

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

JAIRO RIBAS DE ANDRADE JUNIOR

**CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PEÇAS DE MADEIRA
DE PINUS ELLIOTTII UTILIZANDO O MÓDULO DE
ELASTICIDADE OBTIDO PELO MÉTODO DE ONDAS
LONGITUDINAIS DE TENSÃO**

SÃO CARLOS

2016

JAIRO RIBAS DE ANDRADE JUNIOR

**CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PEÇAS DE MADEIRA
DE PINUS ELLIOTTII UTILIZANDO O MÓDULO DE
ELASTICIDADE OBTIDO PELO MÉTODO DE ONDAS
LONGITUDINAIS DE TENSÃO**

VERSÃO CORRIGIDA

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

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos quesitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil (Estruturas).

Orientador: Prof. Dr. Antônio Alves Dias

SÃO CARLOS

2016

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.

A553c Andrade Junior, Jairo Ribas de
Classificação estrutural de peças de madeira de Pinus elliottii utilizando o módulo de elasticidade obtido pelo método de ondas longitudinais de tensão / Jairo Ribas de Andrade Junior; orientador Antônio Alves Dias. São Carlos, 2016.

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, 2016.

1. Classificação estrutura da madeira. 2. Ensaio não-destrutivo. 3. Madeira laminada colada. 4. Construção industrializada. 5. Woodframe. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JAIRO RIBAS DE ANDRADE JUNIOR**.

Título da dissertação: "Classificação estrutural de peças de madeira de pinus elliptii utilizando o módulo de elasticidade obtido pelo método de ondas longitudinais de tensão".

Data da defesa: 12.12.2016.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Antonio Alves Dias (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

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

Prof. Dr. **Almir Sales**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Resultado:

APROVADO

A. PROVADO

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**

*Aos meus pais Jairo e Sônia pela
educação e estrutura e a minha
esposa Aline pelo apoio e carinho...*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por toda a saúde e oportunidades.

Aos meus pais Jairo e Sonia pelos ensinamentos e direcionamento durante toda a minha vida e aos meus irmãos Cláudia, Patrick e Vanessa.

A minha esposa Aline pela paciência, amor, apoio e carinho em todos os momentos.

Ao meu amigo e Prof. Dr. Guilherme Corrêa Stamato pelo acompanhamento profissional e dia a dia.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antônio Alves Dias pelo direcionamento e elucidações na elaboração do trabalho.

Aos amigos e profissionais do LaMEM pelos serviços realizados ao longo do trabalho e estrutura disponibilizada.

Aos professores e ao Departamento de Engenharia Civil (Estruturas) da USP de São Carlos (EESC-USP) pela estrutura e base fornecidas para a formação.

A Associação da Indústria Madeireira de Capão Bonito (ASSIM) por ceder o equipamento para realização dos ensaios dinâmicos.

A todos que de maneira indireta torceram pelo meu sucesso em completar mais esta etapa de formação.

RESUMO

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

A classificação estrutural de peças de madeira possibilita melhor utilização do material, separando as peças de acordo com a sua resistência estimada. Nesse processo é feita a classificação visual, de grande importância no caso de madeiras do gênero pinus, e a classificação mecânica por meio de testes não destrutivos com objetivo de estimar o módulo de elasticidade. Com esse objetivo, além de ensaios de flexão estática, podem ser aplicados métodos dinâmicos baseados em medições das frequências naturais e densidade do material para a determinação do módulo de elasticidade da madeira. Nesse sentido o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do aparelho portátil *Brookhuis Micro Timber Grader (MTG)* na estimativa do módulo de elasticidade por meio de ensaios não-destrutivos de vibração longitudinal. Para tanto, foi utilizado um lote de peças estruturais de madeira da espécie *Pinus elliottii* classificado visualmente. Os resultados obtidos por esse aparelho foram comparados com os resultados de módulo de elasticidade obtidos em ensaio de flexão estática. Tendo em vista a sua praticidade, é recomendável a utilização deste método para a classificação estrutural de peças serradas de madeira. A classificação visual agregada a classificação mecânica são essenciais para a utilização do Pinus em vigas laminadas coladas, construções industrializadas de madeira e do sistema construtivo em *woodframe*.

Palavras-chave: Classificação estrutural da madeira. Ensaio não-destrutivo. Madeira Laminada Colada. Construção industrializada. Woodframe.

ABSTRACT

ANDRADE JUNIOR, J. R. **Structural grading of *Pinus elliottii* timber using the modulus of elasticity obtained by longitudinal stress wave method**. 2016. 126 p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structures)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

The structural grading of wood allows better use of the material, sorting the specimen according to their estimated strength. In this process the visual grading is a fundamental matter in use of the structural *Pinus elliottii* and also the mechanical grading obtained by non-destructive methods in order to estimate the modulus of elasticity. For this purpose, in addition to the static bending tests, dynamic methods based on measurement of the natural frequencies and density of the material to determining the modulus of elasticity (MOE) of timber can be applied. The objective of this study was to evaluate the efficiency of portable device *Brookhuis Micro Timber Grader* (MTG) in estimating the modulus of elasticity by non-destructive testing of longitudinal vibration. It was used structural pieces of wood species *Pinus elliottii* rated visually. The results obtained by this device was compared with the modulus of elasticity results obtained in static bending tests. Given its convenience and low cost, it is recommended to use this method for structural grading of timber sawn pieces. The visual and stress grading are essencial for the use of Pines in glued laminated timber, industrilization timber constructions and woodframe constructions.

Keywords: Structural Timber Grading. Non-destructive Examination. Glued Laminated Timber. Industrialization Construction. Woodframe.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Definição de planos e eixos de simetria elástica para uma peça retangular de madeira.....	29
Figura 2 – Diagrama força aplicada x flecha na flexão.	31
Figura 3 – Identificação dos nós em uma peça de madeira.	39
Figura 4 – Medida da inclinação das fibras de uma peça de madeira.	40
Figura 5 – Esquemático da estrutura microscópica da madeira.	43
Figura 6 – Tipos de vibração mecânica: (a) flexional, (b) longitudinal, (c) torcional.	48
Figura 7 – Modos de vibração com vários graus de liberdade: (a) um grau, (b) n graus	48
Figura 8 – Deslocamento e alongamento de uma barra na vibração longitudinal.....	52
Figura 9 – MTG dispositivo portátil.	55
Figura 10 – Conjunto do Equipamento portátil MTG.....	55
Figura 11 – Medições do módulo de elasticidade com o MTG utilizando ativador interno.	57
Figura 12 – Medições do MOE com o MTG utilizando ativador externo.	58
Figura 13 – Lote de 260 peças de 45x105x2500mm de <i>Pinus elliottii</i>	65
Figura 14 – Medidor de umidade por contato M52 Marrari.	66
Figura 15 – Modelo da régua com os limites de dimensões dos nós.	67
Figura 16 – Medição de um nó de borda com a régua adaptada.	67
Figura 17 – Computador com bluetooth e software de aquisição de dados.	68
Figura 18 – Posicionamento do MTG para obtenção do MOE estimado e display do aparelho.....	68
Figura 19 – Detalhe do apoio rotulado e do sistema de aplicação da carga.	69
Figura 20 – Montagem do ensaio estático para obtenção do MOE e MOR.....	69
Figura 21 – Esquemático dos espaçamentos para ensaio da peça de 45x105mm.	70
Figura 22 – Valores Característicos de MOE de acordo com a NBR7190.	82
Figura 23 – Valores Característicos de MOR de acordo com a NBR7190.	82
Figura 24 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{MTG} do lote completo.....	84
Figura 25 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOE do lote completo.	84
Figura 26 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{MTG} do lote completo.....	85
Figura 27 – Diagrama dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{MTG} da Classe SS.....	86
Figura 28 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{MTG} – Classe SS.....	86
Figura 29 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{MTG} da Classe SS.....	86
Figura 30 – Diagrama dispersão e reta de regressão entre o MOE estático e o E_{MTG} da Classe S1.....	87
Figura 31 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{MTG} – Classe S1	88
Figura 32 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{MTG} da Classe S1.....	88
Figura 33 – Diagrama dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{MTG} da Classe S2.....	89
Figura 34 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{MTG} – Classe S2.	89
Figura 35 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{MTG} da Classe S2.	90
Figura 36 – Diagrama dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{MTG} da Classe S3.....	90
Figura 37 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{MTG} – Classe S3	91
Figura 38 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{MTG} da Classe S3.....	91

Figura 39 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{DIN} do lote completo.....	93
Figura 40 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{DIN} para o lote completo.	93
Figura 41 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{DIN} do lote completo.	94
Figura 42 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE na flexão estática e o E_{DIN} – Classe SS.....	95
Figura 43 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{DIN} – Classe SS.....	95
Figura 44 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{DIN} – Classe SS.	95
Figura 45 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE na flexão estática e o E_{DIN} – Classe S1.	96
Figura 46 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{DIN} – Classe S1.	97
Figura 47 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{DIN} – Classe S1.....	97
Figura 48 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE estático e o E_{DIN} – Classe S2.....	98
Figura 49 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{DIN} – Classe S2.....	98
Figura 50 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{DIN} – Classe S2.....	99
Figura 51 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{DIN} – Classe S3.....	100
Figura 52 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{DIN} – Classe S3.....	100
Figura 53 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{DIN} – Classe S3.....	100
Figura 54 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o MOR do lote completo.....	102
Figura 55 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR para o lote completo.	102
Figura 56 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o MOR do lote completo.	103
Figura 57 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o MOR – Classe SS.	104
Figura 58 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR – Classe SS.....	104
Figura 59 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o MOR – Classe SS.	104
Figura 60 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE na flexão estática e o MOR – Classe S1.	105
Figura 61 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR – Classe S1.	106
Figura 62 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o MOR – Classe S1.....	106
Figura 63 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o MOR – Classe S2.....	107
Figura 64 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR – Classe S2.....	107
Figura 65 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o MOR – Classe S2.....	108
Figura 66 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o MOR – Classe S3.....	109
Figura 67 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR – Classe S3.....	109
Figura 68 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o MOR – Classe S3.....	109
Figura 69 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e a Densidade aparente do lote completo.	111
Figura 70 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para a Densidade aparente para o lote completo. ...	111
Figura 71 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a Densidade do lote completo.	112
Figura 72 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e a Densidade aparente – Classe SS.....	113
Figura 73 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para a Densidade aparente – Classe SS.	113
Figura 74 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a Densidade aparente – Classe SS.	113
Figura 75 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e a Densidade aparente – Classe S1.....	114
Figura 76 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para a Densidade aparente – Classe S1.	115
Figura 77 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a Densidade aparente – Classe S1.....	115

Figura 78 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e a Densidade aparente – Classe S2.	116
Figura 79 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para a Densidade aparente – Classe S2.	116
Figura 80 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a Densidade aparente – Classe S2.	117
Figura 81 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e a Densidade aparente – Classe S3.	118
Figura 82 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para a Densidade aparente – Classe S3.	118
Figura 83 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a Densidade aparente – Classe S3.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de resistência das coníferas.	34
Tabela 2 – Classes de resistência das dicotiledôneas.	34
Tabela 3 – Classes visuais descritas na <i>National Grading Rule</i>	38
Tabela 4 – Dimensões admitidas dos defeitos em cada classe visual.	40
Tabela 5 – Classes de densidade definidas na ASTM D245-93	41
Tabela 6 – Relação entre resistência e o módulo de elasticidade da espécie Abeto da Noruega 40x145 mm expresso em coeficiente de determinação (R^2)	44
Tabela 7 – Limites das características das peças estruturais para ensaio com o MTG.	58
Tabela 8 – Tolerâncias dos dados de entrada para o Software MTG	58
Tabela 9 – Propriedades mecânicas de peças estruturais de <i>Pinus sp.</i>	59
Tabela 10 – Propriedades mecânicas de peças estruturais de <i>Pinus oocarpa</i>	60
Tabela 11 – Limitações dos defeitos em cada classe para peças com seção transversal de 45x105mm.	66
Tabela 12 – Quantidade de peças por classe visual.	71
Tabela 13 – Propriedades das peças da Classe SS.	71
Tabela 14 – Propriedades das peças da Classe S1.	74
Tabela 15 – Propriedades das peças da Classe S2.	75
Tabela 16 – Propriedades das peças da Classe S3.	76
Tabela 17 – Estatística descritiva dos resultados de teor de umidade.	79
Tabela 18 – Estatística descritiva dos resultados de Densidade aparente à 12%.	79
Tabela 19 – Estatística descritiva dos resultados de Módulo de Elasticidade na flexão estática.	80
Tabela 20 – Estatística descritiva dos resultados de Módulo de Elasticidade obtido pelo MTG.	80
Tabela 21 – Estatística descritiva dos resultados de MOE Dinâmico.	80
Tabela 22 – Estatística descritiva dos resultados de MOR.	80
Tabela 23 – Correção do MTG em relação ao MOE estático.	81
Tabela 24 – Quadro de ANOVA (E_{MTG} x MOE) - lote completo.	85
Tabela 25 – Quadro de ANOVA (E_{MTG} x MOE) - classe SS.	87
Tabela 26 – Quadro de ANOVA (E_{MTG} x MOE) - classe S1.	88
Tabela 27 – Quadro de ANOVA (E_{MTG} x MOE) - classe S2.	90
Tabela 28 – Quadro de ANOVA (E_{MTG} x MOE) - classe S3.	91
Tabela 29 – Correlação da regressão linear entre o E_{MTG} e o MOE.	92
Tabela 30 – Quadro de ANOVA (E_{DIN} x MOE) - lote completo.	94
Tabela 31 – Quadro de ANOVA (E_{DIN} x MOE) – Classe SS.	96
Tabela 32 – Quadro de ANOVA (E_{DIN} x MOE) – Classe S1.	97
Tabela 33 – Quadro de ANOVA (E_{DIN} x MOE) – Classe S2.	99
Tabela 34 – Quadro de ANOVA (E_{DIN} x MOE) – Classe S3.	101
Tabela 35 – Correlação da regressão linear entre o E_{DIN} e o MOE.	101
Tabela 36 – Quadro de ANOVA (MOR x MOE) – lote completo.	103

Tabela 37 – Quadro de ANOVA (MOR x MOE) – Classe SS.	105
Tabela 38 – Quadro de ANOVA (MOR x MOE) – Classe S1.	106
Tabela 39 – Quadro de ANOVA (MOR x MOE) – Classe S2.	108
Tabela 40 – Quadro de ANOVA (MOR x MOE) – Classe S3.	110
Tabela 41 – Correlação da regressão linear entre o MOR e o MOE.	110
Tabela 42 – Quadro de ANOVA (MOE x Densidade) – lote completo.	112
Tabela 43 – Quadro de ANOVA (MOE x Densidade) – Classe SS.	114
Tabela 44 – Quadro de ANOVA (MOE x Densidade) – Classe S1.	115
Tabela 45 – Quadro de ANOVA (MOE x Densidade) – Classe S2.	117
Tabela 46 – Quadro de ANOVA para os dados de MOE pela Densidade aparente – Classe S3.	119
Tabela 47 – Correlação da regressão linear entre a Densidade Aparente e o MOE.	119

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVO.....	24
1.2	JUSTIFICATIVA	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	27
2.1.1	Anisotropia da Madeira	27
2.1.2	Modelo ortotrópico para a madeira	29
2.1.3	Módulo de Elasticidade.....	31
2.1.4	Módulo de Elasticidade Transversal	33
2.1.5	Influência da umidade nas propriedades da madeira	33
2.1.6	Classes de resistência da NBR 7190/1997	34
2.2	MADEIRA CLASSIFICADA VISUALMENTE.....	35
2.2.1	Classificação da madeira estrutural com relação às propriedades mecânicas.....	35
2.2.2	Defeitos na madeira estrutural.....	37
2.2.3	Regras de classificação visual.....	38
2.2.4	Medição das características de crescimento	39
2.3	ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS	41
2.4	RELAÇÃO RESISTÊNCIA / MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	43
2.4.1	Propriedades da madeira livre de defeitos.....	43
2.4.2	Módulo de elasticidade (MOE)	43
2.4.3	Ensaio de peças em dimensões estruturais	44
2.5	ENSAIO ESTÁTICO	45
2.5.1	Determinação das constantes elásticas por meio de ensaios estáticos.....	45
2.6	COMPORTAMENTO DINÂMICO DA MADEIRA	46
2.6.1	Tipos de vibração	48
2.6.2	Velocidade do som na madeira.....	49
2.6.3	Atrito interno na madeira	49
2.6.4	Módulo de elasticidade determinado por vibrações ressonantes	50
2.7	ENSAIOS POR VIBRAÇÃO.....	50
2.8	VIBRAÇÃO LONGITUDINAL.....	51
2.9	BROOKHUIS MICROELECTRONICS TIMBER GRADER – MTG	54
2.9.1	Ensaio com o MTG.....	56

2.9.2	Especificações técnicas.....	56
2.10	TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS SOBRE OBTENÇÃO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA MADEIRA	59
2.11	CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	63
3	MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1	MATERIAIS.....	64
3.2	MÉTODOS.....	65
3.2.1	Determinação do teor de umidade	65
3.2.2	Classificação Visual	66
3.2.3	Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo MTG (E_{MTG})	67
3.2.4	Módulo de elasticidade dinâmico calculado pela frequência natural (E_{DIN})	68
3.2.5	Flexão estática	69
4	RESULTADOS OBTIDOS	71
4.1	CLASSIFICAÇÃO VISUAL	71
4.2	DADOS DAS AMOSTRAS	71
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	79
5.1	ESTATÍSTICA DESCRITIVA.....	79
5.2	FATOR DE CORREÇÃO ENTRE O E_{DIN} E O E_{MTG}	81
5.3	VALORES CARACTERÍSTICOS DO MOE E DO MOR.....	81
5.4	CORRELAÇÃO ENTRE O E_{MTG} E O MOE.....	83
5.4.1	Lote completo.....	84
5.4.2	Classe Visual SS.....	85
5.4.3	Classe Visual S1.....	87
5.4.4	Classe Visual S2.....	89
5.4.5	Classe Visual S3.....	90
5.4.6	Resumo das Correlações E_{MTG} x MOE	92
5.5	CORRELAÇÃO ENTRE O E_{DIN} E O MOE.....	92
5.5.1	Lote completo.....	93
5.5.2	Classe Visual SS.....	94
5.5.3	Classe Visual S1.....	96
5.5.4	Classe Visual S2.....	98
5.5.5	Classe Visual S3.....	99
5.5.6	Resumo das Correlações do E_{DIN}	101
5.6	CORRELAÇÃO ENTRE O MOR E O MOE	102
5.6.1	Lote completo.....	102

5.6.2	Classe Visual SS.....	103
5.6.3	Classe Visual S1	105
5.6.4	Classe Visual S2	107
5.6.5	Classe Visual S3	108
5.6.6	Resumo das Correlações do MOR	110
5.7	CORRELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE APARENTE E O MOE	111
5.7.1	Lote completo	111
5.7.2	Classe Visual SS.....	112
5.7.3	Classe Visual S1	114
5.7.4	Classe Visual S2	116
5.7.5	Classe Visual S3	117
5.7.6	Resumo das Correlações da Densidade	119
6	CONCLUSÃO.....	120
	REFERÊNCIAS	123

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um compósito fibroso, que apresenta maior resistência na direção paralela ao eixo longitudinal do tronco. A madeira de dimensões estruturais é um material heterogêneo, com presença de defeitos devido ao crescimento (nós, desvios das fibras, etc.), que reduzem a resistência do material. As peças de madeira serrada do gênero pinus apresentam maior quantidade de defeitos, sendo imprescindível uma classificação mecânica por meio de ensaios não destrutivos.

Um ensaio mecânico não-destrutivo de um material deve ser baseado em correlações conhecidas entre as resistências e outras propriedades que podem ser avaliadas, sem danificar o material. No caso da madeira, a propriedade mecânica que é estimada, na maioria dos casos, é o módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade pode ser obtido por meio de ensaios de flexão estática que são de execução mais difícil e custosa. Métodos dinâmicos como vibração transversal, vibração longitudinal e ultrassom, não destrutivos são uma alternativa para a obtenção do módulo de elasticidade

O aparelho *BrookHuis Micro Timber Grader (MTG)* é um dispositivo portátil que utiliza o método de vibração longitudinal por ondas de tensão para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico da madeira. Através de um software interno, com a seleção da espécie ensaiada, o MTG estima os valores do módulo de elasticidade na flexão estática com correção para 12% de umidade.

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental, em que foram ensaiadas peças de *Pinus elliottii*, com dimensões estruturais, tanto por ensaio de flexão estática normatizado e também por ensaio dinâmico utilizando o equipamento portátil *BrookHuis Microelectronics Timber Grader (MTG)*, visando a utilização do aparelho portátil na classificação estrutural da madeira. Aliado a uma classificação visual dos defeitos presentes nas peças, o intuito foi estimar o Módulo de Elasticidade na flexão estática a partir de correlações do módulo de elasticidade (E_{MTG}) obtido com o MTG, do módulo de elasticidade dinâmico (E_{DIN}), do MOR e da densidade aparente da madeira.

1.1 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a utilização do método de ensaio não destrutivo, por meio de vibração longitudinal, com o uso do aparelho portátil *MTG BrookHuis*, para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais, com vistas à classificação estrutural, utilizando um lote de *Pinus elliottii*, proveniente do sudoeste paulista.

Também foram avaliadas as correlações entre a resistência à flexão (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE), entre o MOE e a densidade aparente e calculados os valores característicos de resistência e de elasticidade do lote.

Os objetivos secundários são:

- classificar visualmente o lote de madeira, segundo as regras do SPIB (*Southern Pine Inspection Bureau*);
- avaliar o módulo de elasticidade (MOE) das peças por meio de testes de flexão estática;
- avaliar os módulos de elasticidade E_{MTG} e E_{DIN} , usando o aparelho MTG, para cada peça;
- correlacionar o módulo de elasticidade dinâmico (E_{MTG}) com o (MOE) na flexão estática;
- correlacionar o módulo de elasticidade dinâmico (E_{DIN}) com o (MOE) na flexão estática;
- correlacionar a resistência na flexão (MOR) com o módulo de elasticidade (MOE) na flexão estática na maior inércia;
- avaliar a influência da classe visual (presença de defeitos) nas correlações entre os módulos de elasticidade.

1.2 JUSTIFICATIVA

A classificação mecânica e a estimativa das propriedades mecânicas da madeira utilizada em estruturas constituem um ponto crítico para o dimensionamento e construção com a espécie *Pinus*. As peças de madeira com dimensões estruturais contêm defeitos naturais que interferem nas propriedades mecânicas do material, proporcionando comportamentos diferentes dos obtidos nos ensaios de peças pequenas e livres de defeitos.

Países europeus e norte-americanos têm maior desenvolvimento neste setor, com normas de dimensionamento e de ensaio consolidadas, com aplicação de equipamentos inovadores de vibração transversal, vibração longitudinal, ultrassom, entre outros, que podem servir de referência para a estimativa da resistência e do módulo de elasticidade da madeira,

por meio de ensaios não-destrutivos. A utilização de um equipamento portátil para determinação do módulo de elasticidade (E) por ondas de tensão, torna possível a classificação não-destrutiva “*in loco*”, na serraria, no fornecedor do material ou no recebimento da obra, barateando os custos desta operação e tornando mais confiável a utilização e padronização da madeira em estruturas. A classificação das peças permite uma melhor racionalidade na execução de construções industrializadas, fabricação de vigas laminadas coladas e edificações no sistema construtivo em woodframe.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 2000, as florestas contavam com cerca de 3,9 bilhões de hectares ao redor do mundo, 30% das terras secas é coberto com árvores. Apesar de várias atividades de conservação, entre 12 e 15 milhões de hectares de floresta são perdidos todo ano. Um total de 3,4 bilhões de m³ de madeira em toras foram derrubados em 2000 ao redor do mundo. Disto, cerca de 45% foi convertido em madeira comercial (WEGENER, ZIMMER, 2008).

O setor florestal brasileiro tem um grande potencial de fornecimento de matérias-primas para construção de habitações em madeira. A Associação Brasileira de florestas Plantadas (ABRAF) e Indústria Brasileira de Árvores (Ibá) detalham os dados sobre o setor. Das florestas plantadas brasileiras, 72% são do gênero *Eucalyptus* e 20,7% são do gênero *Pinus*. (ABRAF, 2013)

Levantamento do do Instituto Brasileiro de Árvores (IBA) mostra que em 2014 os plantios de *Pinus* ocupam 1,588 milhão de hectares, 1,2% superior a área de 2013 e concentram-se no Paraná (42,4%), seguidos por Santa Catarina (34,1%), Rio Grande do Sul 11,6%, São Paulo 7,8%, Minas Gerais 2,5%, e os outros estados somam 1,6% (IBA, 2015).

A desaceleração da construção civil nacional levou a uma queda de 6,1% no consumo doméstico de madeira serrada, que passou de 8,51 milhões de metros cúbicos em 2013 para 7,99 milhões de metros cúbicos em 2014. Nesse cenário, a produção de serrados de árvores plantadas atingiu 9,23 milhões de metros cúbicos, recuo de 1,5% em relação a 2013. As exportações de madeira serrada de árvores plantadas alcançaram 1,24 milhão de metros cúbicos em 2014, um crescimento de 43,6% em relação a 2013. A demanda global por madeira serrada cresceu 18% em 2013, em decorrência da melhoria, ainda que modesta, da economia mundial. (IBA, 2015).

A seguir são apresentados os aspectos relevantes de propriedades mecânicas da madeira, da classificação estrutural (visual e mecânica), e de métodos de ensaios pertinentes.

2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

A norma norte-americana *American Society for Testing and Materials* (ASTM D4761-2002), trata especificamente de ensaios estáticos para peças estruturais, baseada na norma ASTM D198, que detalha os procedimentos de ensaio para madeira serrada na flexão. Vigas com dimensões estruturais são sujeitas à flexão em quatro pontos, bi apoiadas e com a aplicação de cargas em dois pontos, e razão entre vão e espessura da peça entre 18 e 21 vezes. Este tipo de carregamento produz um momento constante, não ocasionando tensão de cisalhamento na seção da viga (BODIG, JAYNE; 1993).

Além dos métodos estáticos para determinar as constantes elásticas da madeira, existem métodos dinâmicos baseados em medições das frequências naturais. O módulo de elasticidade dinâmico E_d pode ser medido utilizando métodos de vibração. Os ensaios de vibração possibilitam a determinação das frequências naturais e do módulo de elasticidade da madeira. Uma vantagem das medições dinâmicas é a curta duração do ensaio. Em geral, o módulo de elasticidade obtido pelos ensaios de vibração é um pouco maior do que os dos ensaios estáticos, mas as diferenças são pequenas, da ordem de 5% a 15% (KOLLMANN, 1968).

2.1.1 Anisotropia da Madeira

A madeira é um material anisotrópico, ou seja, suas propriedades físicas dependem da direção. Por exemplo, a resistência a tração é 30-50 vezes menor na direção perpendicular às fibras do que na direção paralela às fibras. A razão para isso pode ser observada na anatomia da estrutura das fibras da madeira. Deformações devidas à variação da umidade nas direções perpendiculares às fibras são muito superiores do que na direção paralela às fibras (THELANDERSON, 2003). No caso de materiais anisotrópicos, as relações tensão por deformação são apresentadas com a seguinte notação:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}$$

Nesta notação, os índices 1, 2 e 3 indicam as direções analisadas, que são ortogonais entre si. As distorções γ_{12} , γ_{13} e γ_{23} são representadas por ε_4 , ε_5 e ε_6 , respectivamente. As tensões de cisalhamento τ_{12} , τ_{13} e τ_{23} são representadas por σ_4 , σ_5 e σ_6 , respectivamente (BODIG, JAYNE; 1993).

Esta equação matricial também pode ser representada da maneira da Equação (1):

$$\begin{pmatrix} \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma \end{pmatrix} \quad (1)$$

A matriz \mathbf{S} é conhecida como matriz compliance ou matriz dos coeficientes de deformabilidade. A inversa da matriz \mathbf{S} é a matriz \mathbf{C} , conhecida por matriz das constantes de elasticidade ou dos coeficientes de rigidez, conforme a Equação (2).

$$\begin{pmatrix} \sigma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon \end{pmatrix} \quad (2)$$

Dos 36 elementos da matriz \mathbf{S} , 21 são independentes, e a matriz é simétrica ($S_{ij} = S_{ji}$). Deve-se lembrar que, para materiais isotrópicos, são apenas 2 elementos independentes. Os elementos S_{ij} têm o seguinte significado:

a) quando $i = j = 1, 2$ ou 3 , são constantes que relacionam a tensão normal σ com a deformação ε , para cada direção, como mostra a Equação (3):

$$S_{ii} = \frac{1}{E_i} \quad (3)$$

b) A Equação (4) apresenta os valores do S_{ij} , quando $i = 1, 2$ ou 3 e $j = 1, 2$ ou 3 , sendo $i \neq j$, constantes relacionadas às deformações transversais na direção j quando se aplicam tensões normais na direção i :

$$S_{ij} = \frac{-\nu_{ij}}{E_i} = S_{ji} = \frac{-\nu_{ji}}{E_j} \quad (4)$$

c) A Equação (5), apresenta os valores S_{ij} , quando $i = j = 4, 5$ ou 6 , constantes que relacionam a tensão normal τ com a distorção γ , para cada plano:

$$S_{ii} = \frac{1}{G_i} \quad (5)$$

d) Quando $i = 4, 5$ ou 6 e $j = 1, 2$ ou 3 , S_{ij} relaciona uma deformação linear com uma tensão de cisalhamento, ou vice-versa.

e) Quando $i = 4, 5$ ou 6 e $j = 4, 5$ ou 6 , para $i \neq j$, S_{ij} relaciona uma distorção em determinado plano com uma tensão de cisalhamento que atua em outro plano perpendicular. (BODIG, JAYNE; 1993).

2.1.2 Modelo ortotrópico para a madeira

A madeira pode ser considerada um material ortotrópico, com três eixos de simetria elástica, caracterizados pelas direções longitudinal, tangencial e radial. O eixo longitudinal L é paralelo às fibras. O eixo radial R é normal aos anéis de crescimento (perpendicular às fibras na direção radial). E o eixo tangencial T é perpendicular às fibras, mas tangente aos anéis de crescimento. Estes eixos estão apresentados na Figura 1.

