupos para as peças de *Schizolobium amazonicum* mostrado na Figura 49, foi possível estimar o número mais adequado de grupos de acordo com a análise de agrupamento, por meio da menor variação da soma de quadrados dentro dos grupos. Pelo gráfico, a análise de agrupamento deveria ser realizada com quatro ou cinco grupos, porém, isso não foi possível devido ao número reduzido de dados.

Figura 49 – Gráfico do comportamento da soma de quadrados dentro de grupos para as peças de *Schizolobium amazonicum*



Fonte: Autoria própria.

A análise de componentes principais foi utilizada para a observação dos grupos com a redução do espaço paramétrico (de 5 variáveis para 3 novas variáveis chamadas de Componentes Principais). Estas 3 componentes explicaram conjuntamente 93,5% da variabilidade total dos dados. Pela Tabela 62, verificou-se que a componente PC1 estava mais associada às variáveis E_{din} e densidade, a componente PC2 mais associada às variáveis MOE e encurvamento e a componente PC3 mais associada às variáveis MOR e encurvamento.

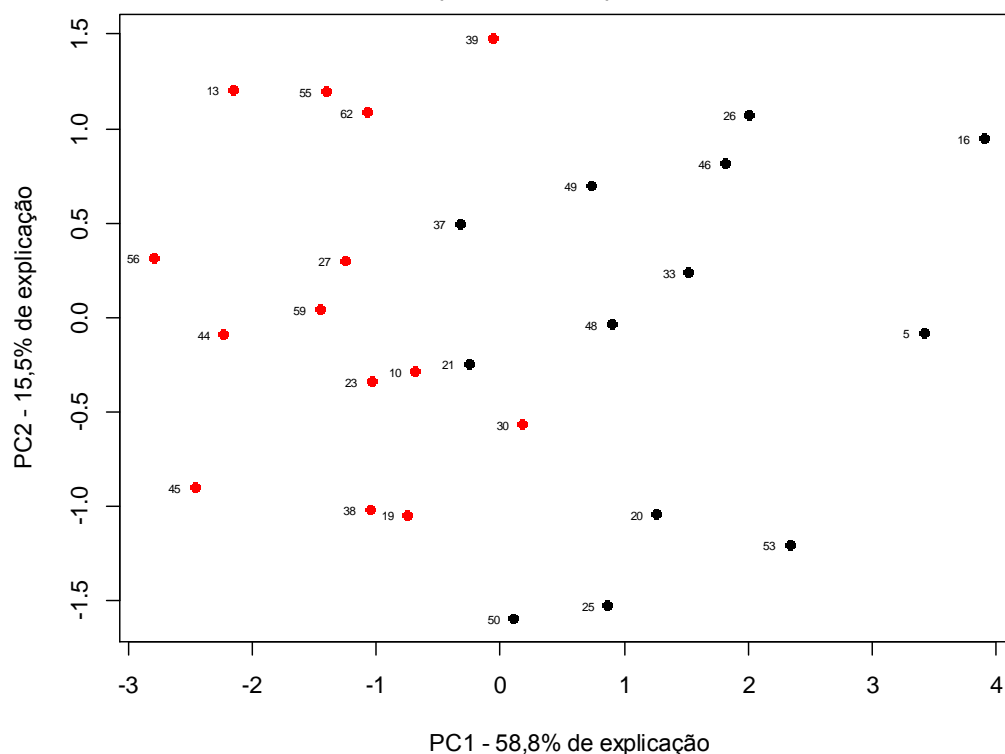
Tabela 62 – Associação das variáveis com as propriedades principais das peças de *Schizolobium amazonicum*

Variáveis	Correlações estimadas		
	PC1	PC2	PC3
MOE	0,414	0,644	0,143
MOR	0,427	0,414	-0,539
E _{din}	0,496	-0,304	0,434
Densidade	0,497	-0,160	0,382
Encurvamento	0,392	-0,544	-0,596

Fonte: Autoria própria.

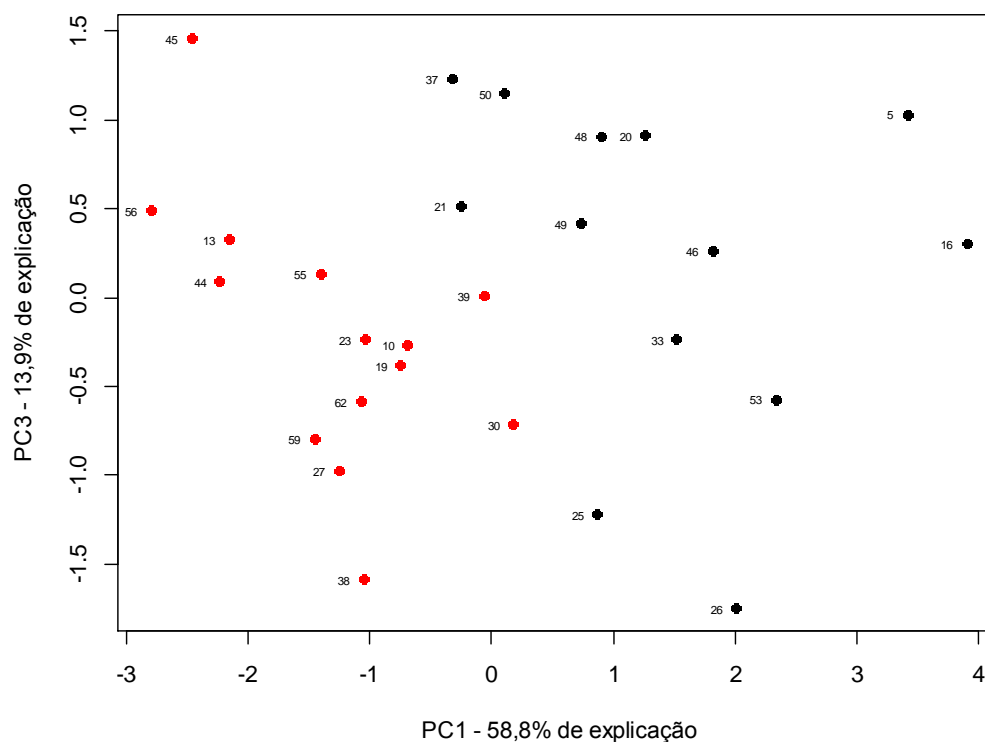
Nas Figura 50 e Figura 51 foram mostradas a dispersão dos grupos da análise de agrupamento pela técnica de componentes principais (PC1, PC2 e PC3), na qual cada ponto representou uma peça com suas identificações e suas cores correspondente ao grupo da análise de agrupamento.

Figura 50 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC2 para as peças de *Schizolobium amazonicum*



Fonte: Autoria própria.

Figura 51 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC3 para as peças de *Schizolobium amazonicum*



Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 50 e Figura 51 observou-se que a componente PC1 que estava mais associada ao E_{din} e densidade das peças, separou os dois grupos G1 (preto) e G2 (vermelho).

Pelos valores da matriz de correlação (Tabela 63), verificou-se que as maiores correlações foram em relação a densidade aparente com as propriedades mecânicas (MOE, MOR e E_{din}) e a correlação entre o MOE e o MOR. E os menores valores de correlação foram em relação ao encurvamento com as demais variáveis analisadas.

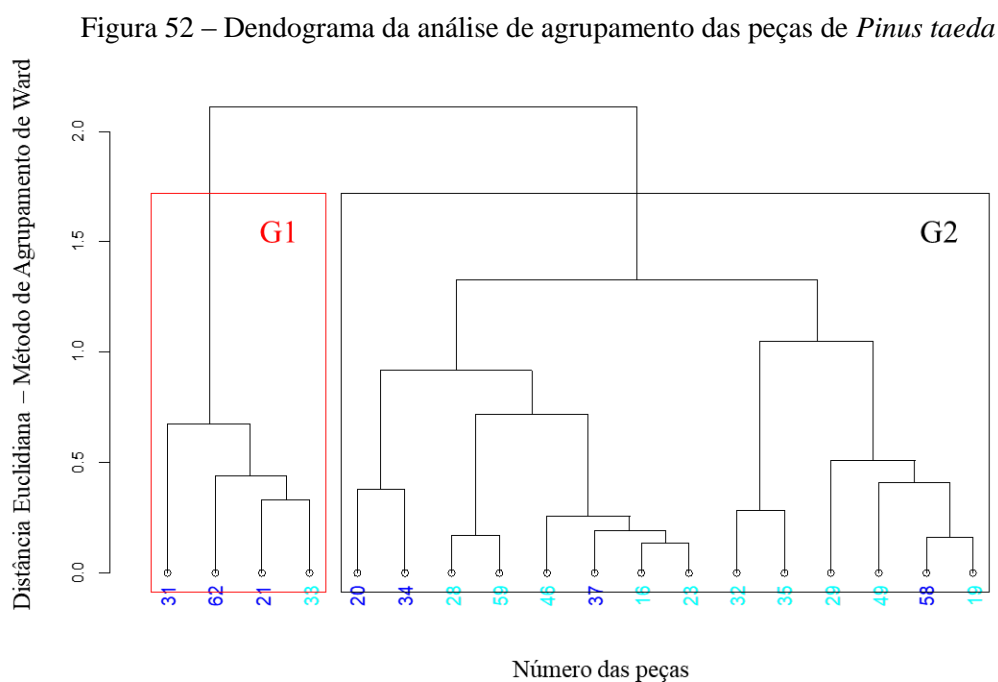
Tabela 63 – Matriz de correlação para *Schizolobium amazonicum*

Variáveis	MOE	MOR	E_{din}	Densidade	Encurvamento
MOE	1	0,5280	0,5037	0,4584	0,2551
MOR	-	1	0,3676	0,5081	0,4440
E_{din}	-	-	1	0,7913	0,5163
Densidade	-	-	-	1	0,4207
Encurvamento	-	-	-	-	1

Fonte: Autoria própria.

