

CRITÉRIOS PARA CLASSIFICAÇÃO VISUAL DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE *Pinus Sp*

MARCELO RODRIGO CARREIRA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Alves Dias

São Carlos
2003

*Aos meus pais Alcides e Lourdes, e a
minha namorada Elizângela...*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e pela oportunidade de estudar .

Ao Professor Antônio Alves Dias, pela amizade e excelente orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Carlito Calil Jr., pela sugestão do tema, pela co-orientação fornecida e pela amizade.

Ao amigo Andrés Batista Cheung, pela colaboração nos trabalhos e pela amizade.

A Mariano Martinez Espinosa, pelas dicas com as análises estatísticas do trabalho.

A todos os amigos do LaMEM, que de alguma forma colaboraram direta ou indiretamente para a produção deste trabalho.

A meus pais Alcides e Lourdes, pelo apoio moral e financeiro fornecido durante todo o curso de mestrado.

Ao meu amor Elizângela, pela paciência e pelo apoio nos momentos difíceis.

Aos professores Cesar Ballarotti e Everaldo Pletz pelo incentivo.

A Battistella Indústria e Comércio de Madeiras pelo fornecimento de toda a madeira utilizada neste trabalho.

Ao IBAMA por permitir o uso da máquina MSR.

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUÇÃO.....	3
1.1 Objetivo	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Classificação de peças estruturais de madeira no Brasil – estado da arte	5
2.2 Métodos de classificação estrutural da madeira	10
2.3 Classificação visual da madeira.....	11
2.3.1 Histórico da classificação visual	11
2.3.2 Componentes de uma classificação visual.....	13
2.3.3 Estabelecimento de classes visuais	13
2.3.4 Determinação das propriedades de resistência	34
2.4 Classificação mecânica	46
2.4.1 Histórico da classificação mecânica.....	47
2.4.2 Componentes de uma classificação mecânica	49
2.4.3 Sistemas MSR E MEL.....	49
2.4.4 Sistema <i>E-rated</i>	56
2.4.5 Avaliação não destrutiva pela técnica de vibração transversal.....	60
3 MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1 Material utilizado	62
3.2 Método	63
3.2.1 Classificação visual	63
3.2.2 Classificação mecânica na máquina MSR.....	64
3.2.3 Classificação mecânica por vibração transversal.....	66
3.2.4 Teste de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia	67
3.2.5 Teste de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia	68
3.2.6 Teste de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova.....	71
3.2.7 Ajuste dos dados	72
4 RESULTADOS OBTIDOS.....	74
4.1 Classificação visual.....	74
4.2 Valores de MOE em relação ao eixo de menor inércia.....	74
4.3 MOR e MOE segundo o eixo de maior inércia	81
4.4 Testes de compressão paralela em corpos-de-prova.....	85
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	87
5.1 Aferição da máquina MSR.....	87
5.2 Aferição do equipamento de vibração transversal.....	95
5.3 Verificação da influência da disposição das pranchas na determinação do MOE estático	98
5.4 Análise dos resultados do MOE em relação ao eixo de maior inércia.....	106
5.5 Análise dos resultados do MOR em relação ao eixo de maior inércia.....	111
5.6 Análise da correlação entre MOR e MOE em relação ao eixo de maior inércia.	116
5.7 Análise da correlação entre o MOR e o MOE em relação ao eixo de menor inércia.....	118
5.8 Determinação do Valor Característico do MOR e do valor médio do MOE em relação ao eixo de maior inércia para cada classe.	121

5.9	Análise da correlação entre E_{co} e f_{co} para os corpos-de-prova.	125
5.10	Análise da correlação entre f_{co} e ρ_{ap} para os corpos-de-prova.	127
5.11	Análise da correlação entre E_{co} e ρ_{ap} para os corpos-de-prova.	129
5.12	Determinação das propriedades de resistência e rigidez à compressão paralela em corpos-de-prova	131
5.13	Comparação das resistências à compressão paralela entre os corpos-de-prova.	133
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	136
7	ANEXO A – CRITÉRIOS PARA A LIMITAÇÃO DOS DEFEITOS	142
7.1	Inclinação das fibras.	142
7.2	Nós	142
7.2.1	Nó na face estreita.	143
7.2.2	Nó no centro da face larga	143
7.2.3	Nó na borda da face larga.	144
7.3	Fendas e Rachas	145
7.4	Empenamento	145
7.4.1	Encurvamento	145
7.4.2	Encanoamento	145
7.4.3	Arqueamento	146
7.4.4	Torcimento.	146
8	ANEXO B – Códigos de ruptura utilizados nos testes de flexão estática e compressão paralela.	148
8.1	Flexão estática.	148
8.2	Compressão paralela	151
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	153
10	APÊNDICE A – EXEMPLO DE REGRAS DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL ESTRUTURAL PARA MADEIRA DE CONÍFERAS.	158
11	APÊNDICE B - INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DE CRESCIMENTO NA RESISTÊNCIA.	160
11.1	Nós	160
11.2	Fibras cruzadas.	162
11.3	Racha anelar, fenda e fenda superficial.	164
11.4	Madeira comprimida	165
11.5	Madeira juvenil	166
12	APÊNDICE C - CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS PARA O EMPREGO DOS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA NA INDÚSTRIA DE MADEIRA LAMINADA COLADA	168
12.1	ÍNDICES DE RESISTÊNCIA (<i>Stress index</i>)	169
12.1.1	Madeira visualmente classificada.	169
12.1.2	Madeira classificada pelo sistema <i>E-rated</i>	171
12.2	FATORES MODIFICADORES DA RESISTÊNCIA	171
12.2.1	Madeira visualmente classificada.	172
12.2.2	Madeira classificada pelo sistema <i>E-rated</i>	175
13	APÊNDICE D – Valores das propriedades de resistência e rigidez para o <i>Southern Pine</i> norte-americano	177
14	GLOSSÁRIO.	178

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - GRÁFICO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO $E_{LAB}=F(E_{OBRA})$	5
FIGURA 2 - SOLICITAÇÕES NAS VIGAS.	8
FIGURA 3 - MEDIÇÃO DA INCLINAÇÃO DAS FIBRAS DE UMA PEÇA DE MADEIRA.	20
FIGURA 4 - IDENTIFICAÇÃO DOS NÓS EM UMA PEÇA DE MADEIRA.	20
FIGURA 5 – NÓS INDIVIDUAIS.	21
FIGURA 6 – CONJUNTO DE NÓS.....	21
FIGURA 7 – NÓ NA BORDA DE UMA PEÇA.	21
FIGURA 8 – MEDIÇÃO DE UM NÓ NA FACE ESTREITA.	22
FIGURA 9 – MEDIÇÃO DE UM NÓ QUE APARECE NAS DUAS FACES DE UMA PEÇA SEM MEDULA.	23
FIGURA 10 – MEDIÇÃO DE UM NÓ NA FACE LARGA.	23
FIGURA 11 - MEDIÇÃO DE UM NÓ DE CANTO EM PEÇA SEM MEDULA.	23
FIGURA 12 - MEDIÇÃO DE UM NÓ DE CANTO EM PEÇA CONTENDO MEDULA.....	24
FIGURA 13 - MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DOS NÓS EM UMA VIGA.	25
FIGURA 14 - MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DOS NÓS EM UMA COLUNA.	26
FIGURA 15 - MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DOS NÓS EM TÁBUAS.....	27
FIGURA 16 – FORMA DE MEDIR UMA RACHA CONFORME ASTM D245-93.	28
FIGURA 17 – FORMAS DE MEDIR UMA FENDA CONFORME ASTM D245-93.	29
FIGURA 18 – FORMAS DE MEDIR UMA RACHA.	29
FIGURA 19 – FENDA SUPERFICIAL.	30
FIGURA 20 – FENDA QUE ATRAVESSA A PEÇA EM ESPESSURA.	30
FIGURA 21 - MEDIÇÃO DO ENCURVAMENTO.	31
FIGURA 22 – MEDIÇÃO DO ENCANOAMENTO.	32
FIGURA 23 - MEDIÇÃO DO ARQUEAMENTO.	32
FIGURA 24 – MEDIÇÃO DO TORCIMENTO.	32
FIGURA 25- LINHA RADIAL REPRESENTATIVA EM PEÇAS CONTENDO MEDULA.	33
FIGURA 26 - LINHA RADIAL REPRESENTATIVA EM PEÇAS SEM MEDULA.....	34
FIGURA 27 - HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIAS RELATIVAS.	40
FIGURA 28 - HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIAS RELATIVAS PARA OS DADOS TRANSFORMADOS.....	40
FIGURA 29 – TESTE DE FLEXÃO EM CAMPO.	43
FIGURA 30 – MÁQUINA DE FLEXÃO UTILIZADA NO PROGRAMA <i>IN-GRADE</i> ALOJADA DENTRO DO PORTA-MALAS DE UM VEÍCULO DE PASSEIO.....	44
FIGURA 31 - ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DE UMA MÁQUINA MSR.....	48
FIGURA 32 - ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA POR ANÁLISE DE REGRESSÃO.	54
FIGURA 33 - RELAÇÃO TÍPICA ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE E O MÓDULO DE RUPTURA.	54
FIGURA 34 - RELAÇÃO ENTRE O MOR E O MOE ESTÁTICO EM RELAÇÃO AO EIXO DE MENOR INÉRCIA DA PEÇA.....	55
FIGURA 35 - ESTIMATIVA DO MOE MÍNIMO PARA O ENQUADRAMENTO NAS CLASSES DAS TABELAS 16 E 17.....	56
FIGURA 36 - SISTEMA MASSA-MOLA E VIGA VIBRANDO TRANSVERSALMENTE.....	60
FIGURA 37 - ESQUEMA DE UM EQUIPAMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DO MOE POR VIBRAÇÃO TRANSVERSAL.	61
FIGURA 38 – CLASSIFICAÇÃO VISUAL E DETALHE DO GABARITO DE ACRÍLICO.....	64
FIGURA 39 – ELEMENTOS DA MÁQUINA DE CLASSIFICAÇÕES.....	65

FIGURA 40 – DETALHES DA CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA MSR.	65
FIGURA 41 – DESENVOLVIMENTO DA CLASSIFICAÇÃO COM A MÁQUINA MSR	66
FIGURA 42 – EQUIPAMENTO DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL UTILIZADO NOS TESTES.....	67
FIGURA 43 – TESTE DE FLEXÃO ESTÁTICA EM RELAÇÃO AO EIXO DE MENOR INÉRCIA DAS PRANCHAS E DETALHE DO APOIO.....	68
FIGURA 44 – ARRANJO DOS TESTES DE FLEXÃO ESTÁTICA EM RELAÇÃO AO EIXO DE MAIOR INÉRCIA.	69
FIGURA 45 – DETALHE DOS CONTRAVENTAMENTOS.	70
FIGURA 46 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO E CÉLULA DE CARGA.	72
FIGURA 47 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE MOE ESTÁTICO E MOE MSR.	89
FIGURA 48 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA O MOE MSR.	89
FIGURA 49 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA OS ESCORES NORMAIS.....	90
FIGURA 50 – DETERMINAÇÃO DO $\lambda_{\text{ÓTIMO}}$ PARA O MOE_{MSR}	91
FIGURA 51 – DETERMINAÇÃO DO $\lambda_{\text{ÓTIMO}}$ PARA O $\text{MOE}_{\text{ESTÁTICO}}$	91
FIGURA 52 – RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA OS DADOS TRANSFORMADOS.....	92
FIGURA 53 – RESÍDUOS CONTRA ESCORES NORMAIS PARA OS DADOS TRANSFORMADOS.	92
FIGURA 54 – HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS PARA OS DADOS TRANSFORMADOS.	93
FIGURA 55 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE MOE ESTÁTICO E MOE MSR, PARA OS DADOS TRANSFORMADOS.....	93
FIGURA 56 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE $\text{MOE}_{\text{ESTÁTICO}}$ E $\text{MOE}_{\text{VIBRAÇÃO-TRANSVERSAL}}$	96
FIGURA 57 – RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA OS DADOS DO MOE OBTIDO NA VIBRAÇÃO TRANSVERSAL.....	96
FIGURA 58 – RESÍDUOS CONTRA ESCORES NORMAIS PARA OS DADOS DO MOE OBTIDO NA VIBRAÇÃO TRANSVERSAL.....	97
FIGURA 59 – HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS PARA OS DADOS DO MOE OBTIDO NA VIBRAÇÃO TRANSVERSAL.	97
FIGURA 60 - GRÁFICO DE RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA OS DADOS AGRUPADOS DO MOE DA CLASSE N°2-ND.....	99
FIGURA 61 – GRÁFICO DE RESÍDUOS CONTRA OS ESCORES NORMAIS PARA OS DADOS AGRUPADOS DO MOE DA CLASSE N°2-ND.....	99
FIGURA 62 – DETERMINAÇÃO DO $\lambda_{\text{ÓTIMO}}$ PARA OS DADOS AGRUPADOS DO MOE DA CLASSE N°2-ND.....	100
FIGURA 63 - GRÁFICO DE RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA OS DADOS TRANSFORMADOS E AGRUPADOS DO MOE DA CLASSE N°2-ND.	100
FIGURA 64 – GRÁFICO DE RESÍDUOS CONTRA OS ESCORES NORMAIS PARA OS DADOS TRANSFORMADOS DO MOE DA CLASSE N°2-ND.	101
FIGURA 65 – TESTE DE NORMALIDADE PARA OS DADOS TRANSFORMADOS DO MOE DA CLASSE N°2-ND.....	101
FIGURA 66 – GRÁFICO DE RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA OS DADOS DO MOE.....	106
FIGURA 67 – GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL DOS RESÍDUOS.	107
FIGURA 68 – TESTE DE NORMALIDADE PARA OS DADOS DO MOE.....	107
FIGURA 69– DETERMINAÇÃO DO $\lambda_{\text{ÓTIMO}}$ PARA O MOE.....	108

FIGURA 70 – GRÁFICO DE RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA OS DADOS DO MOE TRANSFORMADOS PELA EQUAÇÃO 30.	108
FIGURA 71 – GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL PARA OS DADOS DA TABELA 32.	109
FIGURA 72 –TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK PARA O MOE TRANSFORMADO.	109
FIGURA 73 – RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA OS DADOS DO MOR.	111
FIGURA 74 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA OS ESCORES NORMAIS PARA OS DADOS DO MOR.	112
FIGURA 75 - TESTE DE NORMALIDADE PARA OS DADOS DO MOR.	112
FIGURA 76 – DETERMINAÇÃO DO $\lambda_{\text{ÓTIMO}}$ PARA O MOR.	113
FIGURA 77 – RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA OS DADOS TRANSFORMADOS DO MOR.	113
FIGURA 78 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA OS ESCORES NORMAIS PARA OS DADOS DO MOR.	114
FIGURA 79 - TESTE DE NORMALIDADE PARA OS DADOS TRANSFORMADOS DO MOR.	114
FIGURA 80 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE MOE E MOR.	116
FIGURA 81 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA O MOR.	116
FIGURA 82 – GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL DOS RESÍDUOS.	117
FIGURA 83 – HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS.	117
FIGURA 84 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE MOE E MOR.	119
FIGURA 85 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA O MOR.	119
FIGURA 86 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA OS ESCORES NORMAIS.	120
FIGURA 87 – HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS.	120
FIGURA 88 – HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIAS DO MOR PARA A CLASSE N°2-ND.	121
FIGURA 89 – HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIAS DO MOR PARA A CLASSE N°2-D.	122
FIGURA 90 – HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIAS DO MOR PARA A CLASSE SS-ND.	122
FIGURA 91 – HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIAS DO MOR PARA A CLASSE SS-D.	122
FIGURA 92 – TESTE DE NORMALIDADE PARA O MOR DA CLASSE N°2-ND.	123
FIGURA 93 – TESTE DE NORMALIDADE PARA O MOR DA CLASSE N°2-D.	123
FIGURA 94 – TESTE DE NORMALIDADE PARA O MOR DA CLASSE SS-ND.	124
FIGURA 95 – TESTE DE NORMALIDADE PARA O MOR DA CLASSE SS-D.	124
FIGURA 96 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE E_{CO} E F_{CO}	125
FIGURA 97 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA F_{CO}	126
FIGURA 98 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA OS ESCORES NORMAIS.	126
FIGURA 99 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE ρ_{AP} E F_{CO}	127
FIGURA 100 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA F_{CO}	128
FIGURA 101 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA OS ESCORES NORMAIS.	128
FIGURA 102 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE ρ_{AP} E MOE_{CO}	129
FIGURA 103 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA MOE_{CO}	130
FIGURA 104 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA OS ESCORES NORMAIS.	130
FIGURA 105 – TESTE DE NORMALIDADE PARA OS DADOS TRANSFORMADOS DE F_{CO}	132
FIGURA 106 – TESTE DE NORMALIDADE NOS DADOS DE F_{CO} PARA OS CORPOS-DE-PROVA.	133

FIGURA 107 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA OS VALORES ESTIMADOS PARA OS DADOS DE F_{co}	134
FIGURA 108 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS CONTRA OS ESCORES NORMAIS PARA OS DADOS DE F_{co}	134
FIGURA 109 – PEÇAS DE MADEIRA COM ELEVADA DENSIDADE	138
FIGURA 110 – TIPOS DE NÓS E MEDIÇÕES PARA DESCRIÇÃO DO CÓDIGO.....	149
FIGURA 111 – RUPTURA POR TRAÇÃO.	150
FIGURA 112 – DETALHE DA RUPTURA.	150
FIGURA 113 – RUPTURA POR TRAÇÃO NO NÓ.....	150
FIGURA 114 – RUPTURA FRÁGIL POR TRAÇÃO.....	150
FIGURA 115 – RUPTURA POR CISALHAMENTO.....	150
FIGURA 116 – RUPTURA DEVIDO À INCLINAÇÃO DE FIBRAS.	150
FIGURA 117 – RUPTURA POR COMPRESSÃO (ESMAGAMENTO DE FIBRAS).	151
FIGURA 118 – DETALHE DO ESMAGAMENTO DAS FIBRAS.....	151
FIGURA 119 – MODO DE RUPTURA 1.	151
FIGURA 120 – MODO DE RUPTURA 2.	151
FIGURA 121 – MODO DE RUPTURA 3.	152
FIGURA 122 – MODO DE RUPTURA 4.	152
FIGURA 123 – MODO DE RUPTURA 5.	152
FIGURA 124 – MODO DE RUPTURA 6.	152
FIGURA 125 – MODO DE RUPTURA 7.	152
FIGURA 126 – MODO DE RUPTURA 8.	152
FIGURA 127 - EFEITO DO NÓ NA RESISTÊNCIA DA MADEIRA.	160
FIGURA 128 - TIPOS DE NÓS LIMITADOS NA CLASSIFICAÇÃO VISUAL: (A) CENTRO DA FACE LARGA; (B) BORDA DA FACE LARGA E (C) FACE ESTREITA.	161
FIGURA 129 - INCLINAÇÃO DE FIBRAS.	162
FIGURA 130 - EFEITO DAS FIBRAS INCLINADAS NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO.	163
FIGURA 131 - EFEITO DAS FIBRAS INCLINADAS NA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO.....	163
FIGURA 132 - RACHA ANELAR.	164
FIGURA 133 - FENDA.	164
FIGURA 134 - SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA TORA CONTENDO MADEIRA COMPRIMIDA.	165
FIGURA 135 - PEÇA DE MADEIRA SERRADA COM MADEIRA COMPRIMIDA.	166
FIGURA 136 - PROPRIEDADES DA MADEIRA JUVENIL.	166
FIGURA 137 – REGIÃO DE MADEIRA JUVENIL, DE TRANSIÇÃO E ADULTA.....	167

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E MOE_{LAB} PARA TRÊS E QUATRO CLASSES....	6
TABELA 2 - CLASSES DE RESISTÊNCIA PARA AS SEIS ESPÉCIES DE DICOTILEDÔNEAS.	6
TABELA 3 -ESPÉCIES COMERCIAIS E REGIÃO ONDE FORAM OBTIDAS.	7
TABELA 4 -VALORES DE $E_{M,12\%}$ (MPa) NOS PONTOS 1 E 2 DAS VIGAS DE 4,00M.....	9
TABELA 5 - VALORES DE $E_{M,12\%}$ (MPa) NOS PONTOS 1E 2 DAS VIGAS DE 5,00M.....	9
TABELA 6 - VALORES DE $E_{M,12\%}$ (MPa) NOS PONTOS 1 E 3 DAS VIGAS DE 5,00M.....	9
TABELA 7 - VALORES DE $E_{M,12\%}$ (MPa) NOS PONTOS 2 E 3 DAS VIGAS DE 5,00M.....	10
TABELA 8 - NORMAS NORTE-AMERICANAS PARA CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DA MADEIRA.	11
TABELA 9 - AGÊNCIAS NORTE-AMERICANAS DE CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA SERRADA.	14
TABELA 10 - CLASSES VISUAIS DESCRITAS NA <i>NATIONAL GRADING RULE</i>	15
TABELA 11 - GRUPOS DE ESPÉCIES E AGÊNCIAS DE CLASSIFICAÇÃO NORTE-AMERICANAS.	16
TABELA 12- CLASSES DE DENSIDADE DEFINIDAS NA ASTM D245-93.....	33
TABELA 13 - PROPRIEDADES DE PEÇAS DE 140MM X 140MM DE <i>SOUTHERN PINE</i>	38
TABELA 14 - PROPRIEDADES EXPERIMENTAIS E USUAIS PARA COLUNAS DE <i>SOUTHERN PINE</i>	38
TABELA 15 - FATOR DE POSIÇÃO PARA A RESISTÊNCIA A FLEXÃO DE PEÇAS CLASSIFICADAS VISUALMENTE.....	46
TABELA 16 - CLASSES COMUNS DA CLASSIFICAÇÃO MSR.....	50
TABELA 17 - CLASSES COMUNS DA CLASSIFICAÇÃO MEL.....	51
TABELA 18 - FATOR DE POSIÇÃO PARA A RESISTÊNCIA A FLEXÃO DE PEÇAS CLASSIFICADAS MECÂNICAMENTE.	51
TABELA 19 - COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICA DA CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA COM A CLASSIFICAÇÃO VISUAL.	53
TABELA 20 - EQUIVALÊNCIA APROXIMADA DAS DIMENSÕES DOS NÓS DE BORDA PARA A CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA E VISUAL.	57
TABELA 21 - DIMENSÕES MÁXIMAS ADMISSÍVEIS DOS NÓS LOCALIZADOS NA BORDA DAS PEÇAS PARA A CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA E VISUAL.	58
TABELA 22 - VALOR MÍNIMO DO MOE PARA CADA CLASSE.	59
TABELA 23 – LIMITAÇÕES NOS DEFEITOS EM CADA CLASSE PARA PEÇAS DE SEÇÃO TRANSVERSAL DE 3,5CM × 12,5CM. E COMPRIMENTO DE 2,60M.	64
TABELA 24–CÓDIGO DE CORES E OS CORRESPONDENTES INTERVALOS DE MOE	66
TABELA 25 – PEÇAS RECOLHIDAS PARA ANÁLISE.....	74
TABELA 26 – DADOS OBTIDOS NA CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA DO LOTE DE 600 PEÇAS.	74
TABELA 27 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA COM A MÁQUINA MSR E COMO EQUIPAMENTO DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL.....	81
TABELA 28 – RESULTADOS DOS TESTES DE FLEXÃO ESTÁTICA EM RELAÇÃO AO EIXO DE MAIOR INÉRCIA PARA A CLASSE N°2-ND.....	82
TABELA 29 – RESULTADOS DOS TESTES DE FLEXÃO ESTÁTICA EM RELAÇÃO AO EIXO DE MAIOR INÉRCIA PARA A CLASSE N°2-D.....	82
TABELA 30 – RESULTADOS DOS TESTES DE FLEXÃO ESTÁTICA EM RELAÇÃO AO EIXO DE MAIOR INÉRCIA PARA A CLASSE SS - ND.	83

TABELA 31 – RESULTADOS DOS TESTES DE FLEXÃO ESTÁTICA EM RELAÇÃO AO EIXO DE MAIOR INÉRCIA PARA A CLASSE SS-D.	83
TABELA 32 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS RESULTADOS DO MOR OBTIDOS NOS TESTES DE FLEXÃO ESTÁTICA EM RELAÇÃO AO EIXO DE MAIOR INÉRCIA.	84
TABELA 33 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS RESULTADOS DO MOE OBTIDOS NOS TESTES DE FLEXÃO ESTÁTICA EM RELAÇÃO AO EIXO DE MAIOR INÉRCIA.	84
TABELA 34 - RESULTADOS DOS TESTES DE COMPRESSÃO PARALELA PARA A CLASSE Nº2 - ND.....	85
TABELA 35 - RESULTADOS DOS TESTES DE COMPRESSÃO PARALELA PARA A CLASSE Nº2 - D.....	85
TABELA 36 - RESULTADOS DOS TESTES DE COMPRESSÃO PARALELA PARA A CLASSE SS - ND.....	86
TABELA 37 - RESULTADOS DOS TESTES DE COMPRESSÃO PARALELA PARA A CLASSE SS - D.	86
TABELA 38 – QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DO MOE_{MSR} E DO $MOE_{ESTÁTICO}$, TRANSFORMADOS.....	94
TABELA 39 – QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DE E_M E F_M TRANSFORMADOS....	98
TABELA 40 – VALORES DO QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DO MOE DA CLASSE Nº2-ND.....	102
TABELA 41 – TESTE T PARA OS DADOS PAREADOS DO MOE PARA A CLASSE Nº2-ND.	103
TABELA 42 – VALORES DO QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS TRANSFORMADOS DO MOE DA CLASSE Nº2-D.....	103
TABELA 43 – TESTE T PARA OS DADOS PAREADOS DO MOE PARA A CLASSE Nº2-D.	104
TABELA 44 – VALORES DO QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS TRANSFORMADOS DO MOE DA CLASSE SS-ND.	104
TABELA 45 – TESTE T PARA OS DADOS PAREADOS DO MOE PARA A CLASSE SS-ND.	105
TABELA 46 – VALORES DO QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS TRANSFORMADOS DO MOE DA CLASSE SS-D.	105
TABELA 47 – TESTE T PARA OS DADOS PAREADOS DO MOE PARA A CLASSE SS-D... ..	106
TABELA 48 – VALORES DO QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DO MOR TRANSFORMADOS.....	110
TABELA 49 - COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS PAREADAS PARA AS MÉDIAS DO MOE TRANSFORMADO.	110
TABELA 50 – VALORES DO QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DO MOR TRANSFORMADOS.	115
TABELA 51 - COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS PAREADAS PARA AS MÉDIAS DO MOR TRANSFORMADO.	115
TABELA 52 – QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DE E_M E F_M TRANSFORMADOS..	118
TABELA 53 – QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DO MOR E DO MOE EM RELAÇÃO AO EIXO DE MENOR INÉRCIA.	120
TABELA 54 – TRANSFORMAÇÕES PARA OS DADOS DO MOE EM RELAÇÃO AO EIXO DE MAIOR INÉRCIA.	123
TABELA 55 – PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ À FLEXÃO PARA A AMOSTRA EM ESTUDO E PARA O <i>SOUTHERN PINE</i> NORTE-AMERICANO.	125
TABELA 56 – QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DE E_{CO} E F_{CO}	127

TABELA 57 – QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DE MOE E F_{CO} TRANSFORMADOS	128
TABELA 58 – QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DE E_{CO} E ρ_{AP}	130
TABELA 59 – RESULTADOS DOS TESTES DE COMPRESSÃO PARALELA.....	132
TABELA 60 – QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DE F_{CO}	134
TABELA 61 - COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS PAREADAS PARA AS MÉDIAS DO MOE TRANSFORMADO.	135
TABELA 62 – LIMITAÇÃO DA DIMENSÃO DOS NÓS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DA ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL OCUPADA.	137
TABELA 63 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE <i>PINUS TAEDA</i> E <i>ELLIOTII</i> AGRUPADOS, E COM DIMENSÕES NOMINAIS DE 3,5CM X 12,5 CM.	138
TABELA 64 – EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS PARA A AMOSTRA COLETADA.....	140
TABELA 65- RAZÃO DE RESISTÊNCIA ASSOCIADA COM A INCLINAÇÃO DAS FIBRAS... ..	142
TABELA 66 - MÁXIMA INCLINAÇÃO DAS FIBRAS EM CADA CLASSE.	142
TABELA 67 – MÁXIMA PROPORÇÃO PERMISSÍVEL PARA OS NÓS NA FACE ESTREITA.	143
TABELA 68 - LIMITAÇÕES PARA RACHAS E FENDAS.....	145
TABELA 69 – ENCURVAMENTO PERMISSÍVEL PARA PEÇAS COM ESPESURA DE 38MM.	145
TABELA 70 – ENCANOAMENTO MÁXIMO ADMITIDO EM CADA CLASSE.	145
TABELA 71 - ARQUEAMENTO PERMISSÍVEL EM CADA CLASSE.....	146
TABELA 72 – TORCIMENTO PERMISSÍVEL EM CADA CLASSE.....	147
TABELA 73 – TIPO DE RUPTURA.	149
TABELA 74 – EXEMPLO DE REGRAS DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL PARA MADEIRA DE CONÍFERAS.....	158
TABELA 75 - FATORES DE AJUSTE PARA RESISTÊNCIA DE CORPOS-DE-PROVA ISENTOS DE DEFEITOS.	170
TABELA 76 - ÍNDICES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM TESTES COM GRANDES AMOSTRAS E VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA MADEIRA CLASSIFICADA VISUALMENTE.....	170
TABELA 77 - ÍNDICES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO E COMPRESSÃO PARALELA PARA MADEIRA CLASSIFICADA PELO SISTEMA E-RATED.	171
TABELA 78 - FATORES MODIFICADORES DE TENSÃO ASSOCIADOS COM A INCLINAÇÃO DAS FIBRAS.	173
TABELA 79 - CONSTANTES USADAS PARA AJUSTAR A RELAÇÃO DE RESISTÊNCIA EM ELEMENTOS LAMINADOS VERTICALMENTE.	174
TABELA 80 - FATORES DE AJUSTE PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	174
TABELA 81 - FATORES MODIFICADORES MÍNIMOS PARA A RESISTÊNCIA À FLEXÃO E À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS PARA ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MLC PRODUZIDOS COM MADEIRA CLASSIFICADA PELO SISTEMA E-RATED..	176
TABELA 82 – VALORES DE PROJETO PARA <i>SOUTHERN PINE</i> NORTE-AMERICANO.....	177

LISTA DE SIMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

AITC – American Institute of Timber Construction

ALSC – American Lumber Standard Committee

ANOVA – análise de variância

C_D – coeficiente de duração do carregamento

C_{fu} – coeficiente de posição

C_F – coeficiente de dimensão

C_M – coeficiente de umidade

COV – coeficiente de variação

C_t – coeficiente de temperatura

°C – temperatura em graus Celsius

E – módulo de elasticidade

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

$E_{M12\%}$ - módulo de elasticidade a 12% de umidade

F – força

FPL – Forest Products Laboratory

$F_{\alpha;(k-1);(n-k)}$ – valor tabelado para o teste F

°F – temperatura em graus Fahrenheit

G – módulo de elasticidade transversal

GPa –Giga Pascal

I – momento de inércia

I_a – momento de inércia adotado

I_r – momento de inércia real

K_{mod3} – coeficiente parcial de modificação da norma NBR 7190-97

L – vão livre

LaMEM – Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeira

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

L/h – razão entre o vão e a altura

MEL – Machine Evaluated Lumber

MOE – módulo de elasticidade

MOR – módulo de ruptura à flexão

MPa –Mega Pascal
 MSR – Machine Stress Rated
 NDS – National Design Specification
 NGR – National Grading Rule
 NGRC – National Grading Rule Committee
 R^2 – coeficiente de determinação
 Sd – desvio padrão
 SET – departamento de estruturas
 SPIB – Southern Pine Inspection Bureau
 SR – razão de resistência
 SQ – soma dos quadrados
 USDA – United States Department of Agriculture
 USP – Universidade de São Paulo
 VQL – visual quality level
 W – peso

Letras romanas minúsculas

b – base, a menor dimensão da seção transversal
 cm – centímetro
f – deslocamento vertical
 f_c – resistência à compressão
 f_{co} – resistência a compressão paralela
 f_d – resistência de cálculo
 f_k – resistência característica
 f_m – módulo de ruptura à flexão
 f_r – frequência natural de vibração
 g – aceleração da gravidade; ou unidade de massa em gramas
 gl – grau de liberdade
 h – altura, a maior dimensão da seção transversal
 in – unidade de comprimento em polegadas (inches)
 k – constante
 lb – unidade de força em libra
 ln – lognormal

m – metro

min – minutos

mm – milímetro

$t_{\alpha/2}$ – valor tabelado da distribuição t de student para o nível de significância

$\alpha/2$

\bar{x} - média das observações

x_p – resposta prevista

x_{ii} – valor observado

x_{ii}' – valor estimado

Letras gregas minúsculas

α - nível de significância; ou termo independente

β - coeficiente angular

ε - deformação específica

ε_i – resíduo para a observação i

λ - coeficiente para a transformação de Box-Cox

μ - média

ρ_{ap} – densidade aparente

Letras gregas minúsculas

Δ - deslocamento vertical

ΔP – incremento de força

Δv – incremento de deslocamento vertical

σ - tensão normal

σ^2 – variância

RESUMO

CARREIRA, M. R. (2003). Critérios para classificação visual de peças estruturais de *Pinus Sp.* São Carlos. 182p. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A utilização estrutural da madeira serrada oriunda de florestas plantadas apresenta, no Brasil, um considerável potencial para expansão, pois as restrições sobre as florestas nativas são irreversíveis e o mercado se volta, em larga escala, para o uso das madeiras de reflorestamento, destacando-se o *Pinus Sp* como uma das espécies mais promissoras. Entretanto, como resultado do crescimento acelerado, a madeira proveniente destas espécies apresenta muitos defeitos, tornando-se imprescindível a realização da classificação para sua aplicação estrutural. Por outro lado, atualmente no Brasil não há procedimentos normatizados para a classificação de peças estruturais de madeira. Neste trabalho foi verificada a adequabilidade das regras de classificação visual do Southern Pine Inspection Bureau (SPIB) aplicadas à madeira de *Pinus* provenientes de florestas plantadas na região de Lages, Santa Catarina. Foi realizada a classificação visual de 600 peças de *Pinus Sp.* que tiveram a sua rigidez à flexão em relação ao eixo de menor inércia determinada por três métodos: ensaio estático de flexão, equipamento MSR, e equipamento de vibração transversal. Parte destas peças (96) distribuídas em igual número em quatro classes de resistência foi testada à flexão estática em relação ao eixo de maior inércia, com a finalidade de determinar a resistência e a rigidez à flexão de cada classe. O trabalho apresenta correlações entre propriedades de resistência, rigidez e a densidade. O método de classificação visual descrito nas regras do SPIB mostrou-se adequado para ser aplicado na madeira proveniente de florestas de *Pinus Sp* plantadas no Brasil.

Palavras-chave: madeiras, classificação visual, *Pinus*.

ABSTRACT

CARREIRA, M. R. (2003). Rules for visual grading of structural lumber of *Pinus Sp.* São Carlos. 182p. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The structural use of lumber from planted forests presents, in Brazil, a considerable potential for expansion, whereas the restrictions on the native forests are irreversible and the market turns, in wide scale, for the use of the reforestation lumber, standing out the lumber of *Pinus Sp* as one of the most promising species. However, as a result of the fast growth, the coming lumber of these species presents many defects, becoming indispensable the accomplishment of the grading for its structural application. On the other hand, now in Brazil there are not established procedures for the grading of structural lumber. In this work the adequability of Southern Pine Inspection Bureau (SPIB) grading rules applied to lumber of reforestation from city of Lages – SC, were verified. The visual grading of 600 pieces of *Pinus Sp* was accomplished. The flatwise bending stiffness was determined by three methods: static bending, MSR equipment, and equipment of transverse vibration. A part of these pieces (96) distributed in the same number in four structural grades it was tested to the static edgewise bending, with the purpose of determining bending strength and stiffness of each grade. This work presents correlations among strength properties, stiffness and the density. The method of visual grading described in the rules of SPIB was shown appropriate to be applied in the lumber from forests of *Pinus Sp* planted in Brazil.

Keywords: lumber, visual grading, Pinus.

1 INTRODUÇÃO

A madeira serrada de uma tora, independentemente da espécie e dimensão, é bastante variável em suas propriedades mecânicas. É comum encontrar diferenças de resistência acima de trezentos por cento de uma peça para outra da mesma espécie e mesma dimensão. Segundo CURRY (1969), há duas razões para isto. A primeira razão se deve à forte correlação existente entre a resistência e a densidade da madeira. Há uma grande variação nesta característica entre as árvores de uma mesma espécie. Ainda de acordo com CURRY (1969), a segunda razão é que outras características naturais de crescimento, em particular os nós, têm um efeito adverso na resistência, e a extensão, localização e a dimensão deles diferem em cada peça de madeira.

Por outro lado, o máximo de economia do material é obtido quando a variação das características em uma determinada classe é limitada, e todas as peças são utilizadas com seu total potencial.

A norma brasileira NBR 7190-97 (Projeto de Estruturas de Madeira) não apresenta os procedimentos para a classificação estrutural de peças de madeira. Porém, a qualidade da madeira é levada em conta no dimensionamento por meio do coeficiente parcial de modificação K_{mod3} . Este coeficiente é adotado igual a 1,0 no caso de madeira de primeira categoria, e igual a 0,8 no caso de madeira de segunda categoria. A condição de madeira de primeira categoria descrita na norma NBR 7190-97 somente pode ser admitida se todas as peças estruturais forem classificadas como isentas de defeitos, por meio de método visual normatizado, e também submetidas a uma classificação mecânica que garanta a homogeneidade da rigidez das peças que compõem o lote. Desta forma, torna-se necessário agrupar as peças de madeira com propriedades semelhantes em classes, permitindo assim, a utilização segura e racional dos recursos florestais disponíveis.

Neste escopo, foi aplicado neste trabalho o método norte-americano de classificação visual descrito nas regras de classificação visual do Southern Pine Inspection Bureau (SPIB) com base na norma ASTM D245-93 (*Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*) para a classificação estrutural de peças de madeira do gênero *Pinus* e verificação da adequação deste método às espécies de *Pinus Sp* plantadas no Brasil. Determinou-se também o valor característico do módulo de ruptura à flexão para cada classe visual por meio de análise estatística da distribuição de resistência de cada classe.

1.1 Objetivo

Os objetivos principais deste trabalho compreendem a verificação da eficiência e da adequação das regras de classificação visual do SPIB aplicadas à madeira de coníferas das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* provenientes de florestas plantadas no Brasil e determinar valores de propriedades de resistência e de rigidez para o lote em estudo.

Os objetivos secundários são:

- Verificar a influência da disposição das peças na determinação da rigidez à flexão;
- Aferir os resultados da máquina MSR e do equipamento de vibração transversal;
- Correlacionar o módulo de ruptura em relação ao eixo de maior inércia com a rigidez à flexão em relação aos eixos de maior e de menor inércia;
- Correlacionar a resistência à compressão paralela em corpos-de-prova com a rigidez à compressão paralela;
- Correlacionar a resistência à compressão paralela em corpos-de-prova com a densidade
- Correlacionar a rigidez à compressão paralela em corpos de prova com a densidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Classificação de peças estruturais de madeira no Brasil – estado da arte

FURIATTI (1981) pesquisou os métodos de classificação visual e mecânica e determinou uma correlação entre o módulo de elasticidade (MOE) medido a partir de ensaios de obra por ele idealizado e o MOE medido em laboratório para peças de Peroba Rosa (*Aspidosperma Sp*) com dimensões de 6cm x 12cm x 6,00m. A análise dos resultados levou ao seguinte gráfico de correlação.