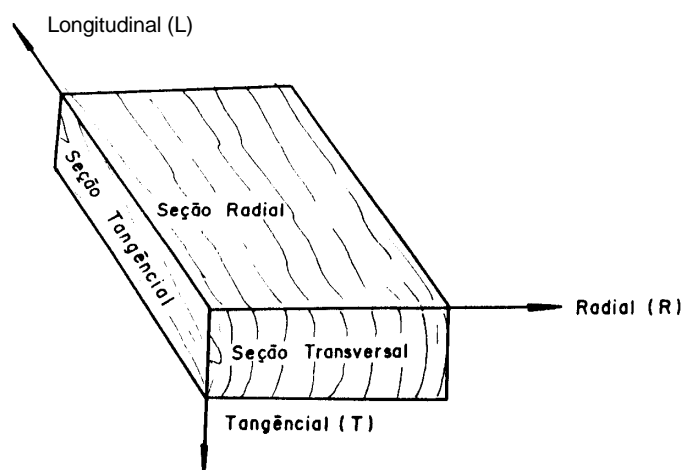


Figura 1 – Definição de planos e eixos de simetria elástica para uma peça retangular de madeira

(Fonte: BODIG & JAYNE, 1993)

Se as direções **1**, **2** e **3** forem coincidentes com as direções **L**, **T** e **R**, respectivamente, teremos a seguinte matriz dos coeficientes de deformação, **S**.

$$\mathbf{S} = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{vmatrix}$$

Obs: os índices 4, 5 e 6 são referentes ao cisalhamento nos planos perpendiculares aos planos LT, LR e TR, respectivamente.

Substituindo os termos S_{ii} por constantes elásticas usuais de Engenharia, e empregando a notação referente aos eixos **L**, **T** e **R**, obtém-se as seguintes relações entre tensões e deformações (BODIG, JAYNE; 1993):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_R \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{TR} \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}} \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \\ \tau_{TR} \end{Bmatrix}$$

As constantes elásticas da madeira, no modelo ortotrópico, são os módulos de elasticidade longitudinais segundo as três direções (E_L , E_T , E_R), os módulos de elasticidade transversais segundo os três planos definidos pelas direções principais (G_{LT} , G_{LR} , G_{TR}) e os coeficientes de Poisson (ν_{LT} , ν_{TL} , ν_{LR} , ν_{RL} , ν_{TR} , ν_{RT}). De acordo com a Equação (6), destas constantes, apenas nove são independentes, pois:

$$\frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T} \quad ; \quad \frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R} \quad ; \quad \frac{\nu_{RT}}{E_T} = \frac{\nu_{RT}}{E_R} \quad (6)$$

É importante observar que o coeficiente de Poisson ν_{ij} é a relação entre a deformação na direção j e a deformação na direção i , para a tensão normal aplicada na direção i (BODIG, JAYNE; 1993).

2.1.3 Módulo de Elasticidade

O Módulo de Elasticidade da madeira na norma NBR7190/1997 é definido por meio de um corpo de prova isento de defeitos e com pequenas dimensões, submetido à compressão paralela ($E_{c0,m}$).

O módulo de elasticidade (E_L) pode ser determinado pela flexão, ao invés de um teste de compressão axial. No caso de relações entre o vão livre e a altura das peças (L/h) menores que 18, as tensões de cisalhamento apresentam uma influência significativa nas deformações das peças, levando o MOE à um valor inferior se não forem computadas as deformações devido as tensões de cisalhamento. (ROCCO, 1983)

O módulo de elasticidade da madeira obtido na flexão é definido no trecho linear do diagrama força x deslocamento, conforme a Figura 2. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

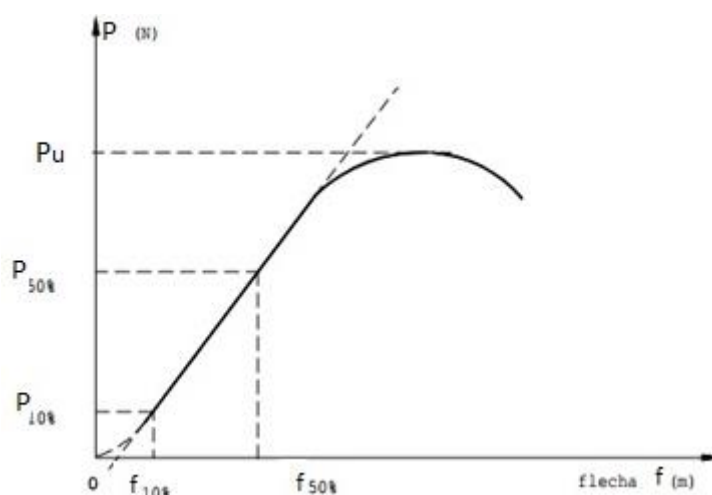


Figura 2 – Diagrama força aplicada x flecha na flexão. (Fonte: NBR 7190/1997, Anexo B)

O módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva força aplicada (P) x flecha no meio do vão (f) (Figura 2), definida pelos pontos ($P_{10\%}$; $f_{10\%}$) e ($P_{50\%}$; $f_{50\%}$), correspondentes respectivamente a 10% e 50% da força máxima (P_u), determinada no ensaio, sendo dada pela Equação (7):

$$E_M = \frac{(P_{50\%} - P_{10\%}) \cdot l^3}{(f_{50\%} - f_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad (7)$$

Sendo:

E_M = Módulo de elasticidade na flexão;

$P_{50\%}$ = Força aplicada equivalente a 50% da força máxima;

$P_{10\%}$ = Força aplicada equivalente a 10% da força máxima;

l = vão livre entre os apoios;

$f_{50\%}$ = deformação no centro do vão com aplicação de 50% da carga máxima;

$f_{10\%}$ = deformação no centro do vão com aplicação de 10% da carga máxima;

b = largura da peça ensaiada;

h = altura da peça ensaiada;

Os três módulos de elasticidade são indicados como Módulo de Elasticidade Longitudinal paralelo ao eixo, Módulo Radial e Módulo Tangencial relativo aos eixos da madeira. Os coeficientes elásticos variam entre as espécies de madeira, e também com a variação do teor de umidade e com o peso específico (KRETSCHMANN, 2010a).

O módulo de elasticidade, E_{w0} , na direção paralela às fibras é medido no ensaio de compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade E_{w90} na direção normal às fibras é medido no ensaio de compressão normal às fibras (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Segundo a NBR7190/1997, na falta de determinação experimental específica, permite-se adotar a Equação (8), para o valor do módulo de elasticidade normal as fibras, com base no módulo de elasticidade paralelo às fibras:

$$E_{w90} = \frac{1}{20} \cdot E_{w0} \quad (8)$$

A caracterização do módulo de elasticidade das madeiras deve respeitar os métodos de ensaio especificados no anexo B da NBR 7190/1997. Os valores devem ser referidos à condição-padrão de umidade ($U=12\%$).

Na impossibilidade da realização do ensaio de compressão simples, permite-se avaliar o módulo de elasticidade E_{com} por meio de ensaio de flexão, de acordo com o método especificado no anexo B (NBR 7190). Por este ensaio, determina-se o módulo aparente de elasticidade na flexão E_M , admitindo as seguintes relações das Equações (9) e (10):

$$\text{Coníferas: } E_M = 0,85 \cdot E_{c0} \quad (9)$$

$$\text{Dicotiledôneas: } E_M = 0,90 \cdot E_{c0} \quad (10)$$

2.1.4 Módulo de Elasticidade Transversal

O módulo de elasticidade transversal (G) é a relação entre as tensões de cisalhamento e a distorção. No caso de vigas a distorção pode ter efeito significativo nas deformações transversais (flechas). Os três módulos de elasticidade transversais denominados G_{LR} , G_{LT} e G_{RT} , são as constantes elásticas nos planos LR , LT e RT respectivamente. (KRETSCHMANN, 2010a).

2.1.5 Influência da umidade nas propriedades da madeira

O teor de umidade da madeira (peso da água em relação ao peso da madeira à 0% de umidade) pode atingir 100% ou mais. Parte da água contida na madeira é denominada livre, que é armazenada nas cavidades das células da madeira, vasos e canais, enquanto aquela ligada no interior das paredes celulares é denominada água de adesão ou higroscópica. Quando a madeira é submetida à secagem, inicialmente é perdida a água livre. O valor correspondente ao teor de umidade quando se perdeu toda a água livre é denominado ponto de saturação das fibras (PSF). O PSF varia entre 25% e 32%, dependendo da espécie analisada, com uma média de 28%, para todas as espécies. (JANKOWSKY, 1990). Até atingir o PSF, a perda de umidade não interfere nas propriedades mecânicas da madeira.

Abaixo do PSF, as propriedades mecânicas da madeira variam de acordo com a variação do teor de umidade, o módulo de elasticidade e a resistência aumentam com a diminuição do teor de umidade (THELANDERSON, 2003).

A madeira é higroscópica e interage com a umidade do ar do ambiente. O teor de umidade em uma peça de madeira varia de acordo com a umidade e a temperatura do ambiente, de forma lenta, o que sugere que ocorre um gradiente de umidade na madeira (THELANDERSON, 2003).

A norma NBR7190 define que a condição padrão de referência para o teor de umidade na madeira é de 12% e que os resultados de ensaios realizados com teores de umidade da madeira, entre 10% e 20% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS, 1997), devem ser corrigidos de acordo com a equação (11), no caso da resistência, e com a equação 12 no caso do módulo de elasticidade.

$$f_{12} = f_{u\%} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (11)$$

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

2.1.6 Classes de resistência da NBR 7190/1997

As classes de resistência das madeiras têm por objetivo o emprego de propriedades padronizadas, orientando a escolha do material para elaboração de projetos estruturais, sendo as peças de madeira enquadradas nas classes de resistência especificadas nas Tabelas 1 e 2. O lote de madeiras ensaiado devem atender os requisitos mínimos das propriedades para ser enquadrado na classe determinada.

Tabela 1 – Classes de resistência das coníferas. (NBR 7190/1997)

Coníferas (Valores na condição-padrão de referência U=12%)					
Classes	f_{c0k} MPa	f_{v0k} MPa	$E_{c0,m}$ MPa	$\rho_{bas.m}$ kg/m ³	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C 20	20	4	3500	400	500
C 25	25	5	8500	450	550
C 30	30	6	14500	500	600

Tabela 2 – Classes de resistência das dicotiledôneas. (NBR7190/1997)

Dicotiledôneas (Valores na condição-padrão de referência U=12%)					
Classes	f_{c0k} MPa	f_{v0k} MPa	$E_{c0,m}$ MPa	$\rho_{bas.m}$ kg/m ³	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C 20	20	4	9500	500	650
C 30	30	5	14500	650	800
C 40	40	6	19500	750	950
C 60	60	8	24500	800	1000

2.2 MADEIRA CLASSIFICADA VISUALMENTE

As peças de madeira serrada, independente da espécie ou dimensões podem apresentar variações significativas nas propriedades mecânicas. As peças devem ser classificadas de acordo com as suas propriedades. (KRETSCHMANN, 2010b).

A classificação visual presume que as propriedades mecânicas de uma peça de madeira são diferentes das propriedades mecânicas de uma peça isenta de defeitos.

A classificação por resistência de uma peça de madeira é alcançada com a combinação entre a classificação visual e a classificação mecânica (WIEGAND, 2008).

2.2.1 Classificação da madeira estrutural com relação às propriedades mecânicas

Um pré-requisito para o uso da madeira estrutural é o conhecimento das propriedades de resistência e do módulo de elasticidade, que devem estar enquadrados entre limites estabelecidos (JOHANSSONN, 2003).

Segundo Carreira (2003) como a madeira é um material natural, não é possível controlar as suas propriedades, ao contrário de materiais fabricados pelo homem, como aço, concreto e plástico, nos quais a qualidade do material é obtida com mudanças na composição das matérias-primas ou com mudanças ambientais de temperatura, pressão, etc. Existem poucos exemplos em que as propriedades da madeira sólida podem ser influenciadas de maneira similar. É possível incrementar a durabilidade da madeira em diferentes níveis por tratamento químico ou térmico. Com modificações químicas, a estabilidade dimensional e a durabilidade podem ser modificadas. Contudo, na medida em que as propriedades mecânicas são os limitantes para o uso estrutural, a única maneira de obter a qualidade desejada é a classificação. Existem dois tipos de sistemas de classificação por resistência:

Classificação visual de resistência: É baseada na inspeção visual superficial das peças, com relação aos seus defeitos naturais ou de processamento, para assegurar que as peças não possuem defeitos que excedam os limites fixados em regras de classificação padronizadas (CARREIRA, 2003).

Segundo Carreira (2003) a classificação visual da madeira é dividida em duas etapas distintas:

- a) Atribuição de uma classe para cada peça de madeira a partir da identificação visual de certas características de crescimento.

- b) Determinação das propriedades de resistência e rigidez para cada classe de uma determinada espécie;

Classificação de resistência mecânica: Quando as peças são avaliadas mecanicamente, por métodos ou equipamentos, que medem um ou vários parâmetros em ações não destrutivas. Baseado nestas medições, as resistências, densidade e o módulo de elasticidade são estimados (CARREIRA, 2003).

Desde que as madeiras começaram a ser utilizadas para construção, muitas formas de classificação visual de resistências foram utilizadas. No entanto, as padronizações somente foram estabelecidas no início do século 20.

Nos Estados Unidos, a Norma ASTM D245, originalmente publicada em 1927, contém orientações para o desenvolvimento de regras de classificação (MADSEN, 1992). Dos anos 1930 em diante, as padronizações de classificação foram introduzidas em vários países da Europa. As regras de classificação desenvolvidas ao longo dos últimos 60 anos diferem muito à respeito dos critérios de classificação, número de classes e limites das classes. Isto é devido ao grande número de espécies de madeira, qualidade e tipos de sistemas construtivos. A norma PS 20-70 (*American Softwood Lumber Standard*), que entrou em vigor nos Estados Unidos em 1970, incorpora várias características, incluindo as dimensões úmida e seca para determinação da retração da madeira. Sob exigência da PS 20-70, uma regra nacional norte-americana de classificação (*National Grading Rule*) foi escrita, definindo características uniformes de classificação para todas as espécies de coníferas na dimensão de caibros e pranchas (CARREIRA, 2003).

Todas as classificações visuais têm em comum a deficiência de avaliar todas as características relevantes apenas de forma visual, e somente são possíveis combinações simples das regras (JOHANSSON, 2003).

A classificação visual depende exclusivamente da estimativa da resistência mecânica a partir de características externas visíveis, como exemplo, os nós e quantidade dos anéis de crescimento. Por outro lado, na classificação de resistência mecânica é possível, em determinados métodos, medir o módulo de elasticidade, a densidade, o teor de umidade e a proporção dos nós. A precisão com que as propriedades podem ser estimadas permite atingir graus mais elevados de qualidade (WIEGAND, 2008).

A classificação visual leva em conta uma série de propriedades que também são relevantes para a aparência. Por exemplo, uma peça classificada visualmente em uma classe com poucos defeitos e melhor estética, normalmente tem nós menores que uma peça enquadrada em uma classe menos atraente e menos resistente. Contudo, este não é o caso da

classificação mecânica. Uma peça classificada mecanicamente como de alta resistência pode conter defeitos visualmente maiores que uma peça esteticamente desejável, pois depende também da complexidade e localização destes defeitos no corpo de prova, e que, muitas vezes, não são perceptíveis visualmente. A escolha de uma classe maior ou mais resistente não significa automaticamente uma peça mais bonita esteticamente (WIEGAND, 2008).

A idéia de utilizar parâmetros obtidos com ensaios não destrutivos para estimar a resistência, e utilizá-los como base para a classificação da madeira estrutural foi proposta simultaneamente nos Estados Unidos e na Austrália no fim dos anos 1950 (MADSEN, 1992). O principal propósito foi incrementar a acurácia dos processos de classificação por resistência para alcançar uma melhor utilização das qualidades disponíveis na madeira estrutural (JOHANSSONN, 2003).

2.2.2 Defeitos na madeira estrutural

Johansson (2003) define que a madeira estrutural apresenta diversos tipos de defeitos, como nós, fendas de topo, rachaduras, inclinação das fibras, apodrecimento, esmoados, bolsas de resina, presença de medula. A amplitude destes defeitos não importa somente em quanto cada defeito individual reduz a resistência, mas também com que frequência eles ocorrem. *Nós* são considerados defeitos sérios e que podem reduzir drasticamente a resistência, estão quase sempre presentes em grande número nas peças estruturais nas espécies do gênero *Pinus*. *Rachaduras ou Trincas de topo* também podem afetar gravemente a resistência, mas elas ocorrem com menor frequência e normalmente são defeitos isolados em uma peça de madeira de *Pinus*.

Os *Nós* afetam a resistência da madeira estrutural devido à redução da seção transversal e por ocasionar inclinação das fibras próximas. Os *Nós* podem ocorrer em aglomerados e, quando isto ocorre, para efeito de classificação são considerados, como um nó com dimensão maior. Em ensaios mecânicos de tração as rupturas ocorrem nos *Nós* em 95% dos casos (JOHANSSONN, 2003).

A consideração da inclinação das fibras como um parâmetro de redução da resistência não se refere aos desvios ocasionados pelos nós, mas pela inclinação geral que ocorre, em relação à direção paralela às fibras, ao longo da direção longitudinal da peça de madeira (PERSTOPER, 1999).

2.2.3 Regras de classificação visual

A classificação visual de peças estruturais de madeira é realizada por meio de regras de classificação. Na América do Norte, as regras de classificação são escritas por uma associação de indústrias que representam uma área onde as espécies específicas são recolhidas, a *Southern Pine Inspection Bureau (SPIB)*. O *Pinus elliottii* recebe o nome comercial de *Slash Pine* e o *Pinus taeda* o nome de *Loblolly Pine*. Ambos fazem parte do grupo *Southern Pine* e são classificados segundo as regras do (*SPIB*) (CARREIRA; DIAS, 2006).

Os critérios para a limitação dos defeitos descritos em todas as regras de classificação visual em vigor na América do Norte, incluindo a *SPIB*, são baseados na norma ASTM D245 (*Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*), por exigência da *National Grading Rule*. Esta norma não fornece as regras de classificação visual, porém estabelece os critérios de como medir os defeitos e fornece meios para limitar os defeitos em função de uma razão de resistência (CARREIRA; DIAS, 2006).

De acordo com Madsen (1992), a norma ASTM D245-93 trata somente da classificação estrutural e, além disso, é limitada à classificação visual.

De acordo com a norma ASTM D245, a razão de resistência é uma relação hipotética entre a resistência de uma peça de madeira com características visíveis de crescimento, que reduzem sua resistência, e a resistência de um corpo de prova isento de defeitos desta mesma madeira (CARREIRA; DIAS, 2006).

A Tabela 3 apresenta as classes visuais descritas na *National Grading Rule*, e as razões de resistência à flexão mínima de cada classe, fornecendo um índice comparativo de qualidade. A classe visual *Select Structural (SS)*, é a de melhor qualidade e admite o menor índice de defeitos, permitindo uma redução de até 33% na resistência, em relação à uma peça isenta de defeitos da mesma espécie. A classe visual *S1* é permite uma redução de 45%, a classe visual *S2* uma redução de 55% e a classe visual *S3* uma redução de até 74% na resistência.

Tabela 3 – Classes visuais descritas na *National Grading Rule*.

Dimensões	Classe	Razão de resistência à flexão (%)
Caibros e Pranchas	Select Structural (SS)	67%
	Classe (S1)	55%
	Classe (S2)	45%
	Classe (S3)	26%

Para especificação em projetos, as peças enquadradas na Classe Visual *SS* são indicadas para os usos principais da estrutura, onde sejam requeridas as maiores cargas. As peças das classes visuais *S1* e *S2* são indicadas para uso secundário nas estruturas e as peças da classe visual *S3* ou desclassificadas não são indicadas para uso na estrutura.

2.2.4 Medição das características de crescimento

A medição dos defeitos é realizada visualmente, ou seja, sem o auxílio de nenhuma ferramenta complexa. Carreira e Dias (2006) apresentam as regras de classificação visual adaptadas pelo *SPIB* e as principais características que devem ser observadas na classificação visual.

Nós

Deve-se medir os nós de maior diâmetro posicionados no centro da face larga, na borda da face larga e na face estreita das peças, conforme a Figura 3.

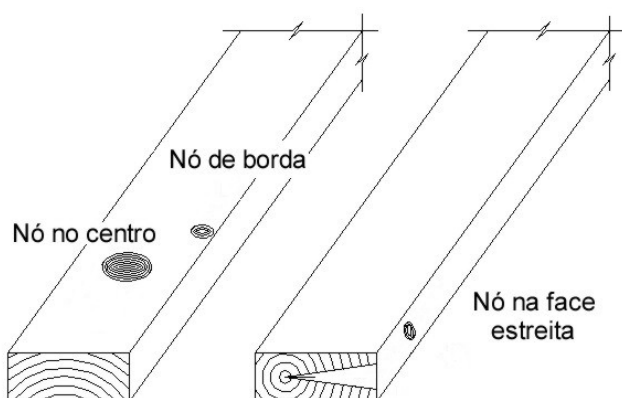


Figura 3 – Identificação dos nós em uma peça de madeira. (CARREIRA; DIAS, 2006)

Inclinação das fibras

A inclinação das fibras é medida nas quatro faces, e na zona que apresentar a maior inclinação geral, desconsiderando o desvio em torno dos nós, conforme a Figura 4.

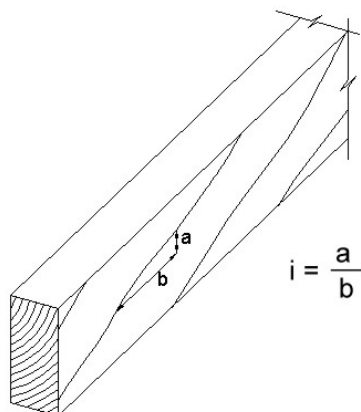


Figura 4 – Medida da inclinação das fibras de uma peça de madeira. (CARREIRA; DIAS, 2006)

A Tabela 4 apresenta os limites permitidos para os defeitos em cada classe visual. Segundo as regras do *SPIB*, para a flexão de vãos simples, rachas e fendas são restritas para as extremidades das vigas.

Tabela 4 – Dimensões admitidas dos defeitos em cada classe visual. (Carreira, 2003)

Classe Visual	Nós		Inclinação das Fibras	Rachas Anelares		Fendas
	Face Estreita	Face Larga		Passante	Superficial	
SS	1/5	1/3	1:12	1 vez largura	Até 600 mm	1 vez largura
S1	1/4	7/16	1:10	1 vez largura	Até 600 mm	1 vez largura
S2	1/3	1/2	1:8	1,5 vez. largura	Até 1/4 comp.	1,5 vez. largura
S3	1/2	3/4	1:4	1/6 comp. peça	Sem limites	1/6 comp. peça

Densidade

A norma ASTM D245-00 também define classes de densidade para a madeira, em função da taxa de crescimento da madeira serrada. A taxa de crescimento se refere à quantidade de anéis de crescimento presentes em 2,5 cm em uma linha radial da seção transversal. Assim, para ser considerada como densa, a peça de madeira deve ter seis ou mais anéis de crescimento e, mais de (1/3) um terço da seção transversal deve ser madeira de inverno. Peças com quatro ou mais anéis de crescimento, e com mais da metade da seção transversal com madeira de inverno podem ser consideradas como densa. Para ser considerada de média densidade a peça deve ter quatro ou mais anéis de crescimento. Peças com menos de

quatro anéis de crescimento são classificadas como de baixa densidade (CARREIRA; DIAS, 2006).

As classes de densidade definidas pela ASTM D245-00 são apresentadas na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 – Classes de densidade definidas na ASTM D245-93

Classe	Anéis / 2,5cm	Quantidade de madeira de inverno
Densa	≥ 6	$> 1/3$
	≥ 4	$> 1/2$
Média	≥ 4	
Baixa	< 4	

2.3 ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

A maior parte dos ensaios mecânicos é destrutivo e usando corpos de prova livres de defeitos. Peças estruturais de florestas plantadas são utilizadas com várias dimensões e contém irregularidades e defeitos que podem reduzir sua resistência. Em projetos de estruturas de madeira, as resistências devem ser conhecidas, para uma utilização mais econômica e segura. (KOLLMANN, 1968).

A madeira apresenta grande variabilidade de suas propriedades sendo, penalizada quando em competição com outros materiais estruturais que apresentam propriedades mecânicas mais uniformes. A classificação da madeira através do conhecimento das características de cada peça a ser usada, por ensaios não-destrutivos, é muito útil para equilibrar esta situação. Peças de qualidade superior poderiam ser escolhidas para uso crítico, enquanto as de baixa qualidade poderiam ser utilizadas em locais de menor requisição da resistência e rigidez. Avaliação não-destrutiva de materiais é, por definição, a ciência que identifica propriedades físicas ou mecânicas de uma peça de determinado material, sem alterar sua capacidade de uso (CALIL JUNIOR, MINÁ, 2003).

A avaliação não-destrutiva das estruturas (NDE) têm uma longa história de aplicação. Provas de carga em pontes datam de antes dos anos 1900. Provas de cargas em treliças, no entanto, são mais recentes. Ensaios não-destrutivos permitem avaliar cada peça individual, sem danos devido à sobrecarga (BODIG, JAYNE; 1993).

Algumas vantagens de ensaios não-destrutivos:

- Qualquer amostra pode ser examinada, incluindo elementos estruturais, partes de edificações, árvores em pé ou postes.

– Um corpo de prova pode ser ensaiado diversas vezes sem sofrer danos, isso permite que em cada ensaio, as variáveis sejam alteradas, estudando assim as influências nas propriedades físicas e mecânicas da madeira.

– Diferentes propriedades ensaiadas em uma simples amostra podem ser correlacionadas.

Com a variedade de técnicas não-destrutivas para avaliação da madeira, algumas, têm sido mais utilizadas por parte dos institutos de pesquisa. Como exemplos:

- Técnica da Flexão estática - consiste na medição estática do MOE - Módulo de elasticidade na flexão de um exemplar de madeira, sendo o princípio de funcionamento da máquina de classificação da madeira serrada. MSR - *Machine Stress Rating* (TARGA; BALLARIN; BIAGGIONI, 2005);

- Técnica da vibração transversal (*transverse vibration technique or resonance technique*) – É a análise da vibração de uma peça de madeira, com obtenção do módulo de elasticidade a partir da análise das frequências naturais de vibração (TARGA; BALLARIN; BIAGGIONI, 2005);

- Técnica da vibração longitudinal (*longitudinal vibration technique*) – É a análise da vibração de uma peça de madeira, com obtenção do módulo de elasticidade a partir da análise das frequências naturais de vibração no sentido longitudinal das fibras;

- Técnica das ondas de tensão (*stress wave method*) - consiste na aplicação de uma onda de tensão (impacto) no material e análise do fenômeno de propagação desse estímulo. A velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material são os principais parâmetros (TARGA; BALLARIN; BIAGGIONI, 2005);

- Técnica da propagação de ondas de ultra-som - Ondas acústicas (*Acoustic emission - AE*) e ultra-sônicas (*Acousto-ultrasonic emission - AU*), executada com as ondas acústicas de frequência superior a 20.000 Hz. Consiste na análise de propagação de uma onda e sua relação com as constantes elásticas da madeira. As ondas propagam-se com velocidades que dependem da direção de propagação e das constantes elásticas do material (NOGUEIRA, BALLARIN, 2003).

2.4 RELAÇÃO RESISTÊNCIA / MÓDULO DE ELASTICIDADE

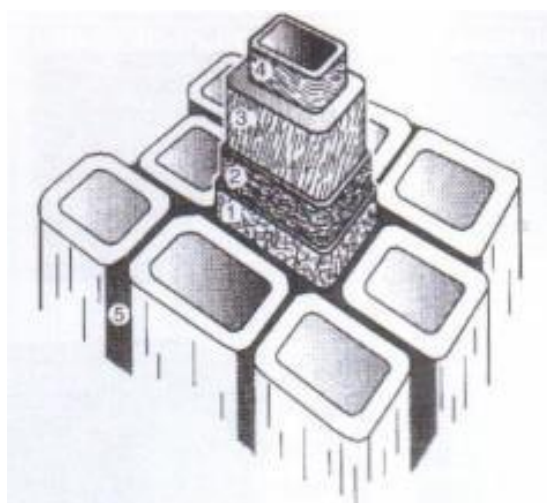
2.4.1 Propriedades da madeira livre de defeitos

Observando a microestrutura celular da madeira é razoável considerar que ela é constituída por pequenos tubos ligados (Figura 5). A largura do tubo, bem como sua espessura pode variar, mas as propriedades da parede celular são muito similares em todas as espécies de madeira. Isto em particular, se aplica à densidade da parede em torno de 1500 kg/m^3 (KOLLMANN, 1968). Isto significa que as propriedades do material madeira como o Módulo de Elasticidade (MOE), a resistência e a densidade ao longo da fibra estão fortemente relacionadas à espessura da parede celular. Isto explica porque a correlação entre propriedades das madeiras livres de defeitos são muito boas. Para pequenos corpos de prova de madeira, livres de defeitos da espécie *Picea Abies*, os coeficientes de determinação (R^2) determinados foram:

Resistência à flexão vs. MOE $\rightarrow R^2 = 0,76$

Resistência à flexão vs. Densidade $\rightarrow R^2 = 0,66$

MOE vs. Densidade $\rightarrow R^2 = 0,64$



1 – Parede Primária;

Parede Secundária:

2 – Camada Externa (S1);

3 – Camada Central (S2);

4 – Camada Interna (S3);

5 – Lamela média.

Figura 5 – Esquemático da estrutura microscópica da madeira.

2.4.2 Módulo de elasticidade (MOE)

Johansson (2003) estudou as relações entre diferentes propriedades da madeira e a resistência a tração para peças da espécie *Abeto* provenientes de oito diferentes localidades

da Noruega (E, G, H, I, K, L, M, S), com seção 40 x 145 mm.. A correlação R^2 entre o módulo de elasticidade e a resistência da madeira variaram de 0,51 à 0,73. Os melhores valores foram encontrados para ensaios de flexão com pequeno vão. Valores inferiores de correlação foram encontrados para a densidade e para a espessura dos anéis de crescimento, o coeficiente de correlação foi independente a origem da madeira, ver Tabela (6).