5.3.3 *Pinus taeda*

Na análise de agrupamento foram avaliadas 18 peças das 44 peças recebidas, que foram ensaiadas á flexão estática para que fossem consideradas as variáveis: MOE, MOR, E_{din} , densidade aparente e nós. Na Figura 52 foi representado graficamente o dendograma da análise de agrupamento. Agruparam-se as peças em dois grupos G1 (vermelho) e G2 (preto), cujas cores das identificações das peças no eixo horizontal foram diferenciadas pela cor azul escura (Classe 1), cor azul clara (Classe 2) e cor rosa (reprovada). O resultado da análise de agrupamento foi comparado a Classe 1 e Classe 2 da classificação visual e mecânica proposta neste trabalho para as peças estruturais de *Pinus taeda*.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com o dendograma da Figura 52, três das quatro peças do grupo G1 pertence à Classe 1, porém a maior parte das peças da Classe 1 (quatro das sete peças) foram inseridas no grupo G2. Por outro lado, o grupo G2 é composto grande parte por peças da Classe 2.

A concordância da classificação visual e mecânica (Classe 1 e Classe 2) com os grupos da análise de agrupamento (G1 e G2) pode ser melhor esclarecida pela matriz de classificação da Tabela 64. Esta matriz mostrou a frequência (em quantidade) da Classe 1 e Classe 2 da classificação visual e mecânica proposta nos grupos G1 e G2 da análise de agrupamento.

Tabela 64 – Matriz de classificação das peças de *Pinus taeda*

Classificação visual e mecânica	Análise de agrupamento		
	G1	G2	Total
Classe 1	3 (42,9%)	4 (57,1%)	7 (100%)
Classe 2	1 (9,1%)	10 (90,9%)	11 (100%)
Total	4	14	18

Fonte: Autoria própria.

Para a verificação da validação dos agrupamentos formados foi utilizado o coeficiente de correlação cofenético, que foi igual a 0,659. Quanto mais próximo do 1 for este valor, mais adequado o método de agrupamento estará para resumir a informação do conjunto de dados.

A matriz de classificação da Tabela 64 mostrou que os grupos apresentaram proporção de peças da Classe 1 e Classe 2 coerentes com os grupos G1 e G2, das 18 peças analisadas, 13 (72,2%) foram agrupados nos grupos correspondentes às classes de resistência. Além disso, 75,0% das peças do grupo G1 foi composto por peças da Classe 1 e 90,9% das peças do Classe 2 foram agrupados no Grupo 2.

Os valores médios e desvios-padrões dos grupos G1 e G2 foram calculados e apresentados na Tabela 65.

Tabela 65 – Média e desvio padrão das variáveis originais para a análise de agrupamento das peças de *Pinus taeda*

Grupos formados	n	Médias e desvio padrão das variáveis originais				
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	E _{din} (MPa)	Densidade (kg/m ³)	Nós (cm)
G1 (preto)	4	10.529 (1,563)	46,71 (6,47)	10.260 (1,980)	545 (50,09)	30 (7,07)
G2 (vermelho)	15	6558 (823)	27,49 (12,96)	7.646 (1,232)	484 (50,64)	36 (16,89)

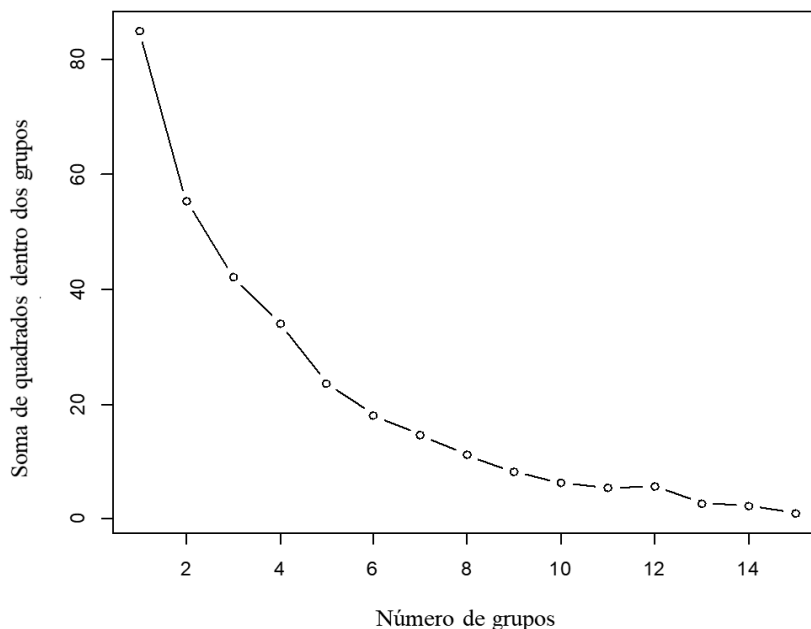
Fonte: Autoria própria.

Os valores dos desvios-padrões de MOE para os grupos G1 e G2 foram mais baixos do que os valores obtidos para a Classe 1 e Classe 2 e, os valores médios se distinguiram consideravelmente de um grupo para o outro e tiveram diferenças de 26,4% e -2,47% respectivamente em relação a Classe 1 e Classe 2 (Tabela 30). Os valores médios de MOR para o grupo G1 e G2 também se diferenciaram significativamente de um grupo para o outro, sendo o valor do desvio padrão de G1 60,5% mais baixo do que da Classe 1 e as diferenças dos grupos

G1 e G2 foram de 44,8% e -11,4%, respectivamente, em relação a Classe 1 e Classe 2 (Tabela 31). O valor médio e o desvio padrão de E_{din} encontrado para o grupo G1 foram maiores em relação a Classe 1 (Tabela 27), e para o grupo G2, o valor médio e o desvio padrão foram próximos aos encontrados para a Classe 2. A diferença dos valores médios de E_{din} dos grupos G1 e G2 em relação a Classe 1 e Classe 2 foram de 19,8% e 4,15%, respectivamente. Os valores médios e desvios-padrões da densidade aparente obtidos para os grupos G1 e G2 foram próximos aos calculados para a Classe 1 e Classe 2, com diferenças de 5,28% e 2,55%, respectivamente.

A partir do gráfico da soma dos quadrados dentro dos grupos para as peças de *Pinus taeda* apresentado na Figura 53, foi estimado o número de grupos com maior homogeneidade interna pois a soma dos quadrados dentro do grupo tendeu a diminuir com o aumento da homogeneidade interna nos grupos. Pela observação do gráfico, a análise de agrupamento deveria ser realizada com seis ou sete grupos, porém, isso não foi possível de realizar devido à quantidade reduzida de dados.

Figura 53 – Gráfico do comportamento da soma de quadrados dentro de grupos para as peças de *Pinus taeda*



Fonte: Autoria própria.

Para visualização gráfica dos grupos, foi utilizada técnica de componentes principais, a fim de reduzir o espaço paramétrico (de 5 variáveis para 3 novas variáveis chamadas de Componentes Principais). Estas 3 componentes explicaram conjuntamente 86% da variabilidade total dos dados. Pela Tabela 66, a componente PC1 estava mais associada às

variáveis MOE, E_{din} e densidade, a componente PC2 mais associada aos nós e a componente PC3 estavam mais associadas a variável MOR, com uma correlação maior para a componente PC2.

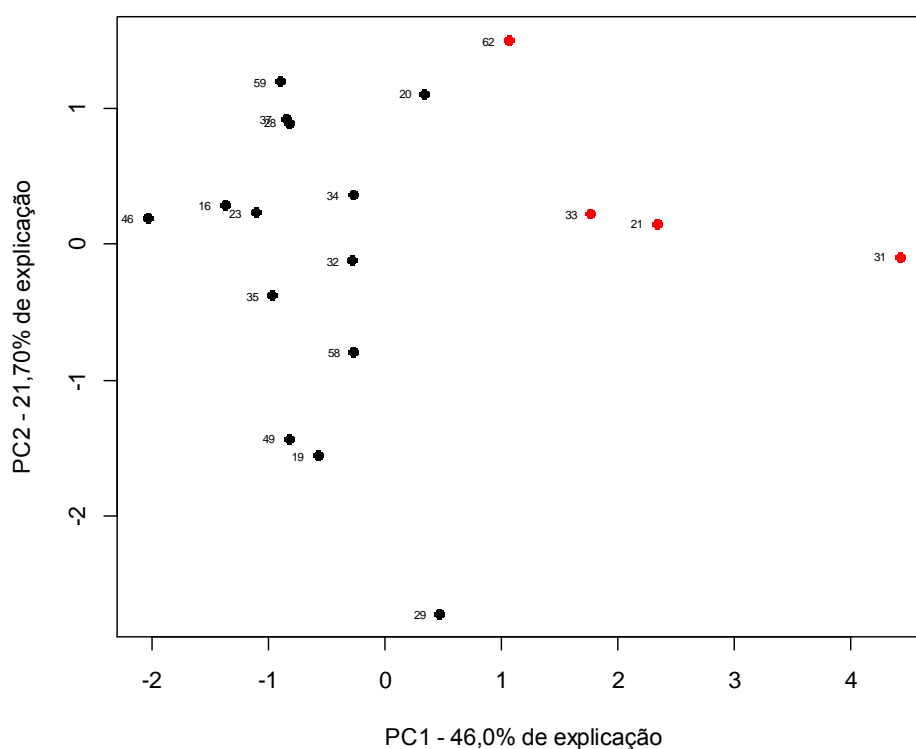
Tabela 66 – Associação das variáveis com as propriedades principais das peças de *Pinus taeda*

Variáveis	Correlações estimadas		
	PC1	PC2	PC3
MOE	0,580	<0,001	0,111
MOR	0,283	0,454	-0,766
E_{din}	0,572	-0,202	-0,141
Densidade	0,501	-0,199	0,402
Nós	<0,001	-0,843	-0,467

Fonte: Autoria própria.