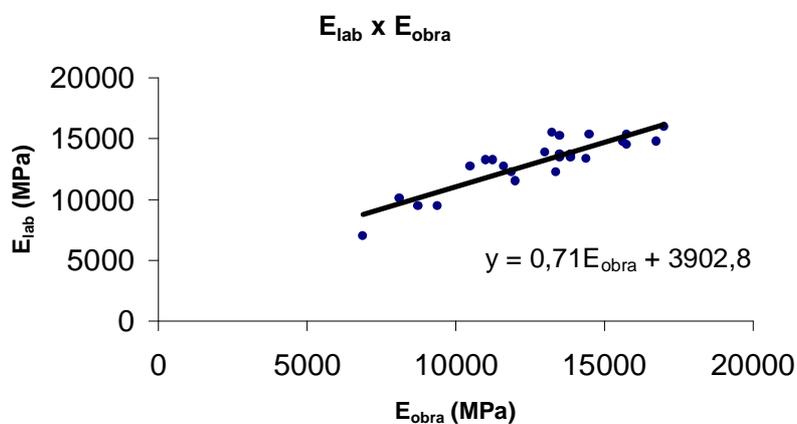


Figura 1 - Gráfico da equação de regressão $E_{lab}=f(E_{obra})$.

Fonte: FURIATTI (1981).

FURIATTI (1981) ainda estabeleceu classes de resistência baseadas no MOE avaliado pelo ensaio de obra. As resistências estabelecidas foram determinadas teoricamente de acordo com a norma NB-11 (Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira) para peças comprimidas de Peroba Rosa de seção 12cm x 12cm com comprimento de 3,50m.

Tabela 1 - Resistência a compressão e MOE_{lab} para três e quatro classes.

Três classes		
Classe	E_{Lab} (MPa)	f_{co} (MPa) ^a
1 ^a	10.528	25,4
2 ^a	8.496	20,5
3 ^a	6.666	16,1
Quatro classes		
Classe	E_{Lab} (MPa)	f_{co} (MPa) ^a
1 ^a	11.022	26,6
2 ^a	9.474	22,9
3 ^a	7.672	18,5
4 ^a	6.666	16,1

a. Tensões admissíveis.

Fonte: FURIATTI (1981).

MELO (1984) testou trinta e cinco vigas com seção transversal de 5cm x 10cm e comprimento de 3,00m das espécies Andiroba (*Carapa guianensis*), Copaíba (*Copaifera multijuga*), Mururé (*Clarisia racemosa*), Pau-Jacaré (*Piptadenia Gonoacantha*), Tachi Preto Folha Grande (*Sclerolobium*) e Tauarí (*Couratari stellata*) na máquina de classificação Computermatik MK P IVa e similarmente em uma máquina universal de testes. Com os dados dos ensaios estabeleceu classes de resistência baseadas em intervalos de MOE, conforme mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Classes de resistência para as seis espécies de dicotiledôneas.

Classes	Resistência (MPa) ^a	Módulo de Elasticidade ($\times 10^3$ MPa)
A	31,5	18,4 - 21,0
B	25,0	16,2 - 18,4
C	20,0	14,5 - 16,2
D	16,0	13,0 - 14,5
E	12,5	11,8 - 13,0
F	10,0	10,9 - 11,8
G	8,0	10,3 - 10,9
H	6,3	9,5 - 10,3

a. Tensões admissíveis

Fonte: MELO (1984).

OKIMOTO *et al* (1995) elaboraram um manual de classificação visual e um ensaio de obra para a classificação mecânica de peças estruturais de madeira das espécies relacionadas na tabela 3.

Tabela 3 -Espécies comerciais e região onde foram obtidas.

Nome comercial	Região
Angelim pedra	N - S - SE - CO
Angelim vermelho	S
Aroeira do sertão	SE - CO
Canafístula	SE
Cedrinho	N - S - SE - CO
Cumarú	SE
Cupiúba	N - S - SE
Eucalipto Citriodora	SE
Ipê	SE
Itaúba	CO
Jacarúba	N
Jatobá	S - SE
Maçaranduba	SE
Peroba Rosa	S - SE - CO
Pinus	S

Fonte: OKIMOTO *et al* (1995).

Com relação à classificação visual, OKIMOTO *et al* (1995) relacionaram as características visíveis de redução de resistência com um critério para rejeição ou aceitação das peças, não sendo estabelecidas relações com as resistências das mesmas.

Para a classificação mecânica OKIMOTO *et al* (1995) determinaram os valores máximos dos deslocamentos verticais para várias seções transversais, a partir de um valor mínimo do módulo de elasticidade estabelecido para cada espécie.

PIGOZZO *et al* (2000), realizaram testes de flexão estática em doze vigas de Envira (*Sterculia Sp*) com os seguintes objetivos: definir o vão livre mais adequado para os ensaios não-destrutivos de flexão em peças estruturais de madeira considerando as dimensões comerciais; estudar o número mínimo de pontos a serem ensaiados em cada peça; analisar a precisão dos resultados; e analisar a estimativa do custo desses ensaios para pequenas empresas.

Os testes foram feitos em vigas de seção transversal de 6cm x 12cm com carregamento centrado no vão livre de 3,00m, sendo seis peças com comprimento de 4,00m e seis peças com comprimento de 5,00m. As peças foram ensaiadas com carregamentos nas posições A e B, respectivamente perpendiculares aos eixos de menor e maior inércia, nos pontos 1 e 2 para as vigas de 4,00 m e nos pontos 1, 2 e 3 para as vigas de 5,00 m, conforme mostra a figura 2.

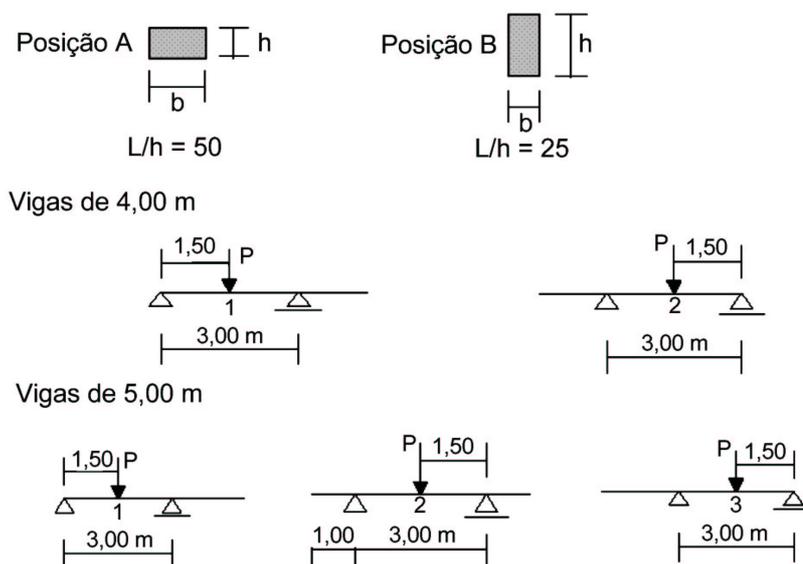


Figura 2 - Solicitações nas vigas.

Fonte: PIGOZZO *et al* (2000).

Os carregamentos foram realizados com velocidades de 4,5 a 5,0 MPa/min e foram aplicados de forma crescente até atingir deslocamentos da ordem de $L/200(\text{cm})$, no ponto de aplicação da força.

O módulo de elasticidade à flexão foi obtido pela equação 1:

$$E = \frac{F}{f} \cdot \frac{L^3}{48 \cdot I} \quad (1)$$

Sendo:

F = Força aplicada;

L = Vão livre igual a 3,00m;

f = Deslocamento vertical igual a $L/200$;

I = Momento de inércia da seção transversal.

Os módulos de elasticidade foram corrigidos para 12% de umidade conforme a norma NBR 7190-97 (Projeto de Estruturas de Madeira). As tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam os dados dos testes de flexão.

Tabela 4 - Valores de $E_{M,12\%}$ (MPa) nos pontos 1 e 2 das vigas de 4,00m.

Vigas	Posição A			Posição B		
	Ponto 1	Ponto 2	Diferença %	Ponto 1	Ponto 2	Diferença %
4.1	12243	11588	5,66	12506	11643	7,42
4.2	18607	19265	3,54	17328	17952	3,6
4.3	16419	16383	0,22	16447	16468	0,13
4.4	18346	17210	6,6	17802	17132	3,91
4.5	18590	18255	1,83	18986	18163	4,53
4.6	15800	17041	7,86	13938	15526	11,39
Média	16668	16624		16168	16147	
Variância	6133305	7114828		6083106	5813233	
Média das diferenças %	4,28			5,16		

Fonte: PIGOZZO *et al* (2000).Tabela 5 - Valores de $E_{M,12\%}$ (MPa) nos pontos 1e 2 das vigas de 5,00m.

Vigas	Posição A			Posição B		
	Ponto 1	Ponto 2	Diferença %	Ponto 1	Ponto 2	Diferença %
5.1	16222	16626	2,49	15865	16437	3,61
5.2	12937	14154	9,41	12970	13244	2,12
5.3	15961	16989	6,44	16146	17375	7,61
5.4	14605	14948	2,35	14275	14405	0,91
5.5	15307	16866	10,31	16222	17006	4,83
5.6	16956	17860	5,33	16882	17336	2,69
Média	15381	16244		15393	15967	
Variância	2030196	1954901		2163603	3002633	
Média das diferenças %	6,06			6,63		

Fonte: PIGOZZO *et al* (2000).Tabela 6 - Valores de $E_{M,12\%}$ (MPa) nos pontos 1 e 3 das vigas de 5,00m.

Vigas	Posição A			Posição B		
	Ponto 1	Ponto 3	Diferença %	Ponto 1	Ponto 3	Diferença %
5.1	16222	17364	7,04	15865	17529	10,48
5.2	12937	14907	15,23	12970	14103	8,74
5.3	15961	17810	11,59	16146	17874	10,7
5.4	14605	14530	0,51	14275	14190	0,6
5.5	15307	17884	16,83	16222	17597	8,48
5.6	16956	16944	0,07	16882	16112	4,78
Média	15331	16573		15393	16234	
Variância	2018102	2192258		2163603	2990878	
Média das diferenças %	8,54			7,3		

Fonte: PIGOZZO *et al* (2000).

Tabela 7 - Valores de $E_{M,12\%}$ (MPa) nos pontos 2 e 3 das vigas de 5,00m.

Vigas	Posição A			Posição B		
	Ponto 2	Ponto 3	Diferença %	Ponto 2	Ponto 3	Diferença %
5.1	16626	17364	4,44	16437	17529	6,64
5.2	14154	14907	5,32	13244	14103	6,49
5.3	16989	17810	4,83	17375	17874	2,87
5.4	14948	14530	2,87	14405	14190	1,51
5.5	16886	17884	5,91	17006	17597	3,48
5.6	17860	16944	5,41	17336	16112	7,6
Média	16244	16573		15967	16234	
Variância	1954901	2192258		3002633	2990878	
Média das diferenças %			4,8			4,76

Fonte: PIGOZZO *et al* (2000).

Entre as conclusões obtidas por PIGOZZO *et al* (2000) destacam-se as seguintes:

- Para vigas sem defeitos visuais, pode-se determinar o módulo de elasticidade à flexão somente na posição A, pois os resultados das posições A e B foram estatisticamente equivalentes ao nível de significância de 95%.
- Nas peças estudadas, demonstrou-se que em dois pontos, distantes de um ou dois metros, os valores de E_M foram estatisticamente equivalentes ao nível de significância de 95%. Dessa forma as peças de quatro e cinco metros poderiam ter os seus valores de E_M caracterizados com apenas um ensaio.
- O impacto do custo da classificação de peças estruturais no preço final da madeira não traria maiores conseqüências uma vez que o consumidor economizaria ao adquirir menor volume de madeira, utilizando classes de maiores resistências e a possibilidade de adquirir peças de primeira categoria permitiria que o coeficiente parcial de modificação k_{mod3} ficasse com valor 1,0, conforme NBR 7190-97, representando um acréscimo direto de 25%, na resistência de cálculo, em relação às peças não classificadas.

2.2 Métodos de classificação estrutural da madeira

Dois métodos são usados para a classificação estrutural de peças de madeira, o visual e o mecânico.

Na classificação visual da madeira, o classificador examina cada peça e limita o tipo, localização e tamanho dos vários defeitos que podem afetar a resistência estrutural.

A classificação mecânica é baseada no uso de um estimador para avaliar a resistência da madeira. Entre os estimadores mais utilizados destacam-se a densidade e a rigidez à flexão.

Segundo GALLIGAN & MCDONALD (2000), na América do Norte a maior parte da madeira estrutural ainda é visualmente classificada. Porém o volume de madeira classificada mecanicamente vem aumentando progressivamente.

A tabela 8 mostra as normas norte-americanas de classificação aplicáveis para cada dimensão e espécie de madeira.

Tabela 8 - Normas norte-americanas para classificação estrutural da madeira.

Dimensão	Classificação	Propriedade	Norma	Aplicável à
Tábuas	Visual	Corpos de prova isentos de defeitos	ASTM D245	Todas as espécies
Caibros e pranchas	Visual	Corpos de prova isentos de defeitos	ASTM D245	Redwood, cedars, minor western softwood, hardwoods
		Dimensões estruturais	ASTM D1990	Outras espécies softwood
	Mecânica	Dimensões estruturais	Procedimentos MSR e E-rated	Todas as espécies
Postes	Visual	Corpos de prova isentos de defeitos	ASTM D245	Todas as espécies

Fonte: GREEN & HERNANDEZ (1998).

2.3 Classificação visual da madeira

A classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça de madeira diferem das propriedades mecânicas da madeira isenta de defeitos devido às características de crescimento, e que tais características podem ser vistas e julgadas pelo olho humano. Com o auxílio de regras de classificação, as características de crescimento são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade.

2.3.1 Histórico da classificação visual

O sistema norte-americano de classificação visual estrutural foi desenvolvido como resultado da busca pelos projetistas por tensões admissíveis do material, que atendessem aos critérios de segurança e economia. Em 1923, o *USDA Forest Service* e o *Forest Products Laboratory* publicaram um conjunto de regras básicas de classificação, com alguns valores de resistência. Estes valores de resistência,

determinados para a melhor madeira cortada de uma árvore, foram usados essencialmente sem alterações por mais de 20 anos.

A II Guerra Mundial trouxe alterações dramáticas no sistema de classificação visual, e as resistências de projeto tiveram um incremento temporário. O exército dos Estados Unidos empregou um acréscimo de 85% nas resistências de projeto. Após a II Guerra, alguns dos incrementos nas resistências tornaram-se permanentes. Ao mesmo tempo, um crescimento na demanda por madeira impôs pressão no sistema de classificação, e outras mudanças foram feitas para o uso mais eficiente dos recursos florestais.

A alteração recente foi a criação da norma PS 20-70 (*American Softwood Lumber Standard*), que passou a ter efeito em setembro de 1970. Esta norma incorporou várias características, incluindo as dimensões verde e seca para a determinação da retração da madeira. Sob as exigências da PS 20-70, uma regra nacional de classificação (*National Grading Rule*) foi escrita determinando características uniformes de classificação para todas as espécies de coníferas na dimensão de caibros e pranchas.

De acordo com BREYER *et al* (1998) em 1978, um grande projeto de pesquisa intitulado “*In-Grade Test Program*” foi empreendido juntamente entre a indústria madeireira e o *U.S. Forest Products Laboratory* (FPL). O propósito do programa “*In-Grade*” foi o teste de peças de madeira visualmente classificadas. Aproximadamente 73.000 vigas de dimensões estruturais foram testadas à flexão, tração e compressão paralela às fibras. Segundo GALLIGAN & MCDONALD (2000), a amostragem foi conduzida utilizando-se as principais espécies de madeira dos Estados Unidos e Canadá. Para auxiliar os testes com elementos de dimensões estruturais, duas normas ASTM foram escritas: ASTM D1990 (*Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Visually Graded Dimension Lumber From In-Grade Test of Full-Size Specimens*) e a ASTM D4761 (*Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material*). As regras de classificação visual para as várias espécies foram mantidas, e o nome “*In-Grade*” inclui os elementos testados com a madeira disponível no mercado de acordo com a norma ASTM D4761.

A partir de 1991, a norma norte-americana de dimensionamento de elementos estruturais, NDS (*National design specification for wood construction*) passa a adotar como valores de projeto para caibros e pranchas os resultados obtidos no programa “*In-grade*”. Para as peças de maiores dimensões (postes) a NDS ainda determina os valores de projeto com base na resistência de pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos.

2.3.2 Componentes de uma classificação visual

Basicamente, 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.

A seguir são apresentados os critérios para o estabelecimento das classes visuais, em seguida serão apresentados os métodos de determinação das propriedades de resistência e rigidez.

2.3.3 Estabelecimento de classes visuais

2.3.3.1 Regras de classificação visual

A norma ASTM D245-93 (*Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*) 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, desta forma a norma ASTM D245-93 define o princípio de como as regras de classificação devem ser desenvolvidas.

De acordo com MADSEN (1992), a norma ASTM D245-93 trata somente da classificação estrutural e, além disso, é limitada à classificação visual, que na América do Norte é feita em 95 a 98% da madeira produzida. Ainda segundo MADSEN (1992), a quantidade de material classificado de acordo com as regras de classificação baseadas na norma ASTM D245-93 é estimada em 235.000.000 m³/ano com um valor de aproximadamente 10 bilhões de dólares.

Nos Estados Unidos, toda a madeira de coníferas é produzida em conformidade com a norma PS20-99 (*American Softwood Lumber Standard*) que foi desenvolvida pelo *American Lumber Standard Committee* (ALSC) de acordo com as exigências do *U.S. Department of Commerce*.

A ALSC criou o *National Grading Rules Committee* (NGRC) como um corpo autônomo encarregado do estabelecimento e manutenção da nomenclatura e descrição das classes de madeira. O NGRC desenvolveu a *National Grading Rule* (NGR), uma regra nacional de classificação que uniformiza os procedimentos de classificação visual para as espécies de coníferas das dimensões de caibros e pranchas.

As agências que escrevem e publicam livros com regras de classificação visual contendo descrições para a classificação são apresentadas na tabela 9.

As regras de classificação normalmente são escritas por uma associação de indústrias que representam uma área onde as espécies específicas são recolhidas. A associação de indústrias é freqüentemente fornecedora de um serviço de qualidade tal como a supervisão do material classificado nas serrarias associadas de acordo com as regras de classificação. As regras de classificação especificadas pela norma PS20-99 devem ser certificadas pela câmara de revisão da ALSC para a conformidade com esta norma.

Tabela 9 - Agências norte-americanas de classificação da madeira serrada.

Agências que escrevem regras de classificação
Northeastern Lumber Manufacturers Association (NELMA)
Northern Softwood Lumber Bureau (NSLB)
Redwood Inspection Service (RIS)
Southern Pine Inspection Bureau (SPIB)
West Coast Lumber Inspection Bureau (WCLIB)
Western Wood Products Association (WWPA)
National Lumber Grades Authority (NLGA)

Fonte: GREEN & KRETSCHMANN (1999).

De acordo com GALLIGAN & MCDONALD (2000), a *National Grading Rule* estabelece os nomes de classes (tabela 10) para caibros e pranchas, e também fornece uma combinação de métodos mecânicos e visuais para a classificação de peças destas dimensões. As exigências visuais para este tipo de madeira são desenvolvidas pelas respectivas agências, que escrevem regras de classificação para

cada grupo de espécie em particular, baseando-se nos procedimentos da norma ASTM D245-93.

Conforme GREEN & KRETSCHMANN (1999), a *National Grading Rule* fornece as linhas gerais para a elaboração das regras de classificação da madeira na faixa de dimensões de caibros e pranchas e especifica as características de classificação para as diferentes classes. As regras de classificação para outras dimensões (postes) podem variar entre as agências que escrevem as regras de classificação. A tabela 10 apresenta as classes visuais descritas na *National Grading Rule*, e também mostra a razão de resistência à flexão mínima associada com cada classe para fornecer um índice comparativo de qualidade.

Tabela 10 - Classes visuais descritas na *National Grading Rule*.

Dimensões	Classe	Razão de resistência a flexão (%)
Caibros e pranchas	Select Structural	67
	Nº 1	55
	Nº 2	45
	Nº 3	26
Postes	Select Structural	65
	Nº 1	55
	Nº 2	45
	Nº 3	26

Fonte: National Grading Rule.

De acordo com a norma ASTM D245-93, 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. Segundo MADSEN (1992), o conceito de razão de resistência é realmente hipotético, pois os efeitos das características de crescimento não são completamente compreendidos e são somente aproximados, usando algumas considerações grosseiras.

Por apresentar resultados satisfatórios, a norma ASTM D245 tem sido referência para a elaboração de normas de classificação visual em outros países, a exemplo das normas AS 2858-86 (*Timber - Softwood - Visually stress-graded for structural purposes*) da Austrália, da NCh1207-90 (*Pino Radiata – Classificacion*

visual para uso estrutural – especificaciones de los grados de calidad) do Chile e da NLGA (*National Lumber Grades Authority*) no Canadá.

2.3.3.2 Grupos de espécies

A maioria das espécies norte-americanas é distribuída em grupos, sendo que a madeira obtida a partir de espécies de um mesmo grupo é tratada como equivalente. As espécies são geralmente agrupadas quando têm as mesmas propriedades mecânicas, ou quando a madeira de duas ou mais espécies é muito semelhante na aparência, ou ainda por conveniência de comercialização, segundo GREEN & KRETSCHMANN (1999).

Para a classificação visual por resistência, a norma ASTM D2555-96 (*Standard Test Methods for Establishing Clear Wood Strength Values*) estabelece os procedimentos para a determinação das propriedades de resistência e rigidez de corpos-de-prova isentos de defeitos, para grupos de espécies norte-americanas. A tabela 11 relaciona os grupos das espécies norte-americanas com as respectivas agências de classificação.

Tabela 11 - Grupos de espécies e agências de classificação norte-americanas.

Grupos de espécies	Símbolo	Espécies que podem ser incluídas no grupo	Agências de classificação
Alaska Cedar	AC	Alaska Cedar	WCLIB,WWPA
Redwood	ACR	Redwood	RIS
Canadian Spruce Pine	CSP		NLGA
Douglas - Fir Larch	DF-L	Douglas Fir, Western Larch	WCLIB,WWPA
Douglas - Fir South	DFS	Douglas Fir South	WWPA
Eastern Spruce	ES	Black Spruce, Red Spruce, White Spruce	NELMA, NSLB
Hem - Fir	HF	California Red Fir, Grand Fir, Noble Fir, Pacific Silver Fir, Western Hemlock, White Fir	WCLIB,WWPA
Softwood Species (Western Woods e outras)	SW	Alpine Fir, Balsam Fir, Black Spruce, Douglas Fir, Douglas Fir South, Engelmann Spruce, Idaho White Pine, Jack Pine, Lodgepole	WCLIB,WWPA
Southern Pine	SP	Loblolly Pine, Longleaf Pine, Shortleaf Pine, Slash Pine	SPIB
Spruce - Pine - Fir (South)	SPF	Balsam Fir, Black Spruce, Engelmann Spruce, Jack Pine, Lodgepole Pine, Red Spruce, White Spruce	NELMA, NSLB, WCLIB, WWPA

Fonte: AITC – 117 Manufacturing (2001).

Na América do Norte, 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, portanto, são classificados segundo as regras do Southern Pine Inspection Bureau (SPIB).

2.3.3.3 Regras de classificação e inspeção do SPIB

O SPIB é uma organização sem fins lucrativos, dedicada à manutenção de normas de qualidade para a indústria de *Southern Pine* dos Estados Unidos. O apoio financeiro é derivado inteiramente dos produtores de *Southern Pine*, embora os benefícios deste programa se estendam para todos, engajados na produção, comercialização e distribuição do *Southern Pine* dos Estados Unidos.

Uma função importante do SPIB é a formulação e publicação de regras de classificação para o *Southern Pine*. De acordo com SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994), mais de 95% da produção industrial de *Pinus* é classificada e comercializada de acordo com estas regras. O SPIB também mantém uma equipe de supervisores de qualidade. Esta equipe inspeciona as práticas de classificação e transporte nas serrarias associadas. Por meio de treinamento dos classificadores, o SPIB auxilia as serrarias na manutenção de um alto grau de eficiência na classificação e observação das exigências das regras no embarque de todas as mercadorias.

Por exigência da *National Grading Rule*, as regras do SPIB, como todas as outras regras de classificação visual em vigor nos Estados Unidos, são baseadas na norma ASTM D245-93 para o estabelecimento dos critérios de classificação.

2.3.3.3.1 Classificação quanto ao uso

O efeito de determinadas características na resistência depende tanto da extensão dos defeitos, bem como da maneira como a peça é usada. Desta forma, uma classificação estrutural eficiente requer que as peças de madeira também sejam classificadas em função de suas dimensões e de seu uso. De acordo com a norma ASTM D245, as peças são classificadas quanto à dimensão e uso em:

- ***Caibros e pranchas:*** Peças de seção transversal retangular, com espessura variando de 38mm à 89mm e com largura maior ou igual à 89mm. Estas peças são classificadas principalmente para resistirem a esforços de flexão em relação aos eixos de maior e menor inércia.

- **Vigas e longarinas:** Peças de seção retangular com espessura igual a 114mm e tendo altura igual ou superior a 165mm. Estas peças são classificadas para resistirem a esforço de flexão em relação ao eixo de maior inércia.
- **Postes e colunas:** Peças de seção retangular em que ambos os lados são maiores ou igual a 114mm, sendo que o maior lado deve ser menos de 38mm superior ao menor lado. Estas peças são classificadas para resistirem a esforços de compressão.
- **Tábuas:** Peças de seção retangular em que a espessura é inferior a 38mm, sendo que a largura é igual ou superior a 38mm, porém menor que 140mm. Estas peças são classificadas para serem usadas tanto em aplicações não estruturais como para aplicações estruturais.

2.3.3.3.2 Critérios para limitação dos defeitos segundo a norma ASTM D245

A classificação visual é realizada pelo exame das quatro faces e das extremidades de cada peça. A localização e a natureza dos nós, bem como outras características aparentes na superfície da madeira são avaliadas por todo o comprimento da peça.

Os princípios básicos da classificação visual estrutural, descritos na norma ASTM D245-93, foram estabelecidos para permitir a avaliação de qualquer peça em termos de uma razão de resistência para cada propriedade avaliada.

As razões de resistência associadas com nós em elementos fletidos foram derivadas da relação teórica entre a capacidade resistente de um elemento com seção transversal reduzida pelo maior nó para a capacidade resistente de um elemento sem defeitos.

A norma ASTM D245-93 fornece equações teóricas para a determinação da máxima dimensão permissível dos nós em cada classe, em função da razão de resistência a flexão estabelecida pela *National Grading Rule*. Estas equações são reproduzidas no Anexo A deste trabalho.

As razões de resistência relacionadas com fibras cruzadas foram obtidas experimentalmente.

A norma ASTM D245-93 considera que as fendas e rachas reduzem somente a resistência ao cisalhamento devido à flexão da peça. As razões de resistência associadas às fendas são derivadas teoricamente, considerando a redução da seção transversal pelas fendas.

A resistência à compressão normal às fibras é pouco afetada pelas características de redução de resistência e considera-se uma razão de resistência de 100%.

A resistência à tração da madeira foi relacionada com a resistência à flexão e a razão de resistência para a tração foi determinada experimentalmente por DOYLE & MARKWARDT (1967).

2.3.3.3.3 Medição das características de crescimento

A seguir serão apresentados os critérios de medição das características de crescimento estabelecidos na norma ASTM D245-93 e incorporados pelo SPIB para a elaboração de suas regras de classificação visual, assim como fazem as outras agências de classificação norte-americanas.

2.3.3.3.3.1 Inclinação das fibras

A inclinação das fibras resultante de serragem diagonal, ou fibras espiral ou torcida na árvore é medida pelo ângulo de inclinação das fibras em relação à extremidade da peça. O ângulo é expresso como uma inclinação.

A inclinação das fibras é medida e limitada nas quatro faces por todo o comprimento de uma peça, e na zona que apresentar a maior inclinação geral, desconsiderando o pequeno desvio em torno dos nós. Os desvios localizados somente são considerados quando a peça tiver menos de 89mm de largura, ou altura inferior à 38mm.

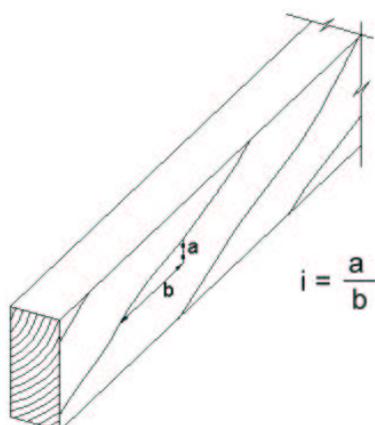


Figura 3 - Medição da inclinação das fibras de uma peça de madeira.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

2.3.3.3.2 Nós

Deve-se medir os nós de maior dimensão posicionados no centro da face larga, na borda da face larga e na face estreita das peças.

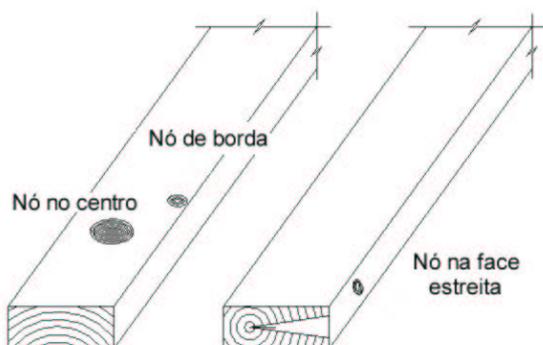


Figura 4 - Identificação dos nós em uma peça de madeira.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

Um conjunto de nós é tratado como um nó individual. Observa-se, entretanto, que no caso de se ter dois ou mais nós próximos, mas com fibras inclinadas em torno de cada nó individualmente, não se deve considerar como um conjunto de nós.

Os buracos associados com nós são medidos e limitados da mesma maneira que os nós.

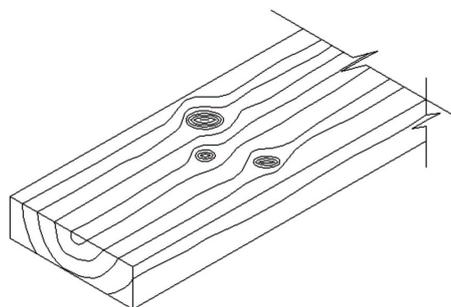


Figura 5 – Nós individuais.

Fonte: ASTM D245-93.

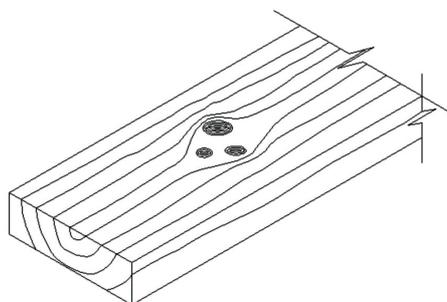


Figura 6 – Conjunto de nós.

Fonte: ASTM D245-93.

Um nó na face larga de um elemento fletido ou tracionado é considerado como um nó de borda se a distância do centro do nó à borda for igual ou menor a $\frac{2}{3}$ do diâmetro do nó.

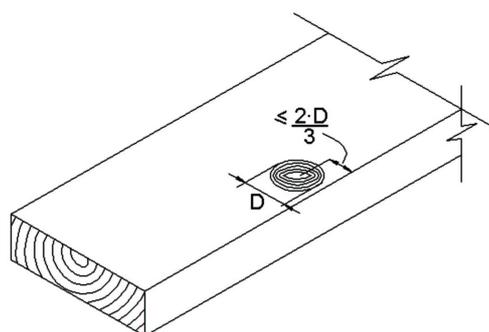


Figura 7 – Nó na borda de uma peça.

Fonte: ASTM D245-93.

2.3.3.3.2.1 Nós em caibros e pranchas

Os nós podem ser medidos diretamente na superfície da peça, ou podem ser medidos pelo método da equivalência, em que a proporção da seção transversal da peça ocupada pelo nó é multiplicada pela largura real da face em que ocorre para determinar o diâmetro do nó equivalente.

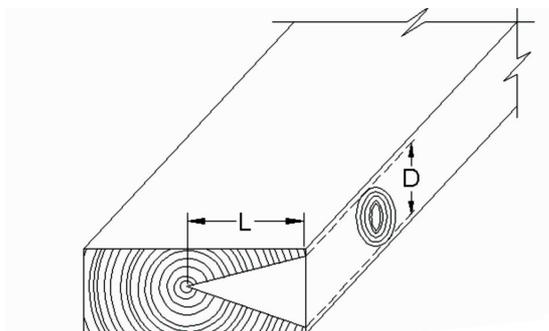


Figura 8 – Medição de um nó na face estreita.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

De acordo com a norma ASTM D245-93, a dimensão de um nó localizado na face estreita é igual à distância entre as linhas paralelas às bordas da peça e que cercam o nó.

Além do diâmetro dos nós na face estreita das peças, a regra de classificação visual do SPIB também limita a profundidade do nó, sendo esta profundidade medida pela posição da medula na peça.

Um nó na face estreita, que apareça também na face larga (não contendo a intersecção das duas faces), de uma peça que não contenha medula é medido e classificado na face larga, sendo o seu diâmetro igual a media da maior e da menor dimensão.

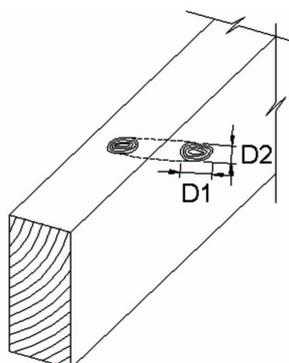


Figura 9 – Medição de um nó que aparece nas duas faces de uma peça sem medula.

Fonte: ASTM D245-93.

A dimensão de um nó na face larga é a média da maior e da menor dimensão.

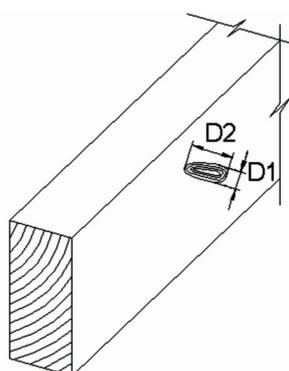


Figura 10 – Medição de um nó na face larga.

Fonte: ASTM D245-93.

Qualquer nó que contenha a intersecção de duas faces em uma peça que não contenha medula, incluindo um nó que se estenda por toda a largura da face, é considerado um nó de canto. Um nó de canto é medido pelas linhas paralelas às bordas da peça e é classificado em relação à face em que é medido.

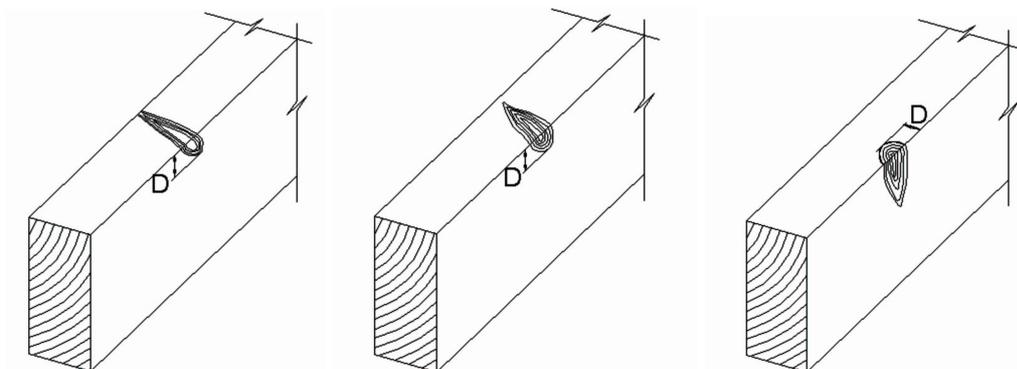


Figura 11 - Medição de um nó de canto em peça sem medula.

Fonte: ASTM D245-93.

Um nó de canto em uma peça contendo medula é medido tanto por sua largura na face estreita entre as linhas paralelas as bordas, ou pelo seu menor diâmetro na face larga, utilizando-se o maior diâmetro.

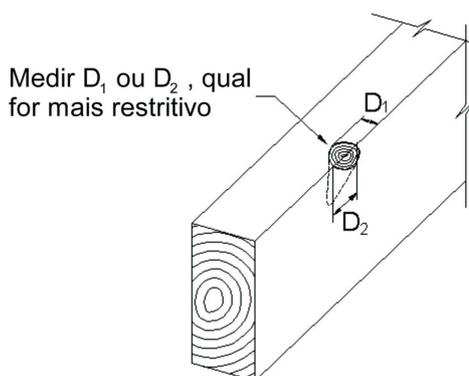


Figura 12 - Medição de um nó de canto em peça contendo medula.

Fonte: ASTM D245-93.

A soma do diâmetro de todos os nós em 152mm de comprimento de uma peça não deve exceder duas vezes a dimensão do maior nó permissível para a classe. Dois ou mais nós do máximo, ou próximo ao máximo tamanho permitido para a classe não devem ser admitidos em 152mm de comprimento em uma face. Qualquer combinação de nós, que no julgamento do classificador torne a peça inadequada para o uso desejado não deve ser admitida.

Quando a peça de madeira é destinada para aplicações de flexão com um único vão, as dimensões dos nós na face estreita e na borda da face larga podem ser aumentadas gradativamente do tamanho máximo permitido no terço central para duas vezes esta dimensão nas extremidades das peças, mas a dimensão do nó não deve exceder o tamanho máximo permitido no centro da face larga. O tamanho do nó na face larga pode ser aumentado gradativamente do tamanho máximo permitido na borda do terço central da peça para até duas vezes esta dimensão nas extremidades da peça. Entretanto, as regras de classificação visual do SPIB não consideram este incremento na dimensão do nó ao longo do comprimento das peças

Quando a peça é destinada para aplicações de flexão em vãos contínuos não se permite o incremento gradativo na dimensão dos nós para os dois terços laterais de seu comprimento.

2.3.3.3.2.2 Nós em vigas e longarinas

O tamanho de um nó na face estreita de uma viga ou longarina corresponde à largura entre as linhas que cercam o nó, sendo que estas linhas são paralelas às bordas da peça. Quando um nó na face estreita de uma peça sem medula se estende até 1/4 da largura da face larga, este nó é medido na face larga.

O tamanho de um nó na face larga é medido pelo seu menor diâmetro. Um nó na borda da face larga é limitado à mesma dimensão como um nó na face estreita.

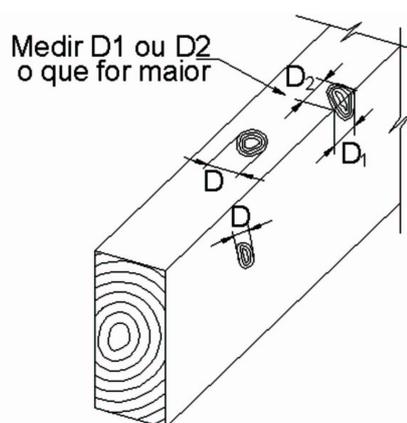


Figura 13 - Medição do diâmetro dos nós em uma viga.

Fonte: ASTM D245-93.

Um nó de canto em uma viga ou longarina contendo medula pode ser medido por sua largura na face estreita entre as linhas paralelas as bordas ou por seu menor diâmetro na face larga, o que for maior, um nó de canto em uma peça sem a presença de medula é medido pelo menor destes dois.