Tabela 6 – Relação entre resistência e o módulo de elasticidade da espécie Abeto da Noruega 40x145 mm expresso em coeficiente de determinação (R^2) (Johansson et al., 2003)

Serraria	Tração		Flexão	
	N	R^2	N	R^2
E	149	0,65	50	0,73
G	150	0,70		
H	150	0,62		
I	149	0,51		
K	152	0,69	50	0,60
L	153	0,68	50	0,54
M	139	0,66		
S	154	0,63	56	0,63

No MOE para a madeira estrutural as deformações na flexão são devidas à contribuição de todo o comprimento da peça. Além disso, o posicionamento dos defeitos naturais na seção também tem importância fundamental. Os nós reduzem os valores do módulo de elasticidade, pois interferem na inclinação da grã da região próxima, reduzindo o módulo de elasticidade longitudinal (JOHANSSONN, 2003).

2.4.3 Ensaios de peças em dimensões estruturais

Os dados obtidos em ensaios em corpos de prova pequenos, livres de defeitos não representam exatamente os valores de resistência de peças com dimensões estruturais. São necessários ensaios em peças de dimensões similares as estruturais, pois fornecem dados de propriedades com a consideração de defeitos reais e usuais do material disponível no mercado. As normas norte americanas ASTM D198-76, e posteriormente a ASTM D4761, detalham os procedimentos de ensaio para madeira serrada na flexão com dimensões estruturais. Usualmente, cargas de três ou quatro pontos são aplicadas na maior ou menor inércia para medir a influência dos defeitos em vigas sujeitas à flexão. O carregamento em quatro pontos, com razão L/h entre 18 e 21, produz um momento constante, portanto não há tensão de cisalhamento na seção da viga entre as cargas (BODIG, 1993).

2.5 ENSAIO ESTÁTICO

2.5.1 Determinação das constantes elásticas por meio de ensaios estáticos

Segundo Kollmann (1968) para a determinação do módulo de elasticidade (MOE) predominam os ensaios de flexão. Para o ensaio de flexão estática com uma carga central a razão do vão pela espessura da viga (l/h) é de no mínimo 14:1 (este vão sofre influência do cisalhamento). O módulo de elasticidade pode ser calculado na região elástica linear da curva de força-deslocamento. A Equação (13) para calcular MOE é:

$$MOE = \frac{P \cdot l^3}{4 \cdot f \cdot b \cdot h^3} \quad (13)$$

Sendo:

P = Força aplicada (N)

f = Deslocamento (mm);

l = Vão livre (mm);

b = Largura da peça (mm);

h = Altura da peça (mm);

O valor obtido de MOE com este vão é menor que o real, uma vez que o deslocamento não é causado apenas pela deformação longitudinal, mas também pelo cisalhamento. A influência das tensões de cisalhamento pode ser negligenciada somente se $L/h \geq 18$. A razão entre o Módulo de Young (E) e o Módulo de cisalhamento (G) é um fator importante. Quando $E/G=17$, os valores do módulo de elasticidade, obtidos pela Equação (13) são mais baixos (9.5%, 8.8% e 4.8%), comparado aos ensaios na flexão, e valores de L/h entre 14, 15 e 20 respectivamente.

A influência da tensão de cisalhamento pode ser considerada pela Equação (14):

$$E = \frac{P \cdot l^3}{4 \cdot f \cdot b \cdot h^3} \cdot \left(1 + 1,2 \cdot \frac{E}{G} \cdot \frac{h^2}{l^2} \right) \quad (14)$$

Enquanto as medidas das deformações longitudinais e laterais (constantes elásticas: S_{11} , S_{22} e S_{33}) são facilmente obtidas, a determinação das deformações de

cisalhamento (constantes elásticas: S_{44} , S_{55} e S_{66}) é muito difícil para materiais anisotrópicos (KOLLMANN, 1968).

A norma americana ASTM D4761-02 estipula os valores da relação do vão entre os apoios e a altura da peça (L/h) entre 18 e 21. A força deve ser aplicada em dois pontos situados nos terços do vão entre os apoios, medindo-se a flecha no centro do vão. O MOE é determinado pela equação (15).

$$MOE = \frac{23 \cdot \Delta F \cdot L^3}{1296 \cdot \Delta V \cdot I} \quad (15)$$

Sendo:

MOE = Módulo de elasticidade estático (MPa);

ΔF = Incremento da força (N);

L = Vão entre os apoios da viga (mm);

ΔV = Incremento do deslocamento (mm);

I = Momento de inércia da seção transversal (mm^4);

Após as medições para determinar o MOE, as peças devem ser carregadas até a ruptura para a determinação da resistência à flexão (MOR), de acordo com a Equação (16):

$$MOR = \frac{F_{\text{máx}} \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (16)$$

Sendo:

MOR = Módulo de ruptura à flexão (MPa);

$F_{\text{máx}}$ = Força máxima aplicada (N);

L = Vão entre os apoios da viga (mm);

b = Largura da seção transversal da peça (mm);

h = Altura da seção transversal da peça (mm);

2.6 COMPORTAMENTO DINÂMICO DA MADEIRA

Adicionalmente aos métodos estáticos para determinar as constantes elásticas da madeira, existem métodos dinâmicos baseados em medições das frequências naturais.

Os ensaios de vibração possibilitam a determinação do módulo de elasticidade, da velocidade do som e das frequências naturais dos corpos de prova. Uma vantagem das medições dinâmicas é a curta duração do ensaio.

Tradicionalmente a parte da mecânica que estuda o movimento de corpos é subdividida em cinemática e dinâmica. A cinemática trata do movimento de partículas e corpos rígidos. A dinâmica, por outro lado, correlaciona movimento com fatores causais. Ambas são consideradas muito significantes para avaliar o comportamento mecânico da madeira. Bastões de baseball, coronhas de armas, dormentes de estradas de ferro, trilhos de segurança devem ser capazes de absorver e dissipar a energia de impacto. Materiais de embalagens absorvem energia, impedindo danos no seu conteúdo (BODIG, 1993).

Uma vibração mecânica ocorre quando um sistema é deslocado do equilíbrio estável. O sistema tende a retornar a posição inicial sob a ação de forças restauradoras, mas em geral atinge a posição original com certa velocidade, que o leva além desta posição. Em um sistema ideal, sem a presença de forças dissipativas, o sistema permaneceria em movimento oscilatório em torno da sua posição de equilíbrio (CALIL JUNIOR, MINÁ, 2003).

O período de vibração é o intervalo de tempo necessário para o sistema completar um ciclo inteiro de movimento. O número de ciclos por unidade de tempo é a frequência e a amplitude é o máximo deslocamento do sistema em relação à posição de equilíbrio; quando o movimento é mantido somente por forças restauradoras, diz-se que a vibração é livre; Quando o efeito do atrito pode ser desprezado, diz-se que a vibração é não-amortecida. Embora toda vibração seja amortecida, na maioria das estruturas reais a frequência de vibração observada é essencialmente igual à frequência natural de um sistema não amortecido. Na maioria das estruturas o coeficiente de amortecimento está entre 2 e 20%. (CALIL JUNIOR, MINÁ, 2003).

Vibrações em elementos de madeira são importantes em muitas aplicações. Estruturas de *wood-frame* estão em estado contínuo de movimento, em função da circulação de pessoas, cargas de vento, etc. Ondas sonoras de baixa energia podem definir as vibrações em seções inteiras de paredes e pisos. Dormentes de madeira são submetidos a uma vibração forçada à uma frequência devido ao tráfego ferroviário. A vibração também é utilizada em ensaios não-destrutivos (BODIG, 1993).

2.6.1 Tipos de vibração

Em geral, as vibrações mecânicas podem ser classificadas em três tipos: *flexional*, *axial* e *torcional* (Figura 6). Embora os tipos de deslocamento sejam diferentes para as três vibrações, todas podem ser derivadas a partir de um conjunto similar de conceitos básicos (BODIG, 1993).

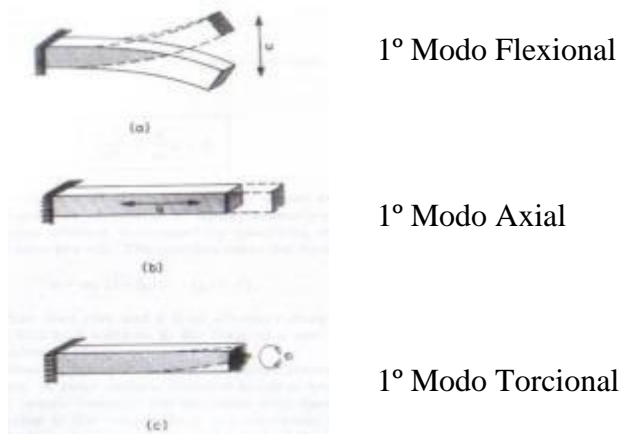


Figura 6 – Tipos de vibração mecânica: (a) flexional, (b) longitudinal, (c) torcional (BODIG, 1993).

Uma mola com a constante (k), um amortecedor com constante (r) e um corpo de massa (m), com o arranjo apresentado na Figura 7a, descreve a vibração de um sistema com um *grau de liberdade*. Um sistema com n graus de liberdade, necessita de n modelos semelhantes, como apresentado na Figura 7b. Independente do número de graus de liberdade, são chamados de *modelos de parâmetros concentrados*, pois se consideram todos elásticos, viscosos e as propriedades de massa agrupadas em um ponto simples. A matriz algébrica é extremamente útil descrevendo sistemas com dois ou mais graus de liberdade. (BODIG, 1993).

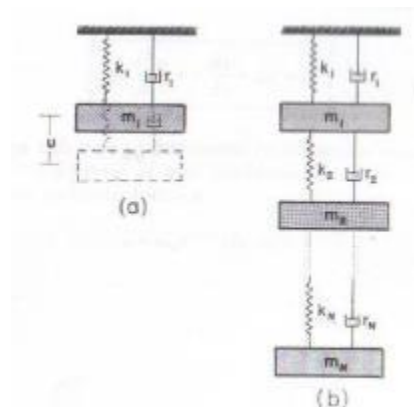


Figura 7 – Modos de vibração com vários graus de liberdade: (a) um grau, (b) n graus (BODIG, 1993).

2.6.2 Velocidade do som na madeira

Na madeira, a velocidade do som varia com a direção da fibra, pois o MOE transversal é muito menor que o MOE longitudinal (em torno de 1/20). A velocidade do som transversal às fibras é entre 1/5 e 1/3 do valor axial (KRETSCHMANN, 2010a).

Por exemplo, uma peça de madeira com módulo de elasticidade axial de 12400 MPa e densidade de 480kg/m³, possui uma velocidade de som na direção axial de cerca de 3800m/s. Na direção transversal, o módulo de elasticidade transversal é de cerca de 690 MPa e a velocidade do som é aproximadamente 890m/s (KRETSCHMANN, 2010a).

A velocidade do som diminui com o acréscimo da temperatura e do teor de umidade na proporção da influência destas variáveis no módulo de elasticidade e na densidade. A variabilidade na velocidade do som na madeira é diretamente relacionada ao módulo de elasticidade e da densidade (KRETSCHMANN, 2010a).

2.6.3 Atrito interno na madeira

Quando um material é deformado, uma energia mecânica é dissipada. O atrito interno é o termo usado para indicar o mecanismo que causa esta energia de dissipação.

O mecanismo de atrito interno na madeira é uma função complexa da temperatura e do teor de umidade. Existe um valor de umidade em que o atrito interno é mínimo, variando entre as espécies. Nos valores de umidade superiores ou inferiores a este mínimo, o atrito interno aumenta até o ponto de saturação das fibras. O valor do teor de umidade com atrito interno mínimo varia com a temperatura (KRETSCHMANN, 2010a).

Segundo estudado por Kretschmann (2010a), na temperatura ambiente de 23°C o atrito mínimo ocorre com teor de umidade em torno de 6%. À temperatura de -20°C isto ocorre no teor de umidade de 14% e na temperatura de 70°C o teor de umidade é de 4%. Em 90°C o mínimo não é bem definido e ocorre próximo da umidade zero.

O valor de atrito interno varia de 0,1 para madeira com altos teores de umidade e temperatura, para menos de 0,02 para madeira com altas temperaturas e baixo teor de umidade. Madeiras com baixa temperatura, independente do teor de umidade, tem um valor intermediário (KRETSCHMANN, 2010a).

2.6.4 Módulo de elasticidade determinado por vibrações ressonantes

A possibilidade de determinar o MOE da madeira estrutural utilizando ensaios dinâmicos já é discutida desde o início dos anos 1930 (HOFFMEYER, 1995). Os métodos tendem às aplicações práticas graças ao desenvolvimento das técnicas de medição associado aos ensaios dinâmicos e das transformadas rápidas de Fourier (FFT) (JOHANSSONN, 2003).

Para a madeira livre de defeitos o MOE dinâmico tem uma forte correlação com o valor do MOE estático e correlações mais fracas em relação à resistência à flexão (MOR). Wormuth (1993) obteve o coeficiente de correlação linear (R^2) de 0,85 entre o MOE dinâmico e o MOE estático para espécies de Abeto da Noruega de dimensões 10x10x200mm. Larsson (1997) ensaiou Abetos da Noruega com seções 38x89mm, 38x140mm e 38x184mm e obteve valores de R^2 entre 0,68 e 0,91. Ele também estudou a correlação entre o MOE dinâmico e a resistência à flexão (MOR) na maior inércia e encontrou valores de R^2 entre 0,39 e 0,61. Sauter (1992) estudou peças da Espécie Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) e obteve o $R^2 = 0,71$ para o MOE dinâmico na flexão em comparação com a resistência à flexão (MOR).

Uma desvantagem na utilização de vibrações ressonantes para estimar as propriedades de resistência e rigidez da madeira em relação à máquinas de classificação por flexão (MSR) é a obtenção apenas de um valor para o MOE da peça, enquanto que no outro caso, são avaliados valores de MOE em pequenos trechos (HOFFMEYER, 1995).

2.7 ENSAIOS POR VIBRAÇÃO

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) pode ser medido utilizando métodos de vibração. A maioria dos ensaios é restrito às vibrações longitudinais ou transversais. A maioria dos dados reportados indica que o módulo de elasticidade dinâmico, E_d , é maior que o módulo de elasticidade na flexão estática, MOE . É sugerido que essa diferença pode ser devida à velocidade de aplicação da carga. Entretanto, outros fenômenos podem ser responsáveis. O autor concluiu neste trabalho que os valores de módulo de elasticidade dinâmico, E_d , para a madeira são entre 5% e 15% maiores que o MOE na flexão estática. (BODIG, 1993).

Devido à natureza da vibração para ensaios de flexão, o módulo de elasticidade obtido representa um valor médio da influência para a peça inteira.

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) pode ser determinado utilizando medidas das ondas de tensão longitudinal. A propagação das ondas de tensão longitudinal fornece os dados necessários para calcular E_d (Equação (17)) ao longo do eixo do elemento.

$$E_d = k \cdot c^2 \cdot \rho \quad (17)$$

Sendo:

c = Velocidade da onda de tensão; (m/s)

ρ = Massa específica (kg/m³)

k = Constante, função das unidades de medida.

2.8 VIBRAÇÃO LONGITUDINAL

As equações de vibração de materiais contínuos se caracterizam por muitos graus de liberdade. Cada elemento de volume têm componentes de movimento ao longo de um ou dos três eixos de coordenadas ortogonais. Vibrações deste tipo requerem a derivação de equações de movimento para elementos de volume diferencial. Sequencialmente, a relação é integrada para o corpo inteiro. A abordagem destes *parâmetros de distribuição* contrasta com a análise anterior de *parâmetros concentrados*. As propriedades dos materiais são distribuídas através do corpo, seguindo uma análise mais realista, mas também mais complexa (BODIG, 1993).

Um exemplo simples de análise é do movimento em uma barra de qualquer seção transversal, mas de comprimento uniforme. A dimensão da seção transversal do elemento estrutural deve ser pequena em relação ao comprimento, de modo que o comprimento de onda de vibração longitudinal é grande em relação às dimensões da seção transversal. Esta restrição limita os níveis de vibração, e como consequência as equações são simplificadas. Além disso, assume-se que o material é homogêneo e contínuo, e que a seção plana antes da vibração, continua plana durante a vibração (BODIG, 1993).

Como mostrado na figura 8, na seção transversal C uma força P é aplicada em uma barra de comprimento l . Em D a força é $P + (\partial P / \partial x) dx$. Como resultado da força, a seção transversal C será deslocada a uma distância u para um novo local C' (BODIG, 1993).

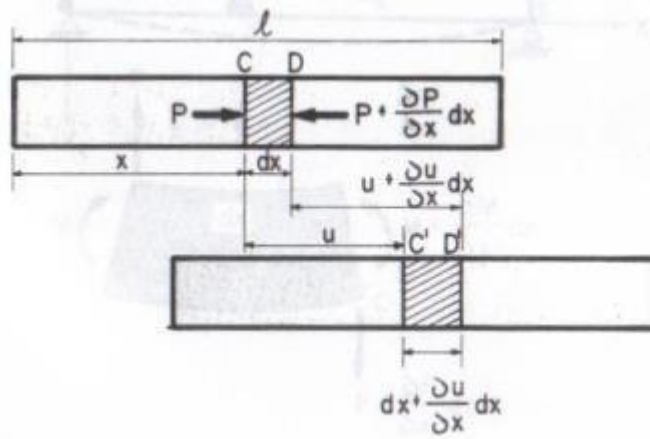


Figura 8 – Deslocamento e alongamento de uma barra na vibração longitudinal.

Similarmente, o deslocamento de D para D' é dado por $u + (\partial u / \partial x) dx$. Mas pelas Leis de Hooke sabe-se que pela Equação (18):

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \gamma_1 = \frac{P}{A \cdot E} \quad (18)$$

A força P não é constante, com mudança de localização. Este fato pode ser expresso pela diferenciação da Equação (16), o que resulta na Equação (19):

$$A \cdot E \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial P}{\partial x} \quad (19)$$

A ação da força no elemento diferencial da barra $(\partial P / \partial x) dx$ é a força resultante, e de acordo com as Leis de Newton, pela Equação (20), o movimento deve ser igual ao produto da massa e aceleração:

$$\frac{\partial P}{\partial x} dx = m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (20)$$

Onde ρ é a densidade de massa da barra (g/cm^3 ou kg/m^3) e $A dx$ o volume diferencial do elemento. O produto $\rho \cdot A dx$ é a massa do volume diferencial do elemento. Substituindo $(\partial P / \partial x)$ da Equação (19) com a Equação (20), temos a Equação (21):

$$A \cdot E \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx = \rho \cdot A \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx \quad (21)$$

Que simplificada é apresentada na Equação (22):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (22)$$

Assumindo que as variáveis são separadas, a solução geral toma a forma da Equação (23):

$$u = \left[C_1 \cdot \text{sen} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \cdot x \right) + C_2 \cdot \text{cos} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \cdot x \right) \right] \cdot [C_3 \cdot \text{sen} \omega t + C_4 \cdot \text{cos} \omega t] \quad (23)$$

A fim de avaliar as quatro constantes C_i , são necessárias quatro equações auxiliares que representem várias condições de contorno. A forma da Equação (23) diferencial sugere a seguinte solução, mostrada na Equação (24):

$$u = u_0 \cdot \text{sen}(\omega_0 \cdot t - \phi) \quad (24)$$

Substituindo as duas derivadas de segunda ordem na Equação (24) e simplificando, tem-se a Equação (25):

$$\omega_0 = c = \sqrt{E/\rho} \quad (25)$$

Isto é, a velocidade de propagação da onda senoidal na direção longitudinal da barra (ω_0) é determinada pela razão do módulo de elasticidade (E) pela massa específica (ρ).

Independentemente do modo de vibração, a ressonância de um número finito de ondas, deve ocupar o comprimento da barra. Conseqüentemente, não ocorrem deslocamentos na extremidade da barra. Para o primeiro modo de vibração ($n = 1$), o comprimento de onda λ é duas vezes o comprimento da barra. A Equação geral (26) relativa ao comprimento de onda para o comprimento da barra é:

$$\lambda = \frac{2 \cdot l}{n} \quad (26)$$

O comprimento de onda é a razão da velocidade da onda (c) pela frequência de vibração (f), substituindo nas Equações (25) e (26), como segue na Equação (27):

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{f} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (27)$$

Combinando as Equações (26) e (27), leva a Equação (28) para a frequência de vibração, dada:

$$f = \frac{n}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (28)$$

Rearranjando a expressão para o módulo de elasticidade, temos a Equação (29):

$$E = E_d = 4 \cdot l^2 \cdot f^2 \cdot \frac{\rho}{n^2} \quad (29)$$

Assim, para a determinação do Módulo de Elasticidade dinâmico (E_d) em MPa ou N/mm^2 , para uma barra submetida à vibração longitudinal, com as duas extremidades livres, no primeiro modo de vibração ($n = 1$), e substituindo na Equação (29) a densidade (ρ) pela relação peso por volume (m/V), a Equação (30):

$$E_d = \frac{400 \cdot l^2 \cdot f^2 \cdot m}{V} \quad (30)$$

f = Frequência de ressonância fundamental (kHz);

m = massa (g);

l = Vão (mm);

V = Volume (mm^3).

2.9 BROOKHUIS MICROELECTRONICS TIMBER GRADER – MTG

A obtenção do módulo de elasticidade dinâmico a partir da frequência natural, conforme a Equação (30), é a base de formulação utilizada pelo aparelho portátil de classificação mecânica *BrookHuis Microelectronics Timber Grader (MTG)*. Esse equipamento utiliza uma curva de correção para modificar o valor dinâmico obtido, em função da espécie ensaiada, para apresentar os valores estimados do Módulo de Elasticidade (MOE), utilizados para enquadramento de classes nas normas estruturais.

O equipamento BrookHuis Microelectronics Timber Grader é um classificador mecânico para peças de madeira de uso estrutural com medição do módulo de elasticidade por meio de ondas de tensão longitudinal. O aparelho é portátil, com bateria recarregável e se comunica com o computador por *Bluetooth*. A face frontal do dispositivo portátil apresenta um ativador interno de impacto (*Stress wave activator*) e o sensor de leitura do sinal de retorno, conforme a Figura 9. (ROZEMA, 2013)



Figura 9 – MTG dispositivo portátil.



Figura 10 – Conjunto do Equipamento portátil MTG.

O conjunto do equipamento MTG (Figura 10) inclui:

- Medidor portátil com microprocessador e um software com menus;
- Software do programa “Timber Grader” para controlar o medidor MTG, e para a armazenagem e criação de relatórios no PC/laptop;
- Leitura do Módulo de Elasticidade (E) em N/mm²;
- Barra acrílica para calibração;
- Adaptador bluetooth para a comunicação com o PC/laptop;

- Manual de instalação e uso;
- Aprovação CE e FCC do equipamento;

2.9.1 Ensaio com o MTG

No início do ensaio devem ser informados previamente ao software do MTG, características do corpo de prova como: dimensões, teor de umidade, temperatura e massa. O equipamento portátil deve ser levemente pressionado na extremidade da seção transversal da peça de madeira. Ao pressionar o botão central amarelo, o ativador mecânico interno impacta o corpo de prova, então o sensor de onda de tensão grava o sinal de retorno da vibração. O software converte esse sinal em resultados (Frequência natural, Módulo de Elasticidade, classe de resistência, etc.). Os resultados são transferidos a um PC / laptop por Bluetooth. Esses resultados podem ser “traduzidos” em um dos muitos padrões internacionais usados para classificação mecânica da madeira. Durante a ação o equipamento portátil não pode ser movimentado. (ROZEMA, 2013).

Pode ser medido o MOE de uma peça por vez. A viga deve estar livre de vibrações da fundação que não devem ser transmitidas à madeira. As peças podem estar gradeadas, separadas por tabiques ou livres no momento do ensaio. (ROZEMA, 2013).

2.9.2 Especificações técnicas

O propósito do MTG é estimar o Módulo de elasticidade da madeira:

- Com seção transversal retangular serrada ou aplainada;
- Com dimensões dentro das especificadas na tabela 7;
- Madeira tratada ou não contra organismos xilófagos.

O MTG não foi projetado para medir a madeira com as seguintes características:

- Madeira tratada com retardantes de fogo;
- Madeira laminada colada;
- Madeira com ligações “finger joint”.

Rozema (2013) estimou a classe de resistência de acordo com as normas europeias, baseadas em 3000 ensaios não destrutivos para as seguintes espécies:

Coníferas: Douglas fir, Larch, Pinus radiata, Spruce.

Dicotiledôneas: Angelim Vermelho, Azobe, Bangkirai, Basralocus, Beech, Bilinga, Chestnut, Cumaru, Cupiaba, Denya, Greenheart, Karri, Limbali, Louro Itauba, Massaranduba, Muiracatiara, Mukulungu, Niove, Oak, Piquia, Piquia Marfim, Robinia, Sapucaia, Sucupira Amarela, Sucupira Vermelha, Tali, Uchi Torrado, Vitex.

Os ensaios para enquadramento em classes de resistência foram adequados à norma EN 14081-4 (ROZEMA, 2013).

MTG com impacto por ativador interno

O ativador mecânico interno do equipamento aplica um impulso na direção axial da peça de madeira com uma quantidade fixa de energia (Figura 11). Devido à força limitada, as peças ensaiadas com o ativador interno estão limitadas as dimensões da Tabela 7. (ROZEMA, 2013).



Figura 11 – Medições do módulo de elasticidade com o MTG utilizando ativador interno.

MTG com impacto externo

Os ativadores de onda externos ao equipamento são definidos como martelos com massa determinada de 100g, 200g ou 300g que podem ser utilizados como ativador mecânico, dependendo da rugosidade de acabamento da extremidade do corpo de prova, bem como a seção transversal e o comprimento (Figura 12). A força do impacto com o martelo não interfere na medida do módulo de elasticidade. Os limites de dimensões dos corpos de prova para utilização de ativadores externos estão na Tabela 7. (ROZEMA, 2013).



Figura 12 – Medições do MOE com o MTG utilizando ativador externo.

Tabela 7 – Limites das características das peças estruturais para ensaio com o MTG.

Características das Madeiras	Com Ativador Interno	Com ativador Externo
Espessura da peça	Entre 15 e 115 mm	Entre 15 e 300 mm
Largura da peça	Entre 50 e 250 mm	Entre 50 e 400 mm
Comprimento da peça	Entre 1.500 e 8.000 mm	Entre 1.500 e 20.000mm
Peso da peça		Entre 1 e 500 kg
Teor de umidade		Entre 2% e 50%
Temperatura da madeira		Entre 0 e 50°C
Massa específica Dicotiledôneas		Entre 400 e 1400 kg/m ³
Massa específica Coníferas		Entre 300 e 800 kg/m ³

A Tabela 8 apresenta as tolerâncias das informações de entrada no software para manter a precisão da leitura.

Tabela 8 – Tolerâncias dos dados de entrada para o Software MTG

Características	Tolerâncias
Comprimento da madeira	+/- 1%
Espessura da madeira	+/- 1 mm
Largura da madeira	+/- 1,5 mm
Peso da madeira	+/- 1%
Teor de umidade da madeira até o PSF	+/- 5% Teor de Umidade

2.10 TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS SOBRE OBTENÇÃO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA MADEIRA

Carreira (2003) classificou visualmente 600 peças de *Pinus sp.*, com densidade média de 520 kgf/m³, em apenas dois dias empregando duas pessoas. As peças foram separadas em quatro grupos: Classe de Seleção Estrutural com alta densidade (SS-D), com baixa densidade (SS-ND), Classe secundária densa (N°2-D) e não-densa (N°2-ND). As madeiras foram ensaiadas na flexão estática, na vibração transversal e na máquina MSR. Para espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* com seção transversal de 3,5cm x 12,5cm, a Tabela 9 apresenta os valores característicos de resistência à flexão (*MORk*) e valores médios do Módulo de Elasticidade (*MOEm*) encontrados para o lote ensaiado e também os valores destas características estabelecidos pelo SPIB (*Southern Pine Inspection Bureau*):

Tabela 9 – Propriedades mecânicas de peças estruturais de *Pinus sp.* (CARREIRA, 2003)

Classe	Amostra estudada		Southern Pine Norte Americano	
	MORk (MPa)	MOEm (MPa)	MORk (MPa)	MOEm (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

Carreira (2003) concluiu que para o MOR a presença de defeitos é muito mais significativa na redução da resistência do que a diferença de densidade, com correlação entre o MOR e o MOE na flexão estática de $R^2 = 0,65$. A estimativa do *E* por vibração transversal apresentou correlação com o MOE na flexão estática de $R^2 = 0,98$. O *E* obtido pela máquina MSR apresentou correlação de $R = 0,92$ para o MOE na flexão estática, porém ocorreu aumento da dispersão com o aumento da densidade. A correlação entre a densidade aparente à 12% e o módulo de elasticidade na compressão foi de $R^2 = 0,47$.

Freitas (2004) classificou peças estruturais de *Pinus spp* pela MSR (*Machine Stress rate*) e constatou que a velocidade da peça não é um parâmetro que influencia nos valores do MOE dinâmico. Porém a intensidade da carga aplicada influencia no MOE dinâmico, observando bons valores de coeficiente de regressão (r^2) com o MOE na flexão. O autor verificou que é indispensável a classificação visual juntamente com a classificação mecânica.

Segundinho (2012) avaliou a eficácia de métodos de ensaio baseados nas frequências naturais de vibração, com utilização do aparelho *Sonelastic® Stand Alone*, em vigas de *Pinus oocarpa*, sendo 14 peças de dimensões (45x90x2300 mm), 30 peças de dimensões (40x240x2010 mm) e 30 peças de dimensões (40x240x3050 mm), com os resultados apresentados na Tabela 10. O método da frequência natural por vibração longitudinal apresentou resultados confiáveis e um método prático, pois não há necessidade de suportes específicos ou calibrações prévias para a obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira, reduzindo o tempo de execução e favorecendo o ensaio de grande quantidade de peças. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos pelo autor, de MOE na flexão estática e suas correlações com o E na vibração longitudinal para as diferentes dimensões para a espécie de *Pinus oocarpa*.