Nas Figura 54 e Figura 55 foram mostradas a dispersão dos grupos da análise de agrupamento pela técnica de componentes principais (PC1, PC2 e PC3), na qual cada ponto representou uma peça com suas identificações e suas cores correspondente ao grupo da análise de agrupamento.

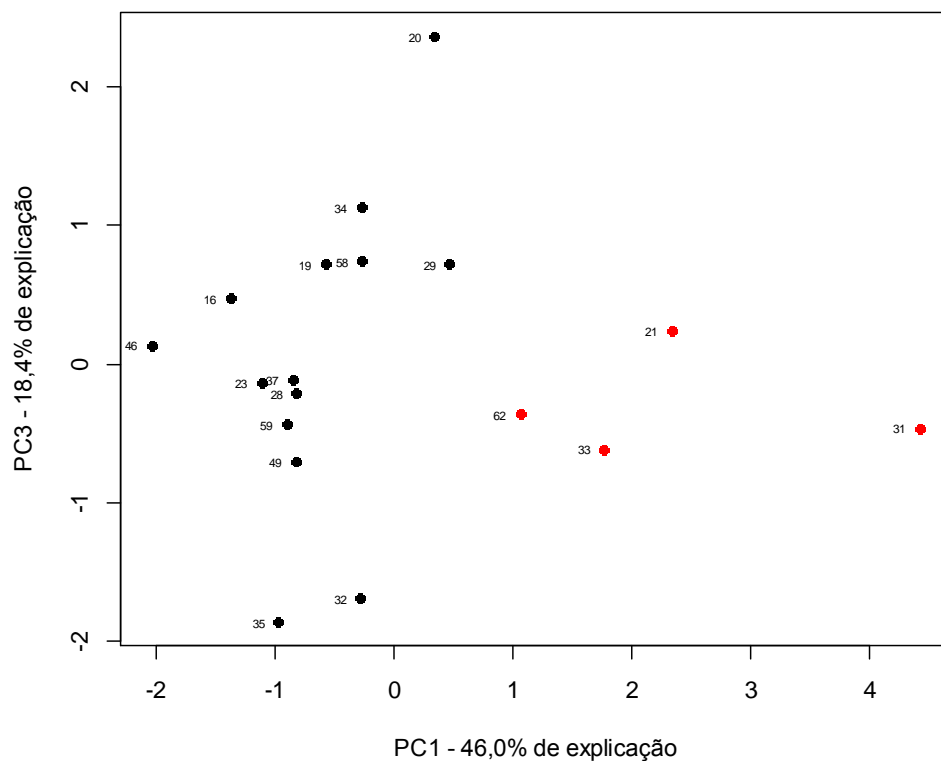
Figura 54 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC2 para as peças de *Pinus taeda*



Fonte: Autoria própria.

A componente PC1 da Figura 54 e Figura 55, que estava mais associada às variáveis MOE, E_{din} e densidade, possibilitou separar o grupo G1 do grupo G2.

Figura 55 – Gráfico de dispersão dos escores das componentes PC1 e PC3 para as peças de *Pinus taeda*



Fonte: Autoria própria.

Pelos valores da matriz de correlação (Tabela 67), constatou-se a baixa correlação do tamanho do nó com as outras variáveis. As maiores correlações verificadas foram entre o MOE e o E_{din} (0,6724) e entre a densidade e MOE (0,5581).

Tabela 67 – Matriz de correlação para *Pinus taeda*

Variáveis	MOE	MOR	E_{din}	Densidade	Nós
MOE	1	0,2729	0,6724	0,5581	-0,1523
MOR	-	1	0,3067	0,0525	-0,1143
E_{din}	-	-	1	0,5403	0,0992
Densidade	-	-	-	1	-0,0472
Nós	-	-	-	-	1

Fonte: Autoria própria.

5.4 Tabela de classes de resistência

A norma espanhola UNE-EN 14358: 2016 recomenda que o valor característico das propriedades de resistência deve ser calculado segundo uma distribuição log-normal, e para a propriedade de densidade deve ser calculada para uma distribuição normal. Caso os testes estatísticos encontrarem evidências de distribuição normal aos dados de propriedades de resistência, recomenda-se que utilize as equações para distribuição normal. Portanto, foi realizado o teste de Anderson-Darling (Tabela 68) para verificar se a distribuição das propriedades mecânicas pode ser aproximada a uma distribuição normal e determinar o valor característico a partir do equacionamento adequado, segundo a norma espanhola UNE-EN 14358: 2016.

Para a maioria dos variáveis avaliadas, com um nível de confiança de 95%, apontaram evidências de que as amostras testadas estão normalmente distribuídas e, portanto, as tabelas de classes de resistência (Tabela 69, Tabela 70 e Tabela 71) foram estabelecidas a partir dos valores característicos obtidos pelo equacionamento para a distribuição normal pela norma UNE-EN 14358: 2016.

Tabela 68 – Valores obtidos para o teste de Anderson-Darling para normalidade

Propriedade	<i>E. urograndis</i>		<i>S. amazonicum</i>		<i>Pinus taeda</i>	
	AD	Valor-p	AD	Valor-p	AD	Valor-p
mecânica						
E_{din}	0,6851	0,0723	0,5321	0,1676	0,2500	0,7342
MOE	1,0581	0,0084	0,2689	0,6538	1,0517	0,0069
MOR	0,3879	0,3799	0,3856	0,3673	0,5210	0,1601
f_{t0}	0,3278	0,5038	0,1808	0,8750	0,7476	0,0382
f_{t90}	1,2837	0,0024	2,6191	1,0412E-06	0,8370	0,0298
f_{c0}	1,4789	7,8823E-04	0,4177	0,3183	0,2160	0,8403
f_{c90}	0,3966	0,3532	0,4627	0,2054	0,5435	0,1440
f_{c90y}	0,2604	0,6920	0,2637	0,6231	0,2610	0,6741
K_{c90}	0,9215	0,0173	0,3557	0,3896	0,4641	0,2308
f_{v0}	0,2233	0,8157	0,5055	0,1676	0,3157	0,5197

Fonte: Autoria própria.

Tabela 69 – Tabela de classes de resistência para peças estruturais de *Eucalyptus urograndis*

Classes de resistência			
Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
MOR (MPa)	40	38	34
Tração paralela (MPa) $f_{t0,k}$	21	20	13
Tração perpendicular (MPa) $f_{t90,k}$	0,1	0,1	0,1
Compressão paralela (MPa) $f_{c0,k}$	34	34	32
Compressão perpendicular (MPa) $f_{c90,k}$	11	11	9
Compressão normal às fibras no limite de plastificação (MPa) f_{c90y}	8	6	6
Rigidez na compressão normal às fibras (MPa) K_{c90}	5	5	5
Cisalhamento paralelo (MPa) $f_{v,k}$	3	3	3
MOE médio paralelo (MPa) $E_{0,m}$	13.000	12.000	10.000
Densidade aparente (kg/m ³) $\rho_{ap,m}$	650	600	500

Fonte: Autoria própria.

Tabela 70 – Tabela de classes de resistência para peças estruturais de *Schizolobium amazonicum* (Paricá)

Classes de resistência		
Propriedade	Classe 1	Classe 2
MOR (MPa)	28	28
Tração paralela (MPa) $f_{t0,k}$	30	10
Tração perpendicular (MPa) $f_{t90,k}$	0,05	0,05
Compressão paralela (MPa) $f_{c0,k}$	21	18
Compressão perpendicular (MPa) $f_{c90,k}$	3	3
Compressão normal às fibras no limite de plastificação (MPa) f_{c90y}	2,5	1,5
Rigidez na compressão normal às fibras (MPa) K_{c90}	3	2
Cisalhamento paralelo (MPa) $f_{v,k}$	4	2
MOE médio paralelo (MPa) $E_{0,m}$	7.500	5.000
Densidade aparente (kg/m ³) $\rho_{ap,m}$	350	250

Fonte: Autoria própria.

Tabela 71 – Tabela de classes de resistência para peças estruturais de *Pinus taeda*

Classes de resistência		
Propriedade	Classe 1	Classe 2
MOR (MPa) $f_{m,k}$	9	9
Tração paralela (MPa) $f_{t0,k}$	2	1
Tração perpendicular (MPa) $f_{t90,k}$	0,1	0,1
Compressão paralela (MPa) $f_{c0,k}$	28	22
Compressão perpendicular (MPa) $f_{c90,k}$	7	5
Compressão normal às fibras no limite de plastificação (MPa) f_{c90y}	5	3
Rigidez na compressão normal às fibras (MPa) K_{c90}	4	4
Cisalhamento paralelo (MPa) $f_{v,k}$	3	2
MOE médio paralelo (MPa) $E_{0,m}$	7.000	5.500
Densidade aparente (kg/m^3) $\rho_{ap,m}$	420	390

Não foram utilizados os valores característicos pela norma internacional ISO 13910: 2005, pois o número mínimo de 40 corpos de prova não foi obtido. Os valores característicos obtidos pela norma brasileira ABNT NBR 7190: 1997 foram calculados para fins de comparação.