A soma das dimensões de todos os nós contidos em metade do comprimento de uma face em uma viga com 6,10m (20ft) ou menos de comprimento, quando medido como especificado para a face em consideração, não deve exceder quatro vezes a dimensão do maior nó permitido nesta face. Esta restrição em uma viga com mais de 6,10m deve ser aplicada para qualquer 3,0m (10ft) de comprimento contido em metade do comprimento da peça.

Quando a peça de madeira se destina a aplicações de flexão em um único vão, as dimensões dos nós na face estreita e na borda da face larga podem ser incrementadas gradativamente, do tamanho máximo permitido no terço central do comprimento, para duas vezes este tamanho nas extremidades da peça, exceto que o

tamanho deste nó não deve exceder o tamanho permitido no centro da face larga. O tamanho do nó na face larga pode ser incrementado proporcionalmente do tamanho permitido na borda para o tamanho permitido no centro.

Quando a peça é destinada para aplicações de flexão em vãos contínuos, as restrições para os nós no terço central devem ser aplicadas para os dois terços laterais de seu comprimento.

2.3.3.3.2.3 Nós em postes e colunas

O tamanho de um nó em qualquer face de um poste ou coluna é tomado como o diâmetro de um nó circular, o menor dos dois diâmetros de um nó oval, ou o maior diâmetro perpendicular ao comprimento de um nó diagonal.

Um nó de canto é medido em todo o lugar que sua medida representar o verdadeiro diâmetro do galho causador do nó.

A soma das dimensões de todos os nós em qualquer 152mm (6") de comprimento de um poste ou coluna não deve exceder duas vezes o tamanho do maior nó permitido. Dois ou mais nós do máximo tamanho, ou próximos ao máximo tamanho permitido não devem ser admitidos em 152mm de comprimento de uma face.

Em elementos comprimidos, com largura maior que a espessura, a dimensão dos nós em ambas as faces, larga e estreita, não deve ultrapassar a dimensão permitida na face larga.

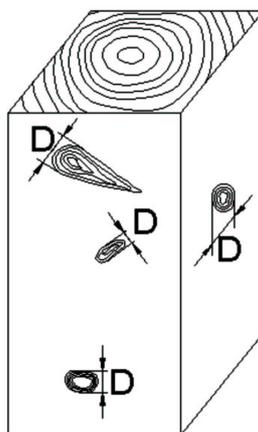


Figura 14 - Medição do diâmetro dos nós em uma coluna.

Fonte: ASTM D245-93.

2.3.3.3.2.4 Nós em tábuas

Os nós nas tábuas são medidos pela média dos diâmetros nas duas faces opostas, sendo cada diâmetro tomado como a distância entre as linhas paralelas às bordas da tábua. Os nós não são medidos na face estreita, desde que eles apareçam também em uma ou ambas as faces largas.

A soma dos diâmetros dos nós em 152mm (6") de comprimento em qualquer posição das peças não deve exceder duas vezes a dimensão do maior nó permitido para a classe. Dois ou mais nós da máxima dimensão permitida não devem ser admitidos nos mesmos 152mm de comprimento em uma face.

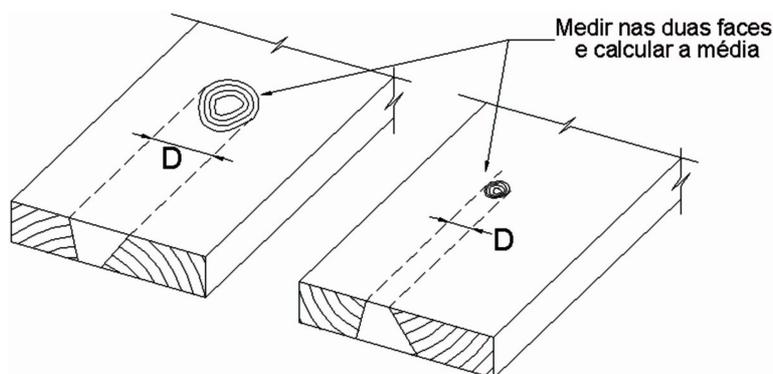


Figura 15 - Medição do diâmetro dos nós em tábuas.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

Na América do Norte uma grande quantidade de *Southern Pine* é usada na construção civil para fins não estruturais, como revestimento de paredes ou para assoalho. Assim estas peças são classificadas pela aparência, e sua resistência não é o fator de maior importância.

De acordo com o SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994), as classes de aparência e, portanto, não estruturais para as tábuas são: N° 1, N° 2, N° 3, e N° 4. Observando que as classes N° 1, N° 2 e N° 3 não têm nenhuma relação com as classes definidas pela norma *National Grading Rule*, visto que esta norma uniformiza os procedimentos de classificação somente para caibros e pranchas.

As classes estruturais para as tábuas são a INDUSTRIAL 55, a INDUSTRIAL 45 e a INDUSTRIAL 26.

Ainda de acordo com o SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994) as peças da classe INDUSTRIAL 55 devem apresentar as mesmas características das peças da classe N°1 para caibros e pranchas, as peças da classe INDUSTRIAL 45 devem apresentar as mesmas características das peças da classe N°2 para caibros e pranchas e as peças da classe INDUSTRIAL 26 devem apresentar as mesmas características das peças da classe N°3 para caibros e pranchas.

2.3.3.3.3 Racha anelar e fenda

Observa-se na literatura uma discordância com relação à maneira de medir as rachas e as fendas.

De acordo com a norma ASTM D245-93 o tamanho de uma racha anelar é igual ao seu comprimento ao longo da curvatura do anel de crescimento em que ocorre. Se a racha atravessar a peça em espessura, o tamanho da racha é igual ao comprimento médio da racha medido paralelamente ao comprimento da peça.

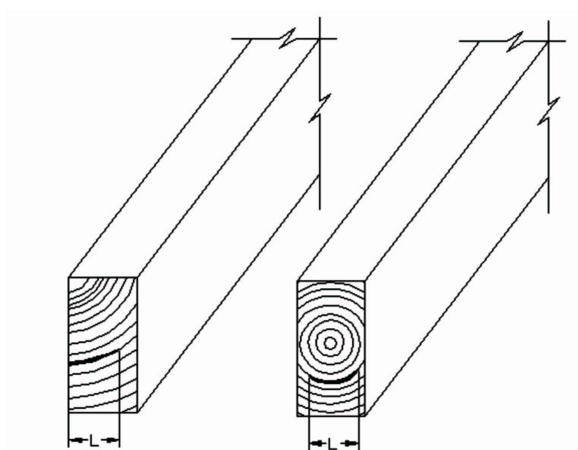


Figura 16 – Forma de medir uma racha conforme ASTM D245-93.

Fonte: ASTM D245-93.

Para norma ASTM D245-93 a medida das fendas superficiais é dada pela profundidade média medida pelas linhas que cercam a fenda e que são paralelas às faces largas da peça.

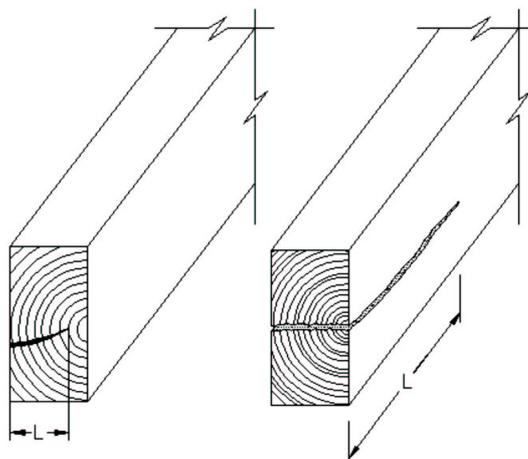


Figura 17 – Formas de medir uma fenda conforme ASTM D245-93.

Fonte: ASTM D245-93.

O SPIB simplifica a forma de medir as rachas e as fendas uniformizando as medições. Para o SPIB, o tamanho de uma racha anelar na extremidade de uma peça é igual à sua extensão medida paralelamente ao comprimento da peça.

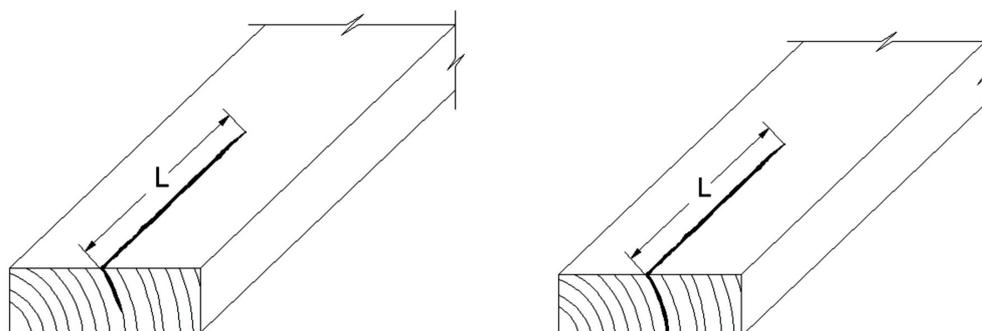


Figura 18 – Formas de medir uma racha.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

O fendilhado na extremidade das peças não é limitado. As fendas que atravessam a peça em espessura são medidas e limitadas por sua extensão medida paralelamente ao comprimento da peça.

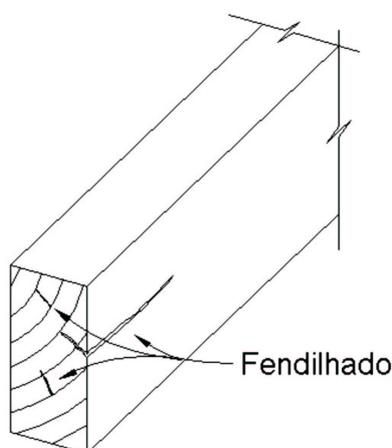


Figura 19 – Fenda superficial.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

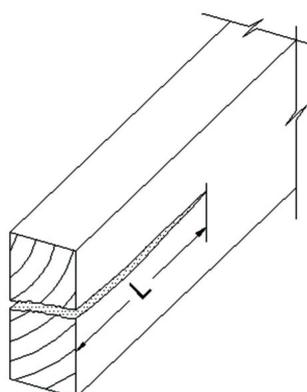


Figura 20 – Fenda que atravessa a peça em espessura.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

O anexo A deste trabalho traz as limitações no comprimento das rachas e fendas descritas nas regras de classificação visual do SPIB.

Fora da zona crítica, em elementos fletidos, e em elementos carregados axialmente, as fendas e as rachas anelares têm pouco ou nenhum efeito nas propriedades de resistência e não são limitadas por esta razão. Pode ser aconselhável limitá-las em algumas aplicações por questão estética, ou para prevenir a penetração de umidade e conseqüente apodrecimento.

2.3.3.3.4 Empenamento

O termo empenamento refere-se à qualquer desvio na forma geométrica inicial de uma peça de madeira, incluindo encurvamento, encanoamento,

arqueamento, e torcimento. Apesar da norma ASTM D245 não apresentar critérios com relação à restrição do empenamento, as regras de classificação do SPIB apresentam limitações para os tipos de empenamento mais frequentes nas peças de madeira. Estas limitações são reproduzidas abaixo.

Encurvamento: É definido como um empenamento em relação ao eixo de menor inércia de uma peça de madeira.

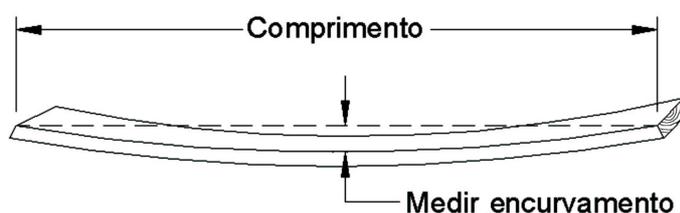


Figura 21 - Medição do encurvamento.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

O encurvamento é medido no ponto de maior deslocamento em relação à linha reta que une as duas extremidades da peça.

De acordo com SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994), o encurvamento máximo permitido em uma classe é determinado da seguinte forma:

- Peças com espessura inferior a 38mm: O encurvamento máximo permissível é igual a três vezes o arqueamento máximo para peças com largura de 38mm.
- Peças com espessura maior ou igual a 38mm e inferior a 64mm: O encurvamento máximo permissível é igual a duas vezes o arqueamento máximo para peças com largura de 38mm.
- Peças com espessura maior ou igual a 64mm: O encurvamento máximo permissível é igual ao arqueamento máximo para peças com esta espessura.

Encanoamento: Empenamento de uma peça de madeira de forma que a seção transversal apresente um lado côncavo e outro convexo.

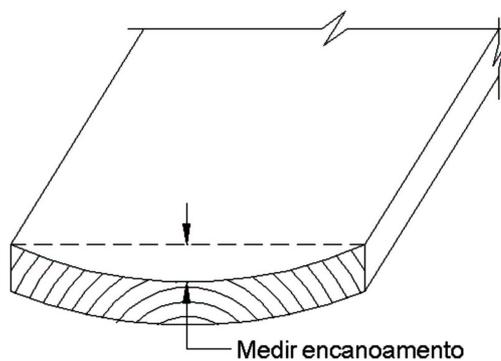


Figura 22 – Medição do encanoamento.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

Arqueamento: É definido como um empenamento em relação ao eixo de maior inércia de uma peça de madeira. A figura 23 mostra como o arqueamento é medido.

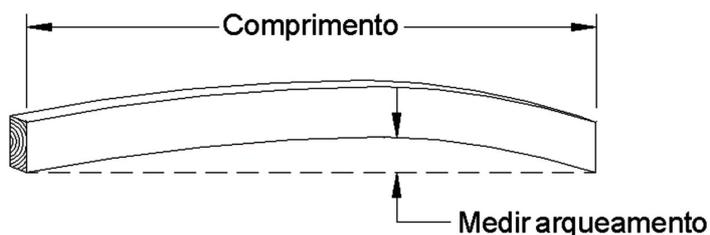


Figura 23 - Medição do arqueamento.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

Torcimento: É definido como uma combinação de empenamentos em relação aos eixos de maior e de menor inércia da peça de madeira em forma espiralada.

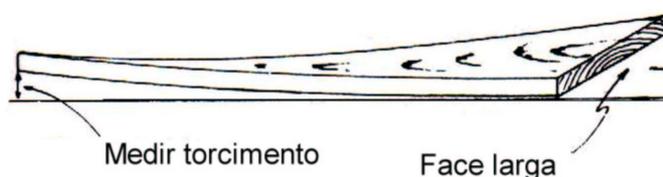


Figura 24 – Medição do torcimento.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

2.3.3.3.3.5 Densidade

Além da classificação com relação a defeitos, a norma ASTM D245-93 também estabelece classes de densidade para a madeira, em função da taxa de

crescimento da madeira serrada. O termo taxa de crescimento se refere à quantidade de anéis de crescimento presentes em 2,5cm (1”) de comprimento, medidos em uma linha radial representativa. Assim, para ser considerada como densa, a peça de madeira deve ter seis ou mais anéis de crescimento e, além disso, mais de (1/3) um terço da seção transversal deve ser madeira de inverno. Peças com quatro ou mais anéis de crescimento, e tendo 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 consideradas de baixa densidade.

As classes de densidade definidas pela ASTM D245-93 são apresentadas na tabela 12 a seguir:

Tabela 12- Classes de densidade definidas na ASTM D245-93

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

Fonte: ASTM D245-93

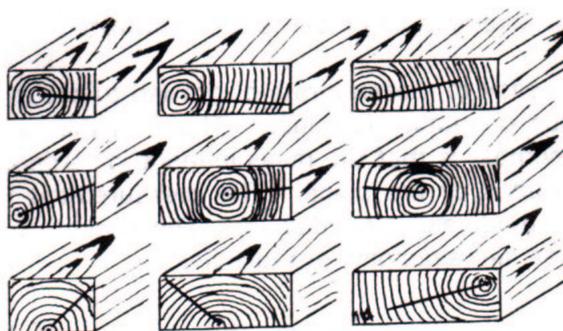


Figura 25- Linha radial representativa em peças contendo medula.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

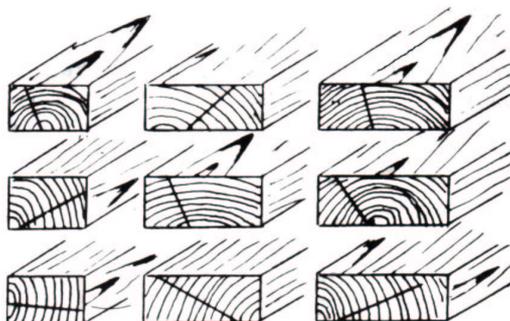


Figura 26 - Linha radial representativa em peças sem medula.

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

Observou-se na literatura que na prática as classes de média e baixa densidade são unidas e recebem o nome de não-densa. As madeiras densas são designadas pela letra D, sendo as madeiras não-densas designadas por ND.

2.3.4 Determinação das propriedades de resistência

2.3.4.1 Baseando na resistência de corpos-de-prova

Nos Estados Unidos, a determinação das propriedades de dimensionamento da madeira foi baseada nas propriedades mecânicas de pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos, GREEN & KRETSCHMANN (1999). De acordo com GREEN (1998), os procedimentos para a determinação das propriedades mecânicas para o dimensionamento da madeira visualmente classificada foram estabelecidos inicialmente há 50 anos atrás. Eles envolvem os resultados de testes em pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos os quais são modificados por coeficientes de modificação para a derivação das propriedades de dimensionamento. Os ajustes são feitos para as dimensões dos nós e outros defeitos naturalmente decorrentes das características de crescimento.

Assim, cada propriedade de resistência de uma peça de madeira, visualmente classificada, é derivada do produto da resistência característica de corpos-de-prova isentos de defeitos (para cada espécie) pela razão de resistência da peça de madeira e pelos fatores de modificação:

$$f_d = SR \cdot f_k \cdot K \quad (2)$$

Sendo:

f_d = resistência de cálculo da peça estrutural de madeira serrada;

f_k = resistência característica de corpos-de-prova isentos de defeitos, dada na norma ASTM D2555 ou determinada em teste com corpos-de-prova, conforme a norma ASTM D143;

SR = razão de resistência para a propriedade considerada;

$K = (C_M \cdot C_F \cdot C_D \cdot C_t \cdot C_{fu})$;

C_M = coeficiente de umidade;

C_F = coeficiente de dimensão;

C_D = coeficiente de duração de carregamento;

C_t = coeficiente de temperatura;

C_{fu} = coeficiente que leva em conta em que posição a peça é usada.

DOYLE & MARKWARDT (1966), realizaram testes em peças estruturais de *Southern Pine* com o objetivo de estabelecer propriedades de resistência em peças de madeira visualmente classificada e também de verificar as relações entre propriedades de resistência e rigidez. As amostras representativas de madeira de diversas dimensões foram obtidas em 10 estados norte-americanos. Para os testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia das peças, foram adotados os procedimentos da norma ASTM D198. Os procedimentos para os testes de flexão sobre o eixo de menor inércia e os testes de compressão paralela foram desenvolvidos por não haver procedimentos normatizados na época. Nos testes com corpos-de-prova isentos de defeitos cortados a partir das peças de dimensões estruturais foram adotados os procedimentos da norma ASTM D143.

Em todos os testes, as peças foram aleatoriamente colocados na máquina de testes, sem sistematizar a colocação com relação aos nós, desvios de fibras, empenamento ou qualquer outro defeito. Foram determinadas também a massa específica e a umidade de cada peça.

Antes dos testes foram determinadas as razões de resistência para cada peça, conforme a norma ASTM D245. Após os testes de flexão, uma seção não danificada contendo madeira livre de defeitos foi cortada de cada peça rompida para confecção de corpos-de-prova de flexão.

Após a análise dos resultados, DOYLE & MARKWARDT (1966) concluíram que:

- O módulo de ruptura (MOR) e os valores de resistência ao cisalhamento são iguais aos previamente publicados para peças de dimensões estruturais da espécie *Pinus Sp*, enquanto que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade (MOE) foram 6% menores, e a resistência à compressão normal foi 16% menor que os valores tabelados.
- Nas análises das classes visuais foi mostrado que, na flexão, para todas as classes e dimensões, 5,1% das peças romperam abaixo do nível de resistência apresentado nas regras de classificação. Este valor é próximo ao limite de exclusão de 5% associado com as resistências na classificação. Em duas classes, da dimensão 38mm x 89mm, não houve peças que falharam abaixo do nível de resistência estabelecido. Na compressão paralela às fibras, nenhuma peça em nenhuma das dimensões ou classes falharam no nível de resistência estabelecido para a classe.
- Os dados obtidos nos testes revelaram um meio para avaliar a eficiência da classificação visual com relação a resistência à compressão e a resistência à flexão. Adotando a eficiência como sendo a relação entre a resistência apresentada nas regras de classificação visual dividida pela capacidade total da peça determinada nos testes, a classificação visual mostrou uma eficiência média de 48% para a flexão e 43% para a compressão. Isto ilustra como a classificação visual contém grandes quantidades de material de elevada resistência que não são usados com seu total potencial.
- Foi obtido um coeficiente de correlação linear igual a 0,945 entre os valores do MOE no sentido de maior inércia com o MOE no sentido de menor inércia da peça.
- As relações entre o MOR no sentido de maior inércia para o MOE no sentido de menor inércia mostram uma grande variação nos

coeficientes de correlação entre as várias classes e dimensões. O coeficiente de correlação linear encontrado foi de 0,679 para a dimensão 38mm x 89mm, 0,607 para a dimensão 38mm x 140mm, 0,674 para a dimensão 38mm x 184mm e 0,443 para a dimensão de 38mm x 235mm.

GREEN & KRETSCHMANN (1987) realizaram testes de flexão e compressão paralela em aproximadamente 200 peças de 140mm x 140mm x 3m de *Southern Pine* com o objetivo de avaliar as propriedades estabelecidas pela classificação visual para peças de madeira de 140mm x 140mm, e estabelecer uma base técnica para a classificação mecânica de postes e colunas de *Southern Pine*. As amostras foram obtidas de duas serrarias dos estado do Mississippi e Alabama. As peças de madeira foram classificadas por um supervisor de qualidade do Southern Pine Inspection Bureau (SPIB) para características que afetam diretamente as propriedades de resistência, tais como nós e inclinação de fibras. Metade das peças foram classificadas como *Select Structural* e metade como N° 2. As madeiras estavam secas no momento da compra e elas foram armazenadas por vários meses antes dos testes. Foram medidas todas as dimensões e todas as peças foram pesadas.

Os testes de flexão foram conduzidos de acordo com a norma ASTM D 198. As vigas foram testadas com aplicação de carga em três pontos a uma relação vão:altura igual a 17. A velocidade de deslocamento do pistão da máquina foi de 5mm/min, levando as peças à ruptura em torno de 20 minutos. Após os testes, uma parte não danificada das peças foi retirada para a determinação do teor de umidade e da densidade seguindo-se as normas ASTM D4442 e D2395 respectivamente.

Os testes de compressão paralela às fibras foram conduzidos de acordo com a norma ASTM D198 e foram realizados com peças de 2,80m de comprimento. A velocidade de deslocamento foi de 2,5mm/min, levando a peça à ruptura em aproximadamente 13 minutos. O módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras foi determinado usando medidas de deslocamento feitas com dois Transformadores Diferenciais de Variação Linear (LVDT) em ambos os lados das peças. O MOE foi determinado com duas leituras.

As propriedades das madeiras visualmente classificadas são mostradas na tabela 13.

Tabela 13 - Propriedades de peças de 140mm x 140mm de *Southern Pine*.

Propriedade	Classe ^a	Tamanho da amostra	Teor de umidade (%)	Densidade ^b	Média (MPa)	COV ^c (%)	5º percentil (Mpa)
MOE _{flexão estática}	SS	47	14	0,48	9879	28,6	5791
	Nº 2	52	14	0,46	8921	32,9	4612
MOE _{compressão paralela}	SS	50	12	0,48	10825	29,0	5902
	Nº 2	52	12	0,45	9556	28,2	5095
MOR	SS	47	14	0,48	36,1	23,9	22,5
	Nº 2	52	14	0,46	26,3	37,4	13,9
Resistencia a _{compressão paralela}	SS	50	12	0,48	25,7	23,3	17,9
	Nº 2	52	12	0,45	22,7	24,7	15,7

a. SS é *Select Structural*.

b. Densidade baseada no volume e peso seco.

c. Coeficiente de variação.

Fonte: GREEN & KRETSCHMANN (1987)

Em todos os casos, as propriedades da classe *Select Structural* foram significativamente maiores que as propriedades da classe Nº2 (ao nível de significância de 5%) e o MOE à compressão foi maior que o MOE à flexão. A tabela 14 apresenta os valores das propriedades de resistência determinados por meio da estatística não-paramétrica.

Tabela 14 - Propriedades experimentais e usuais para colunas de *Southern Pine*.

Propriedade	Classe	Ponto estimado (MPa)	IC ^a 0,75		Valor usual de cada propriedade (MPa)
			Inferior (MPa)	Superior (MPa)	
MOE _{médio}	SS	9860	9240	10690	10530
	Nº 2	8890	7790	9030	8410
MOR _{5º percentil}	SS	22,6	21,4	24,1	21,7
	Nº 2	13,9	13,3	15,9	12,3
Resistência a _{compressão 5º percentil}	SS	17,9	17,4	18,7	13,7
	Nº 2	15,7	13,6	16,8	7,6

a. Intervalo de Confiança.

Fonte: GREEN & KRETSCHMANN (1987).

Os resultados do estudo realizado por GREEN & KRETSCHMANN (1987), para peças de *Southern Pine* com dimensões de 140mm x 140mm, revelam que:

- O MOR e o MOE a flexão, determinados nos testes confirmam os valores atualmente atribuídos para estas propriedades.

- O valor atribuído para a resistência à compressão paralela é conservador para as madeiras desta dimensão.

Alguns autores apontam deficiências no método baseado na resistência de corpos-de-prova isentos de defeitos para a derivação das propriedades de resistência e rigidez de peças de dimensões estruturais, notadamente quanto ao modo de ruptura e quanto à distribuição de frequências.

MADSEN (1992) afirma que “uma peça estrutural de madeira é diferente da madeira isenta de defeitos como o cimento é diferente do concreto”. A razão fundamental para isso é que os pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos e as peças estruturais de madeira apresentam diferentes modos de ruptura. Em testes de flexão, por exemplo, o início da ruptura nos pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos acontece na face comprimida onde aparecem esmagamentos das fibras; posteriormente, ocorre o progressivo rebaixamento da linha neutra e o conseqüente aumento das tensões na face tracionada, levando a peça à ruptura. Uma peça de dimensões estruturais contém características naturais de crescimento tal como nós e desvios de fibras e o início da ruptura ocorre devido às tensões de tração normal às fibras. Segundo MADSEN (1992), o método de teste em pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos não pode fornecer base confiável para propósitos estruturais.

O valor característico é calculado considerando uma distribuição normal ou gaussiana como sendo uma representação apropriada da distribuição de resistências. Assim o valor característico inferior, é determinado pela equação 3.

$$f_k = f_m - 1,645 \cdot S_d \quad (3)$$

Sendo:

f_k = valor característico inferior, ou resistência característica;

f_m = valor médio da resistência;

S_d = desvio padrão da amostra.

Esta equação considera que a distribuição normal se ajusta convenientemente para os dados de resistência dos pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos.

MARTINEZ (2000), analisando a distribuição de frequências para a resistência a compressão paralela de 100 corpos-de-prova da espécie eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*), comprovou que a distribuição de frequências não segue uma distribuição normal, conforme mostra a figura 27. Como consequência, o valor característico determinado pela equação 3 é incorreto.

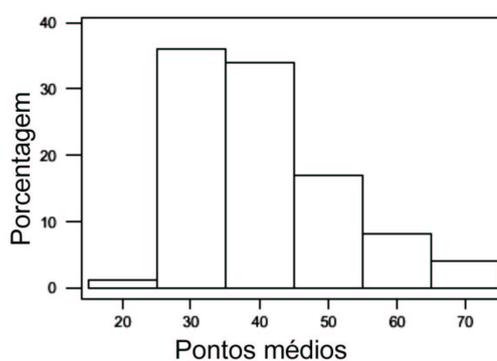


Figura 27 - Histograma de frequências relativas.

Fonte: MARTINEZ (2000)

MARTINEZ (2000) utiliza uma transformação logarítmica para a obtenção de uma distribuição normal aproximada. O histograma de frequências relativas para os dados transformados é mostrado na figura 28.

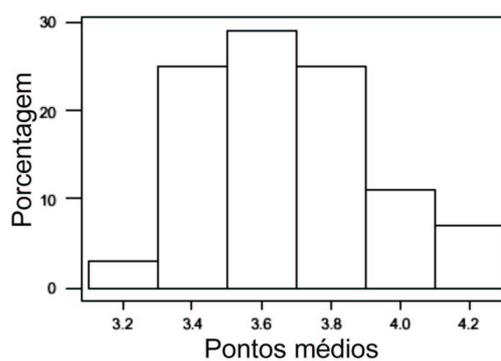


Figura 28 - Histograma de frequências relativas para os dados transformados.

Fonte: MARTINEZ (2000)

Outra solução seria utilizar uma distribuição assimétrica como a de Weibull, por exemplo.

A partir do exposto, pode-se notar a necessidade do emprego de um modelo estatístico para a determinação de níveis de resistência mais econômicos, em que se possa empregar a madeira de forma mais racional.

Estas constatações conduzem ao segundo método de determinação das propriedades de dimensionamento de elementos estruturais de madeira, o procedimento baseado na resistência de elementos estruturais.

2.3.4.2 Baseando na resistência de elementos estruturais

Deve estar claro agora que é necessário outro critério para a derivação das propriedades de resistência de peças estruturais com confiabilidade similar a outros materiais estruturais.

Uma nova filosofia de derivação das propriedades de dimensionamento foi desenvolvida para aplicação no programa norte-americano (*In-grade Test Program*) para a determinação das propriedades de resistência de peças estruturais. Para esta nova filosofia, de acordo com MADSEN (1992), os resultados dos testes devem, o mais fielmente possível, refletir as condições finais de uso das peças de dimensões estruturais. Assim, tomando-se como exemplo, elementos fletidos, se o pior defeito for posicionado na região tracionada da peça, na montagem da estrutura, então os piores defeitos devem ser propositalmente posicionados na região tracionada das peças, durante os testes; se não, um arranjo aleatório é o mais apropriado.

O programa de testes “*In-Grade*” foi um dos maiores programas de teste em um único material; pranchas de madeira. Devido ao fato das peças de madeira serem retiradas diretamente da produção das serrarias, e serem testadas nas suas reais classes, dimensões e espécies, este projeto ficou conhecido como programa “*In-Grade*”. De acordo com GREEN & EVANS (1987), o programa “*In-Grade*” foi desenvolvido pelo *Forest Products Laboratory* em cooperação com a indústria madeireira, faculdades e muitas universidades. Os objetivos deste programa foram:

- Determinar as propriedades mecânicas para pranchas de madeira visualmente classificadas de 38mm de espessura;
- Desenvolver modelos analíticos para estimar o desempenho de estruturas leves de madeira.

Os valores de resistência para cada classe visual foram determinados por meio de uma análise estatística dos resultados dos testes.

Conforme GREEN & EVANS (1987), o programa “*In-Grade*” foi composto por quatro partes principais: procedimentos de amostragem, determinação das características físicas e mecânicas, ajuste dos dados, e análise estatística.

2.3.4.2.1 Procedimentos de amostragem

Para o estabelecimento de propriedades mecânicas da madeira visualmente classificada a partir de testes com elementos de dimensões estruturais, deve-se obter uma amostra representativa da população. Para assegurar a representatividade da amostra, bem como atingir os objetivos com um pequeno número de espécimes, as espécies foram divididas em regiões geográficas levando-se em conta a topografia e as características de crescimento conhecidas. A filosofia geral do programa foi estimar as propriedades mecânicas representativas para uma espécie. Desta forma, as serrarias de uma determinada região foram selecionadas aleatoriamente a partir de uma lista de serrarias que produziam as espécies desejadas. Para as espécies com o maior volume de produção (*Douglas Fir-Larch*, *Douglas Fir (Sout)*, *Southern Pine*, (*Minor*) *Southern Pines*, e *Hem-Fir*), foram estabelecidos um número suficiente de regiões para assegurar que o valor característico inferior das propriedades de resistência seja representativo para as espécies. Para outras espécies, os procedimentos de amostragem não foram desenvolvidos com tanta rigorosidade e, por este motivo, os valores característicos das propriedades de resistência somente são válidos quando combinados em um grupo de espécies.

Nas serrarias, as peças de madeira foram selecionadas em lotes. Cada peça de madeira das espécies descritas acima foi visualmente classificada por um supervisor de qualidade das agências de classificação envolvidas no programa. Não foram selecionadas mais que 20 peças de madeira por lote para cada classe.

Nos Estados Unidos os procedimentos de amostragem para testes de peças estruturais são estabelecidos pela ASTM D2915-94 (*Standard Practice for Evaluating Allowable Properties for Grades of Structural Lumber*), ou ASTM D1990-97 (*Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Visually-Graded Dimension Lumber from In-Grade Tests of Full-Size Specimens*). É

importante assegurar a representatividade da amostra a ser testada. Para a classificação de peças estruturais, a norma ASTM D1990-97 estipula uma matriz de amostragem com no mínimo três dimensões de seção transversal e duas classes de resistência, o que resulta uma matriz da ordem de 2 x 3. As classes de resistência adotadas pela norma ASTM D1990 são N°2 e *Select Structural* (SS).

2.3.4.2.2 Determinação das características físicas e mecânicas

Características físicas – Os dados coletados para a maioria das espécies incluíram as dimensões das peças, a origem da madeira, a classe visual determinada pelo supervisor da agência de classificação, características de redução de resistência, causa e tipo de ruptura, teor de umidade, densidade, número de anéis de crescimento em 2,5cm (1”), porcentagem de madeira de inverno e presença ou ausência de medula. Para madeira seca em estufa foi anotado o método de secagem, a máxima temperatura lida no bulbo seco e o comprimento no momento da leitura do bulbo. Para espécimes testados em campo, o teor de umidade médio foi determinado à partir de três leituras usando um medidor de umidade elétrico.

Características mecânicas – Os espécimes foram testados à flexão em relação ao eixo de maior inércia, à tração e à compressão paralela às fibras seguindo-se os procedimentos apropriados dados na norma ASTM D198 (*Standard Methods of Static Test of Timber in Structural Sizes*) ou D4761 (*Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material*). Os testes de tração e flexão foram conduzidos em campo, utilizando equipamentos portáteis.

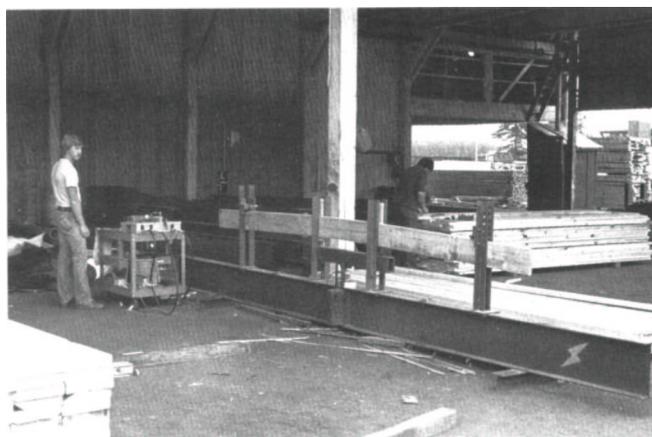


Figura 29 – Teste de flexão em campo.

Fonte: MADSEN (1992).

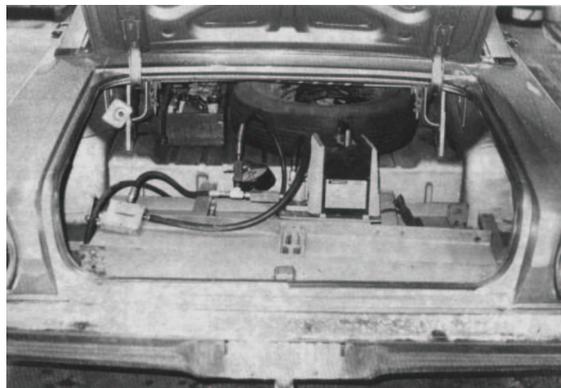


Figura 30 – Máquina de flexão utilizada no programa *In-Grade* alojada dentro do porta-malas de um veículo de passeio.

Fonte: MADSEN (1992).

Os espécimes foram testados com uma velocidade de carregamento suficiente para causar a ruptura das peças entre 0,5 e 2,5 minutos.

Os espécimes de flexão foram testados com uma relação vão:altura (L/h) igual a 17. O carregamento foi aplicado igualmente em dois pontos do vão.

Orientação das faces: As peças foram colocadas na máquina de testes com orientação aleatória das faces. Nos casos em que foi observado um arqueamento pronunciado, as peças foram colocadas com o lado convexo na zona comprimida.

Orientação em relação ao comprimento: As peças foram colocadas na máquina de testes de forma que a característica de máxima redução de resistência seja posicionada aleatoriamente em relação ao comprimento da peça. Nos casos em que dois ou mais defeitos forem julgados como equivalentes, o defeito mais próximo do centro do comprimento da peça foi usado para o seu posicionamento. O MOE foi determinado com dois níveis de carga pré-estabelecidos, sem correção no deslocamento vertical devido aos esforços de cisalhamento. O MOR foi calculado para a máxima força aplicada na peça, considerando as dimensões reais da peça.

Antes dos testes de tração paralela às fibras foi avaliado o MOE à flexão de cada peça. Quando a peça de madeira testada à tração paralela às fibras não pode ser rompida devido às limitações da máquina de teste utilizou-se a máxima força aplicada para calcular a resistência à tração dos espécimes.

Os espécimes de compressão paralela às fibras foram enviados para o *Forest Products Laboratory* (FPL), onde foram conduzidos os testes. Antes dos testes, os espécimes foram condicionados à uma temperatura de 23°C (74°F) e 65% de teor de umidade relativa (considerando o teor de umidade de 12%).

2.3.4.2.3 Ajuste dos dados

O MOR, a resistência a compressão, e o MOE foram calculados pelas fórmulas derivadas da resistência dos materiais. Como não é possível condicionar a madeira nas condições padrão de umidade e temperatura, foi necessário então corrigir os resultados obtidos nos testes para as condições padrão da norma ASTM D1990-97. As condições padrão da norma ASTM D1990-97 são: Temperatura de 23°C e teor de umidade de 15%.

2.3.4.2.4 Análise estatística

De acordo com a norma ASTM D1990-97 deve ser apresentado um resumo dos cálculos estatísticos contendo: tamanho da amostra, média, mediana, desvio padrão, intervalos de confiança, estimativa não-paramétrica pontual, e limites de tolerância. Se um método paramétrico for usado para a caracterização dos dados, deve-se fornecer uma descrição dos procedimentos de seleção e uma tabulação dos parâmetros da distribuição.

A análise estatística das propriedades mecânicas resultaram em oito tabelas:

1. Tabela com os valores do MOE;
2. Tabela resumida com os valores do MOR, resistência a compressão e à tração paralela;
3. Avaliação dos dados com a distribuição de Weibull 2 parâmetros;
4. Avaliação dos dados com a distribuição de Weibull 3 parâmetros;
5. Avaliação dos dados com a distribuição Normal;
6. Avaliação dos dados com a transformação Lognormal;
7. Tabela com o 5º percentil inferior;
8. Tabela com o 50º percentil (mediana).

As tabelas foram organizadas por propriedade: flexão, tração paralela às fibras e compressão paralela às fibras. Para cada propriedade foram feitas duas tabelas, contendo média, mediana, ponto estimado para o 5º percentil inferior, limites de tolerância.