Tabela 10 – Propriedades mecânicas de peças estruturais de *Pinus oocarpa*. (SEGUNDINHO, 2012)

<i>Pinus oocarpa</i> Dimensões	MOE vibração longitudinal (MPa)	MOE estático (MPa)	Correlação entre MOE v.l. e est.	Densidade Aparente (g/cm ³)
45 x 90 x 2300 mm	10455	9443	0,98	0,531
40 x 240 x 2010 mm	14809	13118	0,88	0,612
40 x 240 x 3050 mm	14142	13185	0,89	0,602

O método de vibração longitudinal apresentou valores fortemente correlacionados. Comparando os resultados entre os métodos, utilizando a porcentagem média de variação em relação ao módulo de elasticidade estático, o módulo de elasticidade na vibração longitudinal apresentou valores sempre superiores na ordem de 11,08%, 13,73%, 10,62% respectivamente as seções ensaiadas (SEGUNDINHO, 2012).

Foram também comparadas a velocidade da onda de tensão longitudinal de árvores em pé e de madeira serrada. Os resultados apresentados em valores médios das velocidades de onda de tensão aplicados longitudinalmente através do tronco da árvore foram 3771.5 m/s e para as tábuas foram 4362.8 m/s. Os resultados do teste-T indicaram que os valores médios da amostragem foram significativamente diferentes entre si em um nível de confiança de 95%, e velocidade de onda de tensão ao quadrado teve uma correlação com o MOE estático de ($R^2 = 0,72$) e com o MOR de ($R^2 = 0,60$). A razão principal para estas diferenças é o teor de umidade, sendo a umidade das tábuas menor que o ponto de saturação das fibras, enquanto nas árvores o teor de umidade é maior. Os valores de velocidade em condições com baixo teor de umidade são altamente comparáveis com as madeiras em condição saturada (BUCUR, 2006). A velocidade em condições de umidade abaixo do ponto

de saturação das fibras é sempre maior que a velocidade em madeira com umidade acima do PSF (HORACEK, TIPPNER; 2012).

Horacek e Tippner (2012) avaliaram as propriedades da madeira da espécie *Pinus sylvestris* L. correlacionando o módulo de elasticidade dinâmico (*Ed*) estimado pela técnica de onda de tensão longitudinal e propriedades de flexão estática, módulo de elasticidade na flexão estática (MOE) e resistência à flexão (MOR). Os resultados obtidos para corpos de prova de massa específica entre 370kgf/m³ e 543kgf/m³, correlacionaram a densidade com as propriedades de flexão estática (MOE e MOR), O coeficiente de correlação foi 0,73 para o MOE e 0,50 para o MOR. A estimativa do *Ed* com a técnica de ondas de tensão apresentou valores maiores que o do MOE estático na flexão, mas ambos foram altamente correlacionados, o coeficiente de correlação entre o *Ed* e o MOE estático foi ($R^2=0,96$) e com o MOR foi ($R^2=0,74$).

Segundo Oliveira, Campos e Sales (2002) os valores de MOE dinâmico são mais altos que os valores para MOE estático, com resultados obtidos dos testes dinâmicos 17% maiores que os estáticos. Halabe et al. (1997) explica a razão das diferenças entre o *Ed* e o MOE na flexão estática para a madeira como um material de alto amortecimento e viscoelástico. Para uma amostra de madeira vibrando, a força de restauração elástica é proporcional ao deslocamento e a força dissipativa (amortecimento) é proporcional à velocidade. Portanto, quando uma força é aplicada por um tempo muito curto, como nos ensaios dinâmicos, o material se comporta como um sólido elástico, enquanto para cargas de maior duração, como no ensaio estático, o comportamento é como um líquido viscoso.

Os produtores de madeira serrada da costa da Columbia Britânica investigaram os sistemas mais adequados de classificação mecânica de madeiras com obtenção dos resultados do módulo de elasticidade (MOE) e sua correlação com métodos alternativos. Para a vibração longitudinal foram utilizados o MTG e o MiCROTEC Viscan, para a vibração transversal a Metriguard Modelo E340 e para os métodos estáticos biapoiados de acordo com a ASTM D198 e ASTM D4761 (BARRETT, 2008).

O módulo de elasticidade (E_{340}) obtido pelo ensaio de vibração transversal com o equipamento Metriguard *E340* foi comparado com o módulo de elasticidade pelo ensaio estático para longos vãos de acordo com a ASTM D4761 (E_{4761}) em peças da espécie *Spruce-Pine-Fir* com dimensões 38x89mm, vão de 4,28m e carga aplicada no centro do vão. Houve uma forte relação ($E_{4761} = 0,991.E_{340}$) e alto coeficiente de correlação ($R^2 = 0,981$) entre E_{4761} e E_{340} . Baseado nestes ensaios, os resultados de vibração transversal da Metriguard E340

foram utilizados como referência nos estudos dos módulos de elasticidade citados no artigo deste autor (BARRETT, 2008).

Os módulos de elasticidade medidos com a Metriguard E120 E-Computer foram confirmados como essencialmente os mesmos do MOE determinado nos ensaios de flexão estática biapoiada. Esses MOEs são livres da contribuição do cisalhamento. O MOE também foi medido utilizando dois sistemas de onda de tensão longitudinal, o MiCROTEC Viscan Stress Grader e o Brookhuis Timber Grader (MTG), com os valores de MOE medido com esses instrumentos em média 2% maiores que o E-Computer e da flexão estática. Pode-se concluir que os valores de MOE obtidos pelos ensaios não-destrutivos do E-Computer, Microtec e MTG são similares (BARRETT, 2008).

Os valores de MOE, E_{340} , E_{VISCAN} , E_{198} e MOR foram medidos em corpos de prova com 3 diferentes seções transversais (45x90, 90x90 e 105x105mm) de *Cicuta* canadense classificada visualmente. As linhas de regressão traçadas pelos dados indicam em média que E_{VISCAN} é aproximadamente 2,2% maior que E_{340} (BARRETT, 2008).

Nas relações entre E_{MTG} e E_{340} , medidas para as amostras de *Cicuta* com 90x90mm, as linhas de regressão traçadas pelos dados indicam que o E_{MTG} e E_{340} são essencialmente equivalentes. Os valores estáticos do E_{198} foram de 6% à 9% menores que o E_{340} , E_{VISCAN} e E_{MTG} . Em função do E_{198} ser ensaiado em vãos pequenos, inclui-se nestes resultados a interferência da flexão por cisalhamento, enquanto os demais testes têm valores essencialmente livres de cisalhamento no MOE. (BARRETT, 2008)

As correlações para as regressões, relacionando a resistência à flexão (MOR) com os Módulos de Elasticidade E_{340} , E_{VISCAN} e E_{MTG} são aproximados ($R^2=0,50$ à $0,54$). A correlação entre os valores de MOR e o E_{198} foi de $R^2=0,67$. (BARRETT, 2008).

O valores de MOE obtidos nos ensaios destrutivos, pela ASTM D198, no estado limite último, foram menores que o MOE em ensaios dinâmicos não-destrutivos. Estes valores de MOE incluem deformação por cisalhamento e conseqüentemente diminuem o valor do MOE o que é consistente com as predições para a viga teórica e outros estudos experimentais (BARRETT, 2008).

Ensaio desenvolvidos por Halabe et al. (1997), com técnicas de ensaio não-destrutivo de vibração transversal e de ondas de tensão longitudinal testaram sua acurácia na avaliação da qualidade da madeira estrutural. O artigo apresenta os resultados de um programa experimental, projetado para examinar as correlações entre as características das ondas de tensão e vibração transversal de madeira com teor de umidade acima do PSF (entre 25% e 30%) e madeira com teor de umidade de 12% da espécie *Southern Pine* (*Pinus sp.*) e o

Módulo de Elasticidade (MOE) e resistência (MOR) na flexão estática em dimensões estruturais.

Halabe et al. (1997) reporta o coeficiente de determinação (R^2) entre o MOE na flexão estática na flexão e a velocidade de onda de tensão foi $R^2=0,61$ para madeira acima do PSF e $R^2=0,45$ para madeira 12% de teor de umidade para *Southern Pine*.

Os resultados de regressão do MOE na flexão estática longitudinal (E_e) versus o MOE por onda de tensão longitudinal (E_t) apresentaram coeficientes de determinação $R^2=0,73$ para a madeira acima do PSF e $R^2=0,74$ para madeira com teor de umidade de 12%. Isso indica que 74% do comportamento observado foi explicado pelo modelo de regressão (HALABE, 1997).

2.11 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As técnicas padronizadas de ensaio estático para obtenção do módulo de elasticidade são apresentadas pela norma brasileira NBR 7190/1997 e por normas internacionais como a ASTM D4761 (2002) e ASTM D198 (1976), com enfoque no ensaio de peças com dimensões estruturais, as quais podem ser correlacionadas com as dimensões e localizações dos defeitos naturais ou de processamento na madeira serrada. Este mapeamento de defeitos pode seguir os valores especificados pelo *SPIB*.

Os trabalhos apresentados na literatura reforçam a viabilidade dos ensaios para obtenção do módulo de elasticidade por meios dinâmicos como vibração transversal e ondas de tensão longitudinal com correlações altas nas estimativas do módulo de elasticidade estático da madeira. Os valores do MOE dinâmico são superiores aos valores do MOE estático. Também destaca-se a importância da verificação dos valores de teor de umidade, densidade e também da realização de classificação visual dos defeitos na madeira para complementar a acurácia dos resultados dos ensaios dinâmicos em comparação com os ensaios estáticos normatizados.

A validação dos aparelhos que utilizam métodos dinâmicos de ensaio para o módulo de elasticidade são regulados pela norma europeia EN14081 (2010), sendo que o equipamento de ensaio BrookHuis Microeletronics Timber Grader (MTG) utilizado neste trabalho recebeu esta certificação.

O aparelho de ensaio MTG calcula o valor do módulo de elasticidade dinâmico, E_{DIN} , através da frequência natural na vibração longitudinal e ajusta o valor, para cada

espécie, em um banco de dados interno do software para estimar o Módulo de Elasticidade, E_{MTG} , das peças de madeira. Existe a necessidade de efetuar ensaios complementares com a utilização do equipamento de vibração longitudinal MTG em espécies brasileiras para calibração das curvas de correção da regressão, que determinam o módulo de elasticidade. Em função da origem e das condições ambientais diferentes entre o Brasil e a Europa ocorrem variações nas propriedades físicas e mecânicas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa do trabalho foi a realização de uma classificação visual no lote de madeira da espécie *Pinus elliottii*, provenientes da região sudoeste do Estado de São Paulo.

Após a classificação visual, foram realizados os ensaios de vibração longitudinal por ondas de tensão, com determinação da frequência natural da madeira, no primeiro modo longitudinal e o módulo de elasticidade (E_{MTG}) estimado pelo equipamento portátil, e também para a obtenção da frequência natural da peça para cálculo do módulo de elasticidade dinâmico (E_{DIN}). Em seguida foram realizados os ensaios de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia, sendo determinados os valores de MOE e MOR.

Todos os ensaios e procedimentos foram realizados no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP).

3.1 MATERIAIS

Foi utilizado nesta pesquisa um lote de 260 peças de madeira da espécie *Pinus elliottii*, adquirido na empresa Sguário Madeiras, sendo proveniente da região Sudoeste do Estado de São Paulo, com dimensões nominais de 45mm x 105mm x 2500mm. A Figura (13) mostra o referido lote. As peças foram previamente secas em estufa.



Figura 13 – Lote de 260 peças de 45x105x2500mm de *Pinus elliottii*.

3.2 MÉTODOS

A seguir está apresentado um detalhamento dos procedimentos utilizados na obtenção das propriedades das peças de madeira.

3.2.1 Determinação do teor de umidade

Para realização dos ensaios de foram determinados os teores de umidade de cada peça ensaiada, com o valor médio entre três medidas ao longo da peça, a fim de realizar as correções dos valores dos resultados para a condição padrão de referência de umidade à 12%. As peças foram previamente secas em estufa na indústria e o valor de umidade médio foi de 9,4%. Para a determinação do teor de umidade de cada peça foi utilizado medidor de umidade da madeira por contato que funciona com geração de campo elétrico de alta frequência, modelo M52 da marca Marrari (Figura 14).

Os valores da densidade aparente e das propriedades de MOE das peças foram corrigidos para a condição padrão de referência, a 12% de umidade de acordo com a NBR7190.



Figura 14 – Medidor de umidade por contato M52 Marrari.

3.2.2 Classificação Visual

As peças foram previamente classificadas visualmente de acordo com o as regras do *SPIB* (*Southern Pine Inspection Bureau*), para determinar o efeito dos defeitos naturais e de processamento que possam afetar suas propriedades mecânicas. As peças com deformações excessivas, esmoados e bolsas de resina, foram eliminadas, restando 213 peças.

Foram limitados os diâmetros dos nós no centro da face larga, nós na borda da face larga, nós na face estreita, inclinação das fibras, presença de fendas, rachas, esmoados e bolsas de resina.

As peças foram distribuídas em 4 classes, SS (Select Structural), S1, S2 e S3, em função do tamanho dos defeitos.

Para as peças de *Pinus elliottii* de seção transversal 45x105mm e comprimento 2500 mm foram adotados os limites conforme a Tabela 11.

Tabela 11 – Limitações dos defeitos em cada classe para peças com seção transversal de 45x105mm.

Classe	Nós		Inclinação das Fibras	Rachas Anelares		Fendas
	Face estreita	Face Larga		Passante	Superficial	
SS	9 mm	37 mm	8%	105 mm	600 mm	105 mm
S1	11 mm	47 mm	10%	105 mm	600 mm	105 mm
S2	15 mm	53 mm	12,5%	157 mm	625 mm	157 mm
S3	23 mm	79 mm	25%	416 mm	-	416 mm

Para auxílio na medição dos defeitos foi elaborada uma régua com as marcações das dimensões limite para a seção estudada, conforme as Figuras 15 e 16.



Figura 15 – Modelo da régua com os limites de dimensões dos nós.

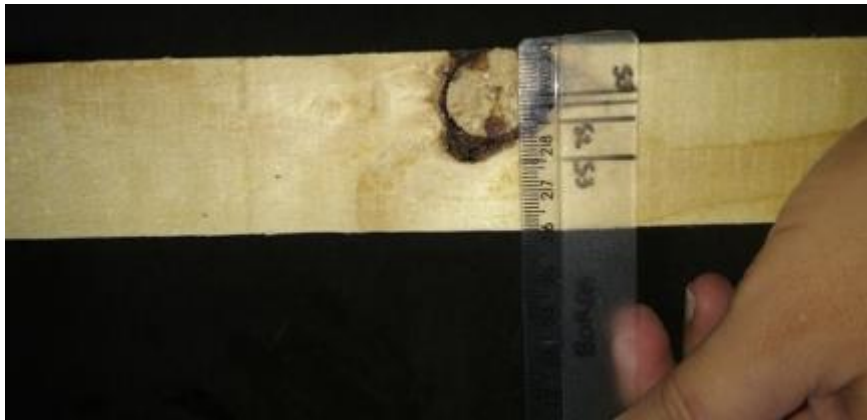


Figura 16 – Medição de um nó de borda com a régua adaptada.

3.2.3 Módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo MTG (E_{MTG})

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido pelo equipamento *BrookHuis Micro-Eletronic Timber Grader (MTG)* seguindo os procedimentos apontados no item 2.9. (Figuras 17 e 18).



Figura 17 – Computador com bluetooth e software de aquisição de dados.



Figura 18 – Posicionamento do MTG para obtenção do MOE estimado e display do aparelho.

O aparelho é calibrado por uma barra de acrílico, que acompanha o kit, independente da espécie estudada, os dados são armazenados no computador e podem ser exportados para análises externas ao software. Estes arquivos armazenam todos os dados inseridos e os resultados dos ensaios.

3.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico calculado pela frequência natural (E_{DIN})

Os valores da frequência natural do primeiro modo longitudinal, também foram utilizados para calcular o valor do Módulo de Elasticidade dinâmico das peças, para serem comparados com os valores de módulo de elasticidade (E_{MTG}) corrigidos pelo software do MTG, verificando as correções do software para estimativa do MOE estático. O módulo de elasticidade dinâmico (E_{DIN}) foi determinado de acordo com a Equação (30), conforme apresentado na revisão bibliográfica, no item 2.8:

3.2.5 Flexão estática

Para os testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia. Foram realizados os procedimentos de ensaio de acordo com a ASTM D4761-02, sendo determinado o Módulo de Elasticidade (MOE) e a resistência (MOR) na flexão estática, com as peças na pior posição dos defeitos naturais, em função da classificação visual anterior.



Figura 19 – Detalhe do apoio rotulado e do sistema de aplicação da carga.



Figura 20 – Montagem do ensaio estático para obtenção do MOE e MOR

Conforme apresentado no item 2.5, neste ensaio as peças foram apoiadas em suportes rotulados com uma relação (L/h) de 18, com vão (L) de 1890mm. A força foi aplicada por pistão hidráulico e uma bomba, acoplado a um anel dinamométrico com capacidade total de 46,59 kN (Figuras 19 e 20). A força é aplicada sobre uma viga metálica

que divide a carga em dois pontos equidistantes do vão entre os apoios (630mm) (Figura 21). As peças foram contraventadas para evitar a perda de estabilidade. A deformação foi medida com um relógio comparador, com precisão de 0,1mm, posicionado no ponto central do vão, e as leituras feitas até a deformação limite de 9,45mm ($L/200$), com medições a cada incremento de 230 N. Após essas medições, as peças foram carregadas até a ruptura para a determinação da resistência MOR.

O MOE estático foi determinado de acordo com a Equação (15)

O MOR foi determinado de acordo com a Equação (16):

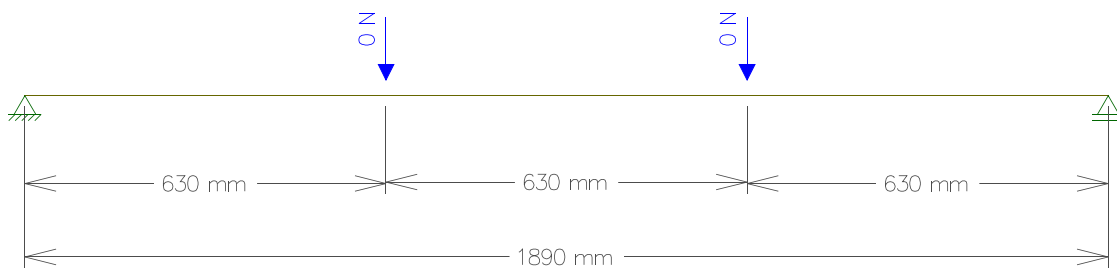


Figura 21 – Esquemático dos espaçamentos para ensaio da peça de 45x105mm.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL

Após a classificação visual do lote, das 260 peças iniciais, foram excluídas 47 peças que não atenderam os limites mínimos de defeitos, em função de nós, empenamentos e esmoados, reduzindo a quantidade de amostras do lote em 18%, para 213 peças. A Tabela 12 apresenta a quantidade de peças enquadradas em cada classe visual.

Tabela 12 – Quantidade de peças por classe visual.

	SS	S1	S2	S3	Lote
Quantidades	72	43	42	56	213
%	33,8	20,2	19,7	26,3	100

4.2 DADOS DAS AMOSTRAS

A Tabela 13 apresenta os seguintes valores obtidos para as peças classificadas como SS, teor de umidade, densidade aparente à 12%, Módulo de Elasticidade Estático (MOE), Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_{DIN}), Módulo de Elasticidade obtido pelo MTG (E_{MTG}) e a resistência à flexão (MOR). As Tabelas 14 à 16 apresentam os valores para as peças das demais classes.

Tabela 13 – Propriedades das peças da Classe SS.

CP	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m³)	MOE (MPa)	E_{MTG} (MPa)	E_{DIN} (MPa)	MOR (MPa)
3	9,5	500	10437	11663	12719	28,3
6	12,2	650	13480	14472	15460	88,8
11	10,8	558	9641	9721	10499	40,1
17	10,2	496	9473	9898	10739	61,9
18	8,9	442	6645	8049	8816	29,6
19	12	526	11410	12868	13769	39,3
22	8,9	427	6574	6619	7249	35,8
26	8,2	432	8020	7636	8405	23,8
32	8,3	457	8356	8000	8801	28,0

Continua...

CP	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m ³)	MOE (MPa)	E _{MTG} (MPa)	E _{DIN} (MPa)	MOR (MPa)
Continuação da tabela 13...						
40	8,8	408	7298	7006	7679	34,0
44	8,8	489	7296	7844	8598	38,1
50	10,1	506	6209	6410	6960	34,6
60	11,4	584	9426	11759	12641	30,9
63	8,4	483	7888	7910	8696	37,2
65	9	467	6226	6421	7028	25,1
66	9,4	470	5752	5786	6315	23,6
69	8,6	467	7891	8179	8979	29,0
79	10	510	8537	8429	9158	31,3
83	11,1	576	9729	11230	12100	62,7
88	8,4	453	8140	7291	8015	22,9
89	10,2	543	9757	10701	11610	34,8
90	10,3	438	7532	8014	8688	28,6
92	8,2	435	5206	5622	6190	24,0
94	10	471	9171	8936	9708	53,4
95	9,7	518	11292	11116	12105	69,0
97	8,7	340	4076	3769	4135	19,3
110	11,5	593	10516	13291	14277	68,5
113	10,1	540	7631	7076	7682	35,8
115	9,4	398	6773	6201	6768	30,2
121	8,4	487	6982	6815	7491	31,9
122	9,5	503	7884	7262	7920	38,8
123	8,3	484	7199	6136	6750	33,0
127	9	577	10388	10704	11716	59,2
129	8,9	512	8659	7923	8679	50,6
134	8,9	505	6464	7262	7954	35,7
137	9,3	509	7055	7433	8118	38,3
141	9,3	495	7392	7843	8566	38,8
142	8,8	420	5450	5543	6076	36,1
147	11,2	514	9074	10360	11154	52,8
148	8,7	465	8583	8547	9375	23,9
152	11,2	594	11410	11416	12292	53,1
155	10	571	9468	9297	10102	50,3
157	10,2	570	10758	11521	12499	81,8
161	12,4	443	6702	7046	7515	18,8

Continua...

CP	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m³)	MOE (MPa)	E_{MTG} (MPa)	E_{DIN} (MPa)	MOR (MPa)
Continuação da tabela 13...						
166	10	535	9111	10301	11192	40,5
167	9,3	493	8954	9860	10769	30,9
170	8,3	480	7709	6743	7418	47,4
173	10	522	10031	10015	10881	60,9
174	9,1	498	6688	6347	6941	37,9
177	9,6	461	4929	5189	5654	14,8
179	9,8	412	6488	7193	7827	39,1
184	7,9	425	5626	5716	6306	23,4
185	8,8	492	6665	6478	7100	49,4
187	11	559	8569	9621	10375	62,5
191	10,1	504	7948	9218	10008	16,3
193	8,3	412	5668	5676	6243	20,0
194	9,1	471	5798	6113	6686	20,2
203	10,4	555	10239	11807	12791	51,3
204	10	472	7564	7719	8387	43,5
206	8,4	497	8040	7234	7952	38,5
209	13,3	646	10368	12368	13096	68,0
210	9,4	513	10050	10408	11359	52,1
212	12,9	727	12652	13155	13975	61,4
213	7,9	390	7178	7487	8259	37,3
214	9,4	448	5118	6124	6684	13,6
220	9,1	564	9850	9211	10075	61,5
221	9,4	450	7864	7925	8650	23,2
224	8,9	498	6723	6825	7476	33,2
228	11	428	4692	5111	5512	19,9
230	11,2	629	11170	11307	12069	76,3
248	11,1	655	14728	15999	17239	76,4
256	12,5	616	9728	11789	12564	65,3

Tabela 14 – Propriedades das peças da Classe S1.

CP	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m ³)	MOE (MPa)	E _{MTG} (MPa)	E _{DIN} (MPa)	MOR (MPa)
23	10,2	387	6994	6260	6792	30,3
28	9,6	460	8382	7940	8653	34,5
36	9,6	497	6910	6028	6569	35,3
38	9,1	436	7053	6752	7386	21,8
45	10,6	529	7096	8016	8671	16,6
51	9,1	424	4233	3994	4369	27,4
52	9,1	446	6822	6303	6894	41,3
64	8,3	496	9175	8403	9244	22,2
74	9,3	455	5564	5960	6509	20,0
78	9,7	522	5250	5357	5834	19,7
98	10,1	555	9874	10198	11072	31,7
101	8,6	516	8763	7804	8567	24,9
111	9,7	469	4787	6320	6882	35,9
116	8,9	496	6295	5982	6553	25,6
118	8,9	481	8937	9195	10073	44,0
126	9,2	511	6637	7314	7994	32,8
130	10,1	502	5385	5231	5679	22,2
133	10	510	8426	8160	8866	41,9
135	7,8	422	5594	6108	6744	22,7
143	8,1	400	6445	6063	6722	30,5
144	7,1	525	7717	8036	8914	17,0
151	9,5	509	7391	8766	9560	34,2
156	9	456	6839	6897	7549	26,8
160	9,1	402	4481	4433	4848	25,3
162	9,1	416	4298	4357	4765	34,2
163	10	555	9784	12545	13630	46,7
168	9,1	460	6988	7894	8635	13,8
186	10,2	465	7994	8675	9412	25,0
189	11,7	496	6460	7181	7702	31,6
192	8	427	7553	7623	8404	20,5
195	8,3	478	8369	7901	8692	21,4
196	10	488	6368	6561	7129	28,0
200	13,2	534	10033	11726	12427	29,2
207	10,5	572	10715	10420	11278	31,2
216	10,3	455	6922	6705	7269	45,1

Continua...

CP	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m³)	MOE (MPa)	E_{MTG} (MPa)	E_{DIN} (MPa)	MOR (MPa)
Continuação da Tabela 14...						
217	9,1	462	7832	7478	8179	44,1
225	8,7	429	8091	8283	9087	22,2
229	9,3	521	5586	5249	5732	18,9
234	9,8	542	6886	6553	7131	32,0
245	8,9	515	7214	7322	8021	26,9
246	9	451	3183	3541	3876	19,8
250	8,4	428	7356	7162	7873	45,1
254	9,4	483	7374	7520	8207	39,8

Tabela 15 – Propriedades das peças da Classe S2.

CP	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m³)	MOE (MPa)	E_{MTG} (MPa)	E_{DIN} (MPa)	MOR (MPa)
5	10,9	579	14366	16006	17273	57,4
7	8,8	430	6178	6192	6787	21,1
8	9,4	548	10640	11362	12400	53,9
21	9,5	496	9378	9131	9958	22,3
27	10,2	448	7692	7709	8364	43,9
29	9,7	492	6466	7824	8520	20,3
30	9,2	378	6627	6602	7216	18,5
31	9,5	529	6679	8414	9176	16,3
33	9,7	519	6401	7361	8016	23,6
41	8,9	465	5875	6282	6881	32,3
48	10	481	6956	6666	7243	32,3
53	9,1	425	3325	3432	3754	17,8
56	8,6	455	7379	6712	7368	15,9
68	9	466	9259	7937	8688	42,4
70	10,5	472	8517	8664	9379	37,9
71	8,3	424	5972	5701	6272	20,5
73	8,2	415	5314	5043	5551	23,9
75	8,4	452	7773	6761	7388	35,4
76	10,2	432	5192	5482	5948	32,4
Continua...						

CP	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m ³)	MOE (MPa)	E _{MTG} (MPa)	E _{DIN} (MPa)	MOR (MPa)
Continuação da tabela 15...						
77	10,3	511	7245	7060	7654	36,7
82	9,5	514	8241	9061	9881	4,1
102	9,3	499	10163	9836	10743	45,8
154	9	432	7160	6817	7462	19,3
158	9,2	446	5972	5576	6095	23,8
164	9,1	460	7122	8147	8910	26,9
169	8,4	423	4986	5434	5974	18,1
175	9,3	427	4479	4691	5123	25,1
176	7,5	431	6623	6779	7499	32,7
178	10,9	552	6479	6093	6575	27,0
180	10,1	469	3439	4689	5091	9,6
188	9	454	6656	6104	6681	24,6
198	8,6	430	6227	6507	7143	27,0
199	9	453	8545	7723	8453	26,0
201	8	442	6304	6968	7682	19,9
202	8	469	5960	6411	6746	11,8
218	9,4	455	5327	5632	6146	15,1
219	9,8	477	6557	5944	6468	25,1
222	7,8	459	7853	7727	8531	31,7
223	9,5	478	6568	6194	6756	19,8
231	8	470	7920	7225	7966	30,9
240	10,1	558	8645	10096	10962	37,1
249	8,8	431	6340	6821	7476	29,5

Tabela 16 – Propriedades das peças da Classe S3.

CP	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m ³)	MOE (MPa)	E _{MTG} (MPa)	E _{DIN} (MPa)	MOR (MPa)
1	10	502	6483	7117	7732	15,6
2	9,2	417	5417	5726	6258	29,9
4	9,5	502	9215	11395	12428	25,4
10	12	566	9837	11356	12151	28,6
13	11,7	484	10999	12831	13825	50,6

Continua...

CP	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m ³)	MOE (MPa)	E _{MTG} (MPa)	E _{DIN} (MPa)	MOR (MPa)
Continuação da tabela 16...						
14	8,8	415	6392	6576	7208	32,6
15	10,7	479	5885	6724	7268	12,3
24	8,6	530	8501	9602	10540	21,9
35	8,8	396	7654	7099	7782	26,8
37	9	421	8826	7418	8119	23,3
42	12,1	515	6317	8204	8771	23,6
43	10,9	532	7686	8864	9566	46,7
46	8,6	442	6870	8112	8905	19,9
47	8,9	425	6349	6829	7481	22,4
57	8,9	532	8235	7031	7702	29,5
59	8,4	394	6246	5250	5771	27,0
61	9,3	459	5559	5631	6150	17,7
72	9,6	440	5338	5087	5544	29,0
80	8,1	419	6065	5814	6405	21,7
81	9	476	6102	6935	7591	19,8
84	9,4	463	7408	8828	9635	23,6
87	7,5	493	6779	6033	6674	37,3
96	11,6	542	8482	9575	10277	30,5
99	9,4	519	9405	10957	11958	41,2
100	8	442	6097	6163	6794	38,3
103	9,5	494	4574	5057	5515	37,9
107	7,7	408	4451	4804	5307	14,5
108	9,6	527	7025	7393	8057	39,4
109	8,3	439	4668	4911	5402	21,9
112	8,2	456	7043	7951	8754	27,8
114	9,3	453	6222	5529	6039	22,7
117	9,2	460	7017	8679	9486	15,2
120	9,5	484	4374	4529	4939	18,8
125	9,5	610	12341	11395	12427	39,5
132	8,8	472	3349	3845	4214	10,6
136	8,6	580	7396	6664	7316	35,3
139	9,5	541	5605	5607	6114	28,7
140	8,4	448	5808	6418	7055	13,3
145	8,8	286	3913	4248	4656	23,9

Continua...