6 CONCLUSÕES

Na classificação visual das peças estruturais foram detectadas as características de crescimento e de secagem que interferiram no desempenho estrutural. Para as peças estruturais das três espécies estudadas, foram observadas a presença de empenamentos excessivos, principalmente, encurvamento e arqueamento, que influenciaram significativamente para a atribuição de classes visuais inferiores às peças. Os defeitos mais recorrentes nas peças de *Eucalyptus urograndis* foram as fissuras e empenamentos excessivos. A presença de medula foi o fator que mais reprovou as peças de *Schizolobium amazonicum* (Paricá). Os nós nas peças de *Pinus taeda* interferiram consideravelmente na resistência, principalmente, à flexão e à tração paralela às fibras, conferindo alta variabilidade às propriedades mecânicas. Observou-se a influência das características visuais, principalmente, na execução dos ensaios de flexão estática e de compressão normal às fibras devido à dificuldade de evitar a instabilidade nas peças.

Ao avaliar a correlação das características visuais com as propriedades de resistência e rigidez, foram obtidos valores baixos para essa correlação. Por isso, a classificação visual deveria considerar os defeitos de empenamentos e fissuras como parâmetros de descarte das peças, e não como limitante para a atribuição de classe visual.

Com a análise de agrupamento foi possível formar grupos a partir das características semelhantes entre os elementos de cada espécie. Avaliou-se o número adequado de grupos que deveriam ser formados, porém adotou-se o mesmo número de agrupamentos das classes de resistência propostas neste trabalho para a comparação dos resultados. Para a maioria das variáveis consideradas, os valores médios e desvios-padrões dos grupos formados se mostraram coerentes com os valores médios das classes de resistências propostas.

A análise de agrupamento possibilitou a avaliação quanto à adequação das peças estruturais classificadas em classes de resistência propostas neste trabalho. O método se mostrou eficaz para o estudo, porém o número reduzido de amostra e a quantidade desproporcional de peças em cada classe de resistência dificultaram a interpretação dos resultados. Por exemplo, na discordância dos grupos intermediários com as classes de resistência. Para o caso do *Eucalyptus urograndis*, foi observado que as peças das Classes 1 e 2 mostraram alta similaridade entre si, enquanto que a Classe 3 apresentou baixa homogeneidade interna, distribuindo as peças da classe 3 em dois grupos (G2 e G3). Para as

peças do *Schizolobium amazonicum* (Paricá) e do *Pinus taeda*, a adoção de duas classes de resistência se mostrou adequado de acordo com a análise de agrupamento, visto que os resultados do dendograma e da matriz de classificação se mostraram satisfatórios.

Os gráficos da soma de quadrados dentro dos grupos indicou que deveriam ser adotados um número maior de grupos para as classes de resistência propostas. Com a adoção de um número maior de classes de resistência seria possível obter a homogeneidade adequada dentro dos grupos. Para a espécie *Eucalyptus urograndis*, cinco ou seis grupos, para o Paricá quatro ou cinco e para o *Pinus taeda* seis ou sete grupos.

Pelo teste de Kruskal-Wallis averiguou-se a diferença entre as medianas das classes de resistência propostas para o *Eucalyptus urograndis*, em que o teste de Dunn mostrou que a Classe 3 obteve a diferença significativa entre as medianas das Classes 1 e 2. Porém, não foi identificada diferença entre as medianas das Classes 1 e 2, assim como já havia sido verificada a similaridade entre essas classes no dendograma, refletindo nos resultados da matriz de concordância, da análise de agrupamento.

Para o teste de Kruskal-Wallis realizado nos grupos (G1, G2 e G3) da análise de agrupamento, foi constatada a diferença significativa entre os grupos. Para as propriedades mecânicas utilizadas como parâmetros para a análise de agrupamento (E_{din} , MOE e MOR), o teste de Dunn apontou diferenças entre as medianas de todos os pares de dados testados, evidenciando a heterogeneidade dos grupos formados. O teste de Wilcoxon aplicado nas classes de resistência de Paricá e *Pinus taeda* apontou diferenças significativas entre as medianas das Classes 1 e 2.

Na análise de correlação entre as propriedades físicas e mecânicas, os maiores valores foram em relação ao MOE x E_{din} (0,794) e densidade aparente x f_{i90} (0,692) para *Eucalyptus urograndis*, E_{din} x f_{i0} (0,952) e densidade aparente x f_{i0} (0,905) para *Schizolobium amazonicum* (Paricá) e, densidade aparente x f_{c0} (0,595) e densidade aparente x f_{c90} (0,555) para o *Pinus taeda*.

A seguir, são apresentadas novamente as tabelas de classes de resistência propostas para peças estruturais das três espécies analisadas.

Classes de resistência: *Eucalyptus urograndis*

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
MOR (MPa) $f_{m,k}$	40	38	34
Tração paralela (MPa) $f_{t0,k}$	21	20	13
Tração perpendicular (MPa) $f_{t90,k}$	0,1	0,1	0,1
Compressão paralela (MPa) $f_{c0,k}$	34	34	32
Compressão perpendicular (MPa) $f_{c90,k}$	11	11	9
Compressão normal às fibras no limite de plastificação (MPa) f_{c90y}	8	6	6
Rigidez na compressão normal às fibras (MPa) K_{c90}	5	5	5
Cisalhamento paralelo (MPa) $f_{v,k}$	3	3	3
MOE médio paralelo (MPa) $E_{0,m}$	13.000	12.000	10.000
Densidade aparente (kg/m ³) $\rho_{ap,m}$	650	600	500

Classes de resistência: *Schizolobium amazonicum* (Paricá)

Propriedade	Classe 1	Classe 2
MOR (MPa) $f_{m,k}$	28	28
Tração paralela (MPa) $f_{t0,k}$	30	10
Tração perpendicular (MPa) $f_{t90,k}$	0,05	0,05
Compressão paralela (MPa) $f_{c0,k}$	21	18
Compressão perpendicular (MPa) $f_{c90,k}$	3	3
Compressão normal às fibras no limite de plastificação (MPa) f_{c90y}	2,5	1,5
Rigidez na compressão normal às fibras (MPa) K_{c90}	3	2
Cisalhamento paralelo (MPa) $f_{v,k}$	4	2
MOE médio paralelo (MPa) $E_{0,m}$	7.500	5.000
Densidade aparente (kg/m ³) $\rho_{ap,m}$	350	250

Classes de resistência: *Pinus taeda*

Propriedade	Classe 1	Classe 2
MOR (MPa) $f_{m,k}$	9	9
Tração paralela (MPa) $f_{t0,k}$	2	1
Tração perpendicular (MPa) $f_{t90,k}$	0,1	0,1
Compressão paralela (MPa) $f_{c0,k}$	28	22
Compressão perpendicular (MPa) $f_{c90,k}$	7	5
Compressão normal às fibras no limite de plastificação (MPa) f_{c90y}	5	3
Rigidez na compressão normal às fibras (MPa) K_{c90}	4	4
Cisalhamento paralelo (MPa) $f_{v,k}$	3	2
MOE médio paralelo (MPa) $E_{0,m}$	7.000	5.500
Densidade aparente (kg/m ³) $\rho_{ap,m}$	420	390

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. H. et al. Full Characterization of Strength Properties of *Schizolobium amazonicum* Wood for Timber Structures. **International Journal of Engineering & Technology IJET IJENS**, v. 13, n. 06, p. 97-100, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) INTERNACIONAL. **D198**. Standard test methods of static test of lumber in structural sizes. West Conshohocker. United States. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) INTERNATIONAL. **D245**. Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber. West Conshohocker. United States. 2006.

ANDRADE JUNIOR, J. R. **Classificação estrutural de peças de madeira de *Pinus elliottii* usando o módulo de elasticidade obtido pelo método de ondas longitudinais de tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)). 126f - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2016.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE-EN 14358**. Estructuras de madera - Determinación y verificación de los valores característicos. Madrid. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**. Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN 02:126.10-0001-1**. Critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN 02:126.10-0001-3**. Método de ensaio de caracterização de peças estruturais de madeira. 2018.

BALLARIN, A. S. **Classificação visual e mecânica simplificada da madeira de *Pinus spp.*** Relatório científico (Iniciação científica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 75f. São Carlos. 2016.

BALLARIN, A. S. et al. Classificação visual e mecânica simplificada da madeira de *Pinus spp.* - avaliação com estatística multivariada. **XVI EBRAMEM e III CLEM**, São Carlos, 2018.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.

BENDTSEN, B. A.; SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and Loblolly pine. **Wood and Fibre Science**, v. 1, n. 18, p. 23-38, 1986.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanical of Wood and Wood Composites**. 1^a. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. Barueri: Manole, 2003.

CALIL JUNIOR, C.; MINÁ, A. J. S. Vibração transversal: um método eficiente para a classificação de peças estruturais de madeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 335-338, 2003.

CALIL NETO, C. **Madeira Laminada Colada (MLC): Controle de Qualidade em Combinação Espécie-Adesivo-Tratamento Preservativo**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Instituição de Física de São Carlos, Instituição de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo. 118f. São Carlos. 2011.