Quatro tabelas apresentam informações em função das várias formas de distribuição de frequência, incluindo: Weibull 3 parâmetros, Weibull 2 parâmetros, Normal e Lognormal.

2.3.4.3 Orientação das peças

Os procedimentos de classificação visual da norma ASTM D245-93 pressupõem que as peças de madeira sejam utilizadas no sentido de maior inércia (*edgewise*) e os testes de flexão para peças estruturais descritos nas normas ASTM D198-97 e ASTM D4761-96 também são realizados em relação ao eixo de maior inércia das peças. Assim a resistência à flexão dada pela equação 3, bem como a resistência obtida nos testes com elementos estruturais são em relação ao eixo de maior inércia das peças. De acordo com o SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994), se a peça for fletida em relação ao eixo de menor inércia (*flatwise*) a resistência obtida pela equação 3 deve ser majorada pelo coeficiente dado na tabela 15.

Tabela 15 - Fator de posição para a resistência a flexão de peças classificadas visualmente.

Espessura		38mm e 64mm	89mm
Largura	89mm	1,10	1,00
	114mm	1,10	1,05
	140mm	1,15	1,05
	184mm	1,15	1,05
	≥ 235mm	1,20	1,10

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

2.4 Classificação mecânica

A classificação mecânica é o processo pelo qual a madeira é avaliada por meio de um teste não-destrutivo, seguido de uma inspeção visual para avaliar certas características que a máquina não pode avaliar adequadamente. A classificação mecânica por tensões (MSR), a avaliação mecânica da madeira (MEL), e a *E-rated* são os três tipos principais de classificação mecânica.

2.4.1 Histórico da classificação mecânica

De acordo com PLESSEY TELECOMMUNICATIONS (1973), em 1958, institutos de pesquisas em madeira da Inglaterra, Austrália e América do Norte, descobriram que a resistência e rigidez à flexão da madeira são altamente correlacionadas. Eles verificaram que a rigidez (MOE) de uma peça de madeira serrada pode ser um forte indicador de sua resistência (MOR).

Segundo GALLIGAN & MCDONALD (2000), o maior esforço que tornou a classificação mecânica um método industrial possível foi realizado por *Potlatch Forest, Inc. (Lewiston, Idaho)*, *Western Pine Association (Portland, Oregon)*, *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Melbourne, Australia)*, e pelo *Timber Research Unit of the Council for Scientific and Industrial Research in South Africa*. Cada uma destas organizações produziu uma máquina de classificação comercial, usando essencialmente os mesmo princípios das relações entre a rigidez da madeira e sua resistência à flexão, que permite um sistema de classificação menos orientado para as espécies, do que o sistema visual de classificação.

Os primeiros testes com a máquina de classificação por tensões demonstraram a necessidade de alterações. Conseqüentemente, procedimentos de controle de qualidade foram formalizados e a inspeção da classificação mecânica tornou-se responsabilidade das agências de classificação da mesma maneira como a classificação visual. Além disso, restrições visuais nas dimensões dos nós de borda foram impostas para a madeira.

De acordo com GALLIGAN & MCDONALD (2000), em 1996, os sistemas de classificação mecânica por tensões alcançaram um nível comercial importante de uso na América do Norte. Aproximadamente 30 milhões de metros cúbicos de tábuas de madeira classificadas pela máquina de tensões foram produzidos em 1996. A maior barreira para o crescimento do sistema de classificação mecânica por tensões é a competição comercial com a classificação visual. Os dois sistemas, que funcionam diferentemente, podem “discordar” em qual classe a madeira deve ser classificada.

O teste não-destrutivo é altamente automatizado, e o processo requer muito pouco tempo. Ao entrar na máquina, a madeira passa por uma série de rolos. Neste

processo, uma força provocando flexão é aplicada perpendicular ao eixo de menor inércia da seção transversal da peça e o módulo de elasticidade de cada peça é medido. Esta máquina é limitada a classificação de materiais finos (espessura de 38mm ou menos). Além do teste não-destrutivo, a madeira classificada pela máquina de tensão é submetida a uma inspeção visual. Uma peça de madeira classificada desta maneira é conhecida como *MSR lumber*.

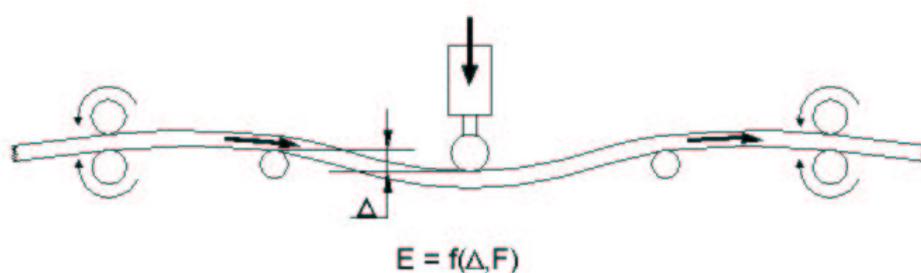


Figura 31 - Esquema do funcionamento de uma máquina MSR.

Fonte: Autor.

Alguns dispositivos medem o MOE e classificam a madeira, baseados no deslocamento vertical que ocorre sobre um pequeno vão menor que a peça de madeira; outros medem em relação a um pequeno vão, mas consideram os resultados obtidos em todo o comprimento da peça. Como consequência, a maneira em que os dados são obtidos e a maneira com que eles são analisados e informados pelo dispositivo influencia a especificação e a classe de resistência. Por esta razão, a saída do dispositivo deve ser sempre calibrada com testes estáticos pela agência supervisora.

No final da década de 70, um segundo método de classificação mecânica foi introduzido para fornecer madeira para a indústria de Madeira Laminada Colada, GALLIGAN & MCDONALD (2000). Pode-se dizer que a classificação *E-rated* é uma alternativa para a classificação visual das lâminas de madeira, pois ela é baseada na medida do módulo de elasticidade em relação ao eixo de menor inércia da peça ($L/h = 100$) e na inspeção visual dos defeitos presentes na borda da face larga das peças. Apesar do sistema de classificação *E-rated* utilizar os mesmos dispositivos mecânicos utilizados no sistema MSR, ele não pode ser considerado um sistema de classificação por resistência, pois não requer testes destrutivos para a avaliação das

propriedades de resistência, somente testes não-destrutivos para medir o módulo de elasticidade.

2.4.2 Componentes de uma classificação mecânica

A classificação mecânica da madeira permite uma melhor seleção do material para aplicações específicas em estruturas. De acordo com GREEN & KRETSCHMANN (1999), os componentes básicos de um sistema de classificação mecânica são:

- a) Estimativa da resistência por meio de métodos não-destrutivos de medidas de propriedades mecânicas relacionadas com as características de crescimento visíveis;
- b) Determinação dos valores de cálculo baseando-se na resistência estimada;
- c) Controle de qualidade para assegurar que as propriedades sejam obtidas.

Os procedimentos do controle de qualidade envolvem:

- a) Operação apropriada da máquina usada para fazer as medidas não destrutivas;
- b) Utilização de um parâmetro adequado para a estimativa da resistência a flexão;
- c) Utilização de um parâmetro adequado para a estimativa da resistência a tração e compressão.

2.4.3 Sistemas MSR E MEL

Os sistemas MSR e MEL diferem nos nomes das classes, controle de qualidade e coeficiente de variação (COV) para os valores do módulo de elasticidade, GREEN & KRETSCHMANN (1999).

Ainda segundo, GREEN & KRETSCHMANN (1999), os nomes das classes do sistema MSR são uma combinação da resistência a flexão de cálculo e do módulo de elasticidade médio em relação ao eixo de maior inércia da peça, por exemplo, a designação 1650f-1.5E, identifica uma classe com resistência a flexão (f_m) de 1650

lb/in² e módulo de elasticidade médio (E) de $1,5 \times 10^6$ lb/in², como mostrado na tabela 16.

Os nomes das classes para a MEL começam com a letra M e são seguidos de um número. Por exemplo, a designação M-23 identifica uma peça de madeira com F_b igual a 2400 lb/in² e módulo de elasticidade de $1,8 \times 10^6$ lb/in². Os nomes das classes e os correspondentes valores de projeto para o método de classificação MEL são mostrados na tabela. 17.

Tabela 16 - Classes comuns da classificação MSR.

Classe	F_b		E		F_t		$F_{c,90}$	
	(MPa)	(lb/in ²)	(GPa)	($\times 10^6$ lb/in ²)	(MPa)	(lb/in ²)	(MPa)	(lb/in ²)
MSR								
1200f-1,2E	8,3	1200	8,3	1,2	4,1	600	9,7	1400
1350f-1,3E	9,3	1350	9,0	1,3	5,2	750	11,0	1600
1400f-1,2E	9,7	1400	8,3	1,2	5,5	800	11,0	1600
1500f-1,3E	10,3	1500	9,0	1,3	6,2	900	11,4	1650
1500f-1,4E	10,3	1500	9,7	1,4	6,2	900	11,4	1650
1650f-1,4E	11,4	1650	9,7	1,4	7,0	1020	11,7	1700
1650f-1,5E	11,4	1650	10,3	1,5	7,0	1020	11,7	1700
1800f-1,5E	12,4	1800	10,3	1,5	8,1	1175	12,1	1750
1800f-1,6E	12,4	1800	11,0	1,6	8,1	1175	12,1	1750
1950f-1,5E	13,4	1950	10,3	1,5	9,5	1375	12,4	1800
1950f-1,7E	13,4	1950	11,7	1,7	9,5	1375	12,4	1800
2000f-1,6E	13,8	2000	11,0	1,6	9,0	1300	12,6	1825
2100f-1,8E	14,5	2100	12,4	1,8	10,9	1575	12,9	1875
2250f-1,6E	15,5	2250	11,0	1,6	12,1	1750	13,3	1925
2250f-1,7E	15,5	2250	11,7	1,7	12,1	1750	13,3	1925
2250f-1,9E	15,5	2250	13,1	1,9	12,1	1750	13,3	1925
2400f-1,7E	16,5	2400	11,7	1,7	13,3	1925	13,6	1975
2400f-1,8E	16,5	2400	12,4	1,8	13,3	1925	13,6	1975
2400f-2,0E	16,5	2400	13,8	2,0	13,3	1925	13,6	1975
2550f-2,1E	17,6	2550	14,5	2,1	14,1	2050	14,0	2025
2700f-2,2E	18,6	2700	15,2	2,2	14,8	2150	14,5	2100
2850f-2,3E	19,7	2850	15,9	2,3	15,9	2300	14,8	2150
3000f-2,4E	20,7	3000	16,5	2,4	16,5	2400	15,2	2200
3150f-2,5E	21,7	3150	17,2	2,5	17,2	2500	15,5	2250
3300f-2,6E	22,8	3300	17,9	2,6	18,3	2650	16,2	2350

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

Tabela 17 - Classes comuns da classificação MEL.

Classe	F _b		E		F _t		F _{c,90}	
	(MPa)	(lb/in ²)	(GPa)	(x10 ⁶ lb/in ²)	(MPa)	(lb/in ²)	(MPa)	(lb/in ²)
MEL								
M-5	6,2	900	7,6	1,1	3,4	500	7,2	1050
M-6	7,6	1100	6,9	1,0	4,1	600	9,0	1300
M-7	8,3	1200	7,6	1,1	4,5	650	9,7	1400
M-8	9,0	1300	9,0	1,3	4,8	700	10,3	1500
M-9	9,7	1400	9,7	1,4	5,5	800	11,0	1600
M-10	9,7	1400	8,3	1,2	5,5	800	11,0	1600
M-11	10,7	1550	10,3	1,5	5,9	850	11,5	1675
M-12	11,0	1600	11,0	1,6	5,9	850	11,5	1675
M-13	11,0	1600	9,7	1,4	6,6	950	11,5	1675
M-14	12,4	1800	11,7	1,7	6,9	1000	12,1	1750
M-15	12,4	1800	10,3	1,5	7,6	1100	12,1	1750
M-16	12,4	1800	10,3	1,5	9,0	1300	12,1	1750
M-17	13,4	1950	11,7	1,7	9,0	1300	14,1	2050
M-18	13,8	2000	12,4	1,8	8,3	1200	12,6	1825
M-19	13,8	2000	11,0	1,6	9,0	1300	12,6	1825
M-20	13,8	2000	13,1	1,9	11,0	1600	14,5	2100
M-21	15,9	2300	13,1	1,9	9,7	1400	13,4	1950
M-22	16,2	2350	11,7	1,7	10,3	1500	11,4	1650
M-23	16,5	2400	12,4	1,8	13,1	1900	13,6	1975
M-24	18,6	2700	13,1	1,9	12,4	1800	14,5	2100
M-25	19,0	2750	15,2	2,2	13,8	2000	14,5	2100
M-26	19,3	2800	13,8	2,0	12,4	1800	14,8	2150
M-27	20,7	3000	14,5	2,1	13,8	2000	16,5	2400
M-28	15,2	2200	11,7	1,7	11,0	1600	13,1	1900

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

De acordo com SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994), A resistência à flexão dada nas tabelas 16 e 17 refere-se ao uso das peças na posição de maior inércia (*edgewise*). Se as peças forem utilizadas na posição de menor inércia (*flatwise*) os valores listados nas tabelas acima devem ser majorados pelo coeficiente dado na tabela 18.

Tabela 18 - Fator de posição para a resistência a flexão de peças classificadas mecânicamente.

Largura da peça	89mm	140mm	184mm	235mm	286mm	337mm
Fator	1,10	1,15	1,15	1,20	1,20	1,20

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

Com relação ao controle de qualidade, o sistema MSR requer que uma amostra representativa do lote seja testada diariamente por no mínimo uma propriedade de resistência e o módulo de elasticidade a flexão na orientação de maior inércia da peça, sendo que o sistema MEL requer um controle diário da resistência à tração e testes para a determinação do MOR e da rigidez à flexão em relação ao eixo de maior inércia das peças. Finalmente, as classes de MSR são determinadas

adotando-se um $COV = 11\%$ em relação ao módulo de elasticidade, enquanto as classes de MEL são determinadas para um $COV \leq 15\%$.

Todos os sistemas de classificação por resistência são baseados no uso de um estimador para avaliar as propriedades de resistência. Na classificação visual, a dimensão dos defeitos visuais, como os nós, é usada para avaliar a resistência. De acordo com GALLIGAN & MCDONALD (2000), no sistema de classificação mecânica, a combinação das dimensões dos nós presentes na borda da face larga da peça com a medida do módulo de elasticidade têm sido um estimador tradicional.

Todos os sistemas de classificação mecânica empregam alguma forma de inspeção visual, uma avaliação visual de características específicas que afetam a resistência e rigidez da peça. O sistema de inspeção visual utilizado com as máquinas de classificação por tensões limita as características de redução de resistência da peça, fixando estas características como uma fração da seção transversal, GALLIGAN & MCDONALD (2000).

Além das limitações com relação ao diâmetro dos nós localizados na borda das peças, muitas agências que supervisionam a classificação exigem a limitação de características localizadas nas extremidades das peças, ou em outras áreas não testadas pelo dispositivo mecânico. Assim, por exemplo, os procedimentos de inspeção visual para a classificação mecânica do SPIB limitam algumas características de crescimento tais como: fendas, rachas anelares, inclinação das fibras, medula podre, esmoado e empenamento.

Algumas características da classificação mecânica por tensões são melhor compreendidas se contrastadas com as características da classificação visual.

Para a classificação visual, a *National Grading Rule* permite diferentes propriedades mecânicas, para uma mesma classe visual, em função das espécies. Por exemplo, a tabela 19 compara o módulo de ruptura a flexão e os valores do módulo de elasticidade de uma classificação mecânica com uma classificação visual típica em peças de 38mm x 89mm com teor de umidade igual a 15%. Os valores de E e f_m determinados pela máquina de classificação são mostrados na coluna do lado esquerdo.

Tabela 19 - Comparação de propriedades mecânica da classificação mecânica com a classificação visual.

Classificação mecânica por tensão (F_m , E)	Classificação visual (valor de F_m)				Classificação visual (valor de E)			
	S. Pine	Douglas Fir-Larch	Hem-Fir	Spruce-Pine-Fir	S. Pine	Douglas Fir-Larch	Hem-Fir	Spruce-Pine-Fir
2850-2.3	SS							
2700-2.2								
2550-2.1								
2400-2.0								
2250-1.9		SS				SS		
2100-1.8			SS		SS			
1950-1.7					Nº 1	Nº 1		
1850-1.6	Nº 1			SS	Nº 2	Nº 2	SS	
1650-1.5							Nº 1	SS
1500-1.4	Nº 2	Nº 1			Nº 3	Nº 3	Nº 2	Nº 1;Nº 2
1350-1.3		Nº 2	Nº 1	Nº 1;Nº 2				
1200-1.2			Nº 2				Nº 3	Nº 3
900-1.0								
< 900-1.0	Nº 3	Nº 3	Nº 3	Nº 3				

Fonte: GALLIGAN & MCDONALD (2000).

A tabela 19 também mostra que a correspondência direta entre as propriedades da classificação mecânica e as propriedades da classificação visual não é possível sem o conhecimento das espécies.

Na classificação visual, apesar das descrições serem as mesmas para todas as espécies, (mesmas dimensões dos nós, mesmas exigências quanto à inclinação das fibras, etc) diferentes valores de projeto são determinados para cada espécie. Este procedimento de classificação visual resulta em um grande número de valores de propriedades mecânicas para cada classe em função das espécies.

Segundo GALLIGAN & SNODGRASS (1970), devido ao fato da máquina de tensões classificar a madeira em classes usando a medida mecânica de um estimador, o resultado são classes com menos variáveis na avaliação, se comparado com a classificação visual.

A relação entre o estimador e a propriedade mecânica de interesse é comumente mostrada por uma técnica estatística conhecida como regressão. A figura 32 ilustra o uso de uma regressão linear para mostrar o efeito da variabilidade dos dados na precisão de uma avaliação.



Figura 32 - Estimativa da resistência por análise de regressão.

Fonte: GALLIGAN & MCDONALD (2000).

A figura 33 mostra o uso do MOE à flexão como um estimador do MOR. Nesta figura, ao invés da linha de regressão, a linha inferior do intervalo de previsão (I.P.) é usada para a determinação das propriedades de dimensionamento.

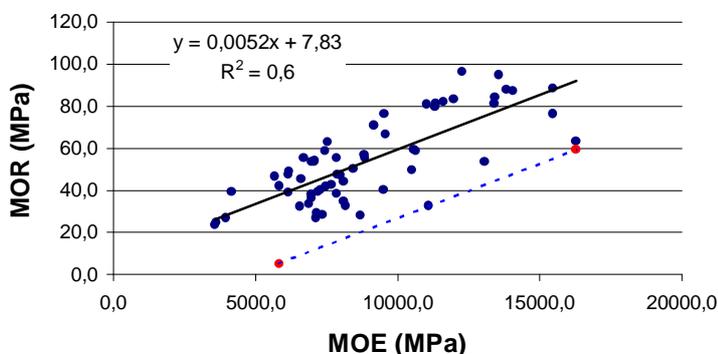


Figura 33 - Relação típica entre o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura.

Fonte: Autor

A linha inferior do intervalo de previsão de 90% garante, com probabilidade de 95% que, para uma nova previsão, o valor observado seja maior que o valor estimado.

Somente uma pequena proporção das peças recai abaixo da linha inferior do intervalo de previsão de 90%. De acordo com GALLIGAN & MCDONALD (2000), os valores para o dimensionamento são fixados neste ponto, com base nos fatores de segurança e outros ajustes.

Os métodos MSR e MEL são baseados na relação existente entre o módulo de elasticidade e a resistência à flexão da madeira. Portanto, para o estabelecimento da correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à flexão para uma determinada espécie de madeira, é necessário que se façam testes preliminares medindo o módulo de elasticidade e determinando a resistência à flexão das peças.

A figura 34 mostra um exemplo típico da relação módulo de elasticidade x resistência à flexão. Os termos VQL-1 e VQL-2 referem-se a peças de madeira em que o maior defeito localizado na borda da peça não supera 1/6 e 1/4 da área da seção transversal da peça respectivamente.

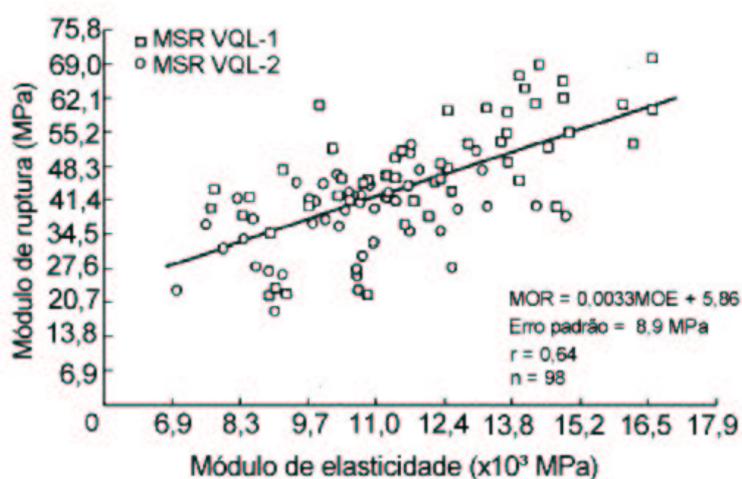


Figura 34 - Relação entre o MOR e o MOE estático em relação ao eixo de menor inércia da peça.

Fonte: GALLIGAN & MCDONALD (2000).

A partir destes dados, pode-se estimar o valor mínimo do módulo de elasticidade para a madeira se enquadrar nas classes apresentadas nas tabelas 16 e 17. A figura 35 ilustra como a classificação pela relação MOE x MOR tem sido desenvolvida historicamente nos Estados Unidos, GREEN & KRETSCHMANN (1999). O grupo de dados para uma espécie em particular é coletado, e a linha inferior do intervalo de previsão de 90% é traçada para a espécie. GALLIGAN & MCDONALD (2000) apresenta um processo aproximado para a determinação da linha inferior do intervalo de previsão de 90%. Neste processo, a linha inferior do intervalo de previsão é aproximada para uma reta, e o processo consiste em traçar

uma reta, paralela à reta de regressão e abaixo da mesma $t_{\alpha/2}$ vez o erro padrão estimado do MOR. Ainda segundo GALLIGAN & MCDONALD (2000) este processo aproximado tem mostrado resultados satisfatórios para a previsão de novas estimativas, apesar de existirem métodos estatísticos mais sofisticados.

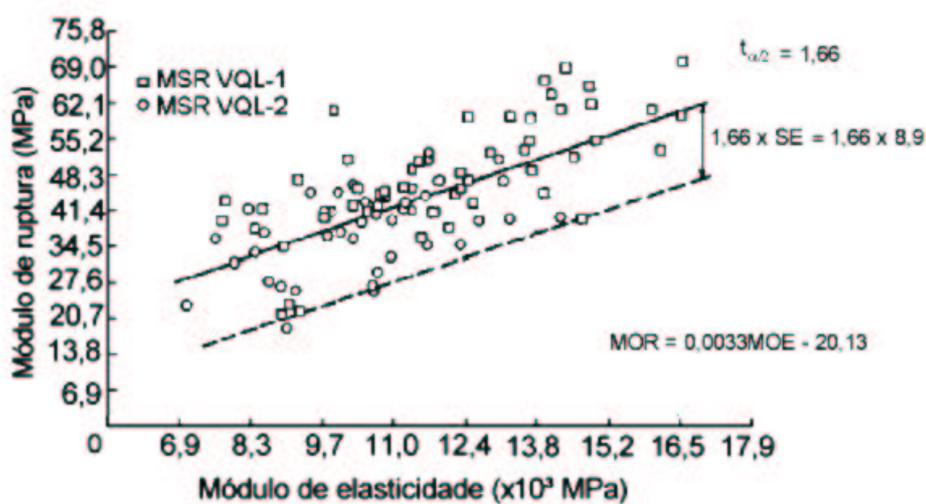


Figura 35 - Estimativa do MOE mínimo para o enquadramento nas classes das tabelas 16 e 17.

Fonte: GALLIGAN & MCDONALD (2000).

De acordo com SOUTHERN PINE INPECTION BUREAU (2001), o valor mínimo do MOE para a classe é o valor correspondente ao 5º percentil da distribuição do MOE, considerando uma distribuição normal de probabilidades para o valor do MOE. Desta forma, o valor mínimo do MOE para cada classe é definido por:

$$E_{\min} = 0,82 \cdot E_m \text{ para o sistema MSR} \quad (4)$$

$$E_{\min} = 0,75 \cdot E_m \text{ para o sistema MEL} \quad (5)$$

2.4.4 Sistema *E-rated*

A classificação *E-rated* foi desenvolvida para atender os critérios da norma norte-americana de fabricação de elementos estruturais de Madeira Laminada Colada ANSI/AITC A190.1-92 (*American National Standards for Wood Products – Structural Glued Laminated Timber*) GALLIGAN & MCDONALD (2000).

A laminação da madeira deve atender às exigências na norma AITC A190.1-92. As lâminas de madeira classificadas pelo *E-rated* são diferenciadas da

classificação visual por exigências específicas de controle de qualidade e variabilidade nos valores do módulo de elasticidade. Estes critérios são listados no anexo D da norma AITC 117-*Manufacturing-2001 (Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber of Softwood Species Manufacturing Requirements)*.

Como dito anteriormente, os sistemas de classificação mecânica se baseiam no componente humano para a classificação visual. GALLIGAN & MCDONALD (2000), utilizam o termo nível de qualidade visual (*Visually Quality Level*) (VQL) para representar as limitações nas características da borda da face larga e outros critérios como canto esmoado e empenamento.

O conceito de nível de qualidade visual (VQL) e os termos VQL-1, VQL-2, VQL-3 e VQL-4, são introduzidos para indicar as características visuais de uma peça de madeira, quando uma combinação de métodos visuais e mecânicos é utilizada para classificar a madeira. Esta dimensão admissível para as características da borda é diferente para cada uma das quatro classes VQL e é especificada como uma fração da seção transversal.

Os níveis de qualidade visual da classificação mecânica são equivalentes às classes da classificação visual, como mostra a tabela 20.

Tabela 20 - Equivalência aproximada das dimensões dos nós de borda para a classificação mecânica e visual.

Classificação mecânica		Classificação visual	
VQL	Nós de borda como fração da seção transversal	Peças estruturais leves ou vigas	Nós de borda como fração da seção transversal ^a
1	1/6	Select Structural	1/6+
2	1/4	Nº 1	1/4+
3	1/3	Nº 2	1/3+
4	1/2	Nº 3	1/2+

^a O sinal positivo significa que a dimensão do nó, computado como uma fração da seção transversal, é sensivelmente maior que a fração mostrada.

Fonte: GALLIGAN & MCDONALD (2000).

Para o dimensionamento de elementos estruturais de Madeira Laminada Colada a norma ASTM D3737-96 apresenta uma tabela relacionando valores de resistência com valores de MOE em relação ao eixo de menor inércia.

A dimensão máxima permitida para os nós para as várias dimensões e classes de madeira tanto na classificação mecânica quanto na visual, são mostradas na tabela 21.

Tabela 21 - Dimensões máximas admissíveis dos nós localizados na borda das peças para a classificação mecânica e visual.

Dimensão (mm)	Mecânica VQL-1	Visual SS	Mecânica VQL-2	Visual Nº1	Mecânica VQL-3	Visual Nº2	Mecânica VQL-4	Visual Nº3
38 x 64	1,11	1,27	1,59	1,91	2,06	2,20	3,18	3,20
38 x 89	1,43	1,91	2,22	2,54	3,02	3,20	4,45	4,40
38 x 140	2,38	2,86	3,49	3,81	4,60	4,80	6,99	7,00
38 x 184	3,02	3,81	4,60	5,08	6,19	6,40	9,21	8,90
38 x 235	3,97	4,76	5,87	6,35	7,78	8,30	11,75	11,40
38 x 286	4,76	5,72	7,14	7,62	9,53	9,50	14,29	14,00

Fonte: GALLIGAN & MCDONALD (2000).

Esta tabela demonstra, por exemplo, que as exigências para as dimensões dos nós localizados na borda para a classe *Select Structural* são similares às exigências para a classe VQL-1, porém a classe *Select Structural* permite que a dimensão do nó localizado na borda seja sensivelmente maior. Assim, uma peça de madeira de dimensões 38mm x 64mm (nó de borda com diâmetro máximo de 1,27cm) será classificada entre as classes VQL-1 (nó de borda com diâmetro máximo de 1,11cm) e VQL-2 (nó de borda com diâmetro máximo de 1,59cm).

A norma AITC 117-*Manufacturing*-2001 determina que as classes de *E-rated* devem ser designadas somente com o valor do módulo de elasticidade medido em relação ao eixo de menor inércia e a proporção dos defeitos permitidos para a classe. Por exemplo, para uma classe com módulo de elasticidade de $1.5 \cdot 10^6$ psi e com defeitos permissíveis de até 1/3 deve ser designada por 1.5E LAM-3. Esta designação ainda pode ser abreviada para 1.5E-3. Nenhum valor de resistência é associado com as classes de *E-rated*.

O anexo D da norma AITC 117 *Manufacturing* – 2001 fixa o valor mínimo do MOE para cada classe de *E-rated*. A distribuição dos valores do MOE para a madeira classificada pelo *E-rated* deve ser tal que o valor do MOE da peça de madeira deve ser igual ou maior ao valor característico das classes mostradas na tabela 22.

Tabela 22 - Valor mínimo do MOE para cada classe.

Classe	Média (10 ⁶ psi)	5º percentil (10 ⁶ psi) ^a
2.6E	2,6	2,26
2.5E	2,5	2,16
2.4E	2,4	2,06
2.3E	2,3	1,96
2.2E	2,2	1,86
2.1E	2,1	1,77
2.0E	2,0	1,67
1.9E	1,9	1,58
1.8E	1,8	1,48
1.7E	1,7	1,39
1.6E	1,6	1,30
1.5E	1,5	1,21

^a O valor característico é determinado pela equação $E_{5th} = 0,955 \cdot E_{médio} - 0,233$ (psi) dada no anexo A1 da norma ASTM D3737-96.

Fonte: AITC 117 *Manufacturing* - 2001.

O apêndice C deste trabalho apresenta algumas considerações adicionais para aplicação do sistema de classificação visual e do sistema *E-rated* na indústria de Madeira Laminada Colada.

HERNANDEZ & MOODY (1996), realizaram testes de flexão em 771 vigas de MLC em cinco espécies de coníferas e três espécies de dicotiledôneas com o objetivo de demonstrar que vigas de MLC feitas de uma variedade de espécies têm propriedades de resistência semelhantes, utilizando-se os mesmos critérios para a classificação da madeira e fabricação das vigas. Os grupos de coníferas testados foram *Douglas Fir-Larch*, *Southern Pine*, *Hem-Fir*, *Spruce-Pine-Fir* e *Norway Spruce*. Os grupos de dicotiledôneas testados foram *Red Maple*, *Yellow Poplar*, e *Red Oak*. As lâminas externas; tanto as tracionadas como as comprimidas foram classificadas pelo sistema *E-rated*. Após a análise dos resultados HERNANDEZ & MOODY (1996) concluíram que:

- As espécies, grupos de espécies, e país de origem têm um efeito mínimo nas propriedades de resistência das vigas;
- A classificação mecânica das lâminas externas tracionadas como um indicador da propriedade de resistência a flexão apresenta-se como um meio efetivo para a classificação de vigas de MLC.

2.4.5 Avaliação não destrutiva pela técnica de vibração transversal

As técnicas de teste não destrutivo para madeira diferem muito das técnicas usadas em materiais homogêneos e isotrópicos como os metais, plásticos e cerâmicas. Em tais materiais, cujas propriedades mecânicas são conhecidas e rigorosamente controladas por processos de produção, as técnicas de avaliação não destrutiva são usadas somente para detectar a presença de descontinuidade, vazios, ou inclusões. Entretanto, na madeira, estas irregularidades ocorrem naturalmente e podem ser induzidas por agentes da natureza que causam degradação.

De acordo com ROSS & PELLERIN (1994), a hipótese fundamental para a avaliação não destrutiva da madeira foi iniciada por JAYNE (1959). Ele propôs que a energia armazenada e as propriedades de dissipação da madeira podem ser medidas por meios não destrutivos, sendo que tais mecanismos determinam o comportamento estático da madeira. Como consequência, convenientes relações matemáticas entre estas propriedades e as propriedades estáticas de resistência e elasticidade podem ser alcançadas por meio de análises de regressão estatística.

Para ilustrar o método da vibração transversal, pode-se fazer uma analogia do comportamento da vibração de uma viga com a vibração de uma massa apoiada sobre uma mola, conforme mostra a figura 36.

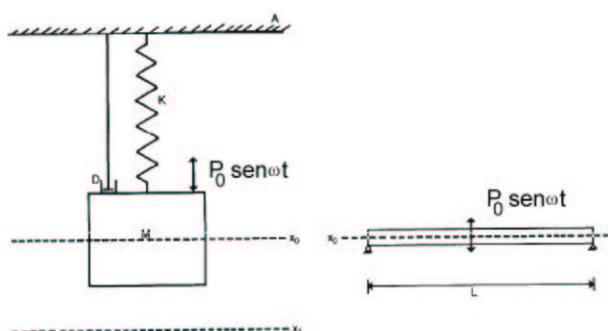


Figura 36 - Sistema massa-mola e viga vibrando transversalmente.

Fonte: ROSS & PELLERIN (1994).

Na figura 36 a massa é suportada por uma mola de rigidez K . A fricção interna, ou amortecimento é denotado por D .

Quando a massa M é colocada em vibração, sua equação de movimento pode ser expressa por:

$$M \cdot \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) + D \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right) + K \cdot x = P_0 \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (6)$$

A equação 6 pode ser resolvida em K e D.

A solução da equação 6 em K leva a seguinte expressão do MOE para uma viga simplesmente apoiada nas extremidades.

$$MOE = \frac{f_r^2 \cdot W \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad (7)$$

Sendo:

f_r = frequência de ressonância (Hz);

W = massa da viga (Kg);

L = vão da peça (m);

I = momento de inércia da seção transversal (cm⁴);

g = aceleração da gravidade (9,8m/s²).

A figura 37 ilustra um esquema de um equipamento para a determinação do MOE por meio da vibração transversal.

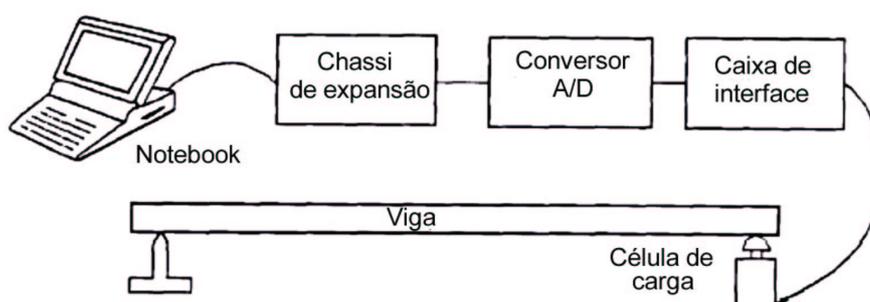


Figura 37 - Esquema de um equipamento para a determinação do MOE por vibração transversal.

Fonte: ROSS et al (1996).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a comprovação da eficiência da classificação visual obtida da revisão bibliográfica, foi realizada a classificação visual em um lote de madeira do gênero *Pinus*, recolhido em Lages, SC.

Após a classificação visual, as peças foram submetidas à classificação mecânica por uma máquina tipo MSR e por um equipamento de vibração transversal. Posteriormente, as peças foram testadas à flexão estática em relação aos eixos de menor e de maior inércia, sendo determinados os valores do MOE, em relação aos dois eixos principais de inércia, e o valor do MOR, segundo o eixo de maior inércia. Também foram realizados testes de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova para caracterização do lote amostrado.

Todos os testes foram desenvolvidos no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (SET/EESC/USP).

3.1 Material utilizado

Foram utilizadas pranchas de madeira das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, sendo que as mesmas encontravam-se misturadas no lote recolhido para análise.

As pranchas de madeira utilizadas apresentam dimensões nominais de 3,5cm × 12,5cm × 2,60m. As peças de madeira foram doadas pela BATTISTELLA INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE MADEIRAS LTDA e são provenientes do Planalto Catarinense, região de Lages, Santa Catarina.

3.2 Método

3.2.1 Classificação visual

A BATTISTELLA separou para o estudo um lote composto por 1200 peças de madeira com dimensões nominais de 3,5cm × 12,5cm × 2,60m. de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, proveniente de Lages, SC.

Foi feita uma pré-seleção neste lote, descartando-se as peças com empenamento excessivo, podridão ou com defeitos que pudessem invalidar os resultados dos testes. Desta pré-seleção restaram em torno de 900 peças.

Para a classificação visual das 900 peças foi aplicado o método de classificação visual do SPIB descrito com detalhes em SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994) e SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1999). O anexo A da dissertação apresenta um resumo deste método de classificação.

As 900 peças foram classificadas como caibros e pranchas (*dimension lumber*). Na classificação foram limitados os diâmetros dos maiores nós presentes no centro da face larga, na borda da face larga e na face estreita, bem como a inclinação das fibras na quatro faces e a presença de fendas, rachas, canto esmoado encanoamento e presença de resina. Também foi considerado o número de anéis de crescimento por 2,5cm (1”) medidos em uma linha radial representativa. Assim, as peças foram classificadas em Densa (D) com 6 ou mais anéis de crescimento e mais de 1/3 da seção transversal contendo madeira de inverno, ou 4 ou mais anéis de crescimento e mais de 1/2 da seção transversal contendo madeira de inverno e Não-Densa (ND) para as demais densidades (média e baixa).

Para a realização posterior do trabalho foram selecionadas 502 peças distribuídas nas classes SS-D, SS-ND, N°2-D e N°2-ND e mais 98 peças distribuídas em outras classes, totalizando 600 peças. Desde a pré-seleção até o final da classificação visual foram gastos dois dias.

As peças foram pré-bitoladas, porém não foram aplainadas, desta maneira apresentavam variação nas dimensões da seção transversal da ordem de 6mm.

Portanto, para a classificação visual considerou-se a seção transversal nominal de 3,5cm × 12,5cm.

A tabela 23 apresenta as dimensões máximas permitidas para os defeitos em cada classe, para peças com seção transversal de 3,5cm × 12,5cm.

Tabela 23 – Limitações nos defeitos em cada classe para peças de seção transversal de 3,5cm × 12,5cm. e comprimento de 2,60m.

Classe	Fibras inclinadas	Nós		Face estreita		Fendas	Racha superficial	Esmoado
		no centro da face	na borda da face larga	D (cm)	L (cm)			
Select Structural	1:12	4,8	2,7	1,7	8,8			
Nº 1	1:10	6,2	3,6	2,1	10,4	12,5	60,0	0,9
Nº 2	1:8	7,5	4,5	2,6	11,4	18,8	90,0	1,2
Nº 3	1:4	9,4	6,2	2,7	12,5	43,3	-	1,8

Durante o procedimento de classificação anotou-se nas peças o seu número e a classe correspondente.

Devido a falta de prática para medir visualmente os defeitos, construiu-se um gabarito de acrílico, no qual foram marcadas as dimensões máximas admissíveis para os nós, e a máxima inclinação permitida para as fibras em cada classe. A figura 38 ilustra a classificação visual realizada utilizando o gabarito.



Figura 38 – Classificação visual e detalhe do gabarito de acrílico.

3.2.2 Classificação mecânica na máquina MSR

Após a classificação visual, as 600 peças foram mecanicamente classificadas utilizando-se uma máquina de classificação por tensão modelo COMPUTERMATIC MK P IVa da marca PLESSEY TELECOMMUNICATIONS.