CP	Umidade (%)	Densidade Aparente (Kg/m ³)	MOE (MPa)	E _{MTG} (MPa)	E _{DIN} (MPa)	MOR (MPa)
Continuação da tabela 16...						
146	9,4	439	7828	6595	7198	23,3
149	11,6	504	6439	6982	7495	24,9
153	8	474	7794	6872	7576	29,9
159	11	499	8225	8107	8742	29,7
165	10,4	599	7941	8430	9132	32,6
171	9	504	6644	6405	7010	30,6
181	10,4	456	6133	5986	6485	27,7
190	8,9	415	5518	6120	6704	19,8
205	10,5	429	5741	6014	6510	26,1
211	8,1	434	5673	5335	5877	32,6
215	7,9	477	6179	7178	7919	12,4
226	8,7	474	8158	8188	8982	35,3
239	11,2	551	5486	8686	9352	30,0
251	10,6	526	7126	9690	10481	25,5
252	9,5	521	9857	8479	9248	36,8
253	8,1	462	6981	7787	8579	29,4
255	9,5	466	7325	7161	7809	23,5

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item estão apresentadas as análises estatísticas nos resultados obtidos e as suas relações entre as diferentes propriedades estudadas para este lote de madeira. Para as análises foi utilizado o software R.

5.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

As Tabelas 17 a 22 apresentam as estatísticas descritivas dos resultados obtidos para cada propriedade considerando o lote completo e cada uma das classes separadamente.

Tabela 17 – Estatística descritiva dos resultados de teor de umidade.

Umidade	Lote Completo	SS	S1	S2	S3
Média (%)	9,5	9,7	9,4	9,2	9,4
Erro padrão (%)	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2
Mediana (%)	9,3	9,4	9,2	9,2	9,3
Desvio padrão (%)	1,1	1,3	1,0	0,8	1,1
Mínimo (%)	7,1	7,9	7,1	7,5	7,5
Máximo (%)	13,3	13,3	13,2	10,9	12,1
Coefficiente de Variação	12%	13%	11%	9%	12%
Quantidade de peças	213	72	43	42	56

Tabela 18 – Estatística descritiva dos resultados de Densidade aparente à 12%.

Densidade Aparente	Lote Completo	SS	S1	S2	S3
Média (kgf/m³)	484	502	479	468	477
Erro padrão (kgf/m³)	4	8	7	7	8
Mediana (kgf/m³)	477	496	481	460	474
Desvio padrão (kgf/m³)	59	70	46	43	57
Mínimo (kgf/m³)	286	340	387	378	286
Máximo (kgf/m³)	727	727	572	579	610
Coefficiente de Variação	12%	14%	10%	9%	12%
Quantidade de peças	213	72	43	42	56

Tabela 19 – Estatística descritiva dos resultados de Módulo de Elasticidade na flexão estática.

MOE	Lote Completo	SS	S1	S2	S3
Média (MPa)	7270	8250	7071	7019	6875
Erro padrão (MPa)	128	249	252	299	228
Mediana (MPa)	6985	7920	6994	6625	6564
Desvio padrão (MPa)	1960	2112	1652	1938	1709
Mínimo (MPa)	3183	4076	3183	3325	3349
Máximo (MPa)	14728	14728	10715	14366	12341
Coefficiente de Variação	27%	26%	23%	28%	25%
Quantidade de peças	213	72	43	42	56

Tabela 20 – Estatística descritiva dos resultados de Módulo de Elasticidade obtido pelo MTG.

E_{MTG}	Lote Completo	SS	S1	S2	S3
Média (MPa)	7558	8611	7214	7162	7254
Erro padrão (MPa)	143	293	284	322	261
Mediana (MPa)	7137	7924	7181	6770	6959
Desvio padrão (MPa)	2203	2489	1861	2084	1950
Mínimo (MPa)	3432	3769	3541	3432	3845
Máximo (MPa)	16006	15999	12545	16006	12831
Coefficiente de Variação	29%	29%	26%	29%	27%
Quantidade de peças	213	72	43	42	56

Tabela 21 – Estatística descritiva dos resultados de MOE Dinâmico.

E_{DIN}	Lote completo	SS	S1	S2	S3
Média (MPa)	8235	9354	7870	7814	7909
Erro padrão (MPa)	153	310	305	347	280
Mediana (MPa)	7757	8684	7873	7425	7583
Desvio padrão (MPa)	2353	2633	2001	2252	2093
Mínimo (MPa)	3754	4135	3876	3754	4214
Máximo (MPa)	17273	17239	13630	17273	13825
Coefficiente de Variação	29%	28%	25%	29%	26%
Quantidade de peças	213	72	43	42	56

Tabela 22 – Estatística descritiva dos resultados de MOR.

MOR	Lote Completo	SS	S1	S2	S3
Média (MPa)	30,9	40,8	29,3	27,0	27,1
Erro padrão (MPa)	0,9	2,1	1,3	1,7	1,1
Mediana (MPa)	28,6	37,2	28,0	25,1	26,9
Desvio padrão (MPa)	14,1	17,4	8,8	11,1	8,6
Mínimo (MPa)	4,1	13,6	13,8	4,1	10,6
Máximo (MPa)	88,8	88,8	46,7	57,4	50,6
Coefficiente de Variação	46%	43%	30%	41%	32%
Quantidade de peças	213	72	43	42	56

5.2 FATOR DE CORREÇÃO ENTRE O E_{DIN} E O E_{MTG}

O aparelho MTG calcula por meio da frequência natural o módulo de elasticidade dinâmico, E_{DIN} , e o software interno reduz os valores dinâmicos, em função da espécie, resultando no valor do E_{MTG} .

Tabela 23 – Correção do MTG em relação ao MOE estático.

Classe Visual	E_{DIN} (MPa)	Relação ao MOE	E_{MTG} (MPa)	Relação ao MOE	Fator de correção
Lote completo	8235	+13,27%	7558	+3,96%	0,9178
SS	9354	+13,38%	8611	+4,38%	0,9206
S1	7870	+11,30%	7214	+2,02%	0,9166
S2	7814	+11,33%	7162	+2,04%	0,9166
S3	7909	+15,04%	6875	+5,51%	0,9172

A Tabela 23 apresenta os valores de E_{DIN} , que foram superiores aos valores do MOE na flexão estática. O software do MTG multiplica E_{DIN} por um fator de correção, que variou de 0,9166 à 0,9206, determinando os valores do E_{MTG} , para a espécie *Pinus elliottii*, os valores do E_{MTG} são mais próximos aos valores do MOE.

5.3 VALORES CARACTERÍSTICOS DO MOE E DO MOR

Foram determinados os valores característicos do Módulo de Elasticidade (MOE) e da resistência (MOR) na flexão estática, de acordo com a formulação da norma NBR 7190/1997, para o lote completo e para cada classe visual.

A Figura 22 apresenta os valores característicos obtidos para o MOE na flexão estática.

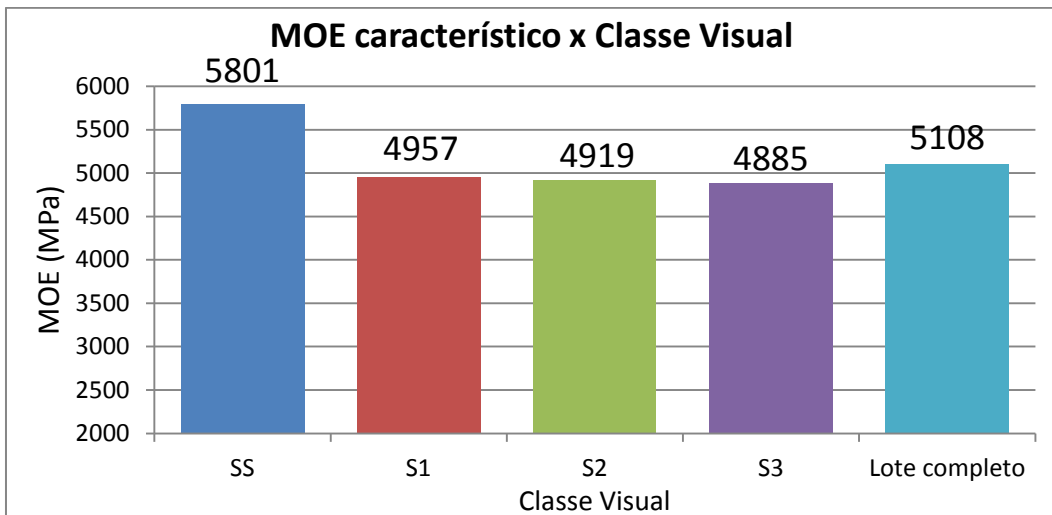


Figura 22 – Valores Característicos de MOE de acordo com a NBR7190.

O Módulo de Elasticidade (MOE) característico na flexão estática à 12% de umidade, apresentou valor para o lote completo foi de 5108 MPa. A classe SS apresentou o maior valor, com 5801 MPa, 13,6% acima do valor do lote completo. As classes S1, S2 e S3 apresentaram valores iguais a 4957 MPa (-3,0%), 4919 MPa (-3,7%) e 4885 MPa (-4,4%) respectivamente. Os valores de MOE entre as classes S1, S2 e S3 foram próximos. Os valores médios do MOE na flexão estática, estão abaixo do valor para classe de resistência para coníferas C25 (8500 MPa) da NBR7190, com as peças sendo enquadradas na classe C20 (3500 MPa).

A Figura 23 apresenta os valores característicos da resistência à flexão (MOR) para cada uma das diferentes classes visuais e para o lote completo.

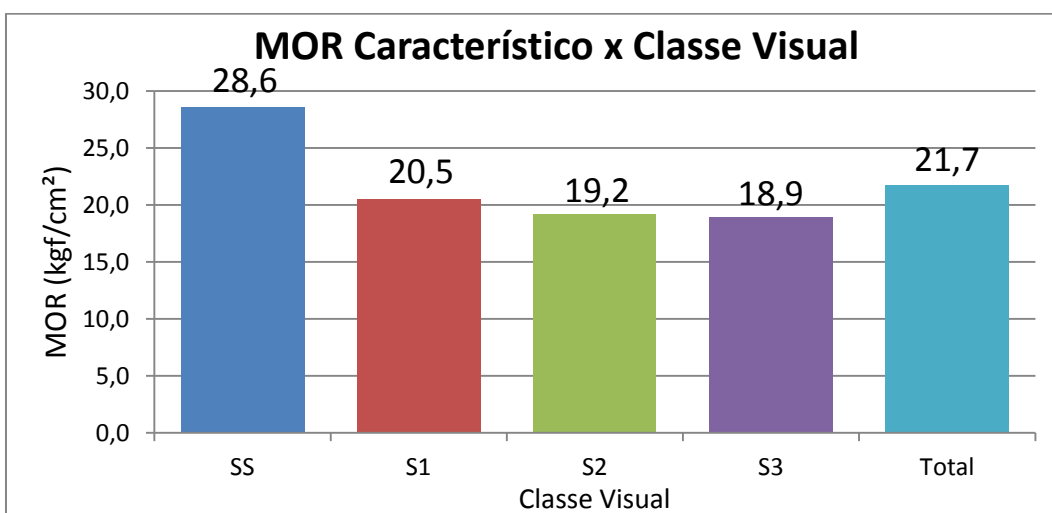


Figura 23 – Valores Característicos de MOR de acordo com a NBR7190.

A resistência à flexão (MOR) para o lote completo foi 21,7 MPa. A classe SS apresentou o maior valor 28,6 MPa, 31,8% acima do valor do lote completo. As classes S1, S2 e S3 apresentaram valores de 20,5 MPa (-5,5%), 19,2 MPa (-11,5%) e 18,9 MPa (-12,9%) respectivamente.

Todas as classes apresentaram valores próximos de densidade. Para os valores característicos de MOE e MOR, a classe SS apresentou melhores resultados. A variação dos valores característicos das propriedades entre as classes S1, S2 e S3 foi pequena, indicando que a junção dessas classes não teria influência significativa, para o lote avaliado.

5.4 CORRELAÇÃO ENTRE O E_{MTG} E O MOE

Para a análise comparativa entre os dados do módulo de elasticidade obtido com o MTG, E_{MTG} , e o módulo de elasticidade obtido pelo ensaio estático, MOE, foi utilizado o modelo de regressão linear simples, sendo o MOE a variável independente (x), como variável dependente (y) foi adotado o E_{MTG} .

Para a utilização do modelo de regressão linear simples, é necessário que sejam satisfeitas as seguintes condições:

- 1) A média dos erros (ε_i) é igual a zero e a variância σ^2 é desconhecida e constante, para $1 \leq i \leq n$.
- 2) Para, $i \neq j$, ε_i e ε_j não devem ser correlacionados, ou seja, $COV(\varepsilon_i; \varepsilon_j) = 0$, para $i \neq j, i \leq 1$ e $j \leq n$.
- 3) A distribuição dos ε_i é normal, para $1 \leq i \leq n$.

A relação entre as variáveis x e y é representada por uma reta de tipo:

$$y(x_i) = \alpha + \beta(x_i) + \varepsilon_i$$

Onde:

y = Variável resposta dependente;

x_i = Variável independente da observação i ;

α = constante;

β = Coeficiente angular;

ε_i = Resíduo das variações de y não explicadas pela variação de x .

A análise foi feita determinando a equação da regressão linear, o coeficiente de correlação e analisando os resíduos, para verificar o atendimento dos requisitos. Após, foi feita a análise da variância para verificar a condição do modelo ajustado.

5.4.1 Lote completo

A Figura 24 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o E_{MTG} e o MOE, para os dados do lote completo.

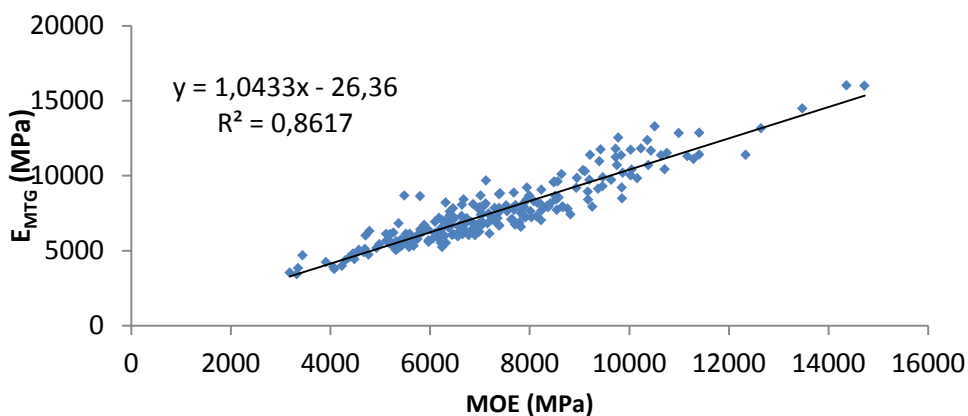


Figura 24 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{MTG} do lote completo.

A Figura 25 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o E_{MTG} , podendo ser observada a homogeneidade da variância.

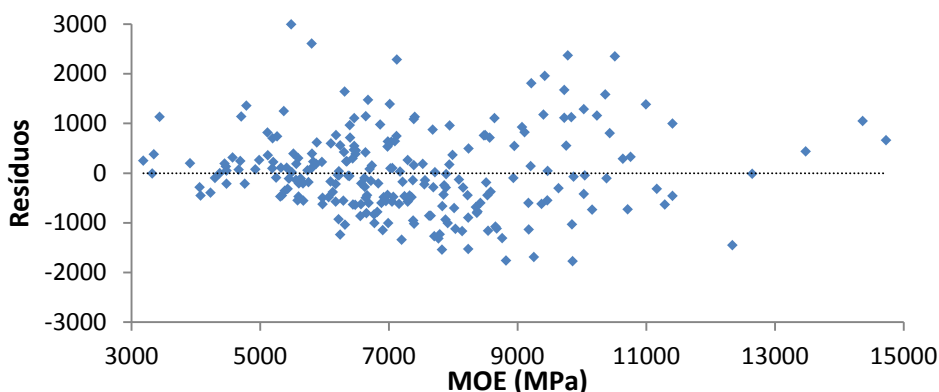


Figura 25 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOE do lote completo.

A Figura 26 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente uma distribuição normal.

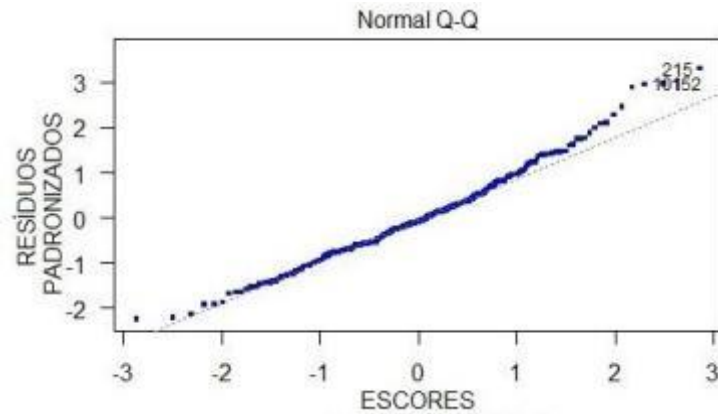


Figura 26 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{MTG} do lote completo.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 24 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 24 – Quadro de ANOVA (E_{MTG} x MOE) - lote completo.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	9,829E+08	9,829E+08	1457,6	0,0000
Resíduo	211	1,578E+08	674331		
Total	212	1,141E+09			

Para os graus de liberdade (1,211), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,86. Como o valor calculado de F é igual a 1457,6, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{E_{MTG}(MPa) = 1,0433 \cdot MOE_E (MPa) - 26,36\}$ é adequado.

5.4.2 Classe Visual SS

A Figura 27 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o E_{MTG} e o MOE obtido pela flexão estática, para os dados da Classe Visual SS.

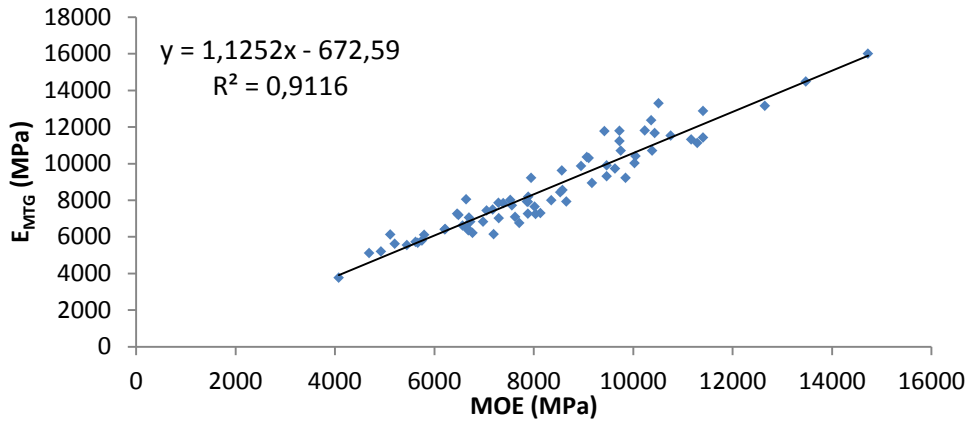


Figura 27 – Diagrama dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{MTG} da Classe SS.

A Figura 28 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados para o MOE MTG, onde pode ser observada a homogeneidade da variância.

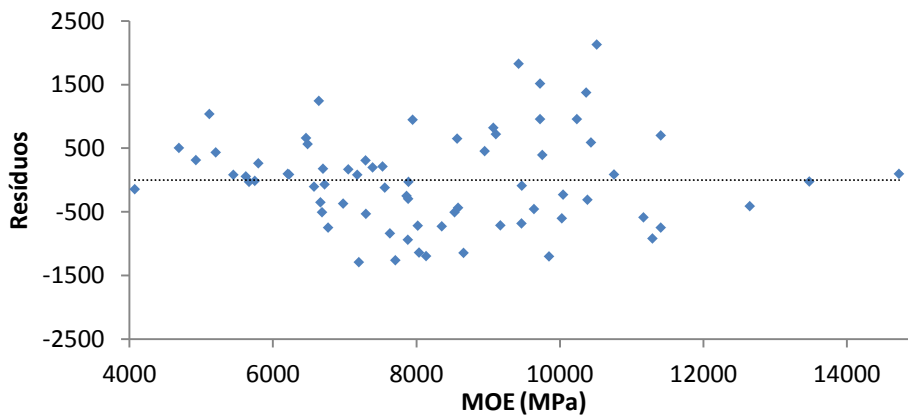


Figura 28 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{MTG} – Classe SS

A Figura 29 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente, uma distribuição normal.

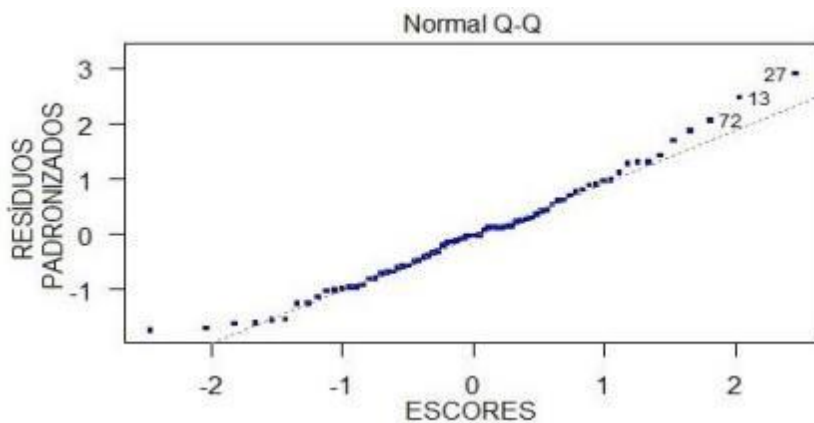


Figura 29 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{MTG} da Classe SS.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 25 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 25– Quadro de ANOVA (E_{MTG} x MOE) - classe SS.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	4,010E+08	4,010E+08	721,9	0,0000
Resíduo	70	3,888E+07	555436		
Total	71	4,399E+08			

Para os graus de liberdade (1,70), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,90. Como o valor calculado de F é igual a 721,9, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{E_{MTG} (MPa) = 1,1252 \cdot MOE (MPa) - 672,59\}$ é adequado.

5.4.3 Classe Visual S1

A Figura 30 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o E_{MTG} e o MOE, para os dados da Classe Visual S1.

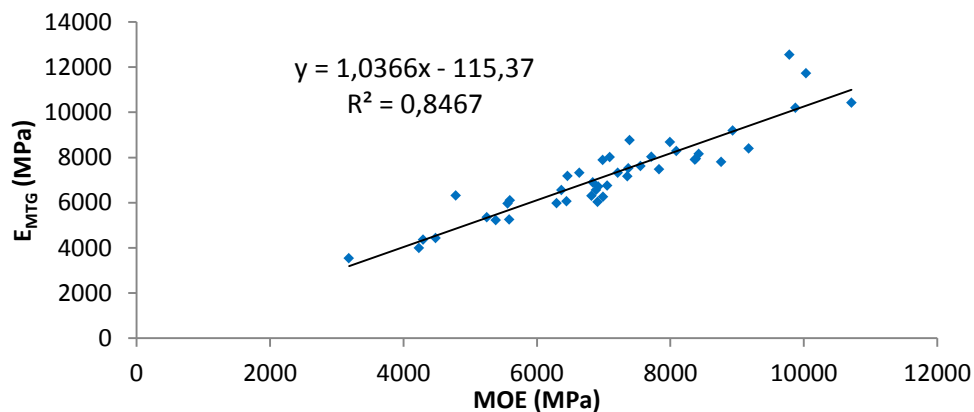


Figura 30 – Diagrama dispersão e reta de regressão entre o MOE estático e o E_{MTG} da Classe S1.

A Figura 31 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o E_{MTG} , podendo ser observada a homogeneidade da variância.

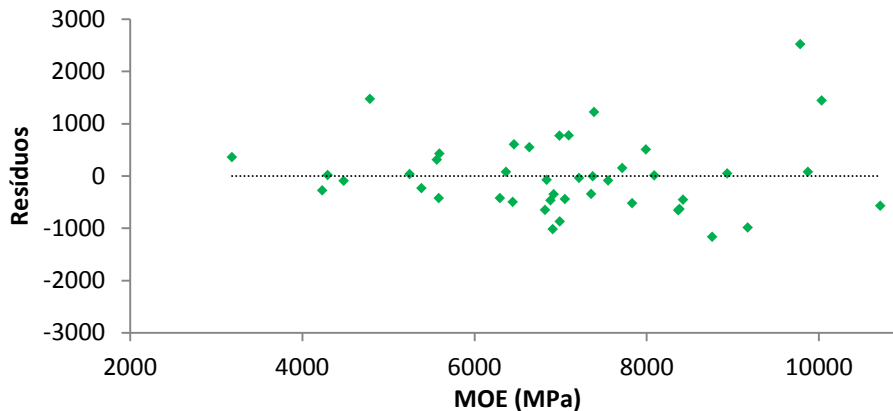


Figura 31 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{MTG} – Classe S1

A Figura 32 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente uma distribuição normal.

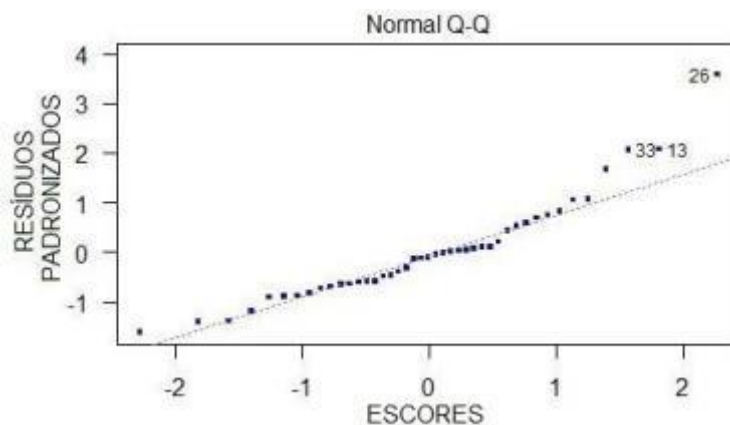


Figura 32 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{MTG} da Classe S1.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 26 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 26– Quadro de ANOVA (E_{MTG} x MOE) - classe S1.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	1,231E+08	4,010E+08	226,5	0,0000
Resíduo	41	2,228E+07	543500		
Total	42	1,454E+08			

Para os graus de liberdade (1,41), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,95. Como o valor calculado de F é igual a 226,5, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{E_{MTG} (MPa) = 1,0366 \cdot MOE (MPa) - 115,37\}$ é adequado.

5.4.4 Classe Visual S2

A Figura 33 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o E_{MTG} e o MOE, para os dados da Classe Visual S2.

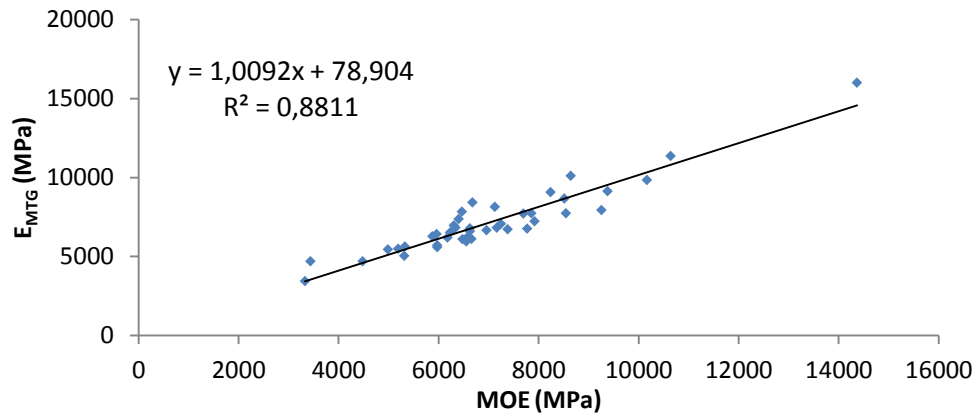


Figura 33 – Diagrama dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{MTG} da Classe S2.

A Figura 34 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o E_{MTG} , podendo ser observada a homogeneidade da variância.

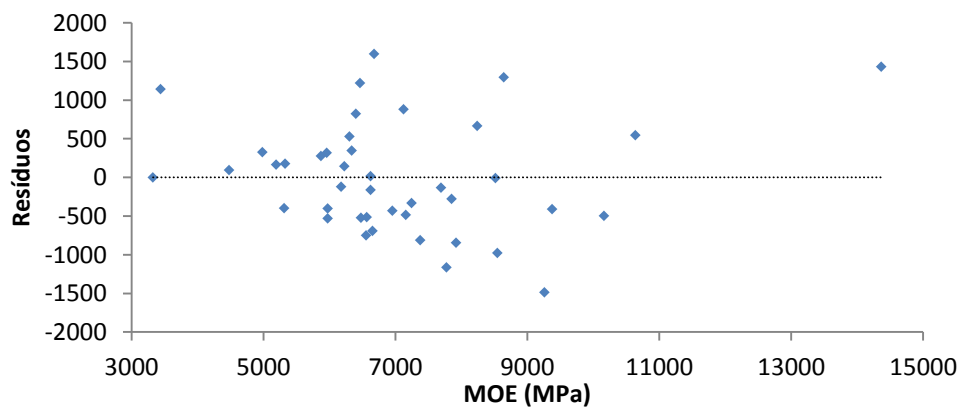


Figura 34 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{MTG} – Classe S2.

A Figura 35 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente, uma distribuição normal.