CARREIRA, M. R. **Critérios para a classificação visual de peças estruturais de *Pinus sp.*** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 182f. São Carlos. 2003.

CARVALHO, A. M. **Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 128f. Piracicaba. 2000.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras**. recomendações silviculturais potencialidades e uso da madeira. 640f. Colombo: Embrapa-CNPQ. 1994.

CAVALHEIRO, R. S. **Madeira Laminada Colada de *Schizolobium amazonicum* Herb. (Paricá): combinação adesivo/tratamento preservante**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais). 102f. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2014.

CHAFE, S. C. Growth stresses in trees. **Australian forest research**, v. 9, p. 293-323, 1979.

COSTA, J. D. A. **Qualidade da Madeira de *Eucalyptus Urograndis* Plantado no Distrito Federal, para Produção de Celulose Kraft**. Dissertação (Mestrado). Universidade

de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Florestal. 86f. Brasília. 2011.

EUROPEAN STANDART. **EN 408**. Structural timber – Structural timber and glued laminated timber: Determination of some physical and mechanical properties. Brussels. 2010.

EUROPEAN STANDART. **prEN 338**. Structural timber - Strength classes. Brussels. 2012.

EUROPEAN STANDART. **prEN 14081**. Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section. Madrid. 2013.

FREITAS, R. R. **Classificação de peças estruturais de Pinus spp. pela MSR (Machine Stress Rate)**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 146f. São Carlos. 2004.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Chapter 4: Moisture Relations and Physical Properties. In: ROSS, R. J. **Wood Handbook: Wood as an engineering material**. [S.l.]: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, v. 1, 2010. Cap. 4, p. 19.

GLOS, P. Strength grading. **Timber Engineering STEP 1**, 1995.

GONÇALVES, F. G. et al. Estudo de algumas propriedades mecânicas da madeira de um híbrido clonal de Eucalyptus urophylla X Eucalyptus grandis. **Árvore**, Viçosa, v. 33, p. 501-509, 2009.

HAIR, J. F. et al. **Análise Multivariada de Dados**. 6. ed. [S.l.]: Bookman, 2009.

HANHIJÄRVI, A.; RANTA-MAUNUS, A. Development of strength grading of timber using combined measured techniques. **Report of the Combigrade project-phase 2**, Espoo 2008. VTT Publication 686. 55p, 2008.

IBÁ. **Relatório Anual**. Indústria Brasileira de Árvores. São Paulo, p. 100. 2016.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **IRAM 9662**. Madera laminada encolada estructural: Clasificación visual de las tablas por resistência. Buenos Aires. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN - CHILE. **NCh 1207**. Pino radiata - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad. Santiago. 2005.

INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13910**. Timber structures - Strength graded timber - Test methods for structural properties. Switzerland. 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13910**. Structural timber - Characteristic values of strength-graded timber - Sampling, full-size testing evaluation. Switzerland. 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16598**. Timber structures - Structural classification for sawn timber. Switzerland. 2014.

JAYNE, B. A. Indices of quality: Vibrational properties of wood. **Forest Product Journal**, v. 9, n. 11, p. 413-416, 1959.

JOHANSSON, C. J. Grading of timber with respect to mechanical properties. In: THELANDERSSON, S. **Timber Engineering**. West Sussex: Wiley, 2003. Cap. 3, p. 23-43.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

KRETSCHMANN, D. E.; GREEN, D. W. Lumber stress grades and design properties. In: _____ **Forest Products Laboratory, Wood handbook: wood as engineering material**. FPL-GTR-113. WI: U. S. Department of Agriculture: Madison, 1999. p. 6-1/6-14.

KUBLER, H. Growth stress in trees and related wood properties. **Forest Products Abstracts Oxford**, v. 10, n. 3, p. 61-119, 1987.

LUKACEVIC, M.; FÜSSL, J. Numerical simulation tool for wooden boards with a physically based approach to identify structural failure. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 72, n. 4, p. 497-508, May 2014.

MACK, J. J. Australian methods for mechanically testing small clear specimens of timber. **Technical Paper**, Australia, n. 31. 19p, 1979.

MARCOLIN, L. A. **Proposição de classes de resistências para peças roliças perfiladas estruturais de Eucalyptus urograndis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). 94f. Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2017.

MORITANI, F. Y.; CALIL JUNIOR, C. Comparação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras do *Eucalyptus urograndis*: corpos de prova isentos de defeitos x peças estruturais. **XVI EBRAMEM e III CLEM**, São Carlos, 2018.

OLIVEIRA, J. T. S. et al. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: 1- avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Forestalis**, n. 56, p. 113-124, dez. 1999.

PEARSON, R. G.; GILMORE, R. C. Effect of fast growth rate the mechanical properties of Loblolly pine. **Forest Product Journal**, v. 30, n. 5, p. 47-54, 1980.

PITER, J. C.; ZERBINO, R. L.; BLAß, H. J. Visual strength grading of Argentinean *Eucalyptus grandis*. **Holz Roh Werkst**, v. 62, n. 1, p. 1-8, 2004.

POŠTA, J. et al. Correlations and differences between methods for non-destructive evaluation of timber elements. **Wood Research**, v. 61, n. 1, p. 129-140, 2016.

RAYMOND, C. A. et al. Relationship between timber grade, static and dynamic modulus of elasticity, and SilviScan properties for *Pinus radiata* in New South Wales. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 37, n. 2, p. 186-196, 2007.

ROCCO LAHR, F. A. **Sobre a Determinação de Propriedades de Elasticidades da Madeira**. Tese(Doutorado). 221f. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1983.

RODRIGUES, R. A. D. **Variabilidade de propriedades físico-mecânicas em lotes de madeira serrada de eucalipto para a construção civil**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeira). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo. 76f. Piracicaba. 2002.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. **Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures**. Madison: WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994.

ROSSO, S. **Qualidade da madeira de três espécies de Eucalyptus resultante da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria. 91f. Santa Maria. 2006.

SALES, A.; CALIL JUNIOR, C. Sistema de Classes de Resistência para Madeira Serrada de Eucaliptos Cultivados no Brasil: Proposição para a NBR 7190. **Madeira: arquitetura e engenharia**, n. 17, ano 6, Dez. 2005.

SALES, A.; ROCCO LAHR, F. A. **Proposição de Classes de Resistência para Madeira**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 1996.

SANTOS, C. V. F. **Método de ensaio para a determinação da resistência ao cisalhamento em elementos estruturais de madeira de Pinus spp.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). 82f. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2016.

SCANAVACA JUNIOR, L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 120-129, Jun. 2004.

SHARMA, S. **Applied Multivariate Techniques**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996.

SILVA, A. K. L. et al. Litter dynamics and fine root production in *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* plantations and regrowth forest in Eastern Amazon. **Plant Soil**, v. 347, p. 377-386, 2011.

TEREZO, R. F. **Avaliação Tecnológica do Paricá e seu Uso em Estruturas de Madeira Laminada Colada**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). 177f. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2010.

TRIANOSKI, R. et al. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies tropicais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 21-28, Mar. 2014.

URBINATI, C. V. **Influência das características anatômicas em juntas coladas de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex. Ducker) Barneby (Paricá)**. 161f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2013.

WARD JR, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236-244, mar 1963.

YANG, B. Z. et al. Comparison of nondestructive testing methods for evaluating No. 2 southern pine lumber: Part A, Modulus of elasticity. **Wood and Fiber Science**, v. 47, n. 4, p. 375-384, 2015.

APÊNDICE 1 – DENSIDADE APARENTE

Tabela.72 – Resultados obtidos da densidade aparente das peças de *Eucalyptus urograndis*

Peça	ρ_{ap} (kg/m ³)	Peça	ρ_{ap} (kg/m ³)	Peça	ρ_{ap} (kg/m ³)	Peça	ρ_{ap} (kg/m ³)	Peça	ρ_{ap} (kg/m ³)
1	627	33	666	68	699	103	646	142	584
2	676	34	664	69	564	104	630	145	582
3	700	35	643	71	737	105	658	146	603
4	725	36	645	72	589	106	544	147	625
5	607	37	766	73	620	107	640	148	549
6	693	38	784	74	593	108	661	149	653
7	647	39	676	75	612	110	621	150	614
8	712	40	747	76	576	111	538	152	649
9	682	41	736	77	597	113	659	153	742
10	680	42	744	78	627	114	639	154	558
11	706	43	760	79	671	115	593	156	610
12	696	44	724	80	605	116	601	157	624
13	885	45	720	81	646	117	639	159	701
14	730	46	692	82	664	118	606	160	676
15	706	47	625	83	556	119	601		
16	613	48	630	84	523	120	635		
17	775	49	669	85	563	121	635		
18	719	50	610	86	571	122	599		
19	736	51	658	88	611	123	701		
20	768	52	583	89	647	124	762		
21	658	53	598	90	597	125	609		
22	702	54	565	91	551	126	599		
23	697	55	597	92	577	127	587		
24	670	58	561	93	596	129	667		
25	708	59	558	94	596	131	676		
26	842	60	534	95	599	133	646		
27	718	61	649	96	629	135	624		
28	703	62	573	97	570	136	638		
29	692	63	592	98	568	137	605		
30	709	64	616	99	619	138	625		
31	668	65	559	100	597	140	575		
32	766	67	607	101	638	141	638		

Tabela 73 – Resultados obtidos da densidade aparente das peças de *Schizolobium amazonicum*