Ao serem introduzidas na máquina, as peças de madeira interrompem um feixe de luz ativando um foto sensor responsável pelo acionamento do pistão a ar comprimido que flexiona as peças em relação ao eixo de menor inércia. Um encoder mede o deslocamento provocado pela força a cada 15cm de comprimento da peça. A máquina envia os dados para um computador que determina o Módulo de Elasticidade (MOE) de cada seção de 15cm e por sua vez envia dados para a máquina pintar um código de cores em cada seção analisada. No final da peça a máquina imprime uma faixa correspondente ao $MOE_{\text{médio}}$ da peça de madeira.

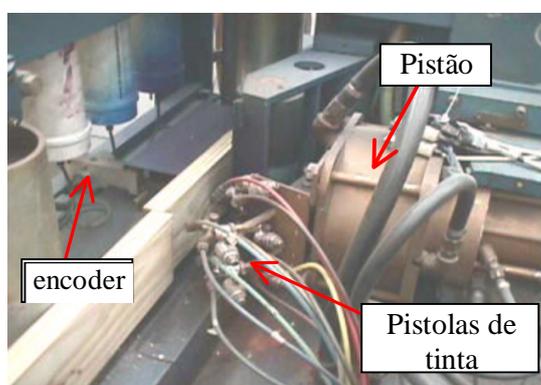


Figura 39 – Elementos da máquina de classificações.

Inicialmente, a máquina foi calibrada. Para tal finalidade, foi colocado um anel dinamométrico alinhado com o pistão pneumático para medir a força aplicada. Para a calibração, foram feitos ajustes da pressão para valores inteiros e em seguida leu-se no anel dinamométrico o valor da força correspondente à pressão lida no manômetro (figura 40).

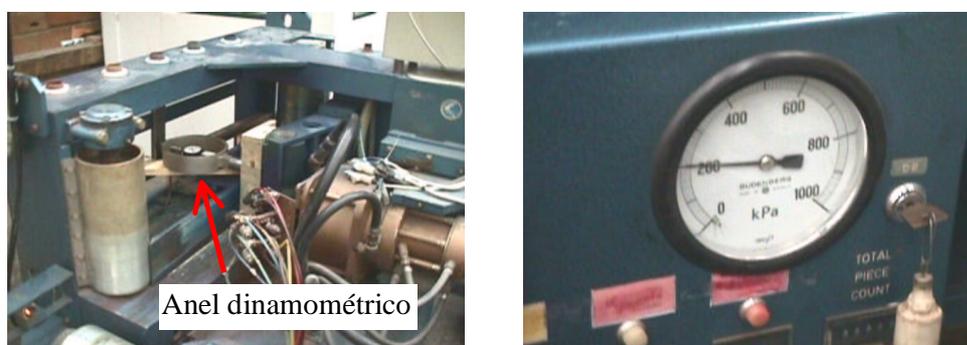


Figura 40 – Detalhes da calibração da máquina MSR.

Assim foi estabelecida uma correlação entre a força aplicada e a pressão lida no manômetro.

Após a calibração da máquina, iniciou-se a classificação das peças. A máquina é ligada a um computador que possui um programa para entrada de dados. Sua operação é bastante simples, bastando informar a seção transversal da peças, a velocidade do ensaio e a força que está sendo aplicada.

A tabela 24 apresenta o código de cores da máquina com os intervalos de MOE referentes a cada cor.

Tabela 24–Código de cores e os correspondentes intervalos de MOE.

Código de cores	Intervalo de MOE (MPa)
Azul	≤ 5.000
Verde	5.001 a 6.000
Amarelo	6.001 a 8.000
Roxo	8.001 a 10.000
Vermelho	≥ 10.001

A figura 41 ilustra o desenvolvimento da classificação com a máquina de tensões.



Figura 41 – Desenvolvimento da classificação com a máquina MSR

A classificação das 600 peças pela máquina MSR demorou um dia. Após a classificação com a máquina MSR, as peças foram transportadas para o Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Universidade de São Paulo (USP), Campus de São Carlos para a realização dos demais testes.

3.2.3 Classificação mecânica por vibração transversal

Na classificação por vibração transversal foi utilizado o equipamento Transverse Vibration E-Computer, modelo 340 da Metriguard. Antes do teste foram

medidas e anotadas as dimensões da seção transversal, bem como o comprimento das 600 peças selecionadas. As peças foram testadas com um vão livre de 2,40 m.

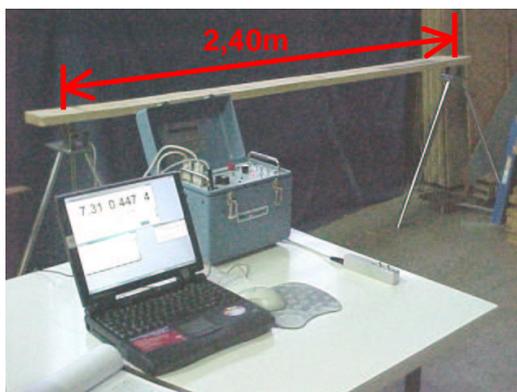


Figura 42 – Equipamento de vibração transversal utilizado nos testes.

Antes do início dos trabalhos de classificação o equipamento foi calibrado utilizando-se para isso uma barra de alumínio de MOE conhecido.

Um dos apoios possui uma célula de carga que estima o peso de cada peça, e a frequência de vibração. Os dados são enviados a um computador que realiza os cálculos e armazena os dados e os resultados dos testes em um arquivo texto. Neste arquivo são gravados o número de cada peça, a seção transversal, a frequência de vibração, o peso e o MOE de cada peça.

No programa de cálculo do MOE foram informadas as dimensões nominais da seção transversal igual a $3,5\text{cm} \times 12,5\text{cm}$. Com as dimensões reais de cada peça os valores do MOE determinados tanto pela vibração transversal, como pela classificação MSR foram corrigidos.

3.2.4 Teste de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia

Para verificar a precisão dos métodos de classificação mecânica utilizados neste trabalho foram realizados testes de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia, para as 600 peças selecionadas. Os testes foram conduzidos seguindo-se os procedimentos da norma ASTM D4761-96. As pranchas de madeira foram colocadas sobre apoios de aço distanciados de 2,40m. Considerando-se a altura nominal de 3,5cm, as peças foram flexionadas com uma relação L/h igual a 69. No centro dos apoios foi colocado um relógio comparador com resolução de 0,01mm e curso

máximo de 50mm. Foi aplicada uma força no centro das pranchas, com duas intensidades: 100 N e 200 N.



Figura 43 – Teste de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia das pranchas e detalhe do apoio.

A intensidade da força foi definida limitando-se o deslocamento vertical máximo em $L/200$, considerando-se um MOE de 10.000 MPa. Foi anotado o valor do deslocamento vertical correspondente a cada nível de carregamento. O MOE à flexão em relação ao eixo de menor inércia foi determinado no segundo incremento de carregamento utilizando-se a seguinte expressão:

$$\text{MOE} = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot \Delta v \cdot I} \quad (8)$$

Sendo:

MOE = Módulo de elasticidade (MPa);

$\Delta P = (F_2 - F_1)$, Incremento de carga (N);

L = Vão da prancha (mm);

$\Delta v = (v_2 - v_1)$, Incremento de deslocamento (mm);

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

3.2.5 Teste de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia

Para a realização dos testes de flexão estática em relação ao eixo principal de maior inércia foram utilizadas quantidades iguais de peças em cada classe. Como a classe N°2-D apresentava apenas 24 peças, foi adotada a mesma quantidade para as

outras três classes, portanto para as demais classes foram selecionadas aleatoriamente 24 peças de cada classe, totalizando um lote de 96 peças.

Este teste foi realizado para a determinação das propriedades de resistência e rigidez à flexão em relação ao eixo de maior inércia das pranchas. A norma adotada nos ensaios foi a ASTM D4761-96. Nestes testes foram medidas, a rigidez (MOE) bem como o módulo de ruptura à flexão (MOR) das pranchas.

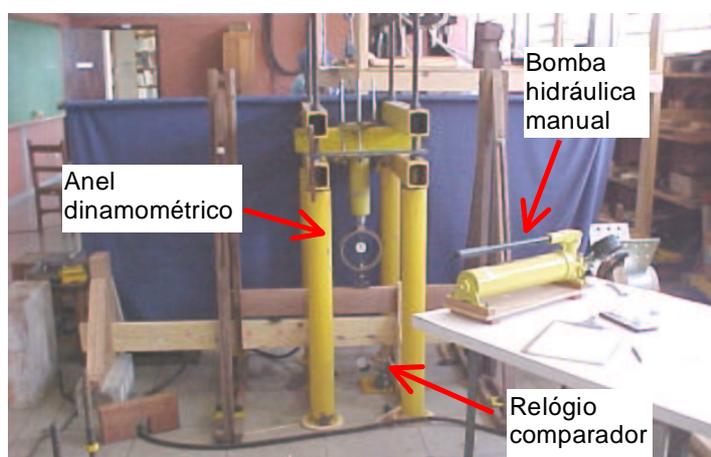


Figura 44 – Arranjo dos testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia.

As pranchas foram apoiadas sobre duas rótulas espaçadas de 2,40 m e foram aplicadas duas cargas concentradas nos terços das mesmas. A relação L/h deste ensaio foi de 19, dentro dos limites da norma ASTM D4761-96 que estipula valores entre 17 e 21 como aceitáveis. Neste teste foi utilizada uma bomba hidráulica manual, um cilindro de 250 kN, um anel dinamométrico com capacidade de 50 kN e um relógio comparador de 0,01mm. A velocidade de carregamento aplicada foi em torno de 36 MPa/min levando as peças à ruptura entre 1min a 10min. As pranchas de madeira também foram devidamente contraventadas para evitar a perda de estabilidade lateral.



Figura 45 – Detalhe dos contraventamentos.

Para a determinação do MOE foram aplicadas duas intensidades de força: 1400 N e 2800 N. Os carregamentos foram definidos limitando-se o deslocamento vertical máximo em $L/200$ e considerando-se um MOE médio de 10.000 MPa. Em seguida as pranchas foram levadas à ruptura. Para cada peça rompida foi marcado a força última de ruptura e um código correspondente ao modo e a causa da ruptura, de acordo com as convenções da norma ASTM D4761-96. Os códigos para caracterizar o modo e a causa da ruptura são dados no Anexo B deste trabalho.

O MOE foi determinado pela seguinte equação:

$$MOE = \frac{23 \cdot \Delta F \cdot L^3}{1296 \cdot \Delta v \cdot I} \quad (9)$$

sendo:

MOE = Módulo de elasticidade (MPa);

$\Delta F = (F_2 - F_1)$, Incremento de força (N);

$L =$ Vão da prancha (mm);

$\Delta v = (v_2 - v_1)$, Incremento de deslocamento (mm);

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

E o MOR foi determinado utilizando-se a seguinte equação:

$$MOR = \frac{M_{máx}}{W} \quad (10)$$

sendo:

MOR = Módulo de ruptura à flexão (MPa);

$$M_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}} \cdot L}{6}, \text{ Momento máximo (N} \cdot \text{mm)};$$

$F_{\text{máx}}$ = Força de ruptura (N);

L = Vão da prancha (mm);

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \text{ Módulo resistente (mm}^3\text{)};$$

b, h = Dimensões da seção transversal (mm);

As pranchas foram testadas aleatoriamente, isto é, sem seguir uma seqüência com relação às classes de resistência. A disposição das peças, com relação aos defeitos nas bordas também foi aleatória.

3.2.6 Teste de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova

Para a caracterização da madeira ensaiada foram realizados testes de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova extraídos de porções não afetadas pelo ensaio de flexão estática. Entretanto não foi possível retirar corpos-de-prova de todas as pranchas devido à propagação da ruptura para as extremidades. No total foram testados 91 corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova foram cortados em comprimentos de 15cm, mantendo-se as dimensões transversais originais das pranchas, tendo sido determinadas as suas densidades, foram testados à compressão paralela em uma máquina universal ensaios da marca AMSLER.

O ensaio foi automatizado utilizando-se dois transdutores de deslocamento com resolução de 0,001mm, modelo BCD-5c da Kyowa e uma célula de carga com capacidade para 400 kN ligados a um sistema de aquisição de dados da Lynx.

A base de medida dos deslocamentos foi 100mm.



Figura 46 – Transdutores de deslocamento e célula de carga.

O sistema de aquisição de dados foi configurado para capturar as informações de força e deslocamento a cada 1 segundo. Os corpos-de-prova foram carregados axialmente até atingirem a ruptura. A velocidade de carregamento aplicada foi em torno de 38 MPa/min. O MOE de cada corpo-de-prova foi medido determinando-se o coeficiente angular da reta de regressão entre os pontos $(\epsilon_{10\%}; \sigma_{10\%})$ e $(\epsilon_{50\%}; \sigma_{50\%})$ do gráfico $\epsilon \times \sigma$. Estes pontos são correspondentes aos valores determinados para 10% e 50% da força de ruptura, respectivamente.

3.2.7 Ajuste dos dados

A madeira utilizada nos testes foi seca em estufa. Foi medido o teor de umidade de algumas peças retiradas aleatoriamente do lote com um medido elétrico Digisystem, modelo DUP 8805 e constatou-se que a umidade das mesmas estava em torno de 11%, portanto não foi necessária à correção das propriedades mecânicas em função da umidade. Entretanto, o MOE medido na máquina MSR, bem como o MOE medido na vibração transversal foram corrigidos de modo a considerar a discrepância entre as dimensões reais da seção transversal das peças em relação à dimensão nominal adotada.

3.2.7.1 Ajuste dos valores do MOE medido pela máquina MSR

Com as dimensões reais da seção transversal de cada peça o MOE foi corrigido da seguinte forma:

$$MOE_c = MOE \cdot \frac{I_a}{I_r} \quad (11)$$

Sendo:

MOE_c = Módulo de elasticidade corrigido (MPa);

I_a = Momento de inércia adotado para uma seção transversal nominal de $3,5 \times 12,5$ cm (MPa);

I_r = Momento de inércia real de cada prancha (MPa);

3.2.7.2 Ajuste dos valores do MOE medido pelo equipamento de vibração transversal

Como o equipamento de vibração transversal fornece a massa de cada peça e a frequência natural de vibração, o MOE foi corrigido empregando-se a equação 7, porém com o momento de inércia real de cada peça.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Classificação visual

A tabela 25 apresenta o resultado da classificação visual realizada nas 600 peças. Observa-se uma grande quantidade de peças sem defeitos.

Tabela 25 – Peças recolhidas para análise.

	SS-D	SS-ND	Nº2-D	Nº2-ND	outras classes	TOTAL
Quantidades	324	92	24	62	98	600

4.2 Valores de MOE em relação ao eixo de menor inércia

A tabela 26 apresenta a classe visual e os resultados corrigidos, obtidos na classificação mecânica com a máquina de classificação MSR e com o equipamento de vibração transversal.

Tabela 26 – Dados obtidos na classificação visual e mecânica do lote de 600 peças.

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
1	SS	D	14083	14603	15264
2	SS	D	19242	20645	18745
3	SS	ND	10475	9750	10387
4	SS	D	13742	12827	14614
5	SS	D	17789	22284	16888
6	SS	D	15160	14565	15060
7	SS	ND	14092	15197	14592
8	1	D	11004	9478	12117
9	3	D	15209	15821	14675
10	SS	D	19323	24243	19024
11	SS	D	15359	17336	15929
12	SS	D	8716	7702	8842
13	1	D	16327	16149	17001
14	SS	D	14682	14132	14736
15	SS	D	25907	28356	25680
16	SS	D	26171	32634	26468
17	SS	D	12265	12823	13034
18	SS	D	17568	18224	17966
19	SS	ND	8297	8664	8923
20	1	D	14287	15324	15574
21	SS	D	15599	15793	16073
22	SS	D	16024	14747	16274
23	SS	D	16615	17870	16640
24	SS	D	15115	14270	15430
25	SS	D	15471	16095	14567
26	SS	ND	13108	16369	13802
27	1	ND	7799	6822	8181
28	SS	ND	8341	11245	9944
29	SS	D	18151	19016	18150
30	SS	ND	8863	7565	9411
31	SS	ND	14618	13956	14427
32	SS	ND	11337	10882	12019

Continua...

Continuação da tabela 26.

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
33	SS	ND	10654	12341	10383
34	SS	D	12647	12187	13092
35	SS	D	15890	18831	16399
36	SS	D	13704	11475	14144
37	SS	D	20529	21488	21266
38	SS	D	10129	9562	10516
39	1	D	15218	16453	14894
40	SS	D	18169	18098	18907
41	SS	D	12760	12863	12059
42	SS	D	12766	11659	12657
43	SS	D	12176	12862	12546
44	SS	D	11383	11127	11654
45	SS	D	18889	18290	20300
46	SS	D	17699	20279	18734
47	SS	D	18775	18277	19351
48	SS	D	9039	8406	9871
49	SS	D	17490	17437	16633
50	SS	D	20810	20841	20888
51	SS	D	17680	14179	18893
52	SS	D	14736	14072	15647
53	SS	D	13269	13206	14057
54	SS	D	14780	15226	15978
55	SS	D	16137	19052	17334
56	SS	D	17417	19975	17469
57	SS	D	15389	15469	13286
58	SS	D	15561	17811	16210
59	SS	D	17561	18194	18492
60	SS	D	15618	19031	16939
61	SS	D	12867	12311	12803
62	SS	D	8476	7842	8644
63	SS	D	18632	17485	20116
64	SS	D	15578	16684	16211
65	SS	D	21018	22421	22079
66	SS	D	13627	12637	13382
67	SS	D	19149	19328	18737
68	1	D	15334	15765	16266
69	SS	D	14120	14324	15254
70	SS	D	18728	22016	19588
71	SS	D	14477	12294	15419
72	SS	D	14817	12745	15008
73	SS	D	11377	11441	11967
74	2	D	14150	16805	13879
75	1	D	18969	23085	20192
76	SS	ND	13193	12157	13590
77	SS	D	17081	19521	18525
78	SS	D	9958	10256	10840

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
79	1	ND	8510	7872	9024
80	SS	D	14312	13204	14455
81	SS	D	16126	20838	16227
82	SS	D	20966	18799	20983
83	SS	D	11208	9701	11663
84	SS	D	16512	15135	17067
85	SS	ND	7527	5918	8014
86	SS	D	15990	17188	16339
87	2	ND	10334	11904	11622
88	1	ND	9940	8461	10465
89	SS	D	14040	13663	14700
90	SS	D	15517	16076	16527
91	SS	D	18303	15639	18340
92	SS	D	12127	10975	12833
93	SS	D	14618	13466	13373
94	SS	D	11610	10501	12947
95	SS	ND	11708	10561	12214
96	SS	D	18216	36645	18538
97	SS	ND	10384	9941	10716
98	SS	ND	9794	8236	10370
99	SS	D	10584	11504	11326
100	SS	D	13135	11909	13689
101	2	D	12223	12027	13116
102	SS	D	12136	13705	13089
103	SS	ND	10602	11065	11036
104	1	D	12837	19998	13892
105	2	D	12289	11018	12117
106	SS	D	10527	10714	11453
107	SS	D	13013	11379	13567
108	SS	ND	12702	14940	13535
109	1	D	11140	10484	11950
110	SS	D	19252	15100	20054
111	SS	ND	9943	9013	9809
112	1	ND	13053	12071	13298
113	SS	D	15306	13577	15708
114	SS	D	16575	15371	18536
115	SS	D	10445	9934	11061
116	1	D	10668	9985	11153
117	SS	ND	11974	11716	12434
118	SS	D	18077	18103	18925
119	SS	D	16532	14409	15655
120	SS	ND	15086	13800	14900
121	2	D	15166	12789	15706
122	SS	D	22881	20527	23042
123	2	ND	8113	8240	8874
124	SS	D	19253	15152	19101

Continua...

Continuação da tabela 26.

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
125	1	D	14965	13527	16367
126	SS	D	16065	16048	16902
127	SS	D	12532	11016	12990
128	SS	ND	8323	10285	9859
129	SS	D	10988	11226	11563
130	SS	D	17135	19447	17545
131	SS	D	17569	19930	18528
132	SS	D	20299	19457	20405
133	SS	D	15788	16781	16413
134	SS	D	16068	15144	16233
135	SS	D	14982	15701	16257
136	SS	D	11833	13684	14527
137	1	D	18371	22684	19538
138	SS	D	17584	17026	18126
139	SS	D	19197	21373	19596
140	SS	D	21680	24360	23145
141	SS	D	14498	15990	14810
142	2	D	10658	8980	11208
143	SS	D	16528	15522	17655
144	2	ND	10566	9646	11112
145	SS	D	15618	16844	17002
146	SS	D	13134	13098	13922
147	SS	D	13492	11203	14274
148	SS	D	12462	11138	12358
149	SS	D	18534	25010	18980
150	SS	D	20655	29180	22013
151	SS	D	10154	10276	12148
152	SS	D	15922	16538	16710
153	SS	D	16137	24156	16379
154	SS	D	18871	16354	19749
155	SS	ND	12516	15717	12342
156	SS	ND	14070	13721	15457
157	SS	D	17800	23109	20223
158	2	ND	9556	9802	10084
159	SS	D	17108	22432	18466
160	SS	D	16431	15911	17125
161	SS	D	17073	20289	17945
162	SS	D	18128	17516	17944
163	1	ND	12056	11127	12870
164	SS	D	14159	14005	14788
165	SS	D	12978	11707	13521
166	SS	D	14436	13577	15291
167	SS	D	15460	13722	16106
168	SS	D	15499	13725	16615
169	SS	D	19179	19227	19564
170	SS	D	14266	13334	15156

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
171	SS	D	17993	16382	18954
172	SS	D	14571	13570	14592
173	SS	D	17105	17978	17915
174	SS	ND	9899	8960	10497
175	SS	D	15747	15738	16557
176	SS	D	14005	13260	14971
177	SS	ND	11284	10023	12259
178	SS	D	13697	12991	14170
179	SS	D	18098	16954	18963
180	SS	D	15900	18008	16283
181	SS	D	18681	15599	19193
182	1	D	13810	13649	14026
183	2	ND	7470	6518	7682
184	SS	ND	11940	10548	12562
185	SS	D	18968	19984	19186
186	SS	ND	7113	6470	8018
187	SS	D	17206	19432	17347
188	SS	D	9996	9653	10958
189	SS	D	19053	20815	19108
190	SS	ND	11587	13750	11607
191	SS	D	13233	15206	13954
192	SS	D	17864	17409	17773
193	SS	D	17041	14479	17646
194	SS	ND	12279	14710	12770
195	SS	D	17428	18323	18097
196	SS	D	15739	15097	16631
197	SS	ND	9434	8162	9450
198	SS	D	19214	18756	19687
199	SS	D	13968	11408	14508
200	1	D	15961	14110	15641
201	SS	D	22427	18657	22479
202	SS	D	19256	25819	19939
203	SS	D	18368	14917	16743
204	SS	D	10832	11638	11576
205	1	D	13773	13177	14029
206	SS	ND	11387	12046	11577
207	SS	ND	8921	9041	9289
208	SS	D	11017	11718	13414
209	SS	D	9271	8369	10034
210	SS	D	13618	10862	14809
211	SS	D	12868	11011	12621
212	SS	D	12570	13354	13557
213	SS	D	16928	16069	17002
214	SS	ND	9794	12162	9816
215	SS	D	11946	12652	12194
216	1	D	11435	9706	11904

Continua...

Continuação da tabela 26.

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
217	SS	ND	10064	10054	10037
218	SS	D	7872	7603	8425
219	SS	ND	10952	9996	10485
220	SS	D	10938	10625	11220
221	SS	D	7568	7800	7756
222	SS	D	13190	14555	13677
223	SS	D	12292	9789	12265
224	SS	D	15618	15194	16057
225	SS	D	17960	21838	18236
226	SS	D	15900	14859	16421
227	SS	D	15484	19827	14746
228	SS	D	14136	15410	14324
229	SS	D	20218	20471	21173
230	SS	D	12053	13230	12503
231	SS	D	19524	19227	20311
232	2	D	14067	13871	14574
233	SS	D	14203	12130	13987
234	SS	D	17036	14987	17651
235	SS	ND	10794	10088	10771
236	SS	D	15993	14551	15391
237	SS	D	20174	17916	19810
238	SS	D	19316	17777	19586
239	SS	D	14603	13162	14932
240	SS	D	15982	14440	17484
241	SS	D	14035	14958	14760
242	SS	D	17098	21373	16857
243	SS	D	14763	12998	15384
244	SS	ND	13441	11260	12733
245	SS	D	15507	14486	16942
246	SS	D	16168	18974	16874
247	SS	D	12228	13049	12826
248	SS	D	18893	18681	19250
249	SS	ND	15310	15236	14533
250	SS	ND	11266	12124	12233
251	SS	D	16277	16646	16342
252	SS	D	17852	11869	16366
253	SS	D	13512	14889	14703
254	2	ND	9688	8042	9843
255	SS	D	10568	12015	11053
256	SS	D	11931	11080	11837
257	SS	D	18706	17163	18588
258	SS	ND	12207	12491	12622
259	SS	D	13408	13397	14026
260	SS	D	18933	23071	18695
261	SS	D	17894	18809	16071
262	SS	D	12722	13025	13462

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
263	SS	D	18504	15926	19020
264	SS	D	18037	20217	19010
265	2	D	14539	17214	13883
266	SS	D	18190	17091	18764
267	SS	ND	13087	14785	14299
268	SS	D	20948	27088	21991
269	SS	D	14221	13221	14479
270	SS	D	15740	14883	15665
271	SS	D	25198	28779	25650
272	SS	D	16793	18649	17503
273	SS	D	13349	17046	16017
274	SS	D	14955	16092	15573
275	SS	D	16497	15454	17304
276	SS	D	15102	16553	16278
277	SS	D	19880	20668	19772
278	SS	D	20035	17457	19692
279	SS	D	21162	18635	22445
280	SS	D	19199	17649	19382
281	SS	ND	9740	9607	10259
282	SS	D	16284	16452	16376
283	SS	D	14029	13782	15245
284	SS	D	15386	13840	15523
285	SS	D	19669	22802	20723
286	SS	ND	9114	7838	8999
287	SS	D	14958	13008	15919
288	SS	ND	9957	9508	10256
289	SS	D	16155	18706	17327
290	3	D	9548	8513	9390
291	SS	D	17707	17495	18620
292	SS	D	8960	7250	9392
293	SS	D	14577	11043	13953
294	SS	D	16613	14186	16434
295	SS	ND	13193	14117	13919
296	SS	D	11347	10773	11900
297	SS	ND	9312	10505	9155
298	SS	D	16514	14985	16170
299	SS	D	16835	15689	17585
300	SS	ND	16557	16377	16770
301	SS	ND	12078	11607	13030
302	SS	ND	10672	9808	10868
303	SS	ND	7812	6929	7689
304	1	ND	15513	13356	13061
305	SS	ND	7497	7271	7834
306	SS	D	16497	18680	16507
307	1	ND	8536	8588	8837
308	SS	ND	6209	11580	12183

Continua...

Continuação da tabela 26.

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
309	SS	D	17206	17196	16829
310	SS	D	18228	14670	15208
311	SS	D	14546	14185	14677
312	SS	ND	16659	14809	16750
313	SS	ND	8666	8497	8292
314	SS	ND	12635	9865	14952
315	SS	D	11102	11546	11153
316	SS	D	13897	13608	14166
317	SS	ND	12231	11777	12724
318	SS	D	18931	27734	19320
319	SS	D	14618	11982	14627
320	SS	D	11307	12014	11509
321	SS	D	16864	17046	18242
322	SS	D	18122	23531	19610
323	SS	ND	10001	11762	9713
324	SS	D	16623	15185	16954
325	SS	D	17357	17463	15527
326	SS	D	11673	11514	11576
327	SS	D	16377	15492	15490
328	SS	D	14818	14573	14568
329	SS	ND	17420	17162	17819
330	SS	D	16951	25975	16448
331	SS	D	12339	11921	12945
332	SS	D	18250	20476	18125
333	SS	D	19618	17793	18306
334	SS	D	16709	19369	16652
335	SS	D	15383	14462	16362
336	SS	D	14524	14726	16270
337	SS	D	11435	10629	11747
338	1	D	12799	12445	12785
339	SS	D	16888	13443	17482
340	SS	D	12174	11599	12294
341	SS	D	17586	16091	16543
342	SS	D	11259	11411	11821
343	SS	D	15703	17289	16184
344	SS	D	9796	9793	10094
345	SS	D	19800	21860	19659
346	SS	D	15348	22200	14657
347	SS	D	18266	18691	18097
348	SS	D	9417	9245	9298
349	SS	D	14174	13341	12696
350	SS	D	14995	15270	14999
351	1	ND	9171	6627	8004
352	2	ND	8414	8448	9590
353	2	D	6850	6215	7797
354	2	ND	8210	6987	8423

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
355	2	ND	7784	6285	7705
356	2	ND	7756	6790	7494
357	SS	ND	8999	7330	8513
358	2	ND	8141	5187	8394
359	2	ND	9297	7239	9389
360	2	ND	6932	6384	7587
361	2	D	7463	8041	8413
362	2	D	11395	10185	11667
363	2	D	11472	12029	11544
364	2	ND	6277	5477	5788
365	2	D	10959	9817	10386
366	2	D	8708	8333	9152
367	2	ND	7414	6590	7964
368	2	D	9874	9160	11005
369	2	ND	9212	8048	7737
370	2	ND	7324	6148	7788
371	2	ND	8396	7612	8666
372	2	D	7677	7670	7806
373	SS	ND	9510	8440	10409
374	SS	ND	7736	7139	7998
375	2	ND	13095	8587	11343
376	2	ND	5501	5162	5746
377	2	ND	6976	7326	7006
378	2	ND	9373	9452	9545
379	2	ND	8043	7908	8356
380	2	ND	7187	6343	7156
381	2	ND	9809	8991	9595
382	SS	ND	8565	7718	9590
383	2	ND	9403	7825	9680
384	2	ND	7277	5950	7230
385	2	ND	7915	7442	8162
386	2	ND	9562	7889	10053
387	2	ND	7002	7759	7305
388	2	ND	7606	7210	9093
389	2	ND	10445	9662	9983
390	2	ND	8507	7419	9215
391	2	ND	7080	6250	7794
392	2	ND	7675	6401	7364
393	2	ND	6617	5879	6413
394	2	ND	7964	7148	8358
395	2	D	7954	8033	7099
396	2	D	8563	8086	9942
397	2	D	13144	12662	13808
398	2	ND	8015	7557	8068
399	2	D	11608	11924	12363
400	SS	D	11066	9931	11200

Continua...

Continuação da tabela 26.

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
401	SS	D	13464	12627	14498
402	2	ND	10656	9471	10299
403	SS	D	15886	19795	16217
404	2	ND	7556	6983	7721
405	SS	D	16070	14952	16246
406	SS	D	18380	18448	19091
407	3	D	9997	10052	10173
408	SS	D	17523	19383	17363
409	SS	D	11884	11736	12183
410	SS	D	13994	15582	13994
411	SS	D	15123	14658	15567
412	SS	D	17835	17101	18701
413	SS	D	13851	14723	14661
414	SS	D	15981	14866	16556
415	SS	D	11878	11750	12162
416	SS	ND	12532	13065	12463
417	SS	D	18749	24346	19355
418	SS	D	13742	13568	13944
419	2	D	12078	10664	11608
420	1	D	18872	21714	19098
421	1	ND	9739	10062	10330
422	1	ND	10745	8779	10961
423	SS	D	13174	13373	12844
424	SS	D	12539	10619	13071
425	SS	D	17174	15927	17902
426	SS	ND	14638	14193	14958
427	SS	D	19885	17698	19174
428	SS	ND	8781	7222	9111
429	SS	ND	10990	9267	11363
430	SS	D	14995	15945	16620
431	SS	D	19514	17058	14682
432	SS	ND	4330	3899	4523
433	SS	ND	13858	14696	14641
434	SS	D	16504	12522	13455
435	SS	D	14150	15381	14071
436	SS	ND	10438	9300	11095
437	SS	D	15158	18994	15435
438	SS	D	15387	15058	16073
439	SS	D	13994	14757	13818
440	SS	ND	10065	8963	10627
441	SS	D	10819	11393	11160
442	SS	ND	10253	9710	9937
443	SS	D	16779	16074	16104
444	SS	ND	7708	6978	8919
445	SS	D	10328	10454	10534
446	SS	ND	9665	10903	9854

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
447	SS	D	14418	14693	14714
448	SS	D	15743	16316	16891
449	SS	D	18094	23007	18053
450	SS	D	17165	20523	17382
451	SS	D	13707	13984	14314
452	SS	D	13773	14310	13724
453	SS	D	20355	22025	19380
454	SS	D	14750	14228	13825
455	SS	D	11502	10306	10711
456	SS	D	17504	17496	17032
457	SS	D	14007	13292	13778
458	SS	D	16869	14345	15950
459	SS	ND	12125	11864	11826
460	1	D	9210	9030	9497
461	SS	D	14853	18200	14482
462	SS	D	19834	18192	20382
463	SS	ND	9662	11667	9213
464	SS	D	16007	15658	14962
465	SS	D	13265	13848	12601
466	SS	D	14639	13998	14748
467	2	D	10158	10015	10720
468	SS	D	14647	15113	15476
469	SS	ND	14185	17221	13907
470	SS	D	12133	12039	12617
471	SS	D	17011	17773	17182
472	SS	D	15298	15326	15353
473	SS	D	16950	17715	16235
474	SS	D	17899	21791	17565
475	SS	D	20753	18136	21915
476	SS	D	12313	12004	12340
477	SS	D	17341	17042	15800
478	2	D	15460	20634	18111
479	2	D	7835	7868	8135
480	SS	D	18378	28807	18913
481	SS	ND	13984	15531	13920
482	SS	D	16452	17769	16641
483	SS	D	20838	21521	20466
484	SS	D	19379	22902	17728
485	SS	D	14043	13792	14285
486	1	D	17613	15990	18095
487	SS	ND	12462	10148	10953
488	SS	D	14890	12559	14677
489	SS	D	16267	15476	14532
490	2	ND	14072	15027	13382
491	SS	ND	11393	10630	11672
492	SS	D	18616	18716	17632

Continua...

Continuação da tabela 26.

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
493	SS	ND	10765	11055	10427
494	SS	D	17173	19282	16878
495	SS	ND	11223	11422	11939
496	SS	ND	16489	17364	16910
497	2	ND	10425	11963	10886
498	SS	D	16925	11301	17490
499	SS	D	13949	11783	13800
500	SS	D	12276	12247	12869
501	2	ND	7445	8799	8571
502	2	D	10633	10907	10509
503	SS	D	10369	9669	10909
504	3	ND	6564	5735	7024
505	SS	ND	11225	10726	11470
506	SS	ND	13192	12527	13073
507	1	ND	7919	6935	8319
508	2	ND	8615	7410	8199
509	2	ND	7046	6574	7166
510	SS	ND	6893	13779	13124
511	SS	ND	12830	8698	13123
512	Descarte		7736	6516	8332
513	-	-	7082	6069	7906
514	-	-	7822	8160	8990
515	1	ND	9109	7931	9371
516	1	ND	10202	8360	10673
517	1	ND	11575	10765	27923
518	-	-	8260	7216	8438
519	2	ND	9045	8566	9608
520	1	ND	6611	5767	7488
521	1	ND	6083	5230	6280
522	-	-	8813	7644	9947
523	SS	ND	11165	9267	10723
524	3	ND	9384	7569	9540
525	3	ND	8387	8523	8417
526	2	ND	6129	5725	6464
527	1	ND	8644	8829	9519
528	SS	ND	6156	5861	6510
529	1	ND	8236	8484	8483
530	-	-	6659	5787	7023
531	3	ND	7306	6231	7473
532	3	ND	6531	5383	6229
533	1	ND	9118	8468	9516
534	Descarte		7740	5797	7265
535	1	ND	12261	10723	12616
536	SS	ND	8357	8178	11034
537	1	D	8032	6863	8426
538	-	-	11785	9925	12320

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
539	1	ND	10130	8562	10067
540	3	ND	5858	5046	5882
541	2	ND	5558	4853	5516
542	3	ND	10968	6930	7819
543	3	ND	10620	10979	11754
544	1	ND	6814	5728	7441
545	-	-	9124	7898	9388
546	1	ND	9439	9171	10019
547	3	ND	6926	6189	7808
548	1	ND	7002	5960	7502
549	1	ND	11506	11147	12860
550	3	ND	4393	3861	4306
551	1	ND	8063	7625	8560
552	2	ND	9963	10069	10682
553	1	ND	10210	9254	11092
554	2	ND	6916	6237	7286
555	3	ND	5654	5048	6173
556	1	ND	9257	8255	9205
557	Descarte		11351	10158	11352
558	2	ND	7871	7273	8532
559	1	ND	7845	6373	8165
560	2	ND	8748	9237	9774
561	3	ND	7108	6246	7169
562	3	ND	5913	5613	6497
563	3	ND	12591	11186	12272
564	2	ND	8258	6693	9465
565	2	ND	6437	5809	6811
566	3	ND	8113	7052	8490
567	1	ND	8942	8877	9215
568	3	ND	11489	9947	12265
569	3	ND	7524	6631	7535
570	2	ND	8973	8251	9710
571	1	ND	10001	12843	11454
572	3	ND	7774	7221	8588
573	3	ND	10233	9725	10513
574	SS	ND	11901	12703	12410
575	3	ND	6771	5557	6916
576	-	-	5997	5739	6755
577	1	ND	13601	17064	13198
578	3	ND	8514	7362	9483
579	1	ND	7029	6190	7552
580	SS	D	7877	12713	14375
581	SS	ND	7742	6511	7900
582	3	ND	7108	6569	7002
583	2	ND	9051	7876	9130
584	SS	ND	11461	10505	11073

Continua...

Continuação da tabela 26.

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
585	3	ND	6273	6076	6680
586	SS	ND	12386	11928	13039
587	1	ND	9644	8324	9701
588	3	ND	9200	8618	9518
589	2	ND	12882	13130	12928
590	3	ND	11308	11638	12880
591	-	-	16671	14237	17299
592	2	ND	6801	5715	6780

Nº	Classe visual		MOE (MPa)		
			Estático	MSR	Vibração transversal
593	2	ND	9747	8512	10282
594	3	ND	10976	10245	11900
595	2	ND	6455	5955	6932
596	3	ND	8343	7973	8398
597	2	ND	7114	6087	7086
598	1	ND	6213	5264	6283
599	1	ND	9043	8881	9372
600	2	ND	6946	6621	7073

Tabela 27 – Estatística descritiva dos resultados da classificação mecânica com a máquina MSR e como equipamento de vibração transversal.

Estatística descritiva	<i>Estático</i>	<i>MSR</i>	<i>Vibração transversal</i>
Média	13069	13077	13444
Erro padrão	165,87	204,04	166,97
Mediana	13090,98	12682,95	13398,02
Desvio padrão	4062,86	4998,05	4089,85
Variância da amostra	16506855,62	24980546,49	16726855,87
Curtose	-0,67	0,85	-0,42
Assimetria	0,17	0,72	0,22
Mínimo	4330,08	3861,06	4306,19
Máximo	26170,91	36645,38	27922,72
Soma	7841442,63	7846402,74	8066308,48
Contagem	600	600	600

4.3 MOR e MOE segundo o eixo de maior inércia

As tabelas 28, 29, 30 e 31 apresentam os resultados obtidos para a rigidez (MOE) e para a resistência (MOR) das 96 peças selecionadas, sendo 24 para cada classe.

Tabela 28 – Resultados dos testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia para a classe N°2-ND.