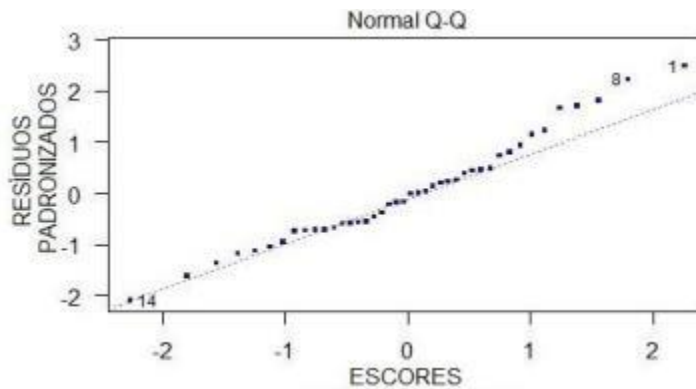


Figura 35 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{MTG} da Classe S2.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 27 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 27 – Quadro de ANOVA (E_{MTG} x MOE) - classe S2.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	1,569E+08	1,569E+08	296,4	0,0000
Resíduo	40	2,117E+07	529354		
Total	41	1,781E+08			

Para os graus de liberdade (1,40), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,96. Como o valor calculado de F é igual a 296,4, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{E_{MTG} (MPa) = 1,0092 \cdot MOE (MPa) + 78,904\}$ é adequado.

5.4.5 Classe Visual S3

A Figura 36 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o E_{MTG} e o MOE, para os dados da Classe Visual S3.

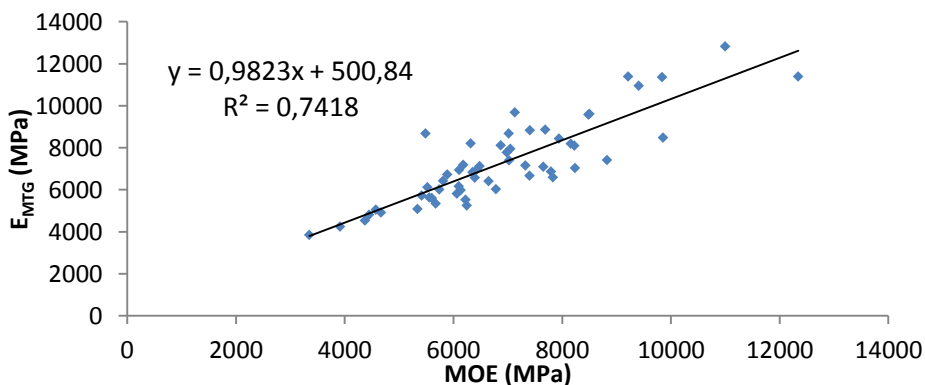


Figura 36 – Diagrama dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{MTG} da Classe S3.

A Figura 37 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o E_{MTG} , podendo ser observada a homogeneidade da variância.

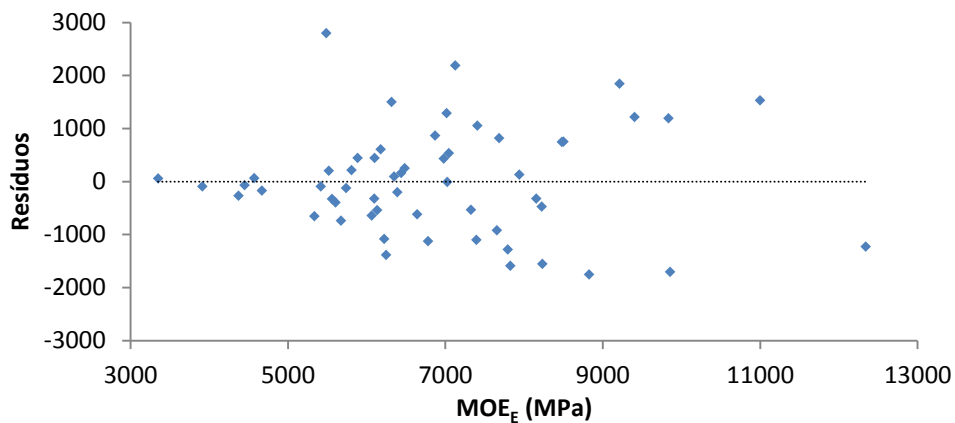


Figura 37 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{MTG} – Classe S3

A Figura 38 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente, uma distribuição normal.

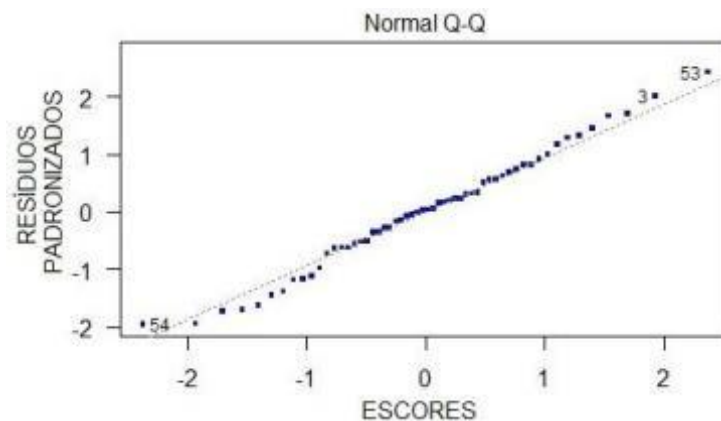


Figura 38 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{MTG} da Classe S3.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 28 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 28 – Quadro de ANOVA (E_{MTG} x MOE) - classe S3.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	1,551E+08	1,551E+08	155,1	0,0000
Resíduo	54	5,398E+07	543500		
Total	55	2,091E+08			

Para os graus de liberdade (1,54), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,93. Como o valor calculado de F é igual a 155,1, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é

altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{ E_{MTG} (MPa) = 0,9823 \cdot MOE (MPa) + 500,84 \}$ é adequado.

5.4.6 Resumo das Correlações E_{MTG} x MOE

A Tabela 29 apresenta o resumo dos valores das correlações da regressão linear entre o E_{MTG} e o MOE na flexão estática para as diferentes classes de madeira.

Tabela 29 – Correlação da regressão linear entre o E_{MTG} e o MOE.

Classe	Correlação do E_{MTG} com o MOE	
	Coefficiente de Correlação	Equação
Lote Completo	0,86	$1,0433 \cdot MOE - 26,36$
SS	0,91	$1,1252 \cdot MOE - 672,59$
S1	0,85	$1,0366 \cdot MOE - 115,37$
S2	0,88	$1,0092 \cdot MOE + 78,904$
S3	0,74	$0,9823 \cdot MOE + 500,84$

Os valores de E_{MTG} , após a aproximação definida pelo software do aparelho MTG, em função da espécie estudada, apresentaram boas correlações com o MOE na flexão estática. Foi observada uma maior correlação da regressão linear nas peças com menor incidência de defeitos, classe visual SS. A presença dos defeitos naturais nas classes S1, S2 e S3, afetaram negativamente a correlação entre as propriedades.

5.5 CORRELAÇÃO ENTRE O E_{DIN} E O MOE

Para a análise comparativa entre os dados do módulo de elasticidade dinâmico, E_{DIN} , obtido pela frequência natural da vibração longitudinal e o módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de flexão estática, MOE, foi utilizado o modelo de regressão linear simples, sendo o MOE a variável independente (x), como variável dependente (y) foi adotado o E_{DIN} .

A análise foi feita determinando a equação da regressão linear, o coeficiente de correlação analisando os resíduos, para verificar o atendimento dos requisitos. Após, foi feita análise da variância para verificar a condição do modelo ajustado.

5.5.1 Lote completo

A Figura 39 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o E_{DIN} e o MOE, para os dados do lote completo.

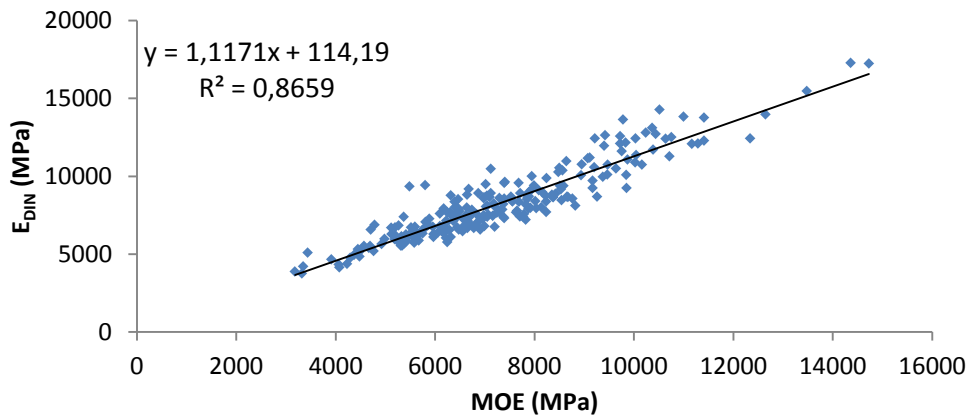


Figura 39 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{DIN} do lote completo.

A Figura 40 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o E_{DIN} , podendo ser observada a homogeneidade da variância.

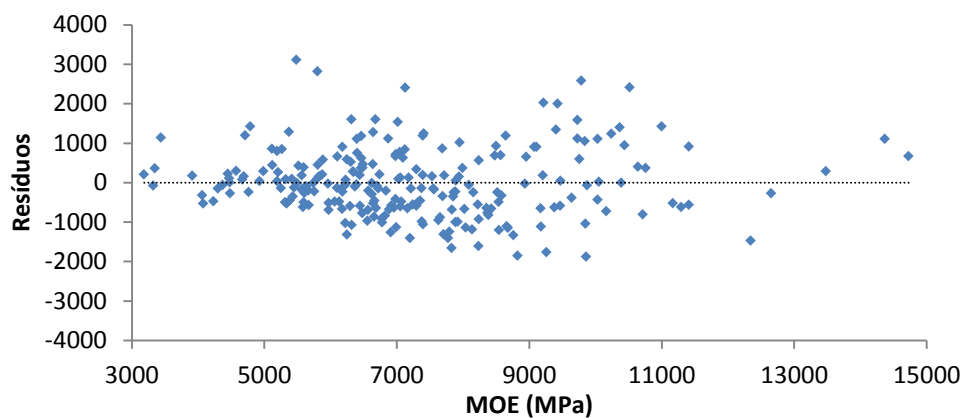


Figura 40 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{DIN} para o lote completo.

A Figura 41 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente, uma distribuição normal.

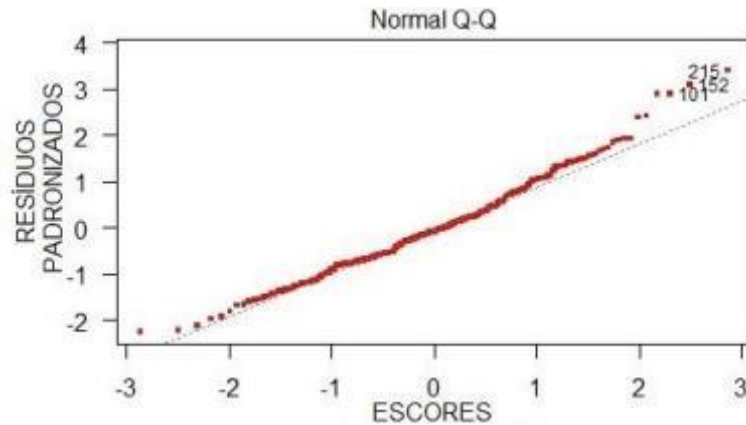


Figura 41 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{DIN} do lote completo.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 30 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 30 – Quadro de ANOVA (E_{DIN} x MOE) - lote completo.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	1,127E+09	9,829E+08	1511,5	0,0000
Resíduo	211	1,744E+08	674331		
Total	212	1,301E+09			

Para os graus de liberdade (1,211), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,86. Como o valor calculado de F é igual a 1511,5, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{E_{DIN} (MPa) = 1,1171 \cdot MOE (MPa) + 114,19\}$ é adequado.

5.5.2 Classe Visual SS

A Figura 42 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o E_{DIN} e o MOE, para os dados da classe SS.

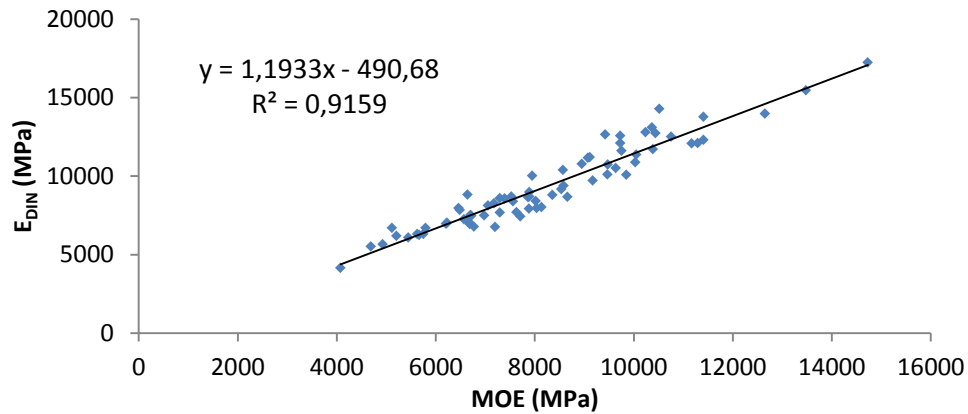


Figura 42 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE na flexão estática e o E_{DIN} – Classe SS.

A Figura 43 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o E_{DIN} , podendo ser observada a homogeneidade da variância.

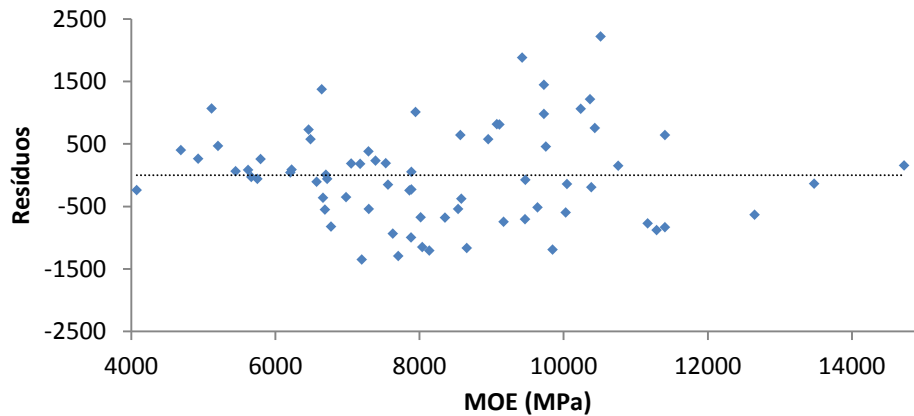


Figura 43 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{DIN} – Classe SS.

A Figura 44 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente, uma distribuição normal.

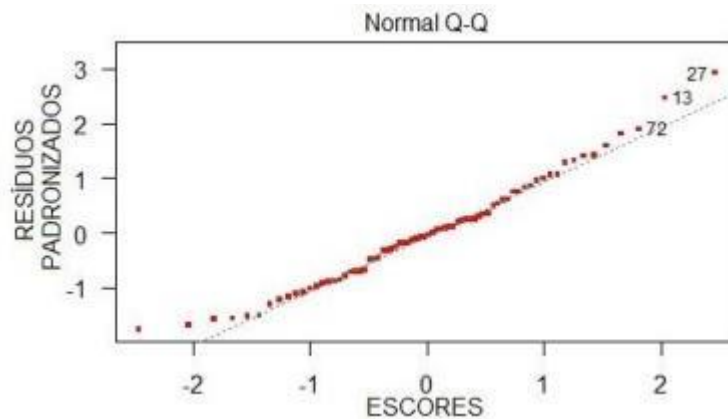


Figura 44 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{DIN} – Classe SS.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 31 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 31 – Quadro de ANOVA (E_{DIN} X MOE) – Classe SS.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	4,510E+08	4,510E+08	762,2	0,0000
Resíduo	70	4,141E+07	591626		
Total	71	4,924E+08			

Para os graus de liberdade (1,70), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,91. Como o valor calculado de F é igual a 762,2, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{ E_{DIN} (MPa) = 1,1933 \cdot MOE (MPa) - 490,68 \}$ é adequado.

5.5.3 Classe Visual S1

A Figura 45 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o E_{DIN} e o MOE, para os dados da classe S1.

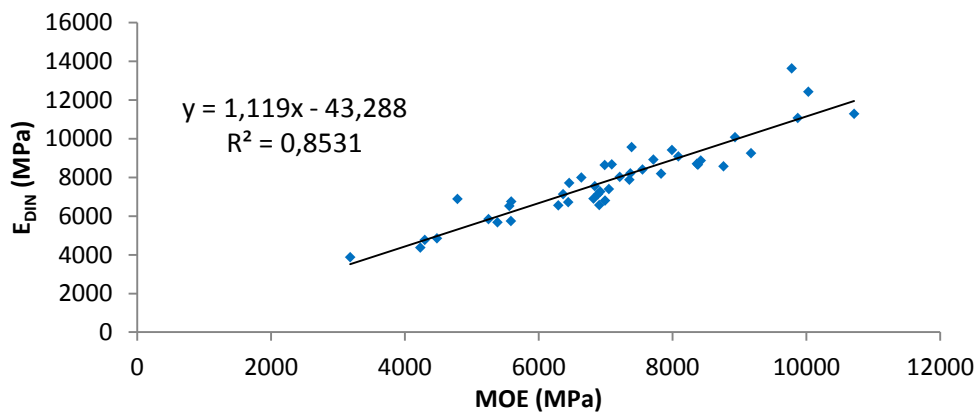


Figura 45 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE na flexão estática e o E_{DIN} – Classe S1.

A Figura 46 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o E_{DIN} , podendo ser observada a homogeneidade da variância.

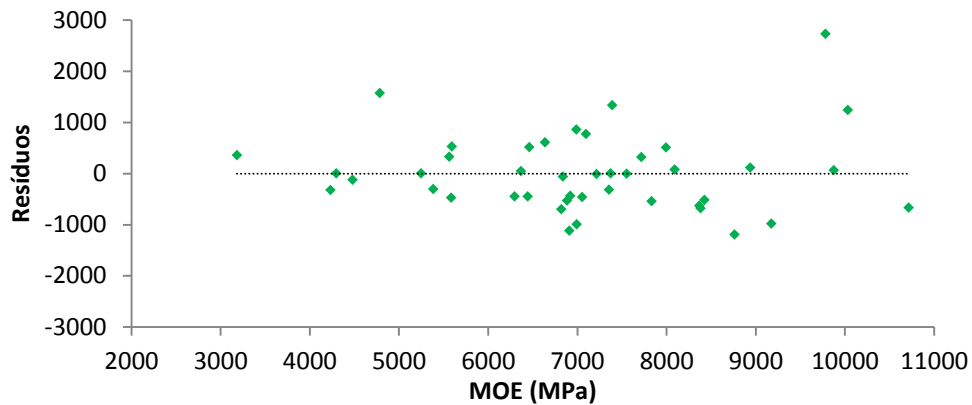


Figura 46 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{DIN} – Classe S1.

A Figura 47 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente uma distribuição normal.

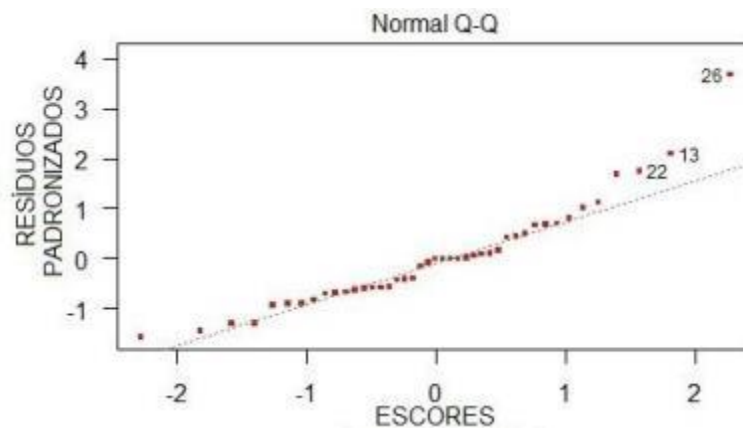


Figura 47 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{DIN} – Classe S1.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 32 apresenta os resultados análise de variância.

Tabela 32 – Quadro de ANOVA (E_{DIN} x MOE) – Classe S1.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	1,435E+08	1,435E+08	238,2	0,0000
Resíduo	41	2,470E+07	602361		
Total	42	1,682E+08			

Para os graus de liberdade (1,41), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,95. Como o valor calculado de F é igual a 238,2, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{E_{DIN} (MPa) = 1,119 \cdot MOE (MPa) - 43,288\}$ é adequado.

5.5.4 Classe Visual S2

A Figura 48 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o E_{DIN} e o MOE, para os dados da classe S2.

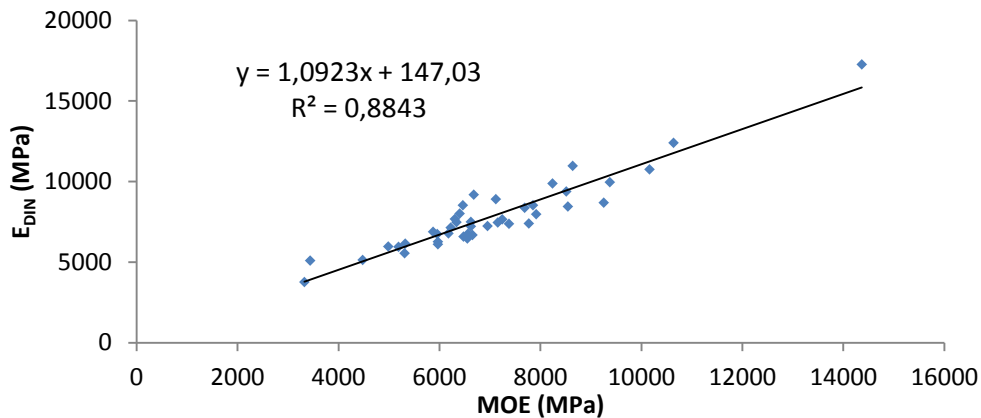


Figura 48 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE estático e o E_{DIN} – Classe S2.

A Figura 49 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o E_{DIN} , podendo ser observada a homogeneidade da variância.

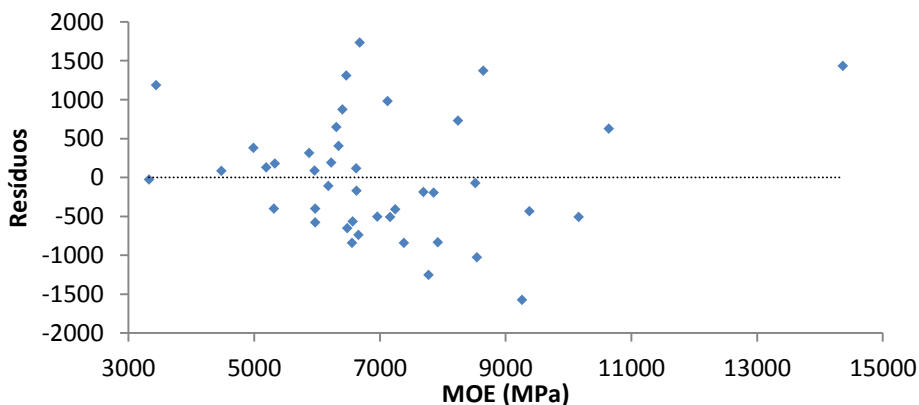


Figura 49 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{DIN} – Classe S2.

A Figura 50 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente, uma distribuição normal.

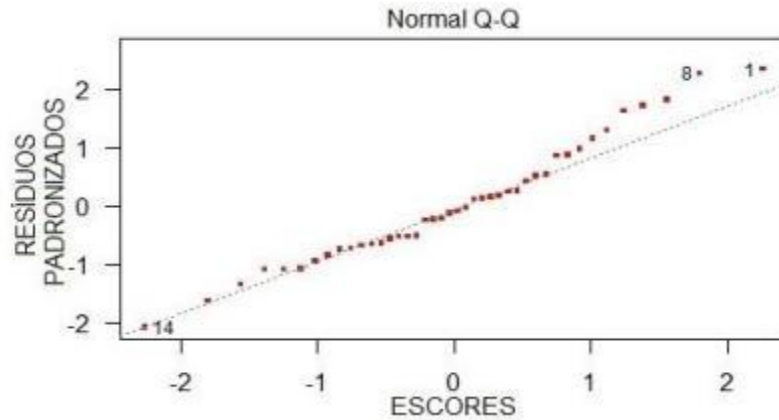


Figura 50 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{DIN} – Classe S2.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 33 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 33 – Quadro de ANOVA (E_{DIN} x MOE) – Classe S2.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	1,838E+08	1,838E+08	305,8	0,0000
Resíduo	40	2,405E+07	601219		
Total	41	2,079E+08			

Para os graus de liberdade (1,40), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,96. Como o valor calculado de F é igual a 305,8, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{ E_{DIN} (MPa) = 1,0923 \cdot MOE (MPa) + 147,03 \}$ é adequado.

5.5.5 Classe Visual S3

A Figura 51 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o E_{DIN} e o MOE, para os dados da classe S3.

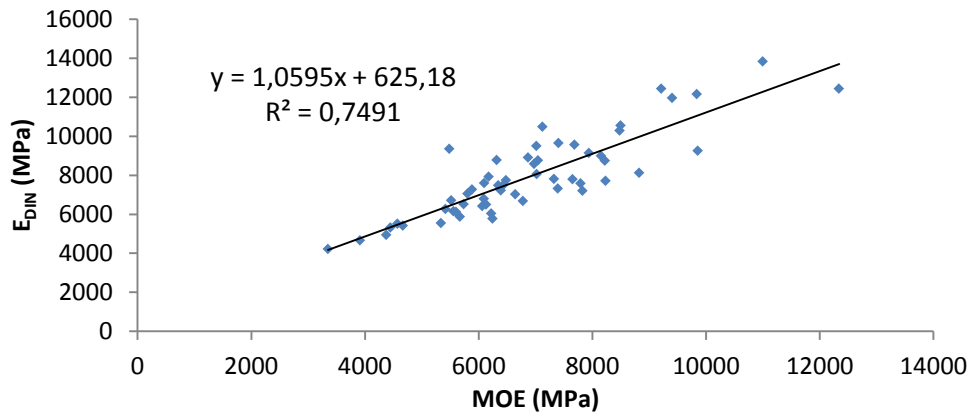


Figura 51 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o E_{DIN} – Classe S3.

A Figura 52 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o E_{DIN} , podendo ser observada a homogeneidade da variância.

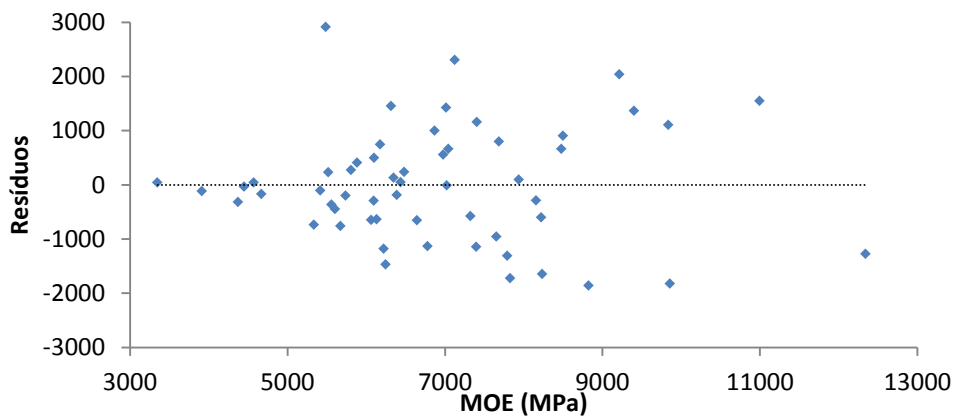


Figura 52 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o E_{DIN} – Classe S3.

A Figura 53 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente, uma distribuição normal.

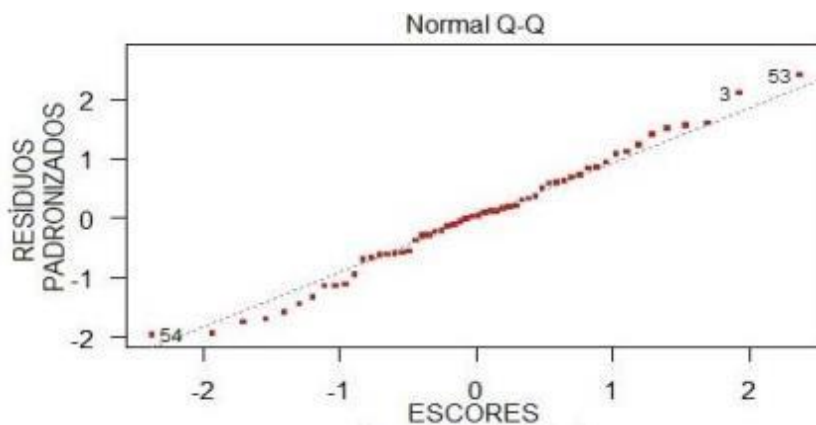


Figura 53 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o E_{DIN} – Classe S3.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 34 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 34 – Quadro de ANOVA (E_{DIN} x MOE) – Classe S3.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	1,804E+08	1,804E+08	161,2	0,0000
Resíduo	54	6,044E+07	1119199		
Total	55	2,409E+08			

Para os graus de liberdade (1,54), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,93. Como o valor calculado de F é igual a 161,2, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{ E_{DIN} (MPa) = 1,0595 \cdot MOE (MPa) + 625,18 \}$ é adequado.

5.5.6 Resumo das Correlações do E_{DIN}

A Tabela 35 apresenta o resumo dos valores das correlações da regressão linear entre o E_{DIN} obtido pela frequência natural e o MOE na flexão estática para as diferentes classes de madeira.

Tabela 35 – Correlação da regressão linear entre o E_{DIN} e o MOE.

Classe	Correlação do E_{DIN} com o MOE	
	Coefficiente de Correlação	Equação
Lote Completo	0,87	1,1171.MOE+114,19
SS	0,92	1,1933.MOE-490,68
S1	0,85	1,119.MOE-43,288
S2	0,88	1,0923.MOE+147,03
S3	0,75	1,0595.MOE+625,18

As regressões lineares entre o E_{DIN} e o MOE, apresentaram boas correlações. Foi observada uma maior correlação da regressão linear nas peças da classe SS, com menor incidência de defeitos. A presença dos defeitos naturais nas classes S1, S2 e S3, reduziu a correlação entre as propriedades.

5.6 CORRELAÇÃO ENTRE O MOR E O MOE

Para a análise comparativa entre os dados do MOR e o MOE obtidos pelo ensaio estático foi utilizado o modelo de regressão linear simples, sendo o MOE a variável independente (x), como variável dependente (y) foi adotado o MOR.