Peça	ρ_{ap} (kg/m³)	Peça	ρ_{ap} (kg/m³)	Peça	ρ_{ap} (kg/m³)	Peça	ρ_{ap} (kg/m³)
1	295	26	343	40	256	54	355
5	413	27	289	42	347	55	328
10	313	29	261	43	351	56	287
11	253	30	344	44	304	59	285
13	273	31	263	45	313	61	318
15	254	32	276	46	375	62	272
16	397	33	359	47	374	64	329
17	296	34	304	48	358	65	317
19	306	35	367	49	314	66	366
20	347	36	347	50	378	67	312
21	314	37	324	51	374	68	290
23	316	38	279	52	480	69	265
25	321	39	319	53	384		

Tabela 74 – Resultados obtidos da densidade aparente das peças de *Pinus taeda*

Peça	ρ_{ap} (kg/m³)	Peça	ρ_{ap} (kg/m³)	Peça	ρ_{ap} (kg/m³)	Peça	ρ_{ap} (kg/m³)
1	419	20	524	34	527	57	398
2	611	21	573	35	413	58	517
3	546	22	502	36	454	59	486
6	543	23	443	37	444	60	520
7	471	24	554	43	434	62	525
9	476	25	506	46	412		
12	442	27	371	47	580		
14	403	28	512	49	453		
15	572	29	590	50	521		
16	451	30	564	51	559		
17	461	31	598	54	506		
18	564	32	480	55	547		
19	518	33	485	56	469		

APÊNDICE 2 – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (E_{din})

Tabela.75 – Resultados obtidos do Módulo de elasticidade dinâmica (E_{din}) das peças de *Eucalyptus urograndis*

Peça	E_{din} (MPa)	Peça	E_{din} (MPa)	Peça	E_{din} (MPa)	Peça	E_{din} (MPa)	Peça	E_{din} (MPa)
1	11370	30	10970	61	15240	93	11045	125	13450
2	13865	31	11045	62	11435	94	11705	126	11020
3	15330	32	13105	63	10215	95	14085	127	11120
4	13340	33	11605	64	12395	96	13640	129	13020
5	9730	34	11720	65	11405	97	11245	131	14835
6	10595	35	12710	67	12375	98	12830	133	12875
7	10650	36	8260	68	13410	99	12230	135	9840
8	14100	37	12235	69	11405	100	11800	136	12295
9	10195	38	16290	71	15625	101	14880	137	10285
10	13495	39	12805	72	10610	103	11490	138	10200
11	11545	40	15810	73	8690	104	10550	140	10820
12	11465	41	12050	74	12280	105	11835	141	10835
13	15555	42	13710	75	11545	106	9510	142	10470
14	16835	43	12900	76	9895	107	12400	145	12490
15	13650	44	11660	77	11475	108	12280	146	12075
16	10205	45	15690	78	14130	110	13950	147	11590
17	14135	46	12020	79	11960	111	10615	148	10505
18	13865	47	13115	80	9640	113	11515	149	14365
19	14025	48	12935	81	13630	114	12425	150	13665
20	15715	49	16745	82	14225	115	12045	152	14885
21	11565	50	13080	83	13105	116	10995	153	13685
22	12440	51	15565	84	8585	117	11850	154	13340
23	13075	52	10440	85	9670	118	11415	156	13340
24	10690	53	11870	86	10590	119	11405	157	11300
25	13305	54	12365	88	11845	120	12610	159	14360
26	14525	55	10675	89	13030	121	12310	160	13730
27	10880	58	10920	90	11070	122	11870		
28	12880	59	9875	91	11055	123	15230		
29	12490	60	10140	92	10260	124	13995		

Tabela 76 – Resultados obtidos do Módulo de elasticidade dinâmica (E_{din}) das peças de *Schizolobium amazonicum*

Peça	E_{din} (MPa)	Peça	E_{din} (MPa)	Peça	E_{din} (MPa)	Peça	E_{din} (MPa)
1	6220	26	7125	40	5725	54	7590
5	10410	27	5885	42	9600	55	5630
9	9040	29	5865	43	8790	56	6115
10	7370	30	7105	44	6450	59	6415
11	5425	31	5660	45	6950	61	6425
13	6335	32	5605	46	8485	62	6645
16	10390	33	8625	47	8915	64	8325
17	6120	34	4675	48	8415	65	7570
19	7425	35	8205	49	8800	66	8390
20	9800	36	7560	50	8900	68	5730
21	8475	37	7875	51	9905	69	6385
23	6780	38	6730	52	11035		
25	8760	39	7175	53	8935		

Tabela 77 – Resultados obtidos do Módulo de elasticidade dinâmica (E_{din}) das peças de *Pinus taeda*

Peça	E_{din} (MPa)	Peça	E_{din} (MPa)	Peça	E_{din} (MPa)	Peça	E_{din} (MPa)
1	5773	20	9173	34	7730	57	5513
2	7667	21	10070	35	9207	58	8087
3	7100	22	4027	36	7520	59	6473
6	9510	23	6943	37	7290	60	6920
7	3803	24	6670	43	7883	62	7933
9	3463	25	10265	46	5950		
12	6353	27	4913	47	6373		
14	3487	28	5570	49	7820		
15	11127	29	8777	50	8587		
16	6617	30	9753	51	9430		
17	7370	31	12773	54	5777		
18	6707	32	9400	55	8840		
19	8010	33	10267	56	7360		

APÊNDICE 3 – ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA

Tabela 78– Resultados obtidos dos Módulos de elasticidade estático (MOE) das peças de *Eucalyptus urograndis*

Classe 1		Classe 2		Classe 3			
Peça	MOE (MPa)	Peça	MOE (MPa)	Peça	MOE (MPa)	Peça	MOE (MPa)
10	11102	99	11034	52	9170	88	11794
18	11985	29	11119	69	9543	39	11827
82	12980	50	11608	97	9887	150	11839
71	13083	114	11714	94	9948	141	11938
131	13828	107	11729	58	10221	30	12023
160	14143	120	11950	111	10223	68	12038
159	14198	15	11965	145	10237	54	12137
123	14206	43	12030	33	10298	122	12503
51	15267	125	12249	157	10346	74	12535
		89	12545	142	10539	118	12846
		153	12624	126	10546	129	12857
		35	12867	63	10591	83	13688
		133	12894	100	10654		
		124	12958	55	10669		
		156	13029	147	10723		
		81	13035	154	10747		
		49	13072	91	10766		
		96	13210	140	10781		
		8	13256	86	10786		
		67	13270	115	10830		
		152	13303	44	10833		
		101	13388	72	10904		
		110	13594	103	10934		
		78	13642	34	10996		
		149	13894	77	11005		
		40	14824	116	11013		
		61	14898	127	11068		
		14	16910	148	11084		
				119	11089		
				65	11103		
				146	11300		
				90	11321		
				92	11329		
				104	11339		
				98	11348		
				105	11515		
				137	11552		
				117	11568		
				75	11588		
				79	11724		

Tabela 79 – Resultados obtidos do Módulo de ruptura à flexão (MOR) das peças de *Eucalyptus urograndis*

Classe 1		Classe 2		Classe 3			
Peça	MOR (MPa)	Peça	MOR (MPa)	Peça	MOR (MPa)	Peça	MOR (MPa)
82	47,89	99	29,60	52	23,91	30	67,30
71	59,13	35	35,88	77	33,82	68	68,61
18	64,44	107	43,31	142	35,15	105	68,90
10	67,20	101	43,71	58	36,39	55	69,15
160	70,31	156	51,66	97	37,04	154	72,45
131	77,18	89	59,86	100	39,99	150	73,66
159	79,32	15	61,93	63	39,99		
51	82,86	125	62,57	104	40,70		
123	100,85	114	64,77	140	42,15		
		29	65,45	126	42,39		
		81	65,54	129	42,64		
		149	67,14	98	43,07		
		49	67,70	141	44,44		
		67	67,73	90	48,08		
		50	68,05	147	48,22		
		78	68,70	72	48,30		
		110	69,96	118	49,63		
		43	70,33	75	50,46		
		120	71,52	34	50,94		
		8	74,89	115	51,67		
		152	77,62	86	51,83		
		124	78,69	92	51,85		
		61	78,84	69	52,09		
		96	80,03	39	52,29		
		40	83,22	94	52,44		
		153	89,18	44	53,69		
		14	92,56	148	55,05		
				33	55,26		
				116	57,32		
				146	57,66		
				122	58,18		
				91	58,40		
				111	59,52		
				74	61,28		
				79	61,39		
				103	61,62		
				157	62,08		
				145	62,39		
				117	62,71		
				119	62,95		
				137	63,49		
				127	64,08		
				83	64,26		
				65	65,62		
				54	66,61		
				88	66,78		

Tabela 80 – Resultados obtidos dos Módulos de elasticidade estático (MOE) das peças de *Schizolobium amazonicum*

Classe 1		Classe 2	
Peça	MOE (MPa)	Peça	MOE (MPa)
50	7137	31	6832
33	9264	39	7524
46	10145	33	7678
48	10217	30	7787
5	10733	23	7946
16	11291	23	8127
		10	8160
		24	8215
		59	8224
		30	8366
		48	8794
		28	8855
		31	8952
		13	9056
		53	9132
		62	9645
		33	9740
		44	9892
		45	10303
		49	10480
		39	10767

Tabela 81 – Resultados obtidos do Módulo de ruptura à flexão (MOR) das peças de *Schizolobium amazonicum*