Classe	N°	MOR - MOE para o eixo de maior inércia Classe N°2 - ND				
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	Caracterização da ruptura ^a		
				Causa	código	tipo
N° 2 - ND	352	8038	34,4	nó - 4	26006000	0
	541	6031	32,1	nó - 9	15190000	0
	589	10101	38,7	nó - 3	42371307	0
	497	8420	67,5	-	-	0
	371	7710	81,6	-	-	0
	378	7678	32,1	nó - 2	4720	0
	383	8602	93,5	-	-	0
	558	6761	30,1	nó - 8	28283112	0
	394	7286	70,6	nó - 3	45132649	0
	560	7407	61,2	-	-	0
	183	4662	19,4	nó - 3	45400006	0
	369	9313	52,2	nó - 10	30%	0
	386	6842	50,7	nó - 8	24281224	0
	356	6872	28,4	nó - 3	37341811	0
	564	8060	34,7	nó - 10	30%	0
	519	8504	59,7	nó - 9	35210012	0
	392	6133	20,3	nó - 10	40%	0
	402	8816	63,3	nó - 3	38320036	0
	390	7361	53,7	nó - 10	30%	0
	375	8512	77,0	nó - 3	36300321	1
	354	6922	41,6	nó - 3	31222100	0
	389	7924	46,2	nó - 9	43350000	0
	592	6651	62,8	nó - 3	41170046	0
	593	7989	77,7	-	-	0

a. Ver codificação no anexo B.

Tabela 29 – Resultados dos testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia para a classe N°2-D.

Classe	N°	MOR - MOE para o eixo de maior inércia Classe N°2 - D				
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	Caracterização da ruptura ^a		
				causa	código	tipo
N° 2 - D	362	10252	103,1	nó - 3	22259967	0
	144	8275	95,2	nó - 3	42370824	1
	142	9417	40,5	-	-	0
	419	8837	96,8	nó - 3	53533841	0
	467	9493	88,0	-	-	0
	361	7168	45,6	-	-	0
	395	6529	72,2	nó - 3	37354035	0
	368	9156	107,1	nó - 9	07185500	0
	74	10861	44,8	nó - 9	41330000	0
	105	10694	70,2	nó - 3	41362847	0
	372	6563	44,7	nó - 9	29171609	0
	365	7797	40,7	nó - 3	29282400	0
	397	9315	111,0	-	-	4
	363	7528	33,2	nó - 8	35232218	0
	479	8156	117,7	-	-	0
	232	11807	152,1	-	-	0
	399	9200	35,7	nó - 8	42241112	0
	478	15683	131,5	I.F.L.	1:2	1
	353	6833	53,1	nó - 10	20%	0
	121	10779	52,6	nó - 3	38270400	0
	366	7836	38,6	nó - 10	33%	0
	396	7786	75,1	nó - 3	37223946	0
	502	9263	58,1	-	-	1
	101	11132	88,3	nó - 3	52434537	0

a. Ver codificação no anexo B.

Tabela 30 – Resultados dos testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia para a classe SS - ND.

Classe	Nº	MOR - MOE para o eixo de maior inércia Classe SS - ND				
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	Caracterização da ruptura ^a		
				causa	código	tipo
SS - ND	416	12117	117,3	nó - 3	25003200	1
	177	8654	114,8	-	-	0
	206	10964	153,5	-	-	0
	536	8989	96,9	-	-	0
	267	11412	118,6	-	-	0
	85	7160	123,3	-	-	0
	511	9936	97,6	-	-	0
	103	8513	156,8	-	-	0
	288	8323	80,6	-	-	0
	357	7501	99,0	-	-	0
	459	8598	102,2	-	-	0
	432	5756	75,7	-	-	0
	197	8103	217,0	nó - 3	26254563	4
	429	7920	123,1	-	-	0
	93	12701	137,4	I. F.	1:10	0
	194	13085	124,6	-	-	0
	329	12760	136,1	-	-	4
	30	6225	100,6	-	-	0
	184	11677	183,7	-	-	0
	207	8867	126,0	-	-	0
	314	12484	169,1	-	-	0
	108	9461	130,5	-	-	0
	31	10666	83,1	-	-	0
	312	15698	173,3	-	-	4

a. Ver codificação no anexo B.

Tabela 31 – Resultados dos testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia para a classe SS-D.

Classe	Nº	MOR - MOE para o eixo de maior inércia Classe SS - D				
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	Caracterização da ruptura ^a		
				causa	código	tipo
SS - D	47	18751	294,7	-	-	0
	331	12262	142,6	-	-	0
	316	12962	171,1	-	-	0
	426	11977	185,8	nó - 3	07003100	0
	132	18280	253,7	-	-	0
	84	13999	164,0	-	-	0
	114	13398	193,4	-	-	0
	119	12716	161,0	-	-	0
	82	16125	202,8	-	-	0
	92	12261	140,8	-	-	0
	122	16932	135,8	-	-	0
	55	13492	149,8	-	-	4
	131	14298	139,2	nó - 3	24115564	1
	62	8468	123,5	-	-	0
	40	12709	202,8	-	-	0
	37	17376	179,6	-	-	0
	130	14369	122,5	-	-	0
	152	14954	168,2	-	-	0
	273	13735	156,2	-	-	0
	96	13465	86,7	nó - 2	2415_____	0
	65	15364	142,0	-	-	1
	16	17397	252,8	-	-	0
	124	15459	141,5	-	-	0
	472	12531	172,1	I.F.	1:12	0

a. Ver codificação no anexo B.

As tabelas 32 e 33 apresentam a estatística descritiva para os dados do MOR e do MOE respectivamente, em relação ao eixo de maior inércia das peças.

Tabela 32 - Estatística descritiva dos resultados do MOR obtidos nos testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia.

	<i>MOR (MPa)</i>			
	<i>Nº2-ND</i>	<i>Nº2-D</i>	<i>SS-ND</i>	<i>SS-D</i>
Média	51,22	74,83	126,70	170,10
Erro padrão	4,19	6,90	7,12	9,50
Mediana	51,46	71,16	123,17	162,46
Desvio padrão	20,51	33,80	34,87	46,56
Variância da amostra	420,63	1142,75	1216,15	2167,41
Curtose	-0,85	-0,58	0,55	1,40
Assimetria	0,25	0,60	0,81	1,04
Intervalo	74,03	118,91	141,39	207,96
Mínimo	19,43	33,19	75,65	86,72
Máximo	93,46	152,10	217,04	294,68
Soma	1229,29	1795,59	3040,69	4082,23
Contagem	24	24	24	24

Tabela 33 - Estatística descritiva dos resultados do MOE obtidos nos testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia.

	<i>MOE (MPa)</i>			
	<i>Nº2-ND</i>	<i>Nº2-D</i>	<i>SS-ND</i>	<i>SS-D</i>
Média	7608	9182	9899	14303
Erro padrão	238	417	502	482
Mediana	7694	9178	9225	13867
Desvio padrão	1166	2041	2462	2360
Variância da amostra	1359893	4165789	6059997	5570388
Curtose	0,86	3,18	-0,27	0,45
Assimetria	-0,30	1,35	0,41	-0,04
Intervalo	5439	9154	9942	10283
Mínimo	4662	6529	5756	8468
Máximo	10101	15683	15698	18751
Soma	182594	220359	237570	343280
Contagem	24	24	24	24

4.4 Testes de compressão paralela em corpos-de-prova

As tabelas 34, 35, 36 e 37 apresentam os resultados dos testes de compressão paralela às fibras realizados em 91 corpos-de-prova.

Tabela 34 - Resultados dos testes de compressão paralela para a classe N°2 - ND.

Classe	N°	f _c (MPa)	E (MPa)	Tipo de ruptura ^a	Densidade (g/cm ³)
N°2 - ND	352	31,1	8692	3	0,375
	541	24,6	6151	3	0,353
	589	38,7	7642	4	0,448
	497	38,4	9290	1	0,471
	371	34,7	9344	3	0,446
	378	33,9	6396	3	0,410
	383	34,1	6855	2	0,413
	558	29,9	7968	3	0,440
	394	27,8	7220	1	0,389
	560	41,5	8995	3	0,507
	183	31,6	4815	3	0,446
	369	35,4	8994	3	0,431
	386	33,9	6611	3	0,557
	356	31,2	7323	3	0,402
	564	39,4	10971	3	0,638
	519	30,9	6421	3	0,426
	392	30,7	6441	6	0,408
	402	32,7	4635	3	0,507
	390	30,3	7434	3	0,469
	375	31,9	10009	3	0,412
	354	37,1	5764	3	0,497
	389	35,6	11559	3	0,429
	592	27,6	7159	2	0,442
593	36,3	11336	2	0,501	

a. Ver codificação no anexo B.

Tabela 35 - Resultados dos testes de compressão paralela para a classe N°2 - D.

Classe	N°	f _c (MPa)	E (MPa)	Tipo de ruptura ^a	Densidade (g/cm ³)
N°2 - D	362	40,1	13954	3	0,456
	144	35,8	7344	3	0,456
	142	46,7	10462	3	0,560
	419	36,6	7589	5	0,475
	467	43,4	9465	6	0,524
	361	37,4	7929	6	0,457
	395	36,8	5477	3	0,501
	74	47,5	18730	4	0,565
	105	53,1	17180	6	0,603
	372	26,0	6263	3	0,490
	365	38,8	12135	3	0,562
	397	32,3	8484	1	0,526
	363	42,4	9639	6	0,455
	479	47,6	20235	4	0,573
	232	43,1	13661	3	0,576
	399	42,4	10696	3	0,518
	478	31,1	8802	3	0,498
	353	33,5	7717	3	0,456
	121	35,1	9111	3	0,502
	366	33,1	7965	3	0,466
	396	27,1	7683	6	0,493
	502	43,9	12817	3	0,491
	101	37,0	11791	3	0,501

a. Ver codificação no anexo B.

Tabela 36 - Resultados dos testes de compressão paralela para a classe SS - ND.

Classe	Nº	f _c (MPa)	E (MPa)	Tipo de ruptura ^a	Densidade (g/cm ³)
SS - ND	416	45,3	12249	6	0,505
	177	38,7	9017	1	0,464
	536	30,2	6559	3	0,443
	85	37,8	9785	3	0,463
	511	35,9	9843	3	0,481
	103	39,8	8114	3	0,544
	288	37,9	10353	4	0,512
	357	25,1	3658	3	0,407
	459	43,8	8580	3	0,540
	432	25,4	3758	3	0,518
	197	40,4	9637	4	0,506
	429	33,8	11563	1	0,506
	93	24,1	3440	5	0,473
	194	36,1	10082	3	0,458
	30	21,7	2871	5	0,446
	184	35,4	8727	3	0,558
	207	24,4	4942	5	0,470
	314	36,7	12589	6	0,482
	108	40,2	11290	3	0,471
	31	45,3	13657	4	0,503

a. Ver codificação no anexo B.

Tabela 37 - Resultados dos testes de compressão paralela para a classe SS - D.

Classe	Nº	f _c (MPa)	E (MPa)	Tipo de ruptura ^a	Densidade (g/cm ³)
SS - D	47	57,5	9631	6	0,748
	331	55,4	14426	6	0,654
	316	39,6	13776	3	0,547
	426	35,4	6123	4	0,497
	132	50,0	13616	4	0,690
	84	41,9	12747	3	0,530
	114	46,5	14759	1	0,653
	119	58,0	12775	6	0,691
	82	60,4	21917	7	0,688
	92	40,7	13589	4	0,528
	122	73,5	21799	6	0,756
	55	61,8	13194	8	0,697
	131	50,6	14465	4	0,584
	62	38,8	6987	3	0,481
	40	48,0	14821	3	0,602
	37	63,2	11209	4	0,688
	130	54,2	11704	3	0,623
	152	57,5	14302	1	0,631
	273	52,3	11858	1	0,678
	96	51,6	13226	8	0,619
	65	42,1	11967	3	0,672
	16	49,1	13398	3	0,630
	124	56,9	21864	6	0,694
	472	57,5	15512	1	0,625

a. Ver codificação no anexo B.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa do trabalho foram realizadas análises estatísticas para a interpretação dos resultados obtidos nos testes com a amostra coletada e para permitir a realização de inferências na população. Foi utilizado o software estatístico Minitab 13, versão demonstração.

5.1 Aferição da máquina MSR

Foi realizada a aferição da máquina MSR a partir dos resultados obtidos nos testes de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia e nos testes com a máquina MSR. Para aferir os resultados da máquina MSR foi utilizado o modelo da regressão linear simples, tomando como variável independente os valores de MOE medidos nos testes de flexão estática e como variável dependente os valores medidos na máquina MSR.

Este é o modelo mais simples para descrever a relação entre uma variável independente x e uma variável dependente y .

No modelo de regressão linear simples são feitas as seguintes suposições:

- 1) A média dos ε_i é zero e sua variância σ^2 é desconhecida e constante, para $1 \leq i \leq n$;
- 2) Para $i \neq j$, ε_i e ε_j não são correlacionados, isto é, $\text{COV}(\varepsilon_i; \varepsilon_j) = 0$, para $i \neq j, i \leq 1$ e $j \leq n$;
- 3) A distribuição dos ε_i é normal, para $1 \leq i \leq n$.

Não se pode fazer inferências sobre a população a menos que se cumpram as três considerações acima.

O modelo da regressão linear simples debruça-se sobre a relação de tipo linear entre a variável dependente (y) e a variável independente (x). Ou seja, a

relação entre as variáveis x e y das populações x e y correspondentes é representada por uma reta do tipo:

$$y(x_i) = \alpha + \beta(x_i) + \varepsilon_i \quad (12)$$

Sendo:

y = variável resposta;

x_i = variável independente para a observação i ;

α = constante;

β = coeficiente angular;

ε_i = resíduo; reflete o fato de que as variações de y não são totalmente explicadas pelas variações de x .

Como, geralmente, a reta de regressão da população não é conhecida, esta deve ser estimada a partir dos dados amostrais. Portanto deve-se determinar uma equação de curva que se ajuste ao grupo de dados. A qualidade do modelo ajustado tem de ser avaliada antes de se concluir algo a respeito do grau de influência da variável x na variável y , ou de utilizar o modelo ajustado para fazer inferências.

Portanto, considerando-se os dados do MOE obtidos nos testes de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia como sendo a variável independente (x), portanto, isenta de erros, e os dados do MOE obtidos na máquina MSR como a variável dependente (y) é possível investigar a influencia do MOE medido com a maquina MSR, com MOE medido nos testes de flexão estática por meio da análise de regressão linear.

A figura 47 apresenta um diagrama de dispersão entre os módulos de elasticidade medidos nos testes de flexão estática e na máquina MSR, dados na tabela 26.

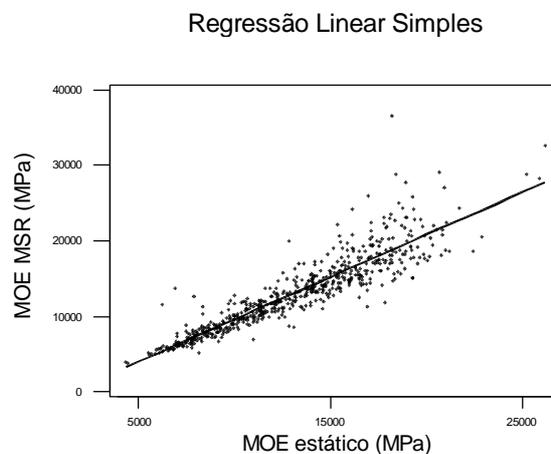


Figura 47 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre MOE estático e MOE MSR.

Observa-se no diagrama de dispersão o aumento do erro com o aumento da magnitude do $MOE_{estático}$. Isto indica que a variância não é constante, o gráfico dos resíduos contra os valores estimados confirma esta observação.

Análise de resíduos

A figura 48 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados para o MOE medido na máquina MSR, no qual se observa que a variância não é constante, pois, o gráfico apresenta forma afunilada. Portanto foi necessário realizar uma transformação dos dados para estabilizar a variância.

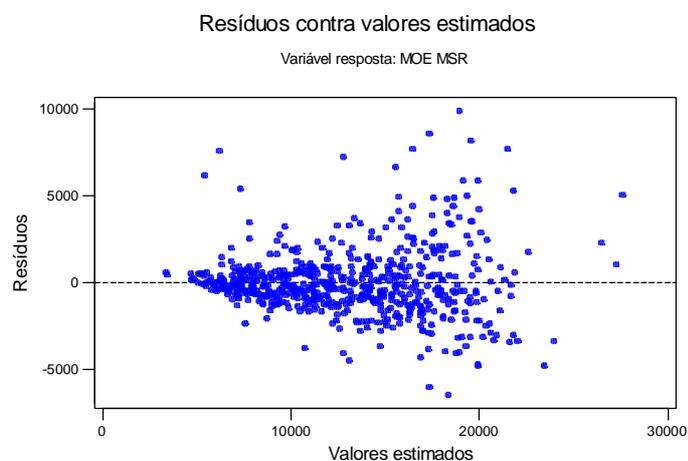


Figura 48 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOE MSR.

Na figura 49 é apresentado o gráfico dos resíduos contra os escores normais, no qual se observa que os resíduos não apresentam distribuição normal, visto que os dados não se distribuem ao longo de uma reta.

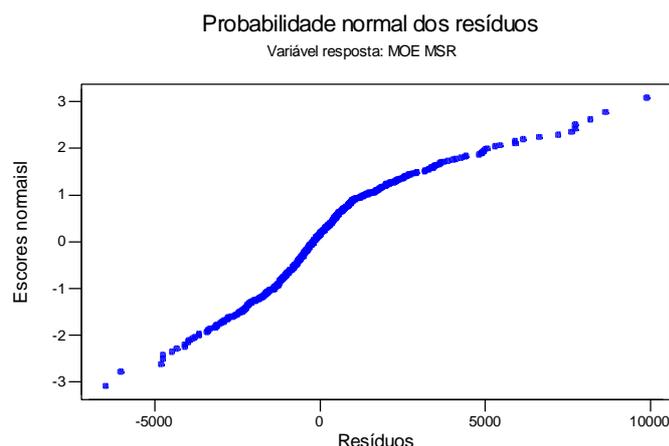


Figura 49 – Gráfico dos resíduos contra os escores normais.

Portanto foi necessário realizar uma transformação dos dados de forma a se obter uma distribuição normal para os resíduos, e a homogeneidade da variância. Para a determinação da equação que melhor ajusta os dados para uma distribuição normal foi utilizado o método de BOX-COX (1964). Este método aplica uma transformação exponencial nos dados, de forma a aproxima-los de uma distribuição normal. Para situações em que a variável dependente y é conhecida e positiva, as seguintes transformações podem ser usadas:

$$T(y_i) = \begin{cases} \left(\frac{y_i^\lambda - 1}{\lambda} \right) & \text{quando } \lambda \neq 0 \quad (a) \\ \ln(y_i) & \text{quando } \lambda = 0 \quad (b) \end{cases} \quad (13)$$

Sendo que λ assume valores entre -3 a $+3$. Não é garantido, mas quase sempre algum valor de lambda (λ) resulta em normalidade. Quando λ se aproximar de zero, então a equação de transformação é dada por $\ln(y)$.

Na prática, muitas vezes as transformações da equação 13 são simplificadas para as seguintes equações:

$$T(y_i) = \begin{cases} Y^\lambda & \text{com } \lambda = \frac{1}{2}, 1, 2, \dots, 3 & \text{para } \lambda \neq 0 \\ \ln(y_i) & & \text{para } \lambda = 0 \end{cases} \quad e \quad (14)$$

O software Minitab 13 adota as equações simplificadas.

As figuras 50 e 51 apresentam, a determinação do $\lambda_{\text{ótimo}}$ para a transformação dos dados do MOE_{MSR} e do $\text{MOE}_{\text{estático}}$ respectivamente, desconsiderando-se as observações extremas (*outlier*).

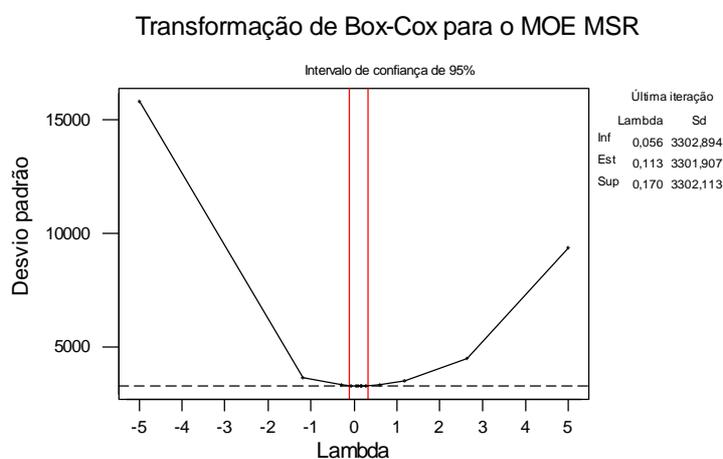


Figura 50 – Determinação do $\lambda_{\text{ótimo}}$ para o MOE_{MSR} .

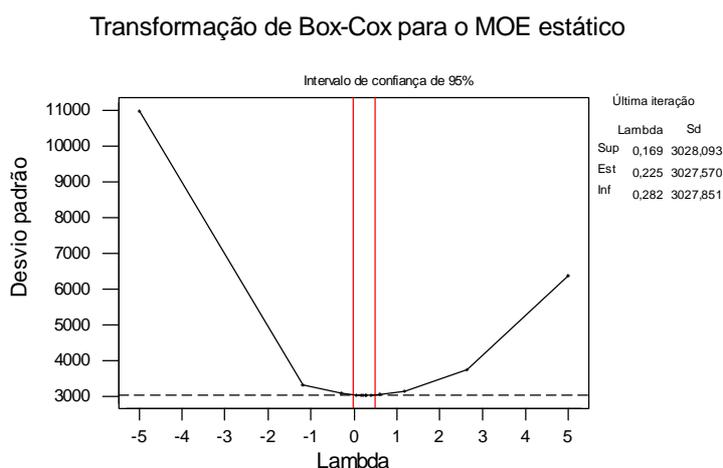


Figura 51 – Determinação do $\lambda_{\text{ótimo}}$ para o $\text{MOE}_{\text{estático}}$.

Como o valor de $\lambda_{\text{ótimo}}$ para o MOE_{MSR} é próximo de zero, foi utilizada a transformação lognormal para estes dados. Portanto, foram aplicadas as

transformações dadas nas equações 15 e 16 para o MOE_{MSR} e para o $MOE_{estático}$ respectivamente.

$$T(MOE) = Ln(MOE_{MSR}) \quad (15)$$

$$T(MOE) = MOE_{estático}^{0,225} \quad (16)$$

A figura 52 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados para os dados transformados, onde se observa a homogeneidade da variância.

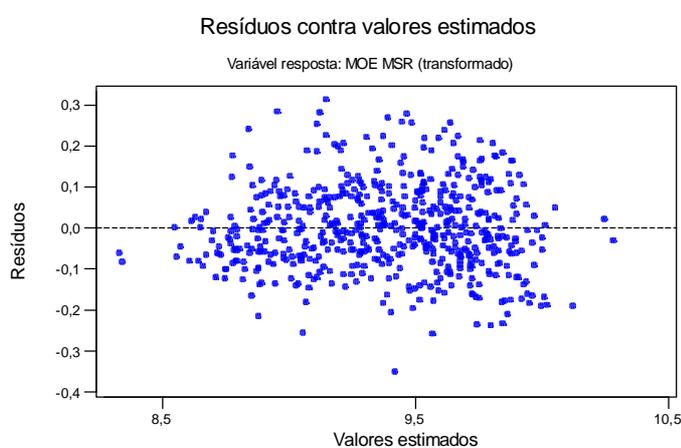


Figura 52 – Resíduos contra valores estimados para os dados transformados.

A figura 53 apresenta o gráfico dos resíduos contra os escores normais, no qual se observa que os resíduos apresentam um padrão muito próximo da normalidade.

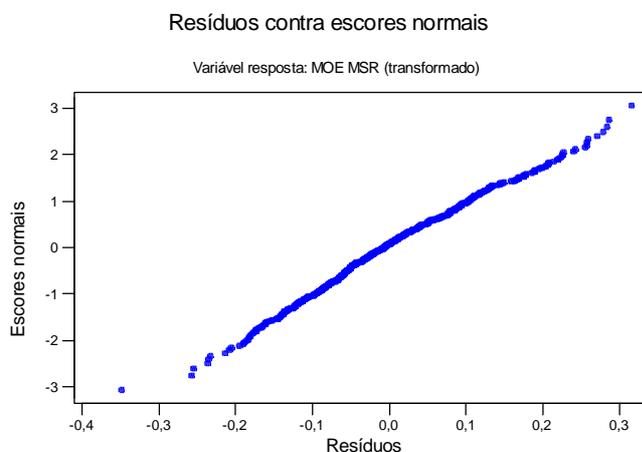


Figura 53 – Resíduos contra escores normais para os dados transformados.

Pode-se chegar à mesma conclusão pela observação do histograma dos resíduos, dado na figura 54.

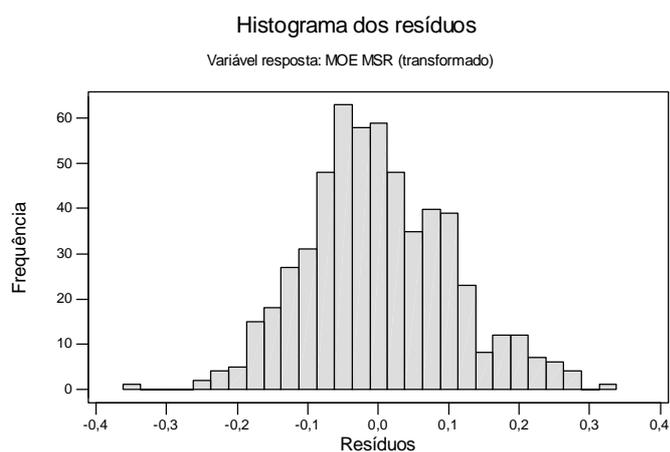


Figura 54 – Histograma dos resíduos para os dados transformados.

A figura 55 apresenta o gráfico de dispersão para os dados transformados.

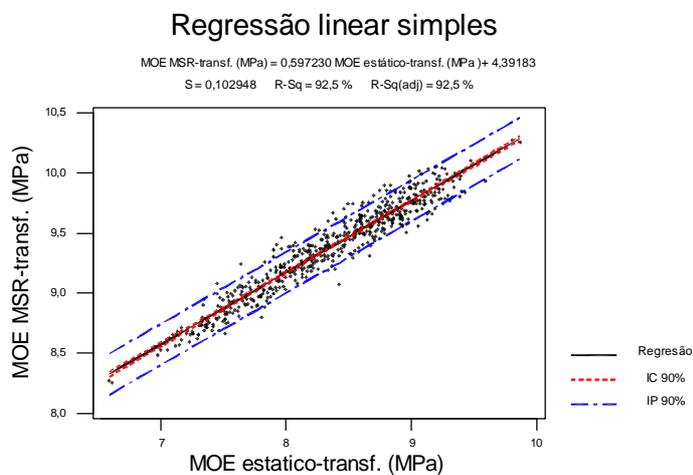


Figura 55 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre MOE estático e MOE MSR, para os dados transformados.

Diante das constatações acima, verifica-se que são cumpridas as três suposições do modelo. Portanto, a análise de variância pode ser usada para verificar a qualidade do modelo ajustado. Esta é mostrada na tabela 38.

Tabela 38 – Quadro de ANOVA para os dados do MOE_{MSR} e do $MOE_{estático}$, transformados.

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Regressão	73,7597	1	73,7597	6959,59	0,000
Erro	5,9774	564	0,0106		
Total	79,7371	565			

Considera-se o seguinte teste de hipótese para os dados da tabela 38:

$$\begin{cases} H_0 : \beta = 0 \\ H_1 : \beta \neq 0 \end{cases} \quad (17)$$

A hipótese nula é a de que a variação de y não depende de x , portanto rejeitando H_0 admite-se que y é função de x . Assim, para um nível de significância $\alpha = 0,05$. A hipótese nula deve ser rejeitada se $F_{cal} > F_{0,05;1;(n-2)}$, isto é, a região de rejeição é $R: F_{cal} > F_{0,05;1;(n-2)}$, assim da tabela F com $(2-1) = 1$ grau de liberdade para a regressão e $(566-2) = 564$ graus de liberdade para os resíduos, tem-se $F_{0,05;(1;564)} = 3,84$, isto é, a região de rejeição é $R: F_{cal} > 3,84$.

Como $F_{cal} = 6959,59 > F_{0,05; 1,564} = 3,84$ rejeita-se H_0 ao nível de significância $\alpha = 0,05$. De acordo com os dados a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela equação de regressão é altamente significativa, portanto o modelo de regressão linear dado por $MOE_{MSR-transf.}(MPa) = 0,5972 \cdot MOE_{estático}(MPa) + 4,391$ é adequado para representar a relação entre os dados transformados do $MOE_{estático}$ e do MOE_{MSR} , para a espécie e dimensões consideradas.

Para representar a relação entre o $MOE_{estático}$ e o MOE_{MSR} para os dados originais, ou seja, sem transformação, basta realizar a transformação inversa nos dados, deste modo chega-se à equação 18.

$$MOE_{MSR}(MPa) = 2,71828^{[0,5972 \cdot MOE(MPa)^{0,225} + 4,391]} \quad (18)$$

Intervalo de confiança e Intervalo de previsão

Uma aplicação importante do modelo de regressão é estimar valores da variável resposta (y) para um valor específico do estimador (x). Para tal finalidade

deve-se construir intervalos de confiança (I.C.) e de previsão (I.P.) para as estimativas.

Os intervalos de confiança e de previsão $(100-\alpha)\%$ para a população podem ser determinados pelas equações 19 e 20 respectivamente

$$IC(100-\alpha)\% = \hat{Y} \pm t_{n-2;\alpha/2} \cdot Se \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (19)$$

$$IP(100-\alpha)\% = \hat{Y} \pm t_{n-2;\alpha/2} \cdot Se \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (20)$$

Sendo:

\hat{Y} = Variável resposta estimada pela equação de regressão;

$t_{n-2;\alpha/2}$ = valor obtido da tabela t de *student*;

Se = Erro padrão estimado = $\sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{n-2}}$;

$$S_{xx} = \frac{[n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2]}{n}.$$

Para os dados originais os intervalos de confiança e de previsão de 90% são dados pelas equações 21 e 22 respectivamente.

$$IC90\% = 2,7183^{(0,5972 \cdot MOE_{estatico} 0,225 + 4,391) \pm 0,1711 \cdot \sqrt{\frac{1}{564} + \frac{(MOE_{estático} 0,225 - 8,34)^2}{66,12}}} \quad (21)$$

$$IP90\% = 2,7183^{(0,5972 \cdot MOE_{estatico} 0,225 + 4,391) \pm 0,1711 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{564} + \frac{(MOE_{estático} 0,225 - 8,34)^2}{66,12}}} \quad (22)$$

5.2 Aferição do equipamento de vibração transversal

A aferição do equipamento de vibração transversal foi realizada da mesma forma que a aferição da máquina MSR, ou seja, foi realizada uma análise de regressão linear simples entre os dados do MOE medido por testes de flexão estática em relação ao eixo de menor inércia e pelo equipamento de vibração transversal.

A figura 56 apresenta o gráfico de dispersão e a reta de regressão entre os dados do MOE medidos nos testes de flexão estática e pelo equipamento de vibração transversal.

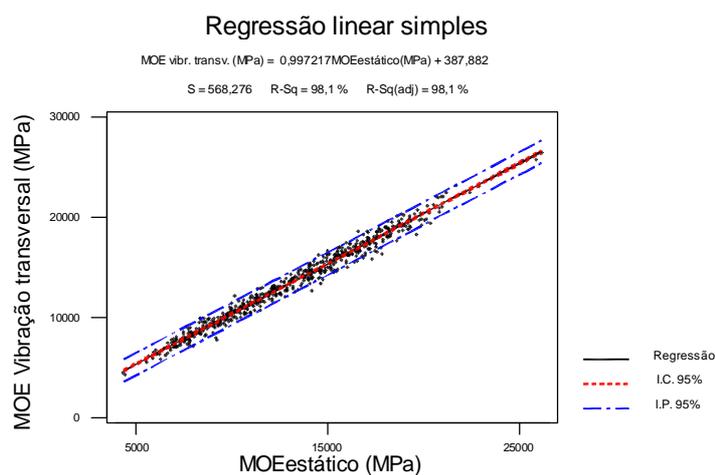


Figura 56 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre $\text{MOE}_{\text{estático}}$ e $\text{MOE}_{\text{vibração-transversal}}$.

Análise dos Resíduos

A figura 57 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados para os dados do MOE obtidos com o equipamento de vibração transversal. Observa-se a constância da variância.

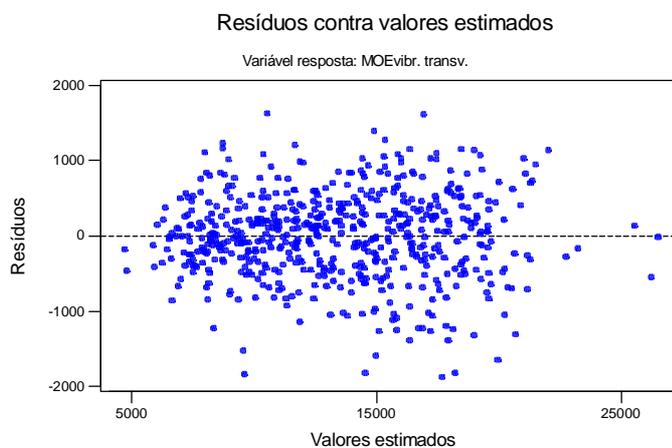


Figura 57 – Resíduos contra valores estimados para os dados do MOE obtido na vibração transversal.

A figura 58 apresenta o gráfico dos resíduos contra os escores normais, no qual se observa que os resíduos se distribuem segundo um padrão aproximadamente normal.

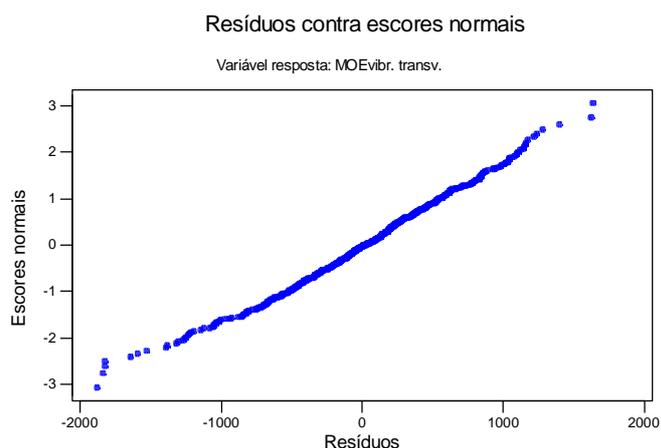


Figura 58 – Resíduos contra escores normais para os dados do MOE obtido na vibração transversal.

Pode-se chegar à mesma conclusão pela análise do histograma dos resíduos mostrado na figura 59.

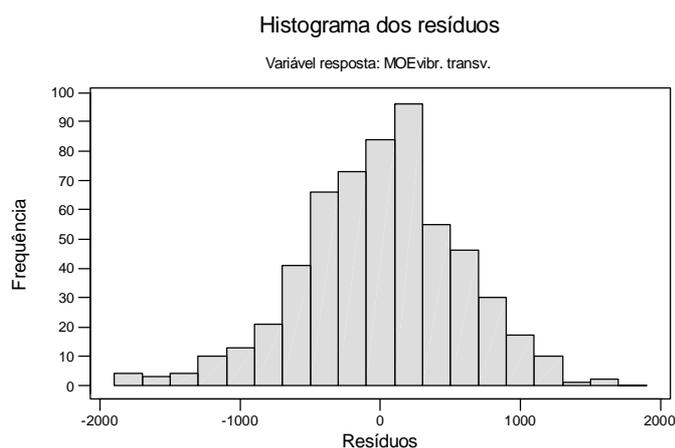


Figura 59 – Histograma dos resíduos para os dados do MOE obtido na vibração transversal.

A tabela 39 apresenta o quadro de ANOVA utilizado para verificar a qualidade do modelo ajustado.

Tabela 39 – Quadro de ANOVA para os dados de E_m e f_m transformados

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Regressão	9447473669	1	9447473669	29254,80	0,000
Erro	185366188	574	322938		
Total	9632839857	575			

Como $F_{cal} = 29254,80 > F_{0,05; 1,574} = 3,840$ rejeita-se H_0 ao nível de significância $\alpha = 0,05$. De acordo com os dados a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que existe evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela equação de regressão é altamente significativa. Portanto o modelo de regressão linear dado por $MOE_{vibração-transv.} (MPa) = 0,9972 \cdot MOE(MPa) + 387,882$ é adequado para representar a relação entre o $MOE_{estático}$ e o $MOE_{vibração-transversal}$, para a espécie e dimensões consideradas.

Intervalo de confiança de Intervalo de previsão

Os intervalos de confiança e de previsão de 90% para os dados em questão são dados nas equações 23 e 24 respectivamente.

$$IC^{90\%} = 0,997 \cdot MOE_{est.} + 387,88 \pm 934,85 \cdot \sqrt{\frac{1}{576} + \frac{(MOE_{est.} - 13033)^2}{9,5 \cdot 10^{+9}}} \quad (23)$$

$$IP^{90\%} = 0,997 \cdot MOE_{est.} + 387,88 \pm 934,85 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{576} + \frac{(MOE_{est.} - 13033)^2}{9,5 \cdot 10^{80}}} \quad (24)$$

5.3 Verificação da influência da disposição das pranchas na determinação do MOE estático

Deseja-se verificar se existe diferença estatisticamente significativa nos valores médios do MOE medidos em relação ao eixo de menor inércia com os valores medidos em relação ao eixo de maior inércia, para cada classe isoladamente. Esta análise foi realizada com os dados das tabelas 26, 28, 29, 30 e 31. A ferramenta estatística utilizada foi a análise de variância para detectar se há diferença entre os tratamentos, e o teste t para dados pareados para verificar se a diferença entre os tratamentos é significativa.

Classe N°2-ND

A figura 60 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados, no qual se observa a heterogeneidade da variância.

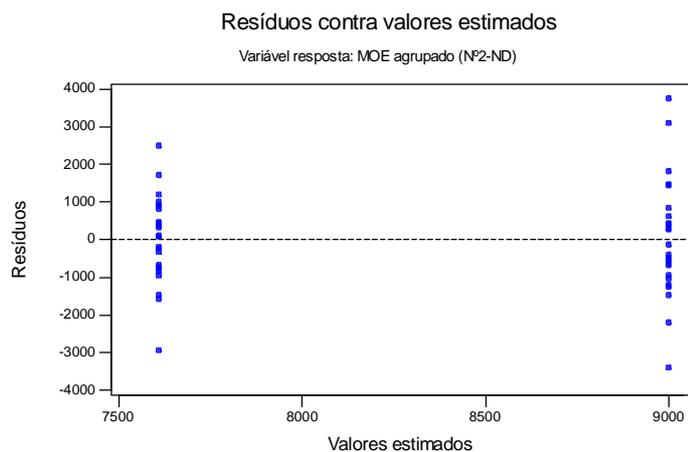


Figura 60 - Gráfico de resíduos contra valores estimados para os dados agrupados do MOE da classe N°2-ND.

A figura 61 apresenta o gráfico dos escores normais, no qual se observa que os dados não se distribuem segundo o padrão de normalidade.