A análise foi feita determinando a equação da regressão linear, o coeficiente de correlação e analisando os resíduos, para verificar o atendimento dos requisitos. Após, foi feita análise da variância para verificar a condição do modelo ajustado.

5.6.1 Lote completo

A Figura 54 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o MOR e o MOE, para os dados do lote completo.

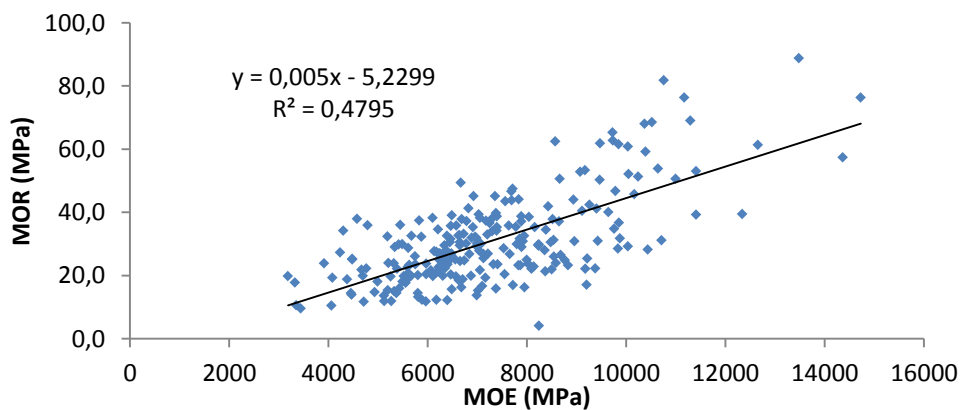


Figura 54 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o MOR do lote completo.

A Figura 55 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o MOR, podendo ser observada a homogeneidade da variância.

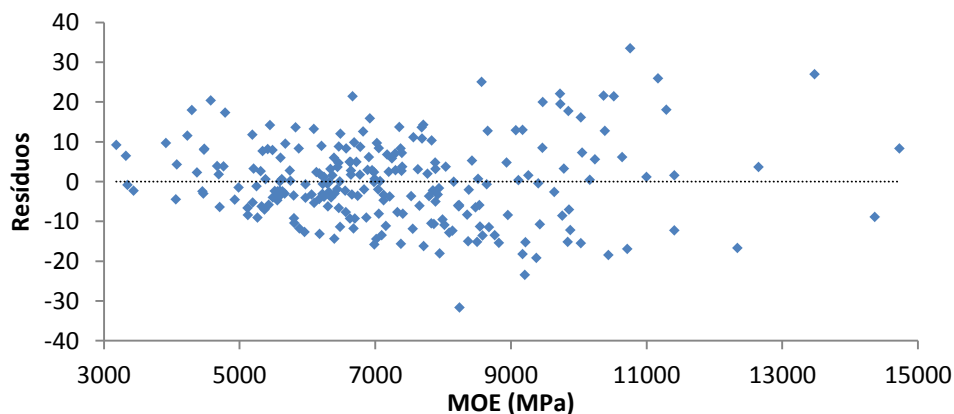


Figura 55 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR para o lote completo.

A Figura 56 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente uma distribuição normal.

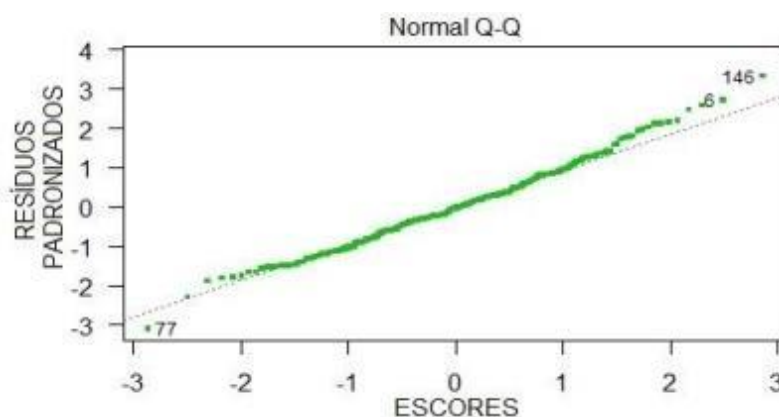


Figura 56 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o MOR do lote completo.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 36 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 36 – Quadro de ANOVA (MOR x MOE) – lote completo.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	2,235E+04	2,235E+04	215,6	0,0000
Resíduo	211	2,427E+04	103,7		
Total	212	4,662E+04			

Para os graus de liberdade (1,211), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,86. Como o valor calculado de F é igual a 215,6, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{MOR (MPa) = 0,005 \cdot MOE (MPa) - 5,2299\}$ é adequado.

5.6.2 Classe Visual SS

A Figura 57 apresenta o diagrama de dispersão e regressão entre o MOR e o MOE, para os dados da classe SS.

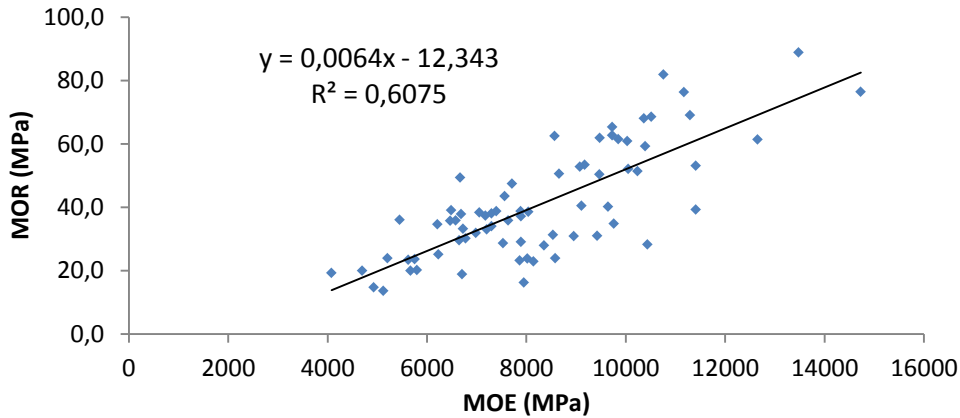


Figura 57 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o MOR – Classe SS.

A Figura 58 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o MOR, podendo ser observada a homogeneidade da variância.

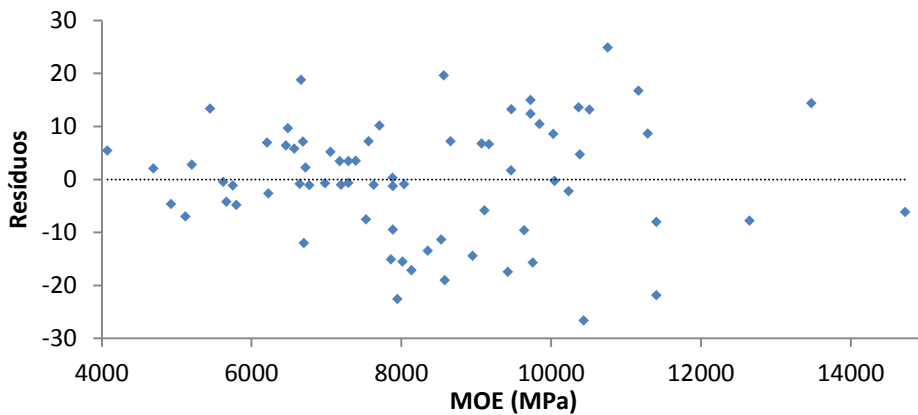


Figura 58 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR – Classe SS.

A Figura 59 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente uma distribuição normal.

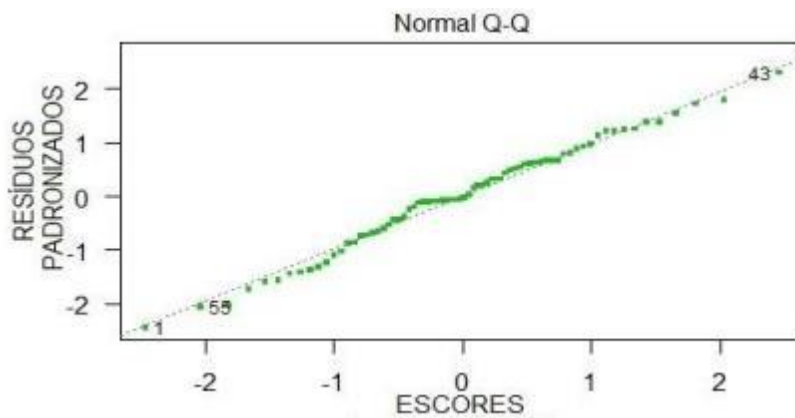


Figura 59 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o MOR – Classe SS.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 37 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 37 – Quadro de ANOVA (MOR x MOE) – Classe SS.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	1,313E+04	1,313E+04	108,4	0,0000
Resíduo	70	8,485E+03	121		
Total	71	2,162E+04			

Para os graus de liberdade (1,70), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,91. Como o valor calculado de F é igual a 108,4, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{MOR (MPa) = 0,0064 \cdot MOE (MPa) - 12,343\}$ é adequado.

5.6.3 Classe Visual S1

A Figura 60 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o MOR e o MOE, para os dados da classe S1.

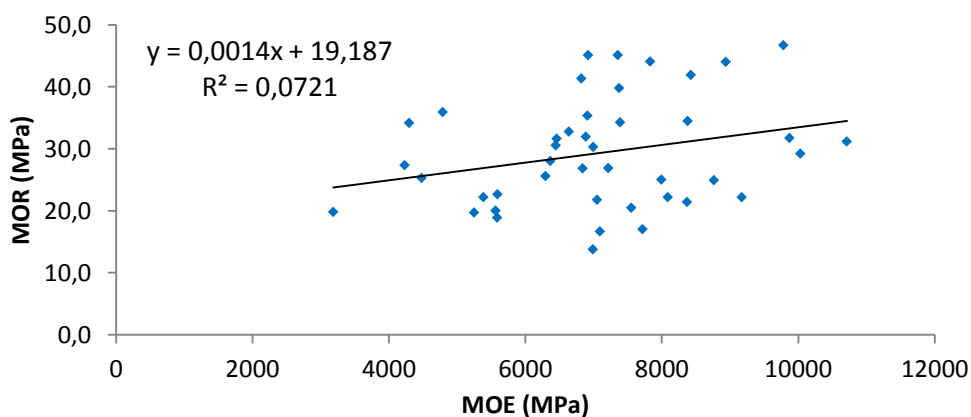


Figura 60 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE na flexão estática e o MOR – Classe S1.

A Figura 61 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o MOR, podendo ser observada a homogeneidade da variância.

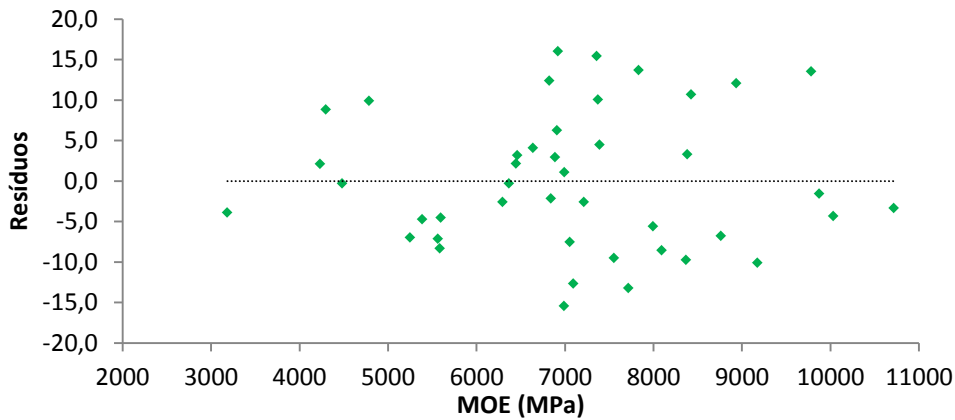


Figura 61 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR – Classe S1.

A Figura 62 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, uma oscilação na distribuição.

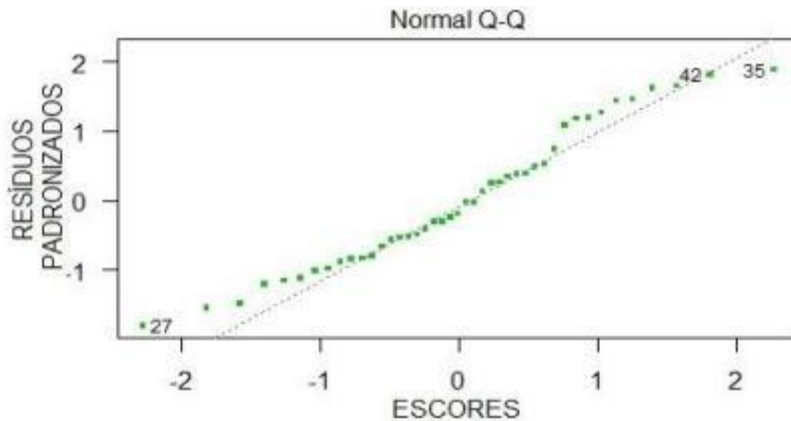


Figura 62 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o MOR – Classe S1.

As suposições da regressão atendidas, a Tabela 38 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 38 – Quadro de ANOVA (MOR x MOE) – Classe S1.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	2,346E+02	2,346E+02	3,19	0,0816
Resíduo	41	3,019E+03	74		
Total	42	3,253E+03			

Para os graus de liberdade (1,41), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,91. Como o valor calculado de F é igual a 3,19, pode-se concluir que não existe evidência estatística de que a proporção da variância é explicada pela regressão. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{MOR (MPa) = 0,0014 \cdot MOE (MPa) + 19,187\}$ não é adequado.

5.6.4 Classe Visual S2

A Figura 63 apresenta o diagrama de dispersão e regressão entre o MOR e o MOE, para os dados da classe S2.

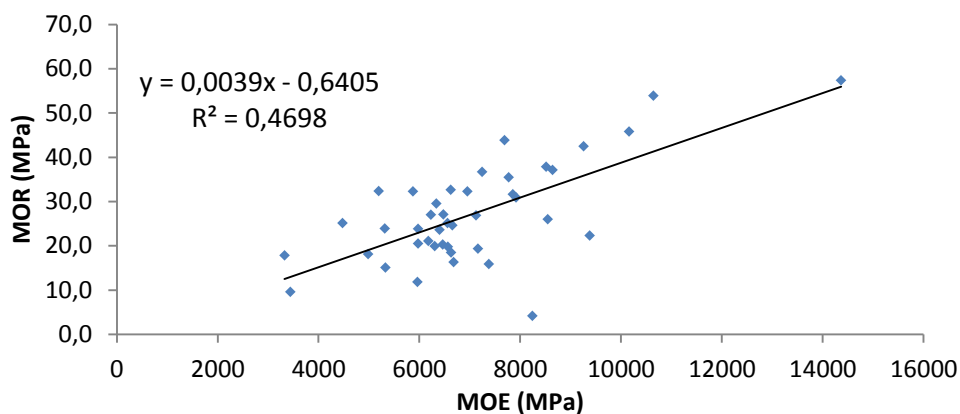


Figura 63 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o MOR – Classe S2.

A Figura 64 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o MOR, podendo ser observada a homogeneidade da variância.

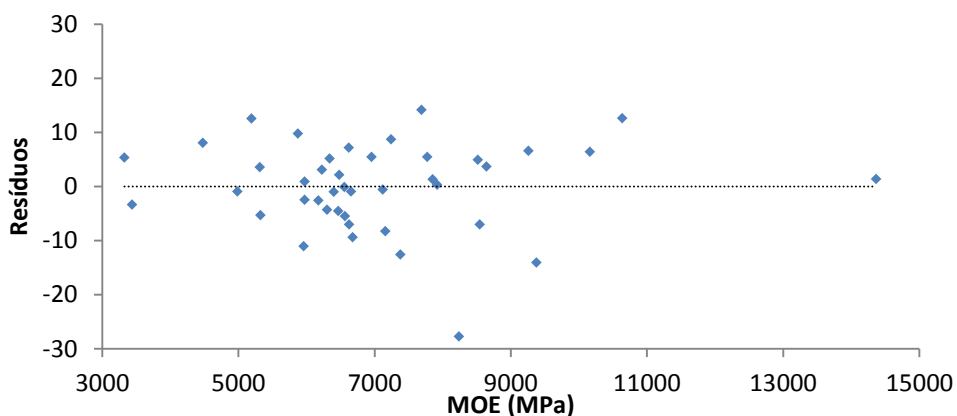


Figura 64 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR – Classe S2.

A Figura 65 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente, uma distribuição normal.

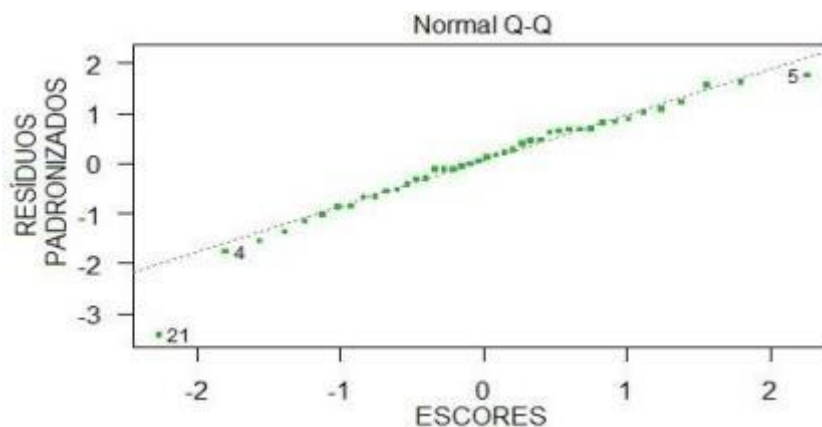


Figura 65 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o MOR – Classe S2.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 39 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 39 – Quadro de ANOVA (MOR x MOE) – Classe S2.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	2,394E+03	2,394E+03	35,4	0,0000
Resíduo	40	2,702E+03	68		
Total	41	5,096E+03			

Para os graus de liberdade (1,40), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,96. Como o valor calculado de F é igual a 35,4, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{MOR (MPa) = 0,0039 \cdot MOE (MPa) - 0,6405\}$ é adequado.

5.6.5 Classe Visual S3

A Figura 66 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre o MOR e o MOE, para os dados da classe S3.

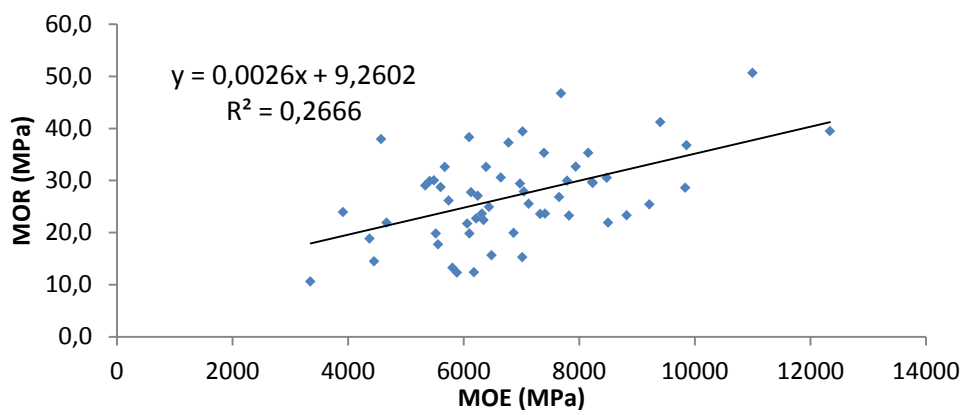


Figura 66 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e o MOR – Classe S3.

A Figura 67 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o MOR, podendo ser observada a homogeneidade da variância.

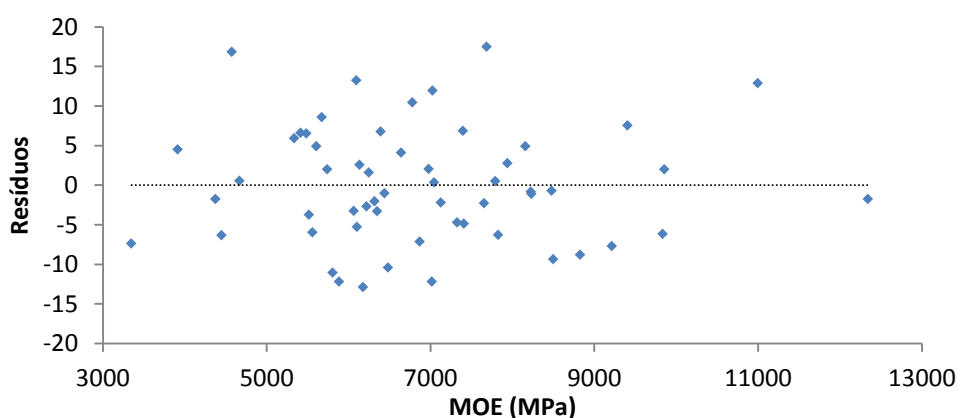


Figura 67 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR – Classe S3.

A Figura 68 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente, uma distribuição normal.

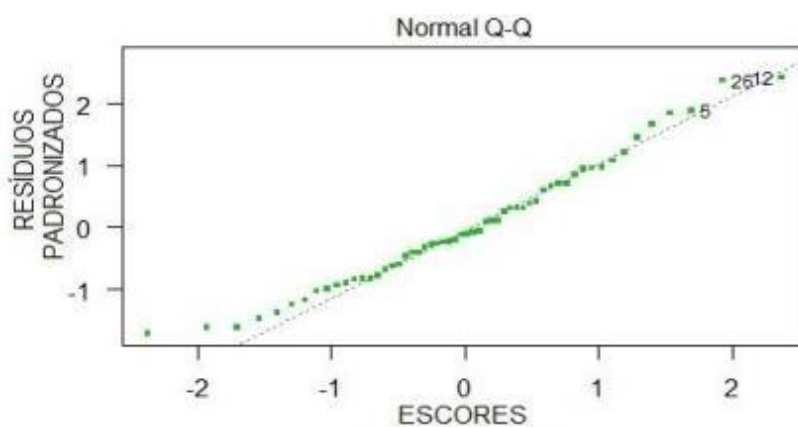


Figura 68 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o MOR – Classe S3.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 40 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 40 – Quadro de ANOVA (MOR x MOE) – Classe S3.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	1,076E+03	1,076E+03	19,6	0,0000
Resíduo	54	2,961E+03	54,8		
Total	55	4,037E+03			

Para os graus de liberdade (1,54), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,93. Como o valor calculado de F é igual a 19,6, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{MOR (MPa) = 0,0026 \cdot MOE (MPa) + 9,2602\}$ é adequado.

5.6.6 Resumo das Correlações do MOR

A Tabela 41 apresenta o resumo dos valores das correlações da regressão linear entre a resistência (MOR) e o MOE, ambos na flexão estática, para as diferentes classes de madeira.

Tabela 41 – Correlação da regressão linear entre o MOR e o MOE.

Classe	Correlação do MOR com o MOE	
	Coefficiente de Correlação	Equação
Lote Completo	0,48	0,005.MOE-5,2299
SS	0,61	0,0064.MOE-12,343
S1	0,07	0,0014.MOE+19,187
S2	0,47	0,0039.MOE-0,6405
S3	0,27	0,0026.MOE+9,2602

O MOE apresentou correlações baixas para estimativa do MOR na flexão estática. Os defeitos naturais como os *nós*, dependendo de sua localização e dimensão, interferem mais nos valores do MOR do que nos valores do MOE, criando um ponto de fragilidade localizado na peça. Em função disto, as peças com maior incidência de defeitos, apresentaram rupturas não previsíveis, que afetaram negativamente a correlação entre as propriedades nas classes estruturais S1, S2 e S3. Foi observada uma maior correlação da regressão linear na classe SS, em comparação às classes S1, S2 e S3.

5.7 CORRELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE APARENTE E O MOE

Para a análise comparativa entre os dados da Densidade aparente e o MOE obtido pelo ensaio de flexão estática foi utilizado o modelo de regressão linear simples, sendo a Densidade a variável independente (x), como variável dependente (y) foi adotado o MOE.

A análise foi feita determinando a equação da regressão linear, o coeficiente de correlação e analisando os resíduos, para verificar o atendimento dos requisitos. Após, foi feita análise da variância para verificar a condição do modelo ajustado.

5.7.1 Lote completo

A Figura 69 apresenta o diagrama de dispersão e regressão entre a Densidade aparente e o MOE, para os dados do lote completo.

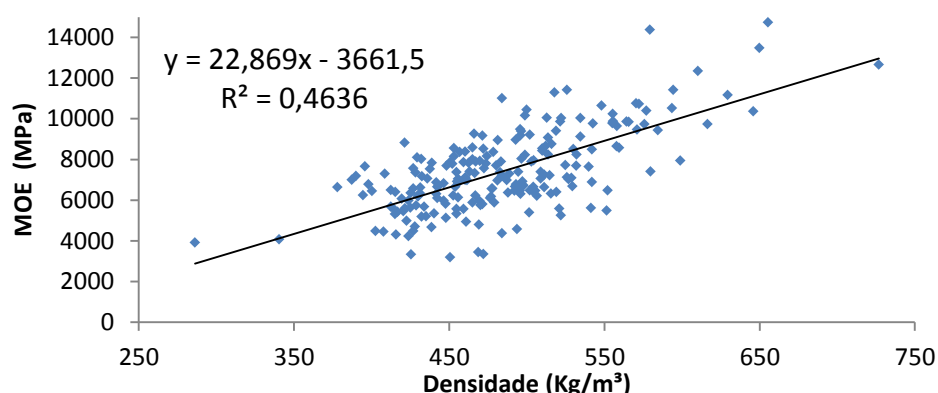


Figura 69 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e a Densidade aparente do lote completo.

A Figura 70 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o MOE, podendo ser observada a homogeneidade da variância.

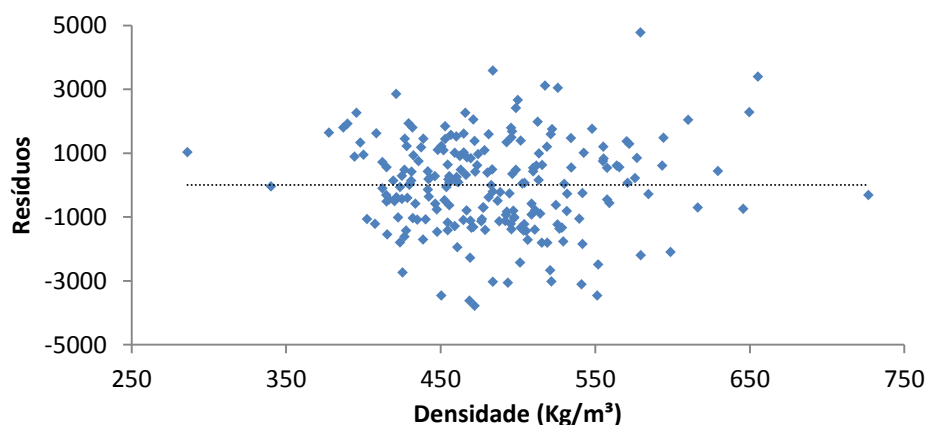


Figura 70 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para a Densidade aparente para o lote completo.

A Figura 71 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente uma distribuição normal.

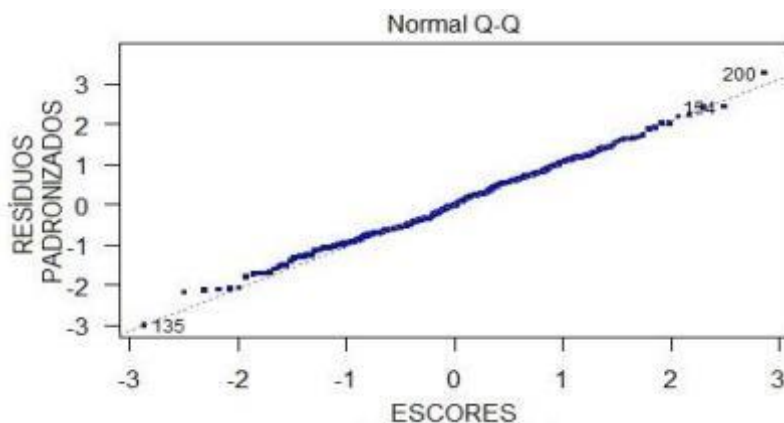


Figura 71 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a Densidade do lote completo.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 42 apresenta os resultados da análise da variância.

Tabela 42 – Quadro de ANOVA (MOE x Densidade) – lote completo.

	GI	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	3,821E+08	3,821E+08	182,4	0,00
Resíduo	211	4,421E+08	2095440		
Total	212	8,242E+08			

Para os graus de liberdade (1,211), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,86. Como o valor calculado de F é igual a 182,4, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{MOE (MPa) = 22,869 \cdot Densidade (MPa) - 3661,5\}$ é adequado.

5.7.2 Classe Visual SS

A Figura 72 apresenta o diagrama de dispersão e regressão entre a Densidade aparente e o MOE, para os dados da classe SS.

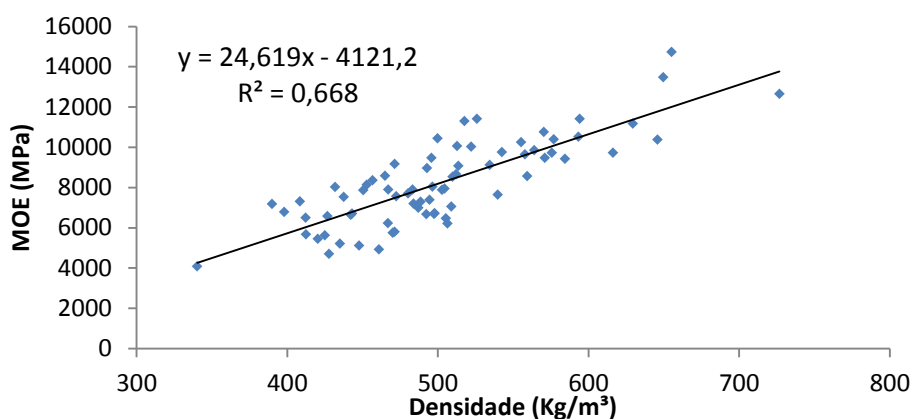


Figura 72 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e a Densidade aparente – Classe SS.