Classe 1		Classe 2	
Peça	MOR (MPa)	Peça	MOR (MPa)
48	40,59	45	22,04
50	41,63	37	34,43
5	56,38	56	37,41
46	60,02	20	38,09
33	61,23	19	38,48
16	70,03	13	40,78
		21	42,63
		23	42,95
		27	44,24
		44	44,87
		38	44,90
		59	45,54
		10	46,75
		62	47,70
		55	48,06
		49	48,10
		30	50,28
		25	53,10
		53	54,92
		39	54,95
		26	67,44

Tabela 82 – Resultados obtidos dos Módulos de elasticidade estático (MOE) das peças de *Pinus taeda*

Classe 1		Classe 2	
Peça	MOE (MPa)	Peça	MOE (MPa)
34	6583	32	4668
37	7036	35	5283
58	7098	59	5710
20	7547	28	6338
62	8766	46	6581
21	10119	19	6636
31	12536	16	6704
		23	7045
		29	7242
		49	7336
		33	10695

Tabela 83 - Resultados obtidos do Módulo de ruptura à flexão (MOR) das peças de *Pinus taeda*

Classe 1		Classe 2	
Peça	MOR (MPa)	Peça	MOR (MPa)
20	11,21	19	12,47
58	17,92	29	13,12
34	22,59	46	20,32
37	33,28	16	21,39
21	40,58	49	24,81
31	52,24	23	28,42
62	52,36	33	41,64
		35	41,77
		28	43,20
		59	44,58
		32	49,79

APÊNDICE 4 – ENSAIO DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Tabela 84 – Resultados obtidos da resistência a tração paralela às fibras das peças de *Eucalyptus urograndis*

Classe 1		Classe 2		Classe 3	
Peça	f _{t0} (MPa)	Peça	f _{t0} (MPa)	Peça	f _{t0} (MPa)
42	50,91	47	26,46	16	15,23
13	71,45	22	45,83	6	20,70
17	79,35	48	48,64	12	32,47
		20	63,68	31	39,10
		108	70,74	23	45,77
		37	71,78	3	46,04
		32	72,46	21	46,04
		38	75,35	25	51,83
				19	53,29
				7	56,09
				24	60,23
				41	60,41
				2	63,05
				45	77,27
				4	78,92
				26	86,57

Tabela 85 – Resultados obtidos da resistência a tração paralela às fibras das peças de *Schizolobium amazonicum*

Classe 1		Classe 2	
Peça	f _{t0} (MPa)	Peça	f _{t0} (MPa)
43	39,75	32	9,52
66	43,41	40	11,93
		17	18,62
		65	23,27
		1	25,69
		64	32,16

Tabela 86 - Resultados obtidos da resistência a tração paralela às fibras das peças de *Pinus taeda*

Classe 1		Classe 2	
Peça	f_{t0} (MPa)	Peça	f_{t0} (MPa)
25	16,64	12	7,46
15	16,69	17	9,33
3	29,14	36	11,68
18	37,05	30	12,71
47	37,10	56	13,84
		44	13,84
		24	14,96
		54	24,08
		57	28,18

APÊNDICE 5 – ENSAIO DE TRAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS

Tabela 87 – Resultados obtidos da resistência a tração normal às fibras das peças de *Eucalyptus urograndis*

Classe 1		Classe 2		Classe 3			
Peça	f_{t90} (MPa)	Peça	f_{t90} (MPa)	Peça	f_{t90} (MPa)	Peça	f_{t90} (MPa)
131	0,173	78	0,083	129	0,078	141	0,246
123	0,192	124	0,150	105	0,100	55	0,255
10	0,231	107	0,209	74	0,115	86	0,260
160	0,233	50	0,209	92	0,116	111	0,268
71	0,258	96	0,214	30	0,119	91	0,272
82	0,261	61	0,214	97	0,136	140	0,276
18	0,289	101	0,217	65	0,146	127	0,279
51	0,308	156	0,223	79	0,153	103	0,280
159	0,320	110	0,224	142	0,155	39	0,281
		29	0,227	83	0,158	157	0,293
		8	0,227	52	0,160	63	0,300
		14	0,229	126	0,170		
		125	0,236	94	0,172		
		35	0,236	148	0,173		
		81	0,237	54	0,174		
		49	0,244	122	0,181		
		153	0,258	150	0,188		
		152	0,261	72	0,191		
		114	0,264	75	0,202		
		67	0,280	146	0,203		
		149	0,281	118	0,207		
		40	0,282	115	0,208		
		15	0,283	104	0,209		
		120	0,289	69	0,212		
		99	0,303	58	0,215		
		43	0,348	145	0,215		
				44	0,219		
				68	0,222		
				154	0,222		
				98	0,223		
				33	0,225		
				119	0,231		
				34	0,236		
				100	0,237		
				117	0,242		
				137	0,243		

Tabela 88 – Resultados obtidos da resistência a tração normal às fibras das peças de *Schizolobium amazonicum*

Classe 1		Classe 2	
Peça	f_{t90} (MPa)	Peça	f_{t90} (MPa)
46	0,097	62	0,061
5	0,098	30	0,065
48	0,112	49	0,070
33	0,115	38	0,071
50	0,149	26	0,073
16	0,164	23	0,074
		13	0,079
		27	0,080
		21	0,083
		19	0,089
		20	0,094
		37	0,095
		10	0,097
		39	0,098
		45	0,098
		56	0,099
		55	0,099
		25	0,103
		44	0,108
		53	0,196

Tabela 89 - Resultados obtidos da resistência a tração normal às fibras das peças de *Pinus taeda*

Classe 1		Classe 2	
Peça	f_{t90} (MPa)	Peça	f_{t90} (MPa)
3	0,077	30	0,077
37	0,083	39	0,078
4	0,086	46	0,091
52	0,098	5	0,093
62	0,105	33	0,095
10	0,110	49	0,097
58	0,111	60	0,099
21	0,118	36	0,107
20	0,121	54	0,109
34	0,122	61	0,113
31	0,130	56	0,119
51	0,134	1	0,121
40	0,139	11	0,122
13	0,159	8	0,125
		16	0,126
		19	0,136
		44	0,138
		35	0,139
		53	0,139
		17	0,149
		32	0,150
		41	0,151
		45	0,153
		29	0,153
		55	0,160
		26	0,161
		12	0,173
		28	0,198
		38	0,201
		59	0,252

APÊNDICE 6 – ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Tabela 90 – Resultados obtidos para a resistência a compressão paralela às fibras das peças de
Eucalyptus urograndis

Classe 1		Classe 2		Classe 3			
Peça	f _{c0} (MPa)	Peça	f _{c0} (MPa)	Peça	f _{c0} (MPa)	Peça	f _{c0} (MPa)
159	34,45	15	33,49	97	16,91	122	44,57
160	43,76	8	34,47	34	32,47	74	44,67
18	44,84	96	38,00	154	34,38	92	44,94
51	45,70	107	40,10	65	35,96	141	45,09
10	46,10	120	41,28	100	36,74	68	45,11
123	48,57	125	43,59	39	37,13	119	45,24
131	49,65	156	44,44	127	37,19	88	45,55
82	51,18	78	44,88	63	37,34	118	45,63
71	56,43	110	44,91	44	37,47	150	45,76
		35	45,62	147	37,49	146	46,40
		99	45,66	77	38,40	104	46,71
		29	45,94	69	38,86	55	46,77
		149	46,01	94	39,32	103	46,82
		89	46,86	111	39,83	83	47,61
		50	47,68	54	39,92	129	49,96
		101	47,75	72	39,96	117	50,06
		67	47,95	91	40,00	79	50,06
		114	48,00	86	40,22		
		152	48,18	52	40,26		
		49	48,24	98	40,54		
		43	49,18	33	40,80		
		61	52,10	157	40,98		
		153	54,46	75	41,30		
		81	54,60	140	41,39		
		124	57,38	30	41,48		
		14	58,21	115	41,87		
		40	58,29	90	41,91		
				142	42,31		
				126	42,32		
				58	42,97		
				145	43,51		
				137	43,89		
				148	43,99		
				105	44,51		

Tabela 91 – Resultados obtidos para a resistência a compressão paralela às fibras das peças de *Schizolobium amazonicum*

Classe 1		Classe 2	
Peça	f_{c0} (MPa)	Peça	f_{c0} (MPa)
48	21,36	49	17,32
33	27,13	62	18,21
5	27,35	27	20,11
50	28,25	55	20,36
16	35,12	59	20,76
46	35,46	30	20,93
		26	22,41
		13	22,45
		37	23,45
		44	24,17
		39	24,36
		38	24,52
		23	25,58
		56	25,62
		45	25,98
		21	27,52
		25	27,83
		19	27,94
		10	28,35
		20	32,34
		53	33,86

Tabela 92 - Resultados obtidos para a resistência a compressão paralela às fibras das peças de *Pinus taeda*

Classe 1		Classe 2	
Peça	f _{co} (MPa)	Peça	f _{co} (MPa)
37	26,32	46	19,66
10	29,02	54	22,85
62	33,36	35	24,22
34	33,81	17	25,00
58	35,76	5	25,41
21	36,35	36	25,95
3	37,95	43	26,30
40	38,61	44	26,90
13	39,54	1	27,63
20	39,56	59	28,47
4	39,70	38	29,23
52	39,96	32	29,52
51	42,38	24	30,30
31	48,42	28	31,27
		23	31,55
		60	31,71
		45	31,77
		53	32,30
		49	32,36
		8	32,56
		12	32,61
		33	32,68
		19	33,93
		61	34,20
		16	34,53
		56	35,24
		41	36,24
		26	36,83
		11	37,60
		29	39,30
		39	40,82
		30	42,60
		55	43,05

APÊNDICE 7 – ENSAIO DE COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS

Tabela 93 – Resultados obtidos da resistência a compressão normal às fibras das peças de *Eucalyptus urograndis*

Classe 1		Classe 2		Classe 3	
Peça	f _{c90} (MPa)	Peça	f _{c90} (MPa)	Peça	f _{c90} (MPa)
131	14,57	107	12,03	115	9,79
18	15,34	50	12,58	126	10,88
51	15,88	96	14,55	140	11,11
123	17,88	8	14,62	146	11,26
		99	15,73	154	11,44
		114	16,27	58	11,58
		156	16,65	86	11,92
		15	17,42	91	12,06
		89	19,10	68	12,32
		124	19,66	83	12,37
				77	12,40
				52	12,71
				92	12,93
				100	13,11
				129	13,40
				55	13,55
				97	13,65
				54	13,74
				145	13,81
				119	14,15
				122	14,20
				94	14,37
				44	15,25
				79	17,55
				127	17,62

Tabela 94 – Resultados obtidos para o limite de plastificação das peças de *Eucalyptus urograndis*

Classe 1		Classe 2		Classe 3	
Peça	f_{c90y} (MPa)	Peça	f_{c90y} (MPa)	Peça	f_{c90y} (MPa)
51	9,99	114	6,27	129	7,27
131	10,09	50	8,82	126	7,37
18	10,29	107	8,96	154	7,81
123	12,09	8	9,36	115	8,13
		96	10,04	86	8,46
		156	10,23	91	8,47
		89	10,30	146	8,49
		99	10,95	77	8,53
		15	11,14	100	8,63
		124	13,66	140	8,73
				55	8,82
				58	8,86
				54	9,07
				122	9,16
				145	9,40
				52	9,52
				119	9,82
				97	9,85
				94	10,33
				83	10,39
				44	10,41
				68	10,73
				79	11,08
				92	11,14
				127	11,36

Tabela 95 – Resultados obtidos para a rigidez na compressão normal às fibras das peças de *Eucalyptus urograndis*

Classe 1		Classe 2		Classe 3	
Peça	K _{c90} (N/mm)	Peça	K _{c90} (N/mm)	Peça	K _{c90} (N/mm)
51	3,84	114	2,69	129	2,60
131	5,06	89	4,61	146	3,15
18	5,11	107	4,83	97	4,16
123	5,89	8	5,00	55	4,25
		50	5,07	52	4,36
		96	5,35	115	4,43
		15	5,62	119	4,48
		156	5,91	86	4,59
		99	6,35	100	4,60
		124	8,73	58	4,67
				145	4,67
				77	4,75
				154	4,76
				54	4,80
				122	4,80
				126	4,95
				44	5,01
				91	5,33
				94	5,46
				140	5,48
				127	5,56
				83	5,97
				92	6,00
				68	6,78
				79	7,19

Tabela 96 – Resultados obtidos da resistência a compressão normal às fibras das peças de *Schizolobium amazonicum*

Classe 1		Classe 2	
Peça	f _{c90} (MPa)	Peça	f _{c90} (MPa)
33	8,15	62	3,92
5	11,98	59	4,44
		38	4,71
		44	5,28
		13	5,32
		55	5,34
		25	6,75
		49	7,29
		30	10,27

Tabela 97 – Resultados obtidos para o limite de plastificação das peças de *Schizolobium amazonicum*

Classe 1		Classe 2	
Peça	f _{c90y} (MPa)	Peça	f _{c90y} (MPa)
33	5,34	59	2,01
5	7,11	13	2,20
		62	2,45
		38	2,92
		44	3,57
		55	3,95
		25	4,23
		49	4,27
		30	6,17

Tabela 98 – Resultados obtidos para a rigidez na compressão normal às fibras das peças de *Schizolobium amazonicum*

Classe 1		Classe 2	
Peça	K _{c90} (N/mm)	Peça	K _{c90} (N/mm)
33	2,57	59	1,15
5	3,30	62	1,27
		38	1,41
		13	1,50
		44	1,63
		55	1,76
		25	1,98
		49	1,98
		30	2,47

Tabela 99 – Resultados obtidos da resistência a compressão normal às fibras das peças de *Pinus taeda*

Classe 1		Classe 2	
Peça	f _{c90} (MPa)	Peça	f _{c90} (MPa)
37	9,31	12	7,57
34	12,09	36	8,20
20	12,31	46	8,84
58	12,74	33	8,87
31	12,85	43	9,08
51	13,08	23	9,31
		35	9,86
		55	11,25
		19	11,57
		56	12,14
		1	12,97
		32	13,03
		49	13,24
		24	13,91
		29	16,02
		54	17,62

Tabela 100 – Resultados obtidos para o limite de plastificação das peças de *Pinus taeda*

Classe 1		Classe 2	
Peça	$f_{c,90y}$ (MPa)	Peça	$f_{c,90y}$ (MPa)
37	5,62	12	4,11
31	7,29	33	5,58
51	7,90	36	5,81
20	8,27	23	5,86
58	8,45	43	6,42
34	8,70	46	6,43
		29	7,12
		19	7,52
		35	7,55
		56	8,05
		24	8,75
		1	9,70
		32	10,03
		55	10,85
		49	11,73
		54	11,81

Tabela 101 – Resultados obtidos para a rigidez na compressão normal às fibras das peças de *Pinus taeda*

Classe 1		Classe 2	
Peça	$K_{c,90}$ (N/mm)	Peça	$K_{c,90}$ (N/mm)
37	2,45	46	2,40
58	2,95	12	2,55
20	3,68	43	2,56
34	3,77	33	2,79
31	3,78	19	2,93
51	4,60	35	3,01
		23	3,18
		36	3,34
		56	3,74
		49	3,89
		32	3,92
		29	3,99
		1	4,33
		55	4,36
		24	5,33
		54	6,20

APÊNDICE 8 – ENSAIO DE CISALHAMENTO PARALELA ÀS FIBRAS

Tabela 102 – Resultados obtidos da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das peças de
Eucalyptus urograndis

Classe 1			Classe 2			Classe 3		
Peça	f _v (MPa)	Modo de ruptura	Peça	f _v (MPa)	Modo de ruptura	Peça	f _v (MPa)	Modo de ruptura
82	3,91	Cisalhamento	35	3,09	Cisalhamento	63	2,70	Cisalhamento
10	5,79	Tração	101	3,12	Cisalhamento	98	2,82	Cisalhamento
71	5,98	Tração	49	4,68	Cisalhamento	142	3,08	Cisalhamento
160	7,23	Cisalhamento	61	5,00	Cisalhamento	148	3,18	Cisalhamento
159	7,34	Tração	29	5,02	Tração	34	3,41	Tração
			67	5,42	Tração	90	3,93	Cisalhamento
			78	5,60	Tração	111	4,12	Tração
			120	5,66	Cisalhamento	39	4,16	Cisalhamento
			149	5,78	Tração	117	4,18	Cisalhamento
			81	5,99	Cisalhamento	88	4,54	Tração
			125	6,25	Tração	104	4,59	Cisalhamento
			110	6,30	Tração	75	4,63	Tração
			43	6,55	Tração	147	4,66	Tração
			14	6,69	Tração	33	4,71	Tração
			153	6,77	Tração	74	4,92	Cisalhamento
			152	6,87	Tração	137	5,01	Tração
			40	8,44	Cisalhamento	69	5,04	Cisalhamento
						103	5,15	Tração
						30	5,17	Cisalhamento
						72	5,18	Cisalhamento
						65	5,61	Tração
						157	5,76	Tração
						141	6,14	Tração
						150	6,16	Tração
						118	6,40	Tração

Tabela 103 – Resultados obtidos da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das peças de *Schizolobium amazonicum*

Classe 1			Classe 2		
Peça	f_v (MPa)	Modo de ruptura	Peça	f_v (MPa)	Modo de ruptura
48	2,91	Tração	27	2,72	Tração
46	4,42	Tração	56	2,77	Tração
16	4,48	Tração	10	2,92	Tração
50	4,75	Tração	45	2,95	Tração
			19	3,24	Tração
			37	3,73	Tração
			20	3,76	Tração
			39	3,78	Tração
			26	4,65	Tração
			53	5,23	Tração

Tabela 104 – Resultados obtidos da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras das peças de *Pinus taeda*

Classe 1			Classe 2		
Peça	f_v (MPa)	Modo de ruptura	Peça	f_v (MPa)	Modo de ruptura
3	3,84	Cisalhamento	16	2,03	Flexão
34	5,61	Cisalhamento	17	2,11	Flexão
20	5,65	Cisalhamento	23	2,87	Flexão
62	6,45	Tração	56	3,25	Flexão
21	7,10	Tração	19	3,38	Cisalhamento
			46	3,68	Flexão
			12	3,80	Cisalhamento
			29	3,84	Flexão
			43	4,10	Flexão
			1	4,16	Flexão
			24	4,18	Cisalhamento
			55	4,26	Cisalhamento
			59	4,29	Flexão
			60	4,43	Cisalhamento
			49	4,68	Flexão
			36	4,99	Cisalhamento
			54	5,56	Flexão
			28	5,61	Flexão
			30	5,74	Flexão