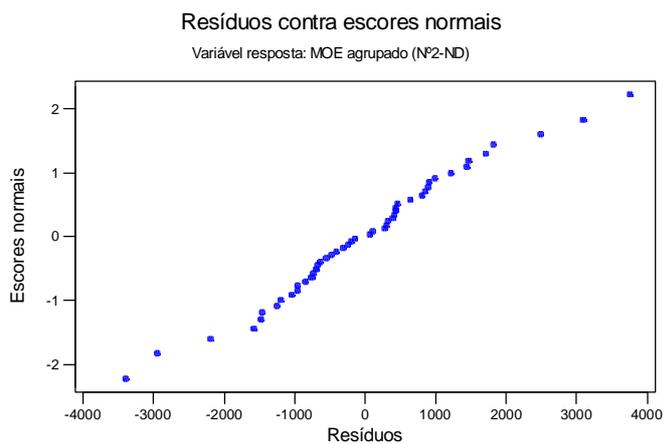


Figura 61 – Gráfico de resíduos contra os escores normais para os dados agrupados do MOE da classe N°2-ND.

Foi realizada a transformação de Box-Cox nos dados, conforme mostra a figura 62.



Figura 62 – Determinação do $\lambda_{\text{ótimo}}$ para os dados agrupados do MOE da classe N°2-ND.

Portanto, a transformação aplicada nos dados foi:

$$T(MOE) = MOE^{0,449} \quad (25)$$

A figura 63 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados para os dados transformados, no qual se observa a homogeneidade da variância.

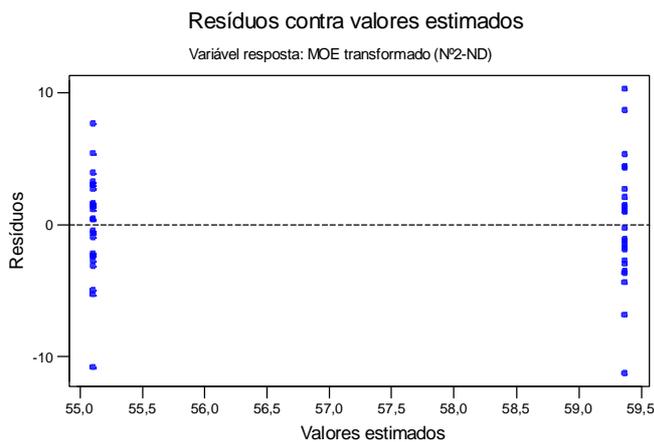


Figura 63 - Gráfico de resíduos contra valores estimados para os dados transformados e agrupados do MOE da classe N°2-ND.

A figura 64 apresenta o gráfico dos resíduos contra os escores normais, no qual se observa a normalidade dos resíduos.

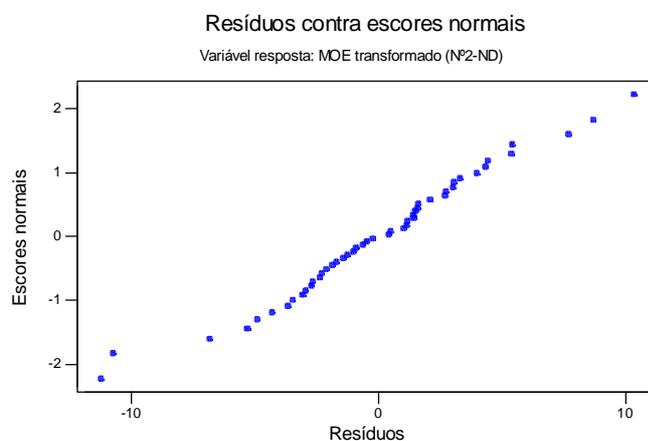


Figura 64 – Gráfico de resíduos contra os escores normais para os dados transformados do MOE da classe Nº2-ND.

A figura 65 apresenta o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para os dados, no qual se conclui que a suposição de normalidade foi aceita pelos dados amostrais ao nível de significância $\alpha = 0,05$.

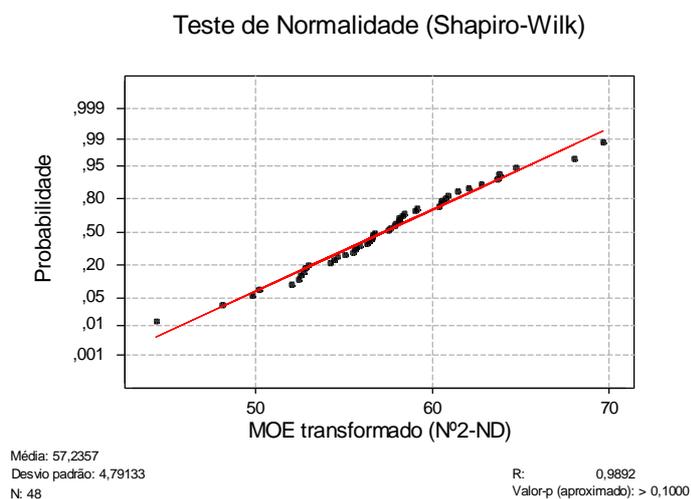


Figura 65 – Teste de normalidade para os dados transformados do MOE da classe Nº2-ND.

Cumprida as suposições do modelo, a tabela de ANOVA é adequada para a análise dos dados. Esta é mostrada na tabela 40.

Tabela 40 – Valores do quadro de ANOVA para os dados do MOE da classe N°2-ND.

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Entre tratamentos (orientação).	218,2	1	218,2	11,66	0,001
Dentro de tratamentos (Resíduos).	860,8	46	18,7		
Total	1079,0	47			

Da tabela F com $(2-1) = 1$ grau de liberdade para os tratamentos e $(48-2) = 46$ graus de liberdade para os resíduos, tem-se $F_{0,05;(1;46)} = 4,06$. Como $F_{cal} = 11,66 > F_{0,05; 1,46} = 4,06$ a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que existe diferença significativa no valor médio do MOE medido em relação ao eixo de maior inércia, com o valor médio do MOE medido em relação ao eixo de menor inércia, para a classe N°2-ND.

Teste de significância

Apesar dos tratamentos conduzirem a resultados diferentes é necessário verificar se a diferença entre os tratamentos é significativa. Foi utilizado o teste t para dados pareados. Este teste é baseado na estatística t , conforme segue:

$$t = \frac{\bar{d}}{Sd / \sqrt{n}} \quad (26)$$

Sendo:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, \text{ média das diferenças das observações;}$$

$$Sd^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}, \text{ variância das diferenças;}$$

$d_i = d_{1i} - d_{2i}$, diferença entre os tratamentos 1 e 2, para a observação i .

Deseja-se realizar o seguinte teste de hipótese:

$$\begin{cases} H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0 & (\text{a diferença não é significativa}) \\ H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0 & (\text{a diferença é significativa}) \end{cases} \quad (27)$$

A hipótese nula é rejeitada quando $|t| > |t_{crítico}|$. Sendo que $t_{crítico} = t_{\alpha/2, v}$ obtido da tabela t com nível de significância $\alpha/2$ e $[n-1]$ graus de liberdade.

A tabela 41 apresenta o resultado do teste t para os dados pareados do MOE para a classe N°2-ND.

Tabela 41 – Teste t para os dados pareados do MOE para a classe N°2-ND.

Teste-t: duas amostras para médias pareadas

	<i>Menor inércia</i>	<i>Maior inércia</i>
Média	59,368	55,104
Variância	22,184	15,240
Observações	24	24
gl	23	
Stat t	6,728	
t crítico	1,714	

Portanto, como $t = 6,728 > t_{\text{crítico}} = 1,714$, conclui-se que a diferença entre os módulos de elasticidade medidos com as peças em orientações diferentes é significativa ao nível de significância $\alpha = 0,05$ para a classe N°2-ND.

Classe N°2-D

A tabela 42 apresenta o quadro de ANOVA para os dados transformados do MOE para a classe N°2-D.

Tabela 42 – Valores do quadro de ANOVA para os dados transformados do MOE da classe N°2-D.

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Entre tratamentos (orientação).	0,3327	1	0,3327	8,21	0,006
Dentro de tratamentos (Resíduos).	1,7824	44	0,0405		
Total	2,1151	45			

Da tabela F com $(2-1) = 1$ grau de liberdade para os tratamentos e $(46-2) = 44$ graus de liberdade para os resíduos, tem-se $F_{0,05;(1;44)} = 4,06$. Como $F_{\text{cal}} = 8,21 > F_{0,05;1,44} = 4,06$ a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que existe diferença significativa no valor médio do MOE medido em relação ao eixo de maior inércia, com o valor médio do MOE medido em relação ao eixo de menor inércia, para a classe N°2-D.

Teste de significância

A tabela 43 apresenta o resultado do teste t para os dados pareados do MOE para a classe N°2-D.

Tabela 43 – Teste t para os dados pareados do MOE para a classe N°2-D.

Teste-t: duas amostras para médias pareadas

	<i>Menor inércia</i>	<i>Maior inércia</i>
Média	9,279	9,104
Variância	0,070	0,043
Observações	24	24
gl	23	
Stat t	7,360	
t crítico	1,714	

Portanto, como $t = 7,360 > t_{\text{crítico}} = 1,714$, conclui-se que a diferença entre os módulos de elasticidade medidos com as peças em orientações diferentes é significativa ao nível de significância $\alpha = 0,05$, para a classe N°2-D.

Classe SS-ND

A tabela 44 apresenta o quadro de ANOVA para os dados transformados do MOE para a classe SS-ND.

Tabela 44 – Valores do quadro de ANOVA para os dados transformados do MOE da classe SS-ND.

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Entre tratamentos (orientação).	4034003	1	4034003	4,43	0,041
Dentro de tratamentos (Resíduos).	41896775	46	910799		
Total	45930778	47			

Da tabela F com $(2-1) = 1$ grau de liberdade para os tratamentos e $(48-2) = 46$ graus de liberdade para os resíduos, tem-se $F_{0,05;(1;46)} = 4,06$. Como $F_{\text{cal}} = 4,43 > F_{0,05;1,46} = 4,06$ a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que existe diferença significativa no valor médio do MOE medido em relação ao eixo de maior inércia, com o valor médio do MOE medido em relação ao eixo de menor inércia, para a classe SS-ND.

Teste de significância

A tabela 45 apresenta o resultado do teste t para os dados pareados do MOE para a classe SS-ND.

Tabela 45 – Teste t para os dados pareados do MOE para a classe SS-ND.

Teste-t: duas amostras para médias pareadas

	<i>Menor inércia</i>	<i>Maior inércia</i>
Média	4473,573	3893,773
Variância	1063074,607	758525,886
Observações	24	24
gl	23	
Stat t	5,215	
t crítico	1,714	

Portanto, como $t = 5,215 > t_{\text{crítico}} = 1,714$, conclui-se que a diferença entre os módulos de elasticidade medidos com as peças em orientações diferentes é significativa ao nível de significância $\alpha = 0,05$, para a classe SS-ND.

Classe SS-D

A tabela 46 apresenta o quadro de ANOVA para os dados transformados do MOE para a classe SS-D.

Tabela 46 – Valores do quadro de ANOVA para os dados transformados do MOE da classe SS-D.

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Entre tratamentos (orientação).	474,7	1	474,7	9,70	0,003
Dentro de tratamentos (Resíduos).	2249,9	46	48,9		
Total	2724,6	47			

Da tabela F com $(2-1) = 1$ grau de liberdade para os tratamentos e $(48-2) = 46$ graus de liberdade para os resíduos, tem-se $F_{0,05;(1;46)} = 4,06$. Como $F_{\text{cal}} = 9,70 > F_{0,05; 1,46} = 4,06$ a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que existe diferença significativa no valor médio do MOE medido em relação ao eixo de maior inércia, com o valor médio do MOE medido em relação ao eixo de menor inércia, para a classe SS-D.

Teste de significância

A tabela 47 apresenta o resultado do teste t para os dados pareados do MOE para a classe SS-D.

Tabela 47 – Teste t para os dados pareados do MOE para a classe SS-D.

Teste-t: duas amostras para médias pareadas

	<i>Menor inércia</i>	<i>Maior inércia</i>
Média	79,417	73,128
Variância	67,238	30,586
Observações	24	24
gl	23	
Stat t	6,792	
t crítico	3,151E-07	

Portanto, como $t = 6,792 > t_{\text{crítico}} = 3,151E-07$, conclui-se que a diferença entre os módulos de elasticidade medidos com as peças em orientações diferentes é significativa ao nível de significância $\alpha = 0,05$, para a classe SS-D.

5.4 Análise dos resultados do MOE em relação ao eixo de maior inércia

Deseja-se testar a hipótese nula de que as médias dos resultados obtidos para o MOE medido em relação ao eixo de maior inércia são todas iguais contra a hipótese alternativa de que as médias são diferentes. Foram analisados os dados das tabelas 28 a 31. A análise dos resultados do MOE inicia-se com a verificação da adequabilidade do modelo.

Verificação da adequabilidade do modelo

Foi utilizado o método gráfico dos resíduos contra os valores estimados para a análise dos resíduos. A figura 66 mostra este gráfico para os dados do MOE em relação ao eixo de maior inércia. O gráfico indica que a variância é constante.

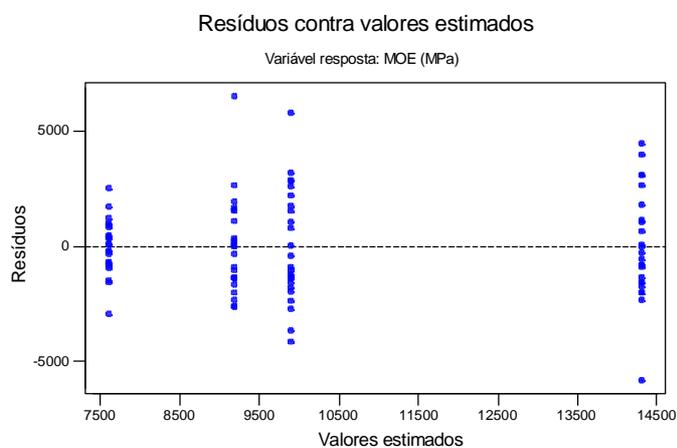


Figura 66 – Gráfico de resíduos contra valores estimados para os dados do MOE.

A normalidade dos resíduos foi verificada pelo gráfico dos resíduos contra os escores normais, com o qual verificou-se que a distribuição dos resíduos não segue o padrão de normalidade.

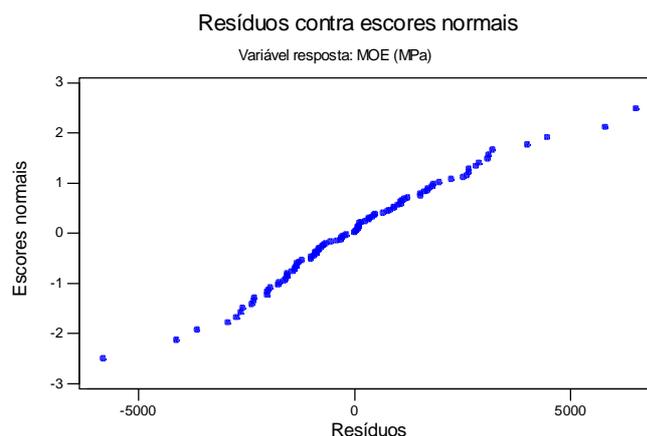


Figura 67 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

Para verificar a normalidade dos dados foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk, e concluiu-se que a suposição de normalidade foi rejeitada, conforme mostra a figura 68.

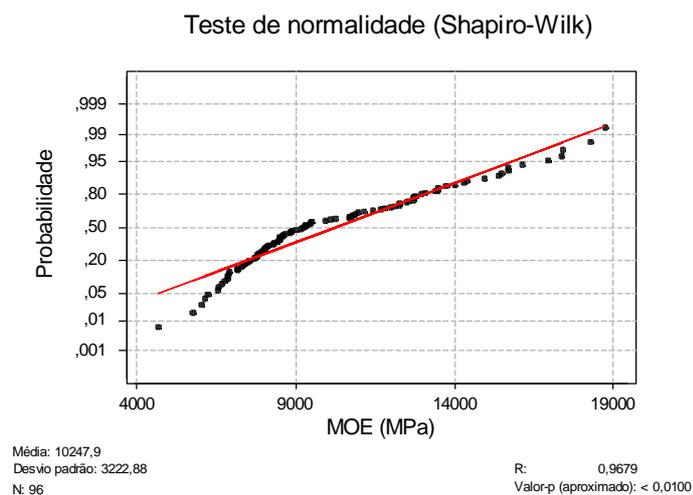


Figura 68 – Teste de normalidade para os dados do MOE.

Para se obter a normalidade aproximada e também a homogeneidade da variância foi utilizada a transformação de Box-Cox. A figura 69 mostra a determinação do $\lambda_{\text{ótimo}}$ para esta transformação.

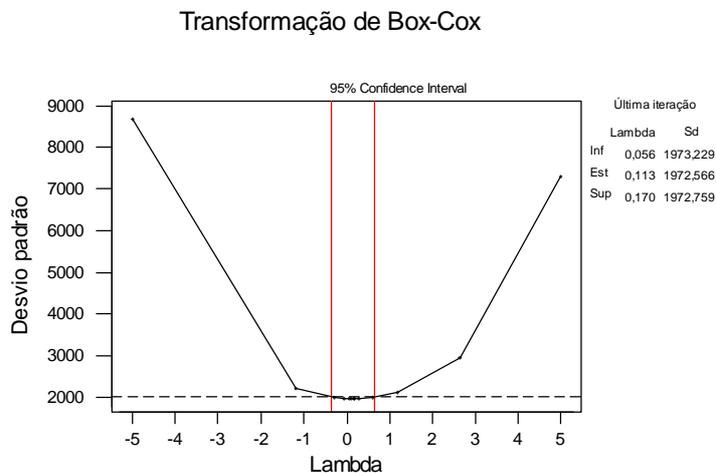


Figura 69– Determinação do $\lambda_{\text{ótimo}}$ para o MOE.

Como $\lambda_{\text{ótimo}}$ é próximo de zero, foi utilizada a transformação lognormal do MOE, como mostra a equação 28.

$$T(MOE) = Ln(MOE) \quad (28)$$

A homogeneidade da variância foi novamente verificada por meio da análise do gráfico dos resíduos contra os valores estimados, conforme mostrado na figura 70.

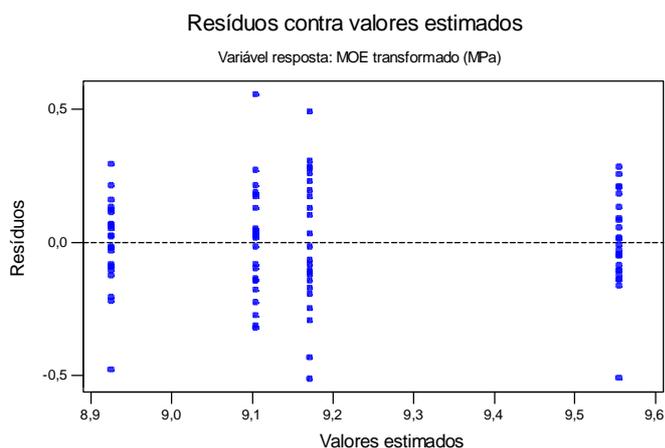


Figura 70 – Gráfico de resíduos contra valores estimados para os dados do MOE transformados pela equação 30.

Observa-se que a variância permanece constante.

Para verificar a normalidade dos resíduos foi utilizado o gráfico dos escores normais. A figura 71 mostra este gráfico, no qual se observa que os resíduos seguem uma distribuição normal aproximada.

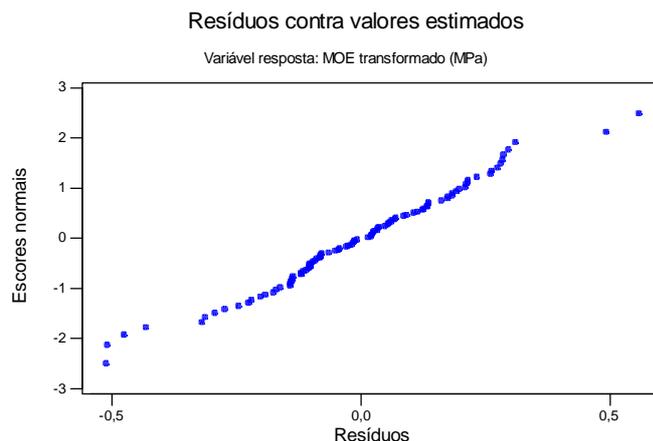


Figura 71 – Gráfico de probabilidade normal para os dados da tabela 32.

O teste de Shapiro-Wilk confirma a normalidade dos dados, conforme mostra a figura 72.

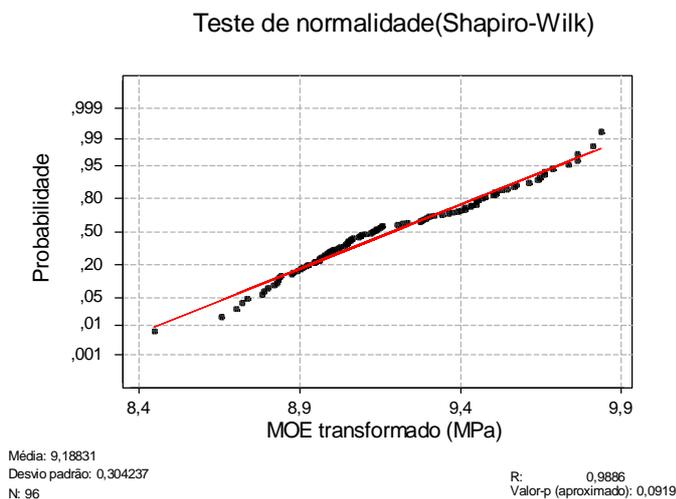


Figura 72 – Teste de normalidade de Shapiro-Wilk para o MOE transformado.

Cumprida as suposições do modelo, a tabela de ANOVA é adequada para a análise dos dados.

Tabela 48 – Valores do quadro de ANOVA para os dados do MOR transformados.

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Entre tratamentos (classes).	5,0643	3	1,6881	41,65	0,000
Dentro de tratamentos (Resíduos).	3,7289	92	0,0405		
Total	8,7932	95			

Da tabela F com $(4-1) = 3$ graus de liberdade e $(96-4) = 92$ graus de liberdade, tem-se $F_{0,05;(3;92)} = 2,717$. Como $F_{cal} = 41,65 > F_{0,05; 3,92} = 2,717$ a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que existe evidência estatística de que existe diferença no MOE médio para os 4 tipos de tratamentos.

Portanto, para verificar quais são as médias que diferem entre si, utiliza-se o método de TUKEY (1977) para verificação de todos os tratamentos pareados.

Teste de Tukey

Número de tratamentos (k) = 4;

MSE = 0,0405;

Graus de liberdade dos resíduos ($N - k$) = 92;

Então, para $\alpha = 0,05$ tem-se da tabela t de *student* o valor de $t_{0,025;92} = 1,99$. A diferença menos significativa (DMS) é dada por:

$$DMS = t_{\alpha/2,v} \cdot \sqrt{MSE \cdot \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} = 1,99 \cdot \sqrt{0,045 \cdot \left(\frac{1}{24} + \frac{1}{24} \right)} = 0,122 \quad (29)$$

A tabela 49 apresenta as comparações múltiplas pareadas.

Tabela 49 - Comparações múltiplas pareadas para as médias do MOE transformado.

Tratamento	1 (Nº2-ND)	2 (Nº2-D)	3 (SS-ND)	4 (SS-ND)
Média (\bar{y}_t)	8,925	9,104	9,170	9,555
Diferença ($\bar{y}_i - \bar{y}_j$)	*	-0,179**	-0,245**	-0,630**
		*	-0,066	-0,451**
			*	-0,385**
				*
IC 95% ($\bar{y}_i - \bar{y}_j$)	*	(-0,330; -0,026)	(-0,397; -0,093)	(-0,781; -0,477)
		*	(-0,219; 0,085)	(-0,603; -0,298)
			*	(-0,536; -0,232)

Portanto, conclui-se que não há diferença estatisticamente significativa de MOE somente entre as classes Nº2-D e SS-ND.

5.5 Análise dos resultados do MOR em relação ao eixo de maior inércia

Deseja-se testar a hipótese nula de que as médias dos resultados obtidos para o MOR em cada classe (tratamento) dadas nas tabelas 28 a 31 são iguais entre si. Foi utilizada a análise de variância para a comparação dos quatro tratamentos.

Análise de resíduos

A figura 73 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados para os dados do MOE, no qual se observa a heterogeneidade da variância (forma afunilada).

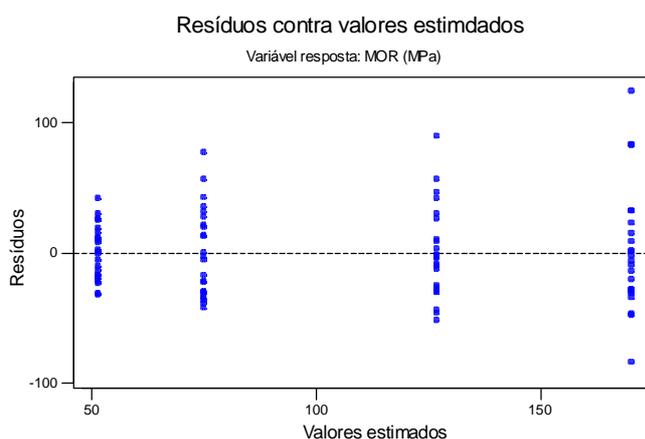


Figura 73 – Resíduos contra valores estimados para os dados do MOR.

A verificação da normalidade dos resíduos foi feita utilizando o gráfico dos resíduos contra os escores normais mostrado na figura 74, no qual se observa que os resíduos não apresentam distribuição normal.

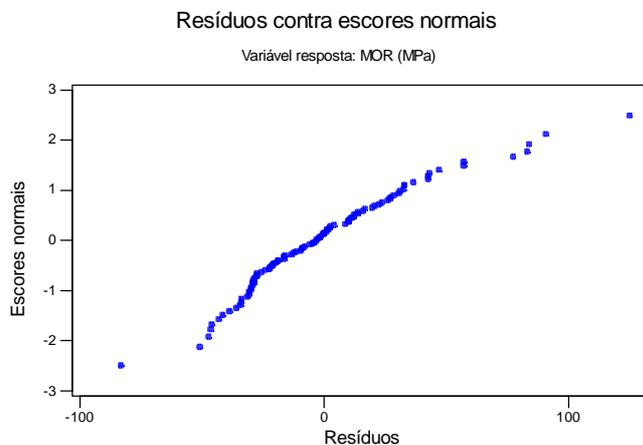


Figura 74 – Gráfico dos resíduos contra os escores normais para os dados do MOR.

Para verificar a normalidade dos dados realizou-se o teste de Shapiro-Wilk, e concluiu-se que a suposição de normalidade foi rejeitada pelos dados amostrais ao nível de significância $\alpha = 0,05$.

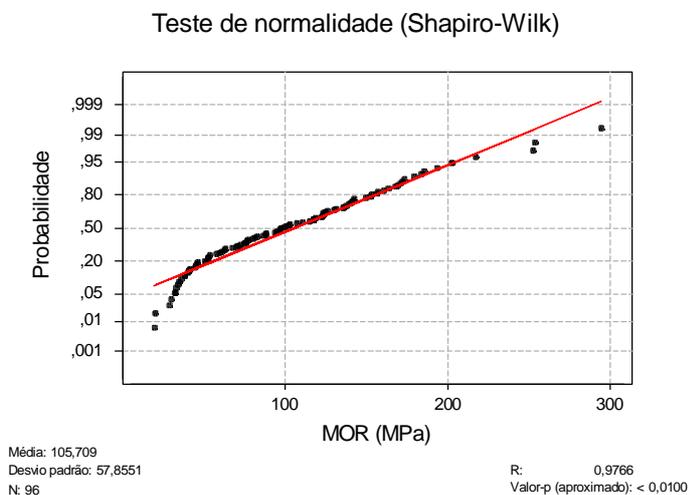


Figura 75 - Teste de normalidade para os dados do MOR.

Portanto foi necessário realizar uma transformação dos dados de forma a se obter uma distribuição normal aproximada tanto para os resíduos, como para a distribuição de frequências do MOR. A figura 76 apresenta a determinação do $\lambda_{\text{ótimo}}$ para a transformação de Box-Cox.

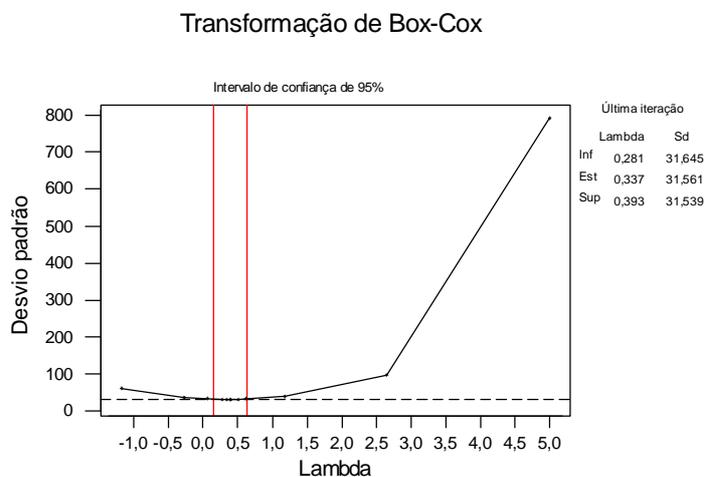


Figura 76 – Determinação do $\lambda_{\text{ótimo}}$ para o MOR.

Observando a figura acima observa-se que o $\lambda_{\text{ótimo}}$ é 0,337. Substituindo-se este valor na equação 14 tem-se a seguinte equação de transformação:

$$T(MOR) = MOR^{0,337} \quad (30)$$

A figura 77 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados, no qual se observa a estabilização da variância.

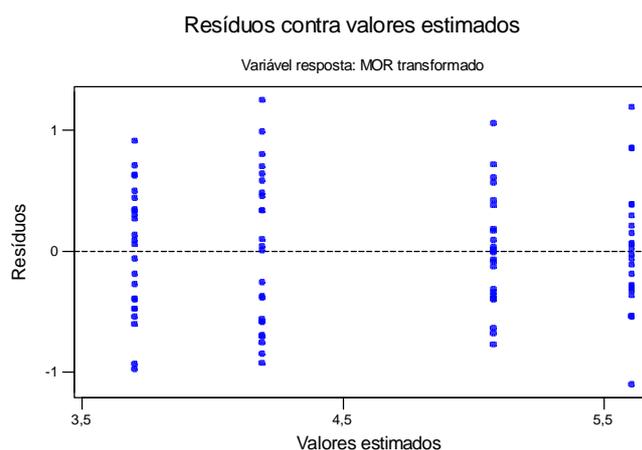


Figura 77 – Resíduos contra valores estimados para os dados transformados do MOR.

Para verificar a normalidade dos resíduos, utilizou-se o gráfico dos resíduos contra os escores normais. A figura 78 mostra este gráfico, no qual se observa a normalidade dos dados.

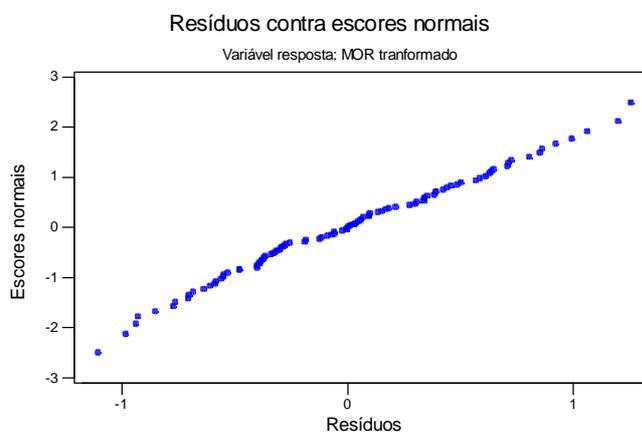


Figura 78 – Gráfico dos resíduos contra os escores normais para os dados do MOR.

A verificação a normalidade dos dados foi feita usando o teste de Shapiro-Wilk, e concluiu-se que a suposição de normalidade foi aceita pelos dados amostrais ao nível de significância $\alpha = 0,05$, conforme mostra a figura 85.

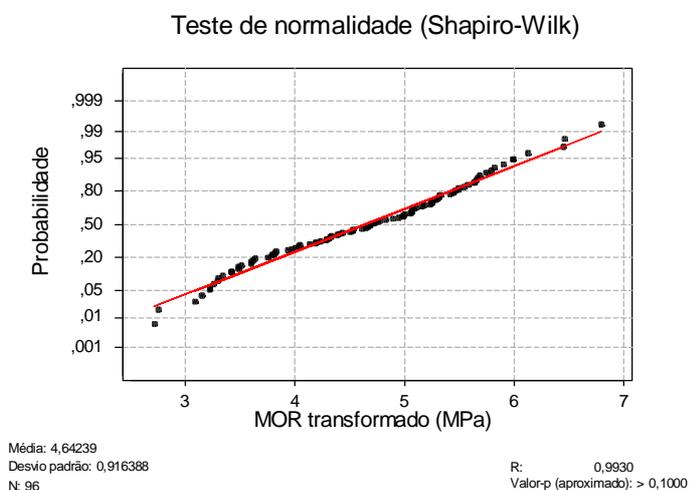


Figura 79 - Teste de normalidade para os dados transformados do MOR.

Portanto, da análise dos dados transformados observa-se que o modelo da distribuição normal é adequado para análise dos dados do MOR, sendo assim, a tabela de análise de variância pode ser utilizada para fazer inferências. Esta é apresentada na tabela 50.

Tabela 50 – Valores do quadro de ANOVA para os dados do MOR transformados.

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Entre tratamentos (classes).	53,021	3	17,674	60,77	0,000
Dentro de tratamentos (Resíduos).	26,757	92	0,291		
Total	79,778	95			

Da tabela F com $(4-1) = 3$ graus de liberdade e $(96-4) = 92$ graus de liberdade, tem-se $F_{0,05;(3;92)} = 2,717$. Como $F_{cal} = 60,76 > F_{0,05; 3,92} = 2,717$ a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que existe evidência estatística de que existe diferença no MOR médio para os 4 tipos de tratamentos.

Teste de Tukey

Número de tratamentos (k) = 4;

MSE = 0,291;

Graus de liberdade dos resíduos ($n - k$) = 92;

Então, para $\alpha = 0,05$ tem-se da tabela t de *student* o valor de $t_{0,025;92} = 1,99$. A diferença menos significativa (DMS) é dada por:

$$DMS = 1,99 \cdot \sqrt{0,291 \cdot \left(\frac{1}{24} + \frac{1}{24} \right)} = 0,309 \quad (31)$$

A tabela 51 apresenta as comparações múltiplas pareadas.

Tabela 51 - Comparações múltiplas pareadas para as médias do MOR transformado.

Tratamento	1	2	3	4
Média (\bar{y}_i)	3,700	4,189	5,075	5,606
Diferença ($\bar{y}_i - \bar{y}_j$)		-0,489**	-1,375**	-1,906**
		*	-0,886**	-1,417**
			*	-0,549**
IC 95% ($\bar{y}_i - \bar{y}_j$)	*	(-0,897; -0,082)	(-1,782; -0,968)	(-2,313; -1,498)
		*	(-1,292; -0,478)	(-1,823; -1,009)
			*	(0,938; -0,123)

Portanto, conclui-se que existe diferença estatisticamente significativa de MOR entre as quatro classes visuais de resistência.

5.6 Análise da correlação entre MOR e MOE em relação ao eixo de maior inércia.

A figura 80 apresenta um diagrama de dispersão entre as variáveis MOR e MOE em relação ao eixo de maior inércia. Observa-se a existência de uma relação linear positiva entre as propriedades.

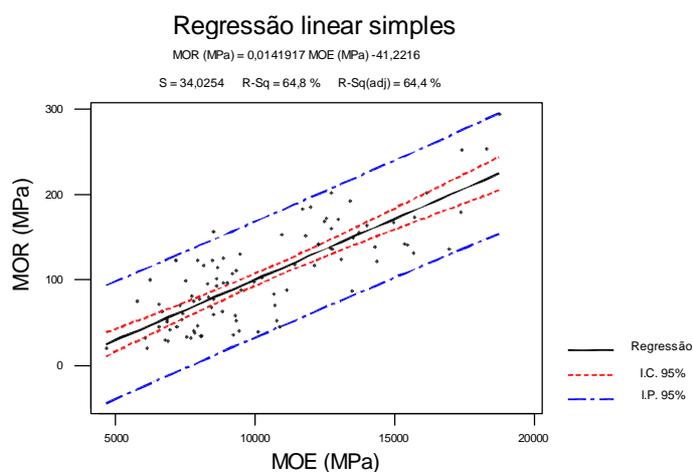


Figura 80 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre MOE e MOR.

Análise de resíduos

A figura 81 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados para o MOR, no qual se observa a homogeneidade da variância.

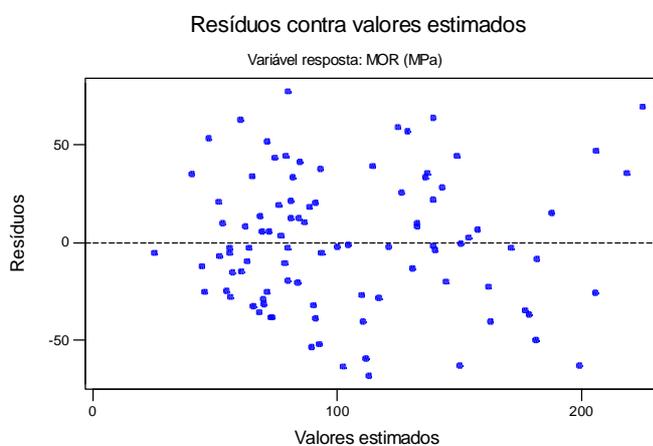


Figura 81 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR.

Na figura 82 é apresentado o gráfico dos resíduos contra os escores normais, onde se pode observar que os resíduos apresentam uma distribuição normal aproximada. Pode-se chegar à mesma conclusão pela análise do histograma dos resíduos mostrado na figura 83.

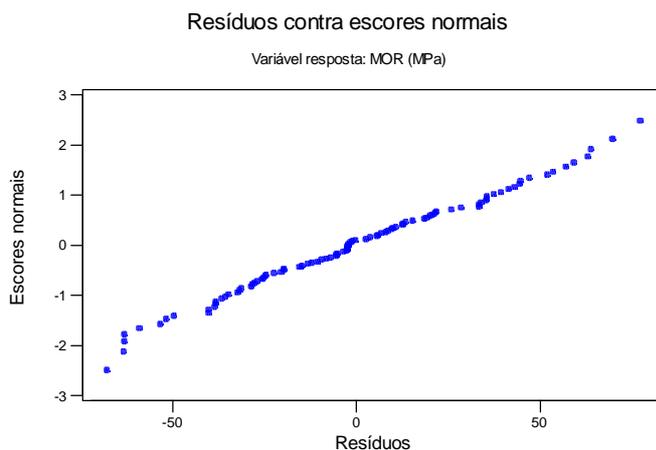


Figura 82 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

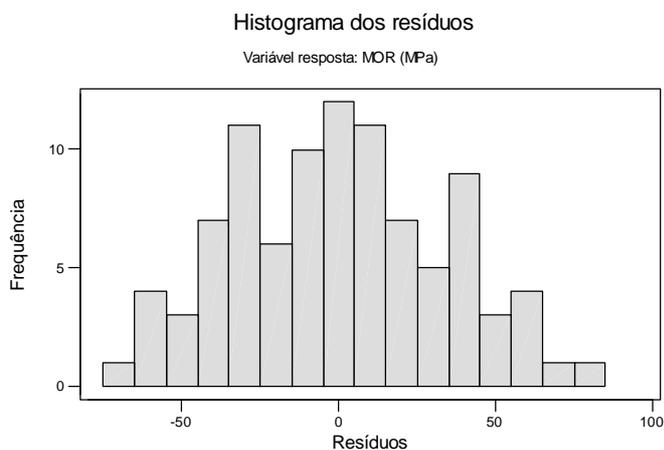


Figura 83 – Histograma dos resíduos.

Diante das constatações acima, verifica-se que as três suposições são cumpridas pelo modelo. Portanto, a análise de variância pode ser usada para verificar a qualidade do modelo ajustado. Esta é mostrada na tabela 52.

Tabela 52 – Quadro de ANOVA para os dados de E_m e f_m transformados

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Regressão	197801	1	197801	170,85	0,000
Resíduos	107669	93	1158		
Total	305470	94			

Da tabela F com $(2-1) = 1$ grau de liberdade para a regressão e $(95-2) = 93$ graus de liberdade para os resíduos, tem-se $F_{0,05;(1;93)} = 3,956$. Como $F_{cal} = 170,85 > F_{0,05;(1;93)} = 3,956$, a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que há evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela equação de regressão é altamente significativa. Portanto o modelo de regressão linear dado por $MOR(MPa) = 0,01419 \cdot MOE(MPa) - 41,22$ é adequado para representar a relação entre o MOE e o MOR, para a espécie e dimensões consideradas.

Linha inferior do Intervalo de Previsão

A relação entre MOE e MOR é bastante interessante para aplicação na classificação mecânica, em que a partir da medição do MOE de uma peça estima-se o correspondente valor característico inferior do MOR. Para esta estimativa, emprega-se a linha inferior do intervalo de previsão de 90%.

Para a regressão linear entre MOE e MOR, a linha inferior do intervalo de previsão de 90% é dada por:

$$MOR = 0,01419 \cdot MOE - 97,66 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{95} + \frac{(MOE - 10271)^2}{9,8 \cdot 10^{+8}}} \quad (32)$$

5.7 Análise da correlação entre o MOR e o MOE em relação ao eixo de menor inércia

A figura 84 apresenta o diagrama de dispersão entre as variáveis MOR em relação ao eixo de maior inércia e MOE em relação ao eixo de menor inércia, o intervalo de confiança (IC) de 90% e o intervalo de previsão (IP) de 90%.

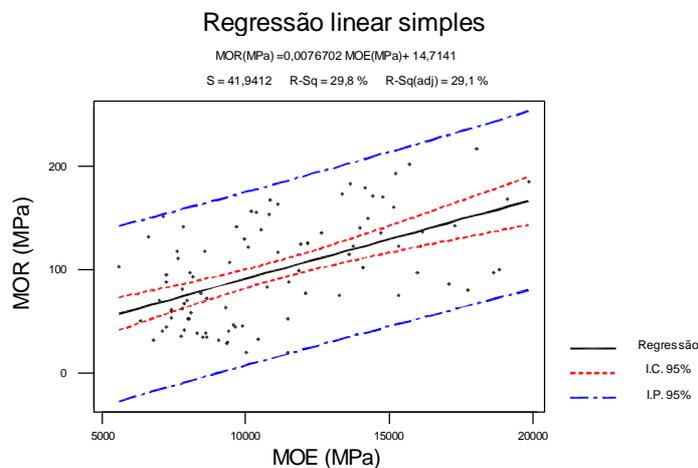


Figura 84 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre MOE e MOR.

Análise de resíduos

A figura 85 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados para o MOR, no qual se observa a homogeneidade da variância.

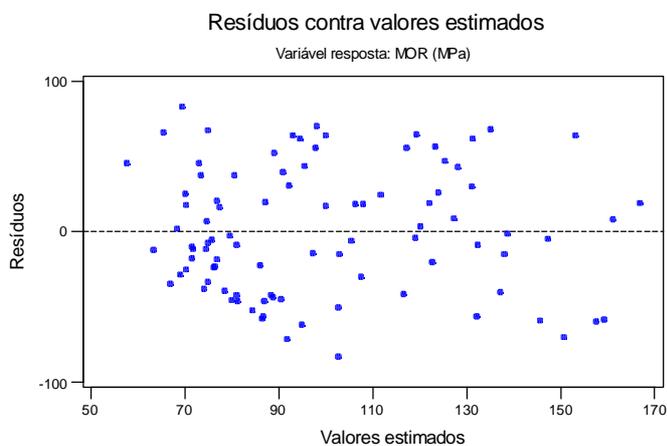


Figura 85 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para o MOR.

Na figura 86 é apresentado o gráfico dos resíduos contra os escores normais, no qual se observa que os resíduos apresentam uma distribuição normal aproximada.

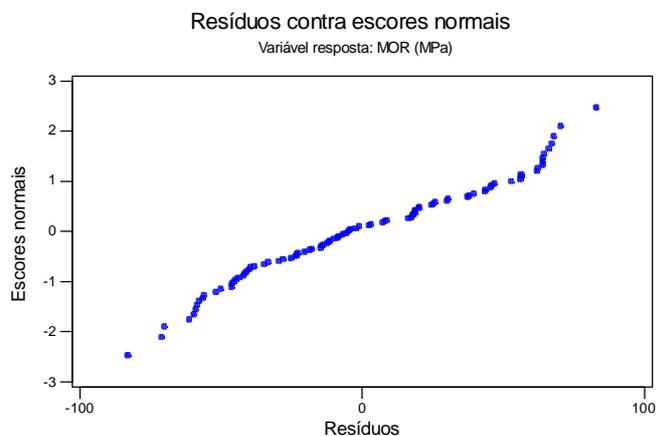


Figura 86 – Gráfico dos resíduos contra os escores normais.

Pode-se chegar à mesma conclusão pela análise do histograma dos resíduos mostrado na figura 87.

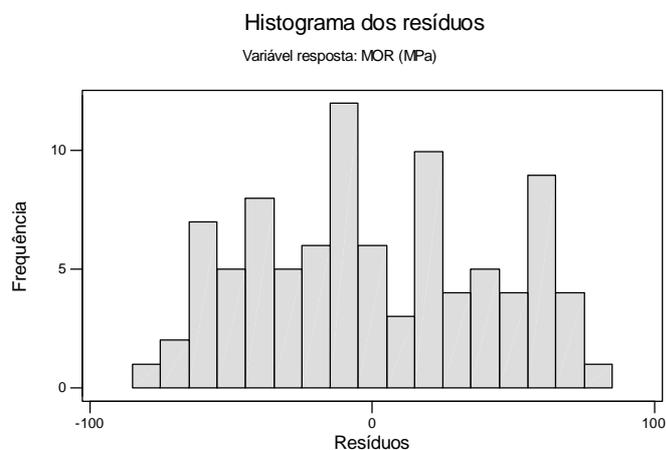


Figura 87 – Histograma dos resíduos.

Diante das constatações acima, verifica-se que as três suposições são cumpridas pelo modelo. Portanto, a análise de variância pode ser usada para verificar a qualidade do modelo ajustado. Esta é mostrada na tabela 53.

Tabela 53 – Quadro de ANOVA para os dados do MOR e do MOE em relação ao eixo de menor inércia.

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Regressão	1	67337	67336,6	38,2797	0,000
Resíduos	90	158316	1759,1		
Total	91	225653			

Da tabela F com $(2-1) = 1$ grau de liberdade para a regressão e $(92-2) = 90$ graus de liberdade para os resíduos, tem-se $F_{0,05;(1;90)} = 3,96$. Como $F_{\text{cal}} = 38,28 > F_{0,05;(1;90)} = 3,96$, a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que há evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela equação de regressão é altamente significativa. Portanto o modelo de regressão linear dado por $MOR(MPa) = 0,00767 \cdot MOE(MPa) + 14,71$ é adequado para representar a relação entre o MOR e o MOE em relação ao eixo de menor inércia, para a espécie e dimensões consideradas.

Linha inferior do Intervalo de Previsão

A linha inferior do Intervalo de Previsão de 90% é dada na equação 33.

$$MOR = 0,00767 \cdot MOE - 69,72 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{92} + \frac{(MOE - 11039)^2}{2,25 \cdot 10^5}} \quad (33)$$

5.8 Determinação do Valor Característico do MOR e do valor médio do MOE em relação ao eixo de maior inércia para cada classe.

Para a determinação do $MOE_{\text{médio}}$ basta determinar a média do MOE em cada classe. Entretanto, para a determinação do f_{mk} , deve-se inicialmente verificar a distribuição de freqüências do MOR dentro de cada classe isoladamente. As figuras 88 a 91 apresentam os histogramas de freqüências para cada classe.

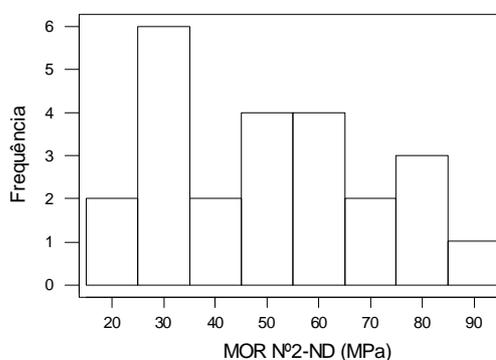


Figura 88 – Histograma de freqüências do MOR para a classe N°2-ND.

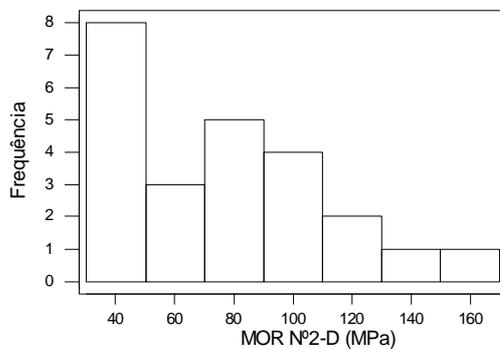


Figura 89 – Histograma de frequências do MOR para a classe N°2-D.

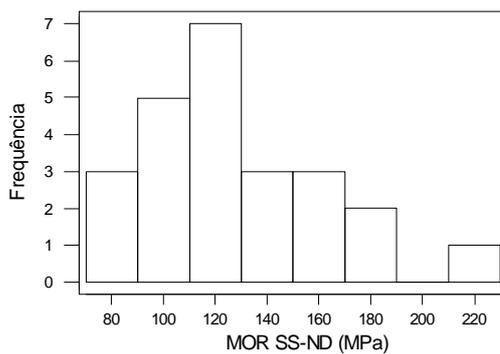


Figura 90 – Histograma de frequências do MOR para a classe SS-ND.

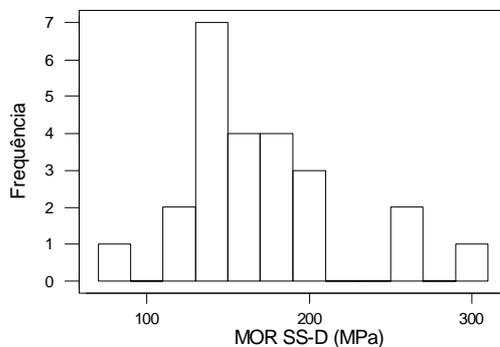


Figura 91 – Histograma de frequências do MOR para a classe SS-D.

Da análise dos histogramas conclui-se que as distribuições de frequências dentro de cada classe não seguem o padrão de normalidade. Portanto foram

realizadas transformações nos dados de forma que os mesmos apresentem uma distribuição normal. Foram utilizadas as transformações exponenciais de Box-Cox. As transformações são apresentadas na tabela 54, e as figuras 92 a 95 apresentam os testes de normalidade para os dados transformados.

Tabela 54 – Transformações para os dados do MOE em relação ao eixo de maior inércia.

Classe	Transformação
Nº2 - ND	$T(\text{MOR}) = \text{MOR}^{0,450}$
Nº2 - D	$T(\text{MOR}) = \text{MOR}^{0,449}$
SS - ND	$T(\text{MOR}) = \text{Ln}(\text{MOR})$
SS - D	$T(\text{MOR}) = \text{Ln}(\text{MOR})$

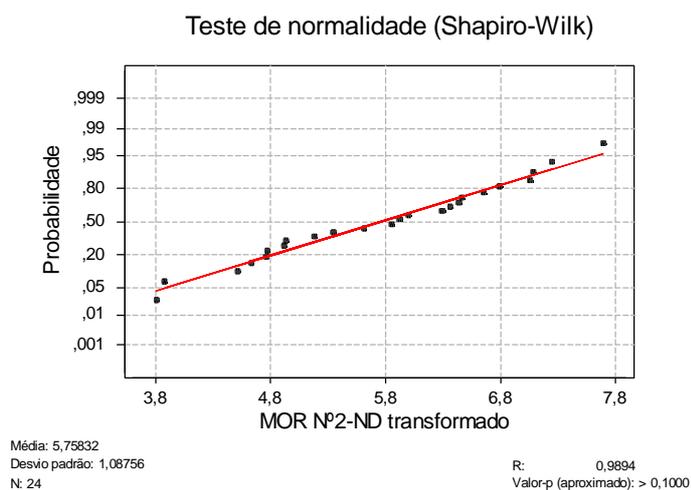


Figura 92 – Teste de normalidade para o MOR da classe Nº2-ND.

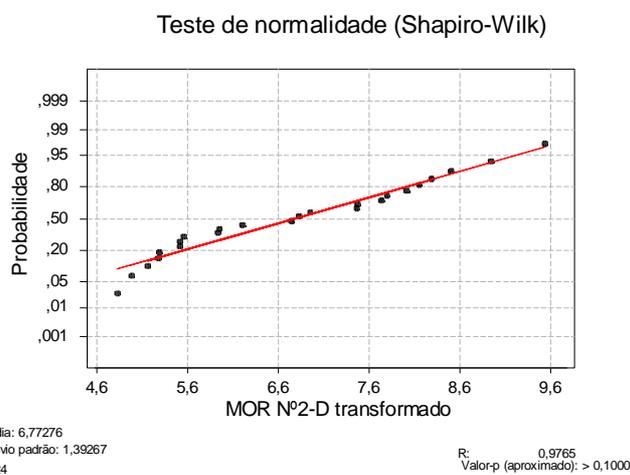


Figura 93 – Teste de normalidade para o MOR da classe Nº2-D.

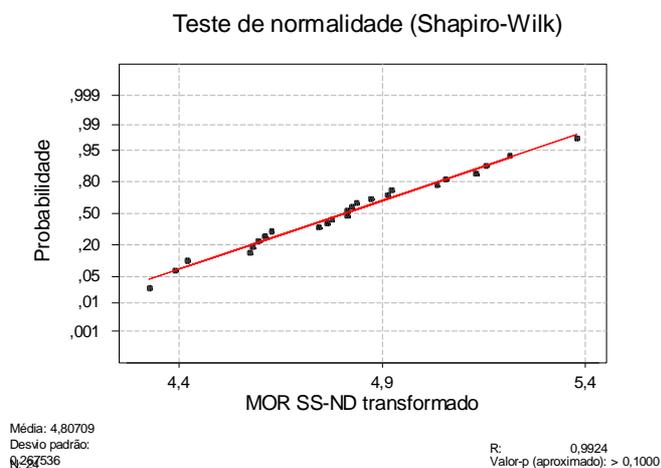


Figura 94 – Teste de normalidade para o MOR da classe SS-ND.

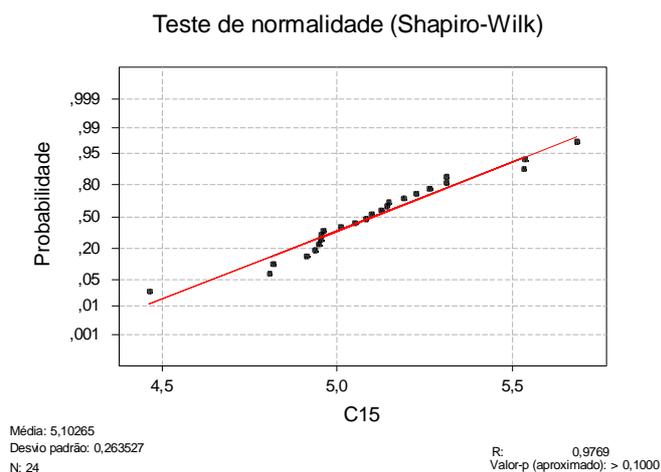


Figura 95 – Teste de normalidade para o MOR da classe SS-D.

A análise dos testes de normalidade leva a conclusão de que a suposição de normalidade foi cumprida para todas as classes. Portanto, o valor característico inferior do MOR para os dados transformados de classe foi determinado pela equação 34.

$$MOR_k = MOR_{médio} - 1,645 \cdot Sd \quad (34)$$

A conversão dos valores transformados em valores reais foi feita pela equação 35 para as classes N°2 e pela equação 36 para as classes SS.

$$MOR = T(MOR)^{(1/\lambda)} \quad (35)$$

$$MOR = 2,7182^{T(MOR)} \quad (36)$$

A tabela 55 apresenta os valores do MOR_k e do $MOE_{m\acute{e}dio}$ determinados para as quatro classes de resist\ecencia. S\ao apresentados tamb\em os valores dados pelo SPIB para o grupo *Southern Pine* norte-americano. Os valores tabelados se referem ao teor de umidade de 12% e carregamento com dura\c7\ao instant\anea.

Tabela 55 – Propriedades de resist\ecencia e rigidez \a flex\ao para a amostra em estudo e para o *Southern Pine* norte-americano.

Classe	Amostra em estudo		<i>Southern Pine</i> Norte Americano	
	MOR_k (MPa)	MOE_m (MPa)	MOR_k (MPa)	MOE_m (MPa)
N\o2-ND	21,9	7608	19,9	9520
N\o2-D	28,7	9182	25,0	11560
SS-ND	79,5	9899	40,6	11560
SS-D	107,6	14303	46,6	12920

Observa-se que as classes N\o2-ND e N\o2-D apresentam valores de MOR bastante pr\oximos. Entretanto, as classes SS-ND e SS-D apresentam valores de MOR em torno de 210% superior ao valor tabelado para o grupo *Southern Pine*. Com exce\c7\ao da classe SS-D, que apresentou para o MOE um valor um torno de 10% acima do MOE do *Southern Pine*, as demais classes apresentaram para o MOE valores em torno de 20% inferiores ao *Southern Pine*.

5.9 An\alise da correla\c7\ao entre E_{co} e f_{co} para os corpos-de-prova.

A figura 96 apresenta o diagrama de dispers\ao entre as vari\aveis E_{co} e f_{co} , no qual se observa a exist\ecencia de uma rela\c7\ao linear entre as propriedades mec\anicas.

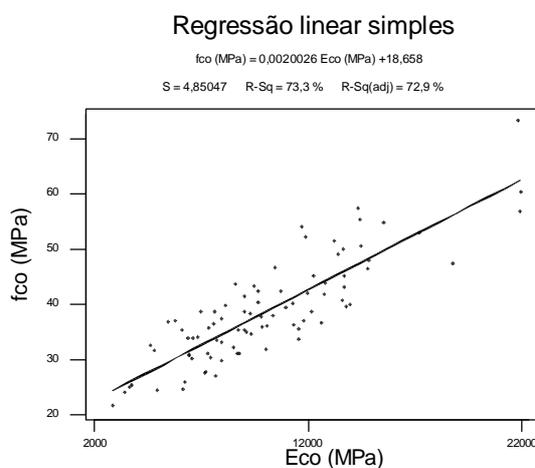


Figura 96 – Diagrama de dispers\ao e reta de regress\ao entre E_{co} e f_{co} .

Análise de resíduos

A figura 97 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados para f_{co} , no qual se observa a homogeneidade da variância.

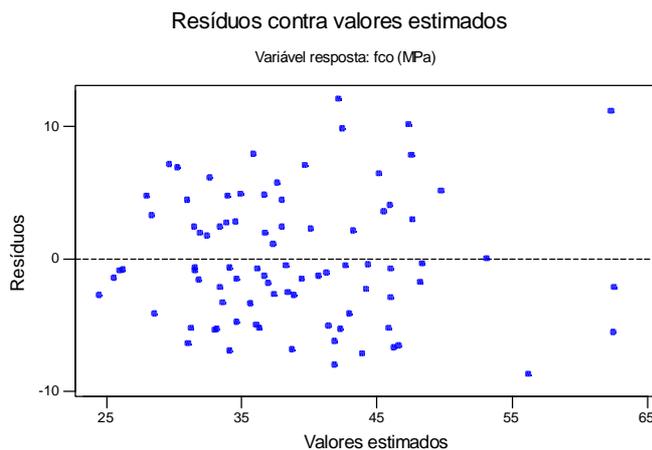


Figura 97 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para f_{co} .

Na figura 98 é apresentado o gráfico dos resíduos contra os escores normais, no qual se observa que os resíduos se distribuem segundo uma normalidade aproximada.

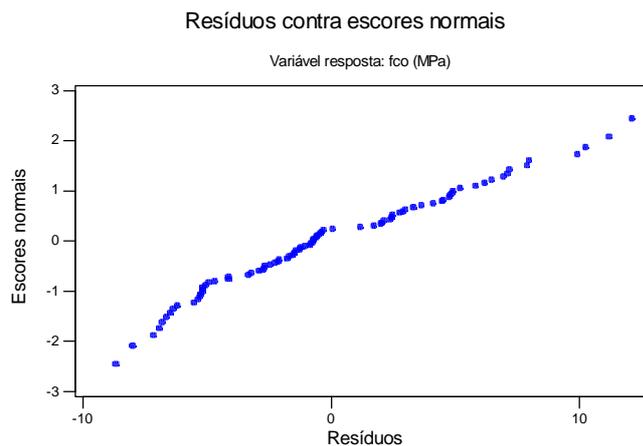


Figura 98 – Gráfico dos resíduos contra os escores normais.

A tabela 56 apresenta o quadro de ANOVA para a verificação da qualidade do modelo ajustado.

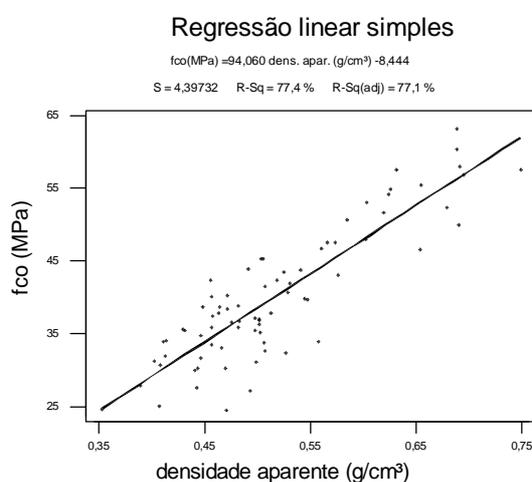
Tabela 56 – Quadro de ANOVA para os dados de E_{co} e f_{co} .

Fonte de variação	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Regressão	5413,6	1	5413,6	230,10	0,000
Resíduos	1976,3	84	23,5		
Total	7389,8	85			

Da tabela F com $(2-1) = 1$ grau de liberdade para a regressão e $(86-2) = 84$ graus de liberdade para os resíduos, tem-se $F_{0,05;(1;84)} = 3,97$. Como $F_{cal} = 230,10 > F_{0,05;(1;84)} = 3,97$, a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que há evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela equação de regressão é altamente significativa. Portanto o modelo de regressão linear dado por $f_{co} (MPa) = 0,00200 \cdot E_{co} (MPa) + 18,66$ é adequado para representar a relação entre f_{co} e E_{co} , para a espécie e dimensões consideradas.

5.10 Análise da correlação entre f_{co} e ρ_{ap} para os corpos-de-prova.

A figura 99 apresenta o diagrama de dispersão entre as variáveis ρ_{ap} e f_{co} , na qual observa-se a indicação de uma relação linear entre as duas propriedades.

Figura 99 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre ρ_{ap} e f_{co} .

Análise de resíduos

A figura 100 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados, no qual se observa a homogeneidade da variância.

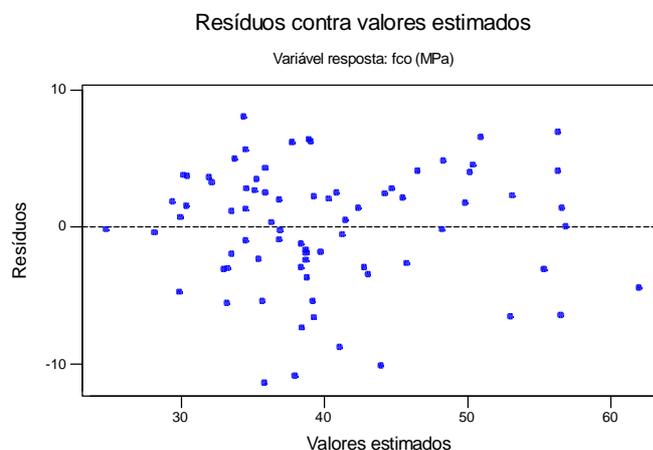


Figura 100 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para f_{co} .

Na figura 101 é apresentado o gráfico dos resíduos contra os escores normais, onde se pode observar os resíduos apresentam normalidade aproximada.

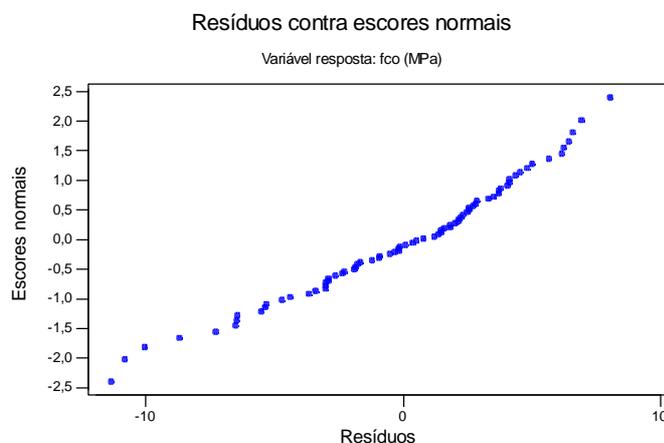


Figura 101 – Gráfico dos resíduos contra os escores normais.

Cumpridas as suposições do modelo, a análise de variância pode ser usada para verificar a qualidade do modelo ajustado. Esta é mostrada na tabela 57.

Tabela 57 – Quadro de ANOVA para os dados de MOE e f_{co} transformados

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Regressão	4893,07	1	4893,07	253,05	0,000
Resíduos	1430,89	74	19,34		
Total	6323,96	75			

Da tabela F com $(2-1) = 1$ grau de liberdade para a regressão e $(76-2) = 74$ graus de liberdade para os resíduos, tem-se $F_{0,05;(1;74)} = 3,98$. Como $F_{cal} = 253,05 >$

$F_{0,05;(1;74)} = 3,98$, a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que há evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela equação de regressão é altamente significativa. Portanto o modelo de regressão linear dado por $f_{co} (MPa) = 94,060 \cdot \rho_{ap12\%} (g/cm^3) - 8,444$ é adequado para representar a relação entre $\rho_{ap12\%}$ e f_{co} , para a espécie e dimensões consideradas.

5.11 Análise da correlação entre E_{co} e ρ_{ap} para os corpos-de-prova.

A figura 102 apresenta o diagrama de dispersão entre as variáveis ρ_{ap} e E_{co} .

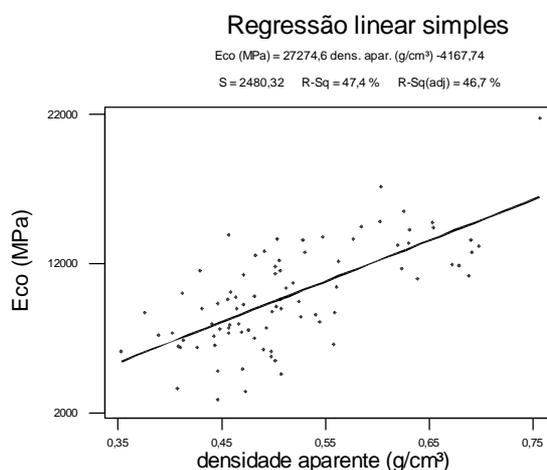


Figura 102 – Diagrama de dispersão e reta de regressão entre ρ_{ap} e MOE_{co} .

Análise de resíduos

A figura 103 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados para MOE_{co} , no qual se observa a homogeneidade da variância.

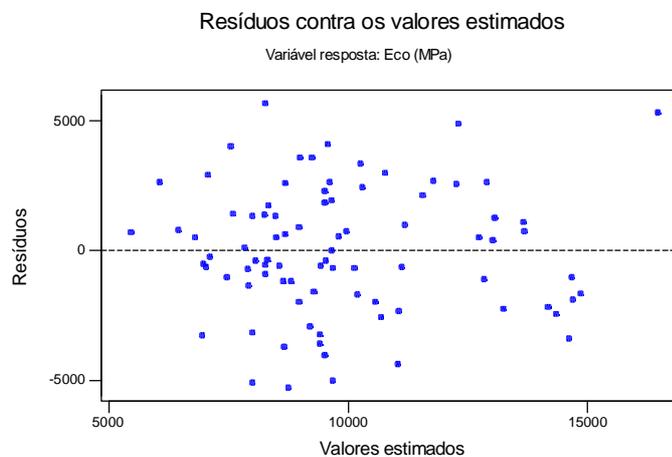


Figura 103 – Gráfico dos resíduos contra valores estimados para MOE_{co} .

Na figura 104 é apresentado o gráfico dos resíduos contra os escores normais, no qual se observa que os resíduos apresentam distribuição normal aproximada.

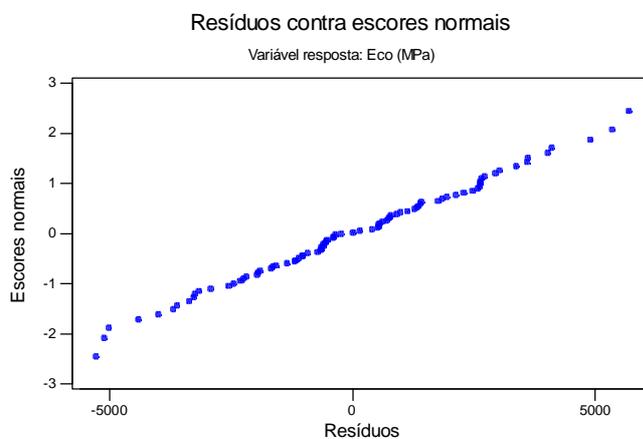


Figura 104 – Gráfico dos resíduos contra os escores normais.

O teste da qualidade do modelo ajustado foi realizado pelo quadro de ANOVA, mostrado na tabela 58.

Tabela 58 – Quadro de ANOVA para os dados de E_{co} e ρ_{ap} .

Fonte de variação	SQ	gl	QM	F_{cal}	Valor-p
Regressão	459247542	1	45924754	74,65	0,000
Resíduos	510616566	83	6152007		
Total	96986410	84			

Da tabela F com $(2-1) = 1$ grau de liberdade para a regressão e $(85-2) = 83$ graus de liberdade para os resíduos, tem-se $F_{0,05;(1;83)} = 3,97$. Como $F_{\text{cal}} = 74,65 > F_{0,05;(1;83)} = 3,97$, a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que há evidência estatística de que a proporção da variância total explicada pela equação de regressão é altamente significativa. Portanto o modelo de regressão linear dado por $E_{co} (MPa) = 27274,6 \cdot \rho_{ap12\%} (g / cm^3) - 4167,74$ é adequado para representar a relação entre $\rho_{ap12\%}$ e E_{co} , para a espécie e dimensões consideradas.

5.12 Determinação das propriedades de resistência e rigidez à compressão paralela em corpos-de-prova

A determinação das propriedades de resistência e rigidez à compressão paralela para as espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* agrupadas se fez determinando o valor característico da resistência à compressão e o valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela dos corpos-de-prova retirados de porções não afetadas pelos testes de flexão estática nas pranchas.

O módulo de elasticidade à compressão paralela foi determinado diretamente pela média dos dados das tabelas 34 a 37. Para a determinação de f_{cok} , os dados foram transformados de forma a apresentarem distribuição normal aproximada. A transformação é mostrada na equação 37.

$$T(f_{co}) = f_{co}^{0,674} \quad (37)$$

A figura 105 apresenta o teste de normalidade para os dados transformados, no qual verifica-se a normalidade dos dados.

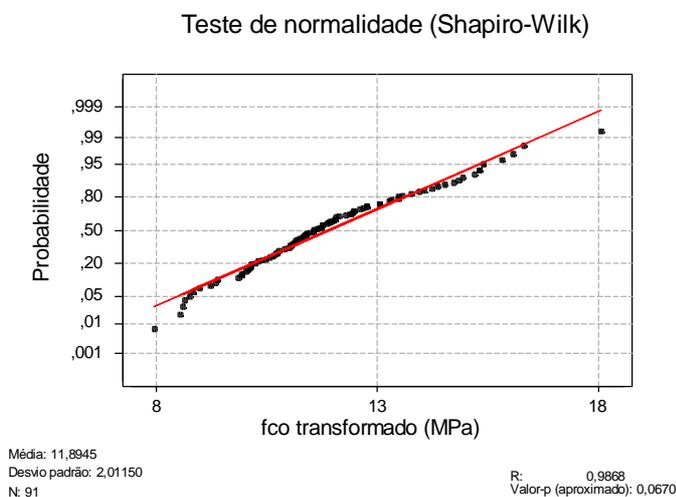


Figura 105 – Teste de normalidade para os dados transformados de f_{co} .

Com a normalidade comprovada, a equação 38 pode ser usada para determinar o valor característico dos dados transformados.

$$f_{cok} = f_{com} - 1,645 \cdot Sd \quad (38)$$

Sendo:

f_{cok} = resistência característica à compressão paralela ;

f_{com} = resistência média à compressão paralela;

Sd = desvio padrão da amostra.

Portanto tem-se para os dados transformados:

$$f_{cok} = 11,894 - 1,645 \cdot 2,01 = 8,588 \text{ MPa} \quad (39)$$

Para retornar ao valor característico da amostra foi feita a transformação inversa, ou seja:

$$f_{cok} = T(f_{cok})^{1/0,674} = 8,588^{1/0,674} = 24,3 \text{ MPa} \quad (40)$$

A tabela 59 apresenta os resultados do f_{cok} e do E_{co} .

Tabela 59 – Resultados dos testes de compressão paralela.

Compressão Paralela	
f_{cok} (MPa)	E_{co} (MPa)
24,3	10259

Portanto, considerando-se o valor de f_{cok} a madeira em estudo pode ser enquadrada na classe C25 da norma NBR7190-97.

5.13 Comparação das resistências à compressão paralela entre os corpos-de-prova.

Deseja-se verificar se existe diferença na resistência à compressão entre os corpos-de-prova de uma classe com outra. Para isso foi utilizado o quadro de ANOVA para verificar se existe diferença, e o teste de Tukey para fazer as comparações múltiplas pareadas. A figura 106 apresenta o teste de Shapiro-Wilk no qual se observa que os dados se distribuem normalmente.

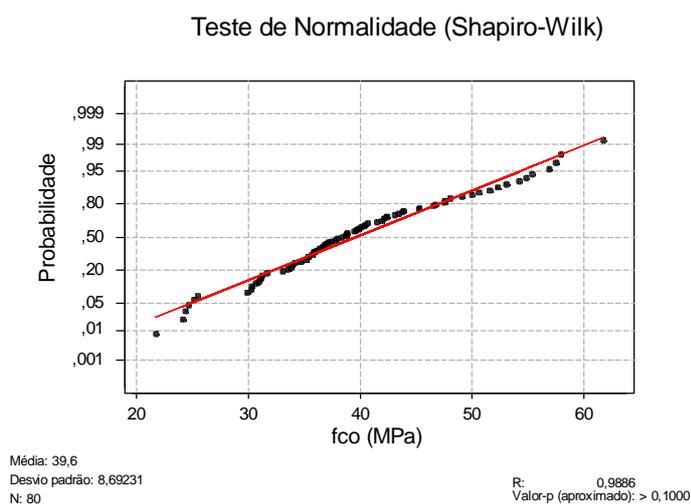


Figura 106 – Teste de normalidade nos dados de f_{co} para os corpos-de-prova.

A figura 107 apresenta o gráfico dos resíduos contra os valores estimados, no qual se observa que a variância dos dados é constante.

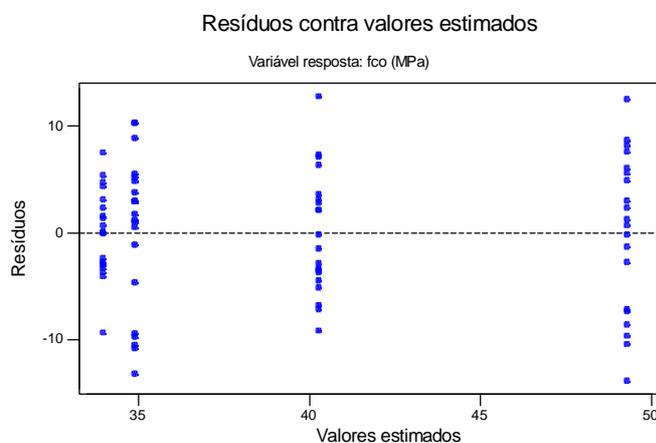


Figura 107 – Gráfico dos resíduos contra os valores estimados para os dados de f_{co} .

A figura 108 apresenta o gráfico dos resíduos contra os escores normais, no qual se observa que os resíduos apresentam distribuição normal.

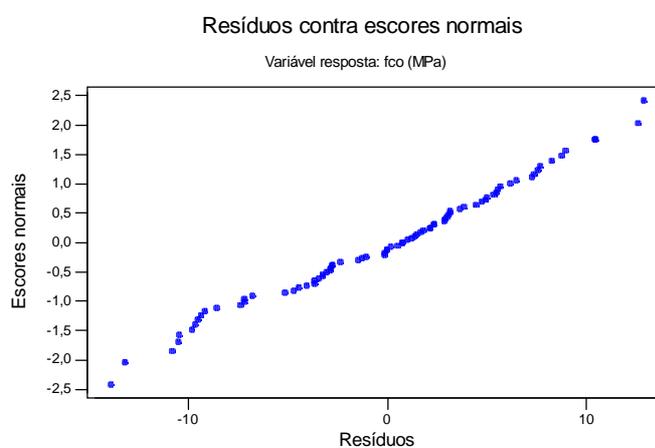


Figura 108 – Gráfico dos resíduos contra os escores normais para os dados de f_{co} .

Portanto o quadro de ANOVA é adequado para analisar os dados de f_{co} , este é apresentado na tabela 60.

Tabela 60 – Quadro de ANOVA para os dados de f_{co} .

Fonte de variação.	SQ	gl	QM	F _{cal}	Valor-p
Entre tratamentos (classes).	2954,1	3	984,7	24,82	0,000
Dentro de tratamentos (Resíduos).	3014,9	76	39,7		
Total	5968,9	79			

Da tabela F com $(4-1) = 3$ graus de liberdade e $(80-4) = 76$ graus de liberdade, tem-se $F_{0,05;(3;76)} = 1,99$. Como $F_{\text{cal}} = 24,825 > F_{0,05; 3,76} = 1,99$ a um nível de significância de $\alpha = 0,05$, pode-se concluir que existe diferença significativa no f_{co} para os 4 tipos de tratamentos.

Portanto, para verificar quais são as médias que diferem entre si, utiliza-se o teste de Tukey para verificação de todos os tratamentos pareados.

Teste de Tukey

Número de tratamentos (k) = 4;

MSE = 39,7;

Graus de liberdade dos resíduos (N - k) = 76;

Então, para $\alpha = 0,05$ tem-se da tabela *t* de *student* o valor de $t_{0,025;76} = 1,99$. A diferença menos significativa (DMS) é dada por:

$$DMS = 1,99 \cdot \sqrt{39,7 \cdot \left(\frac{1}{20} + \frac{1}{20} \right)} = 3,965 \quad (