A Figura 73 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o MOE, podendo ser observada a homogeneidade da variância.

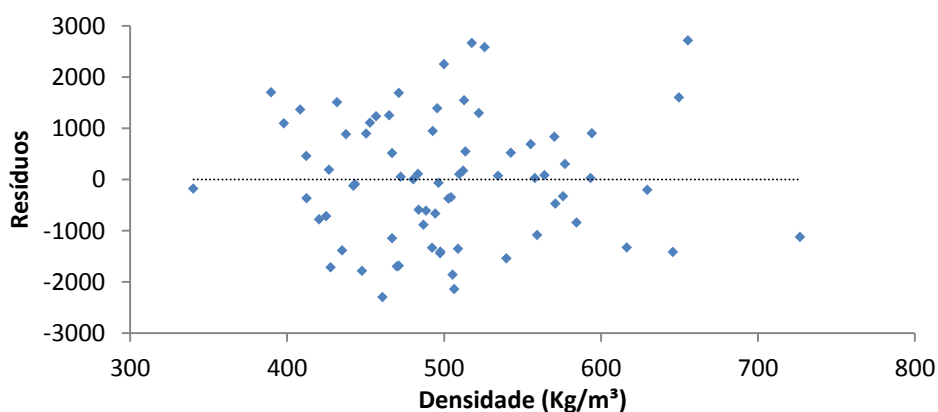


Figura 73 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para a Densidade aparente – Classe SS.

A Figura 74 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente uma distribuição normal.

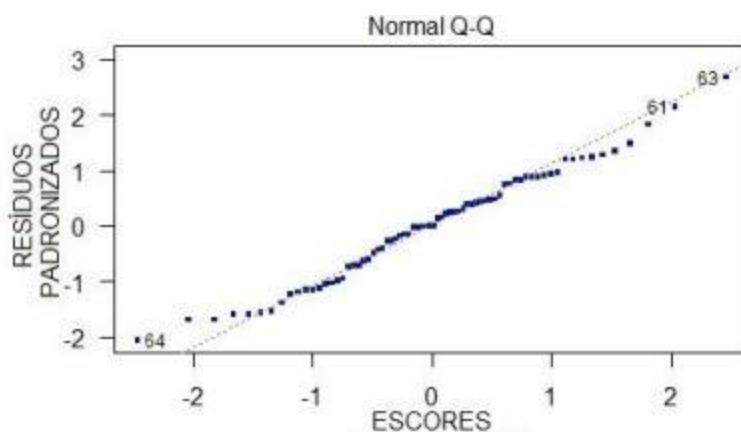


Figura 74 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a Densidade aparente – Classe SS.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 43 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 43 – Quadro de ANOVA (MOE x Densidade) – Classe SS.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	2,115E+08	2,115E+08	140,8	0,0000
Resíduo	70	1,051E+08	1502011		
Total	71	3,167E+08			

Para os graus de liberdade (1,70), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,91. Como o valor calculado de F é igual a 140,8, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{MOE (MPa) = 24,619 \cdot Densidade (MPa) - 4121,2\}$ é adequado.

5.7.3 Classe Visual S1

A Figura 75 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre a Densidade aparente e o MOE, para os dados da classe S1.

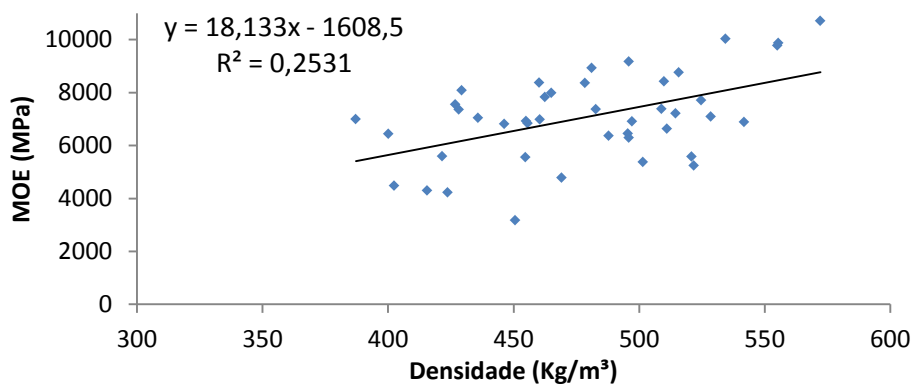


Figura 75 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e a Densidade aparente – Classe S1.

A Figura 76 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para a Densidade, podendo ser observada a homogeneidade da variância.

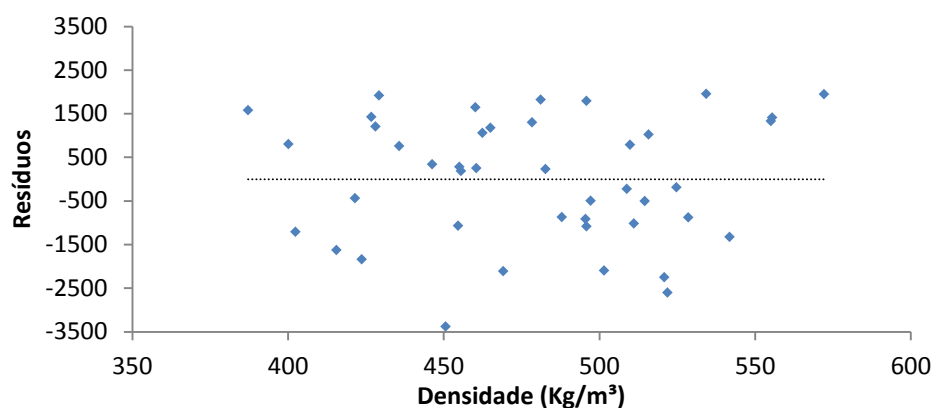


Figura 76 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para a Densidade aparente – Classe S1.

A Figura 77 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente uma distribuição normal.

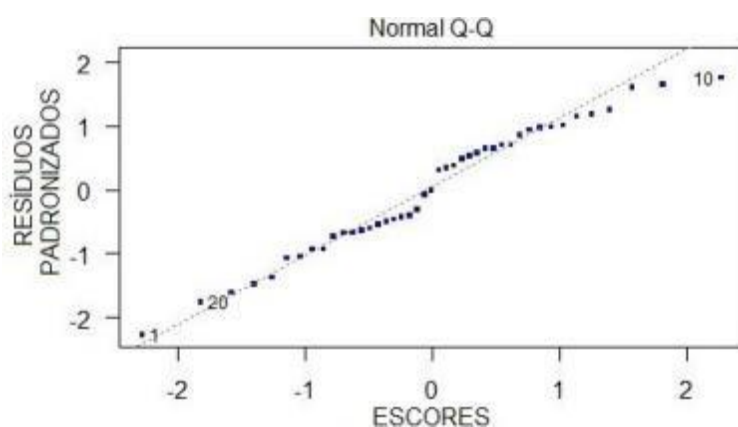


Figura 77 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a Densidade aparente – Classe S1.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 44 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 44 – Quadro de ANOVA (MOE x Densidade) – Classe S1.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	2,899E+07	2,899E+07	13,9	0,0006
Resíduo	41	8,557E+07	2087056		
Total	42	1,146E+08			

Para os graus de liberdade (1,41), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,95. Como o valor calculado de F é igual a 13,9, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{MOE (MPa) = 18,133 \cdot Densidade (MPa) - 1608,5\}$ é adequado.

5.7.4 Classe Visual S2

A Figura 78 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre a Densidade aparente e o MOE, para os dados da classe S2.

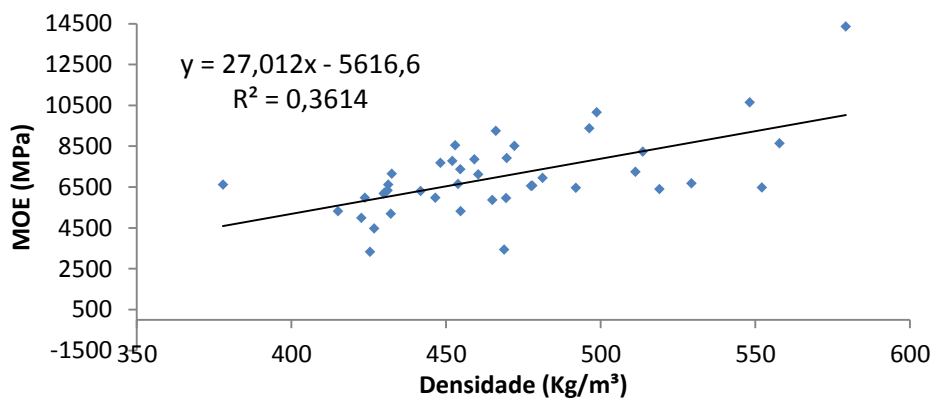


Figura 78 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e a Densidade aparente – Classe S2.

A Figura 79 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o MOE, onde pode ser observada a homogeneidade da variância.

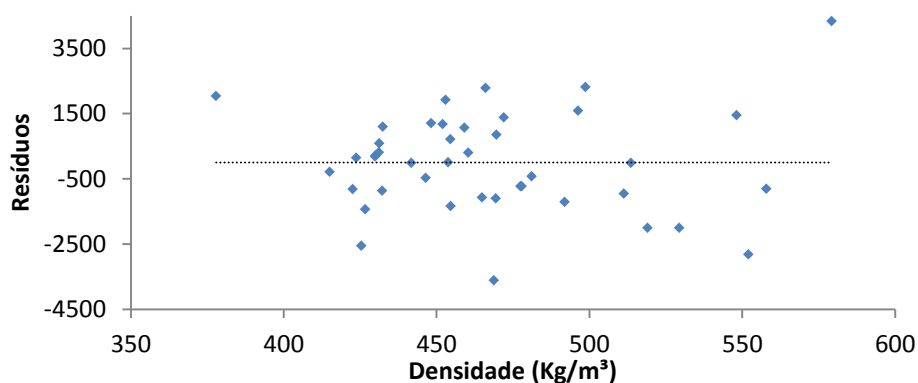


Figura 79 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para a Densidade aparente – Classe S2.

A Figura 80 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente uma distribuição normal.

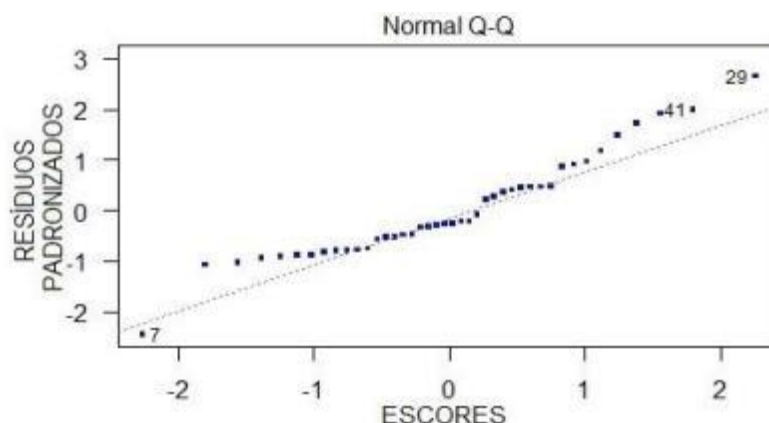


Figura 80 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a Densidade aparente – Classe S2.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 45 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 45 – Quadro de ANOVA (MOE x Densidade) – Classe S2.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	5,568E+07	5,568E+07	22,6	0,0000
Resíduo	40	9,839E+07	2459746		
Total	41	1,541E+08			

Para os graus de liberdade (1,40), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,95. Como o valor calculado de F é igual a 22,6, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é altamente significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{MOE (MPa) = 27,012 \cdot Densidade (MPa) - 5616,6\}$ é adequado.

5.7.5 Classe Visual S3

A Figura 81 apresenta o diagrama de dispersão e a regressão entre a Densidade aparente e o MOE, para os dados da classe S3.

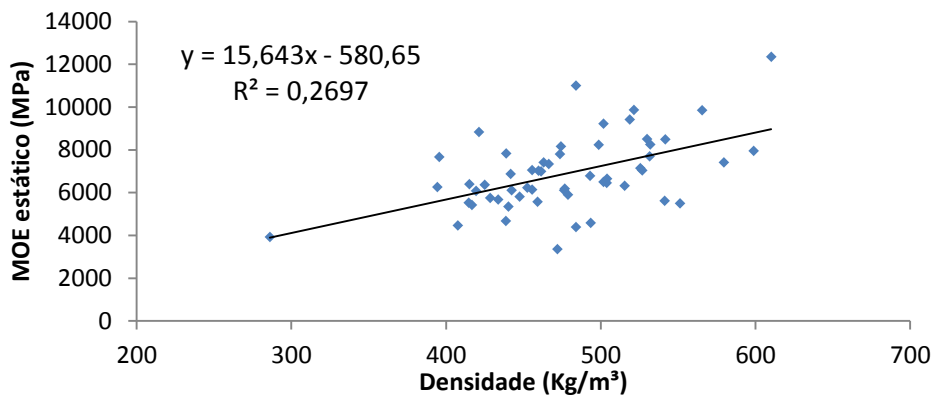


Figura 81 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre o MOE e a Densidade aparente – Classe S3.

A Figura 82 apresenta o gráfico dos resíduos em função dos valores estimados para o MOE, podendo ser observada a homogeneidade da variância.

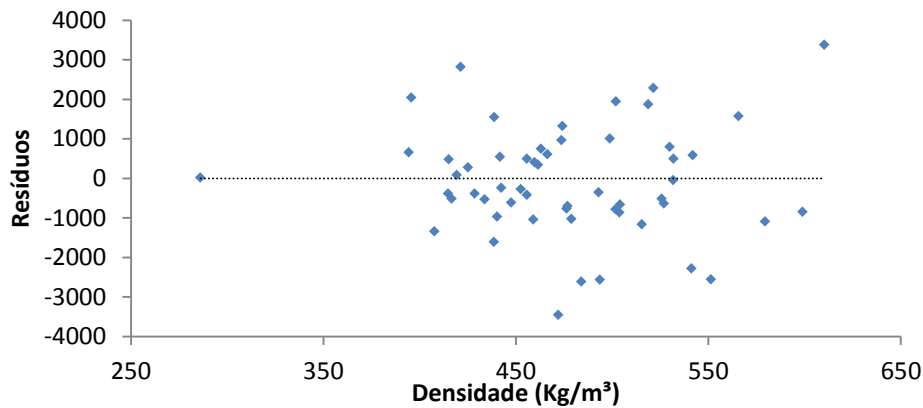


Figura 82 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para a Densidade aparente – Classe S3.

A Figura 83 apresenta o gráfico dos resíduos padronizados contra os escores normais, observando-se, aproximadamente uma distribuição normal.

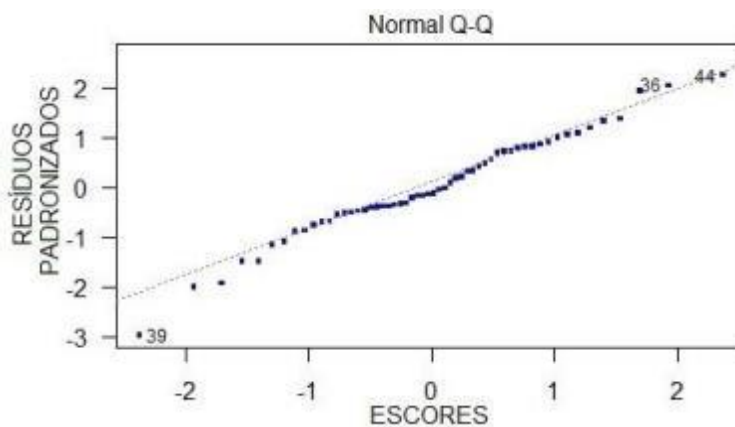


Figura 83 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para a Densidade aparente – Classe S3.

Atendidas as suposições da regressão, a Tabela 46 apresenta os resultados da análise de variância.

Tabela 46 – Quadro de ANOVA para os dados de MOE pela Densidade aparente – Classe S3.

	gl	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	1	4,335E+07	4,335E+07	19,9	0,0000
Resíduo	54	1,174E+08	2173553		
Total	55	1,607E+08			

Para os graus de liberdade (1,54), o valor de F, a um nível de significância de $\alpha=0,05$ é 3,93. Como o valor calculado de F é igual a 19,9, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela regressão é significativa. Assim, o modelo de regressão linear dado por $\{MOE (MPa) = 15,643 \cdot Densidade (MPa) - 580,65\}$ é adequado.

5.7.6 Resumo das Correlações da Densidade

A Tabela 47 apresenta o resumo dos valores das correlações da regressão linear entre a densidade aparente à 12% de umidade e o MOE na flexão estática para as diferentes classes de madeira.

Tabela 47 – Correlação da regressão linear entre a Densidade Aparente e o MOE.

Correlação da Densidade com o MOE		
Classe	Coefficiente de Correlação	Equação
Lote Completo	0,464	$22,869 \cdot Densidade - 3661,5$
SS	0,668	$24,619 \cdot Densidade - 4121,2$
S1	0,253	$18,133 \cdot Densidade - 1608,5$
S2	0,361	$27,012 \cdot Densidade - 5616,6$
S3	0,270	$15,643 \cdot Densidade - 580,65$

A densidade aparente não resultou um bom estimador para o MOE na flexão estática, tendo valores mais significativos para a classe SS, com menor incidência de defeitos e correlações fracas para as classes inferiores S1, S2 e S3.

6 CONCLUSÃO

Do lote completo de 260 peças, após a classificação visual, 213 peças foram enquadradas para utilização estrutural, sendo 33,8% de peças na melhor categoria (SS), 39% de peças nas classes intermediárias, sendo S1(20,2%) e S2(19,7%), e também 26,3% na classe inferior (S3).

O valor médio da umidade das peças foi de 9,5% e os valores da densidade, MOE e MOR foram corrigidos para a condição padrão de 12% de umidade em cada peça.

O valor médio de densidade aparente à 12% de umidade, para o lote completo foi de 484 kg/m³, variando entre 470 kg/m³ (-2,9%) e 502 kg/m³ (+3,7%) entre as classes visuais. Pela densidade as peças apresentaram valores próximos aos da classe C20 (500 kg/m³) da NBR7190.

O Módulo de Elasticidade (MOE) característico na flexão estática à 12% de umidade apresentou valor de 5108 MPa para o lote completo. A classe SS apresentou o maior valor, com 5801 MPa, 13,6% acima do valor do lote completo. O valor do MOE para a S1 foi 4957 MPa (-3,0%), para a S2 foi 4919 MPa (-3,7%) e para a S3 foi 4885 MPa (-4,4%). Os valores do MOE para as classes S1, S2 e S3 foram próximos. As peças, em todas as classes, foram enquadrados na classe C20 (3500 MPa) da NBR7190.

A resistência à flexão (MOR) característica para o lote completo foi 21,7 MPa. A classe SS apresentou o maior valor, 28,6 MPa, 31,8% acima do valor do lote completo. As classes S1, S2 e S3 apresentaram valores de 20,5 MPa (-5,5%), 19,2 MPa (-11,5%) e 18,9 MPa (-12,9%) respectivamente.

A classe SS apresentou os maiores valores característicos das propriedades de MOE e MOR, mesmo com densidade similar entre as classes. A variação média dos valores das propriedades entre as classes S1, S2 e S3 foi pequena, indicando que a junção dessas classes não teria influência significativa, para o lote avaliado.

O E_{DIN} médio para o lote completo foi 13,27% superior aos valores de MOE na flexão estática. Os valores do E_{MTG} foram em média 3,96% acima dos valores do MOE na flexão estática.

Os valores do E_{DIN} foram superiores aos valores de MOE nas diferentes classes visuais. Sendo (+13,38%) na SS, (+11,30%) na S1, (+11,33%) na S2 e (+15,04%) na S3. É possível verificar que o fator de correção do software do MTG aplicado no E_{DIN} , para a espécie *Pinus elliottii* foi entre 0,9166 e 0,9206. Resultando na estimativa mais aproximada

dos valores do E_{MTG} de cada classe visual em SS (+4,38%), S1 (+2,02%), S2 (+2,04%) e S3 (+5,57%), sempre superiores ao valor do MOE.

A correlação da regressão linear entre o E_{MTG} e o MOE foi 0,86 para o lote completo, sendo obtidos os seguintes valores para cada classe: 0,91 (SS), 0,85 (S1), 0,88 (S2) e 0,74 (S3). Os valores de E_{MTG} , após a aproximação definida pelo software do MTG, em função da espécie estudada, apresentaram boas correlações com o MOE na flexão estática. Foi observada uma maior correlação da regressão linear nas peças com menor incidência de defeitos, classe visual SS, havendo uma diminuição na correlação à medida que aumenta a presença dos defeitos naturais.

A correlação da regressão linear entre o E_{DIN} obtido pela frequência natural e o MOE na flexão estática foi 0,87 para o lote completo, sendo obtidos os seguintes valores para cada classe: 0,92 (SS), 0,85 (S1), 0,88 (S2) e 0,75 (S3). As regressões lineares entre o E_{DIN} e o MOE, apresentaram boas correlações, sendo observada uma maior correlação da regressão linear nas peças da classe SS, com menor incidência de defeitos. Nas classes S1, S2 e S3, a presença dos defeitos naturais reduziu a correlação entre as propriedades.

A correlação da regressão linear entre o MOR e o MOE na flexão estática foi 0,48 para o lote completo, sendo obtidos os seguintes valores para cada classe: 0,61 (SS), 0,07 (S1), 0,47 (S2) e 0,27 (S3). O MOR apresentou correlações baixas para estimativa do MOE na flexão estática. Os defeitos naturais, como os *nós*, dependendo de sua localização e dimensão, interferem mais nos valores do MOR do que nos valores do MOE, criando um ponto de fragilidade localizado na peça. Em função disto, as peças com maior incidência de defeitos, apresentaram rupturas não previsíveis, que afetaram negativamente a correlação entre as propriedades nas classes estruturais S1, S2 e S3. Foi observada uma maior correlação da regressão linear na classe SS, em comparação às classes S1, S2 e S3.

A correlação da regressão linear entre o MOE e a densidade aparente à 12% de umidade foi 0,46 para o lote completo, sendo obtidos os seguintes valores para cada classe: 0,67 (SS), 0,25 (S1), 0,36 (S2) e 0,27 (S3). A densidade aparente não resultou um bom estimador para o MOE, com valores mais significativos para a classe SS, com menor incidência de defeitos e correlações fracas para as classes inferiores S1, S2 e S3.

O aparelho portátil de classificação estrutural MTG, por meio da vibração longitudinal apresentou bons resultados para a estimativa do MOE, e é recomendável a utilização deste método para a classificação estrutural de peças serradas de madeira.

A técnica pode contribuir para uma maior velocidade de classificação estrutural das peças de madeira, com baixo custo de instalação e podendo ser aplicado nas serrarias, agregando valor ao produto classificado ou na pré classificação das lamelas para melhor racionalização de vigas de madeira laminada colada (MLC), contribuindo para a evolução da classificação das peças no mercado brasileiro de madeiras para uso estrutural. A classificação das peças permite um maior conhecimento das propriedades das peças utilizadas nos projetos, racionalizando a execução das estruturas. A classificação visual agregada a classificação mecânica são processos essenciais para a utilização do Pinus em vigas laminadas coladas, construções industrializadas e de *woodframe*, aumentando a confiabilidade no material.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198**: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes, Annual Book of ASTM Standards. 76 ed. West Conshohocken, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D245**: Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber. 00 ed. West Conshohocken: Annual Book of ASTM Standards, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4761**: Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material. 02a ed. West Conshohocken: Annual Book of ASTM Standards, 2002.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11700**: Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral. Rio de Janeiro, 1991. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12297**: Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral: medição e quantificação de defeitos. Rio de Janeiro, 1991. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (Brasília) (Org.). **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília: Abraf, 2013.

BARRETT, David et al. Comparison of Machine Grading Methods for Canadian Hemlock. **SBC Industry**, Madison, p.1-6, 2008.

BODIG, J.; JAYNE, B. A.. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. New York: van Nostrand Reinhold, 1993. 712 p.

BUCUR, Voichita. **Acoustics of Wood**. Berlin: Springer-verlag Berlin Heidelberg, 2006. 394 p.

CALIL JÚNIOR, Carlito; MINÁ, Alexandre J. S.. Vibração transversal: Um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 7, n. 2, p.335-338, ago. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662003000200025>.

CARREIRA, Marcelo Rodrigo. **Crítérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus sp.** 2003. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CARREIRA, Marcelo Rodrigo; DIAS, Antônio Alves. Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus sp. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 8, n. 34, p.17-43, out. 2006. Bimestral. ISSN: 1806-6907.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **14081-2**: Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2: Machine grading; additional requirements for initial type testing. Bruxelas: Cen, 2010. 25 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **14081-3**: Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3: Machine grading; additional requirements for factory production control. Bruxelas: Cen, 2010. 19 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **14081-4**: Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 4: Machine grading; grading machine settings for machine controlled systems. Bruxelas: Cen, 2010. 16 p.

FREITAS, Roberto Ramos de. **Classificação de peças estruturais de pinus spp pela MSR (Machine Stress Rate)**. 2004. 185 f. Dissertação (Mestrado) – Área de Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

GATTO, Darci Alberto et al. Qualidade da madeira serrada na região da quarta colônia de imigração italiana do rio grande do sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 1, p.223-233, 2004.

GAUNT, Douglas; VAN WYK, Louw. **Literature review on machine stress grading accuracy check methods**: Manufacturing & Products. 02.1905 Victoria, Australia: Fwpa, 2003. 67 p. ISBN: 1 920883 04 5.

HALABE, Udaya B. et al. Nondestructive Evaluation of Green Wood Using Stress Wave and Transverse Vibration Techniques. **Materials Evaluation**, Columbus, v. 55, n. 9, p.1013-1018, set. 1997.

HERZOG, Thomas et al. **Timber Construction Manual**. Berlin: Friedemann Zeitler, 2008. 375 p.

HOFFMEYER. **Styrkesortering ger mervärde**: Parte 2 - Tillgåenglig teknik. Dinamarca: Laboratory Of Bygningsmaterialer, 1995.

HORÁČEK, Petr; TIPPNER, Jan. Nondestructive Evaluation of Static Bending Properties of Scots Pine Wood using stress wave technique. **Wood Research**, Brno, República Checa, v. 57, n. 3, p.359-366, 2012.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ARVORES (Df). Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual IBA**: 2015 base 2014. Brasília, 2015. 80 p.

JANKOWSKY, Ivaldo Pontes. Fundamentos de secagem de madeiras. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 10, p.1-10, jun. 1990.

JOHANSSON, Carl-johan. Grading of Timber with Respect to Mechanical Properties. In: THELANDERSSON, Sven. **Timber Engineering: Part One – Basic Properties of Wood-Based Structural Elements**. West Sussex: Wiley, 2003. Cap. 3. p. 23-43.

KOLLMANN, Frans F.P.; COTE, Wilfred A.. Physics of Wood. In: KOLLMANN, Frans F.p.. **Principles of Wood Science and Technology: Solid Wood**. Heidelberg: Springer-verlag, 1968. Cap. 6. p. 160-291.

KOLLMANN, Frans F.P.; COTE, Wilfred A.. Mechanics and Rheology of Wood. In: KOLLMANN, Frans F.P.. **Principles of Wood Science and Technology: Solid Wood**. Heidelberg: Springer-verlag, 1968. Cap. 7. p. 292-419.

KRETSCHMANN, David E.. Stress Grades and Design Properties for Lumber, Round Timber, and Ties. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY (Org.). **Wood handbook: Wood as an engineering material**. Washington: U.s. Department Of Agriculture, 2010. Cap. 7. p. 172-187.

KRETSCHMANN, David E.. Mechanical Properties of Wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY (Org.). **Wood handbook: Wood as an engineering material**. Washington: U.s. Department Of Agriculture, 2010. Cap. 5. p. 100-145.

LARSSON, Daniel. **Mechanical characterization of engineering materials by modal testing**. 1997. 97 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Chalmers University Of Technology, Gotemburgo, Suécia, 1997.

MADSEN, B.. Duration of loadest for wet lumber in bending. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 25, n. 5, p.33-40, 1975.

MILLER, D. G.. Selection efficiencies of non-destructive strength tests. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 12, n. 8, p.358-363, 1962.

NOGUEIRA, Marcelo; BALLARIN, Adriano W.. Sensibilidade dos ensaios de ultrassom à ortotropia elástica da madeira. In: CONFERÊNCIA PAN-AMERICANA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS, 3., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** . Rj: ABENDE, 2003.

O'HALLORAN, M. R.; BODIG, J.; BOWDEN, D. C.. Nondestructive parameters of lodge pole pine dimension lumber in bending. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 22, n. 2, p.44-51, 1972.

OLIVEIRA, Fabiana Goia R.; CAMPOS, Janaina Anadia Goes de; SALES, Almir. Ultrasonic Measurements In Brazilian Hardwood. **Materials Research**, São Carlos, v. 5, n. 1, p.51-55, 2002.

ROCCO LAHR, Francisco Antônio. **Sobre a Determinação de Propriedades de Elasticidade da Madeira**. 1983. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1983.

ROZEMA, Peter. **Timber Grader MTG: Operational instructions**. Holanda: Enschede Institutenweg, 2013. 93 p.

SCHWEITZER, Roland. Wood as a Building Material – from the beginnings to the 19th century. In: HERZOG, Thomas. **Timber Construction Manual**. New York: Friedemann Zeitler, 2008. Cap. 1. p. 24-30.

SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcantara et al. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Arvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p.1155-1162, jun. 2012.

TARGA, Luiz A.; BALLARIN, Adriano W.; BIAGGIONI, Marco A. M.. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p.291-299, maio/ago. 2005.

THELANDERSSON, Sven. Wood as a Construction Material. **Timber Engineering: PartOne – Basic Properties of Wood-Based Structural Elements**. West Sussex: Wiley, 2003. Cap. 2. p. 15-23.

WEGENER, Gerd; ZIMMER, Bernhard. Building with wood is building for the future. In: HERZOG, Thomas. **Timber Construction Manual**. Berlin: Friedemann Zeitler, 2008. Cap. 2. p. 47-53.

WIEGAND, Tobias. Grading an improvement of solid timber products. In: HERZOG, Thomas. **Timber Construction Manual**. Berlin: Friedemann Zeitler, 2008. Cap. 3. p. 55-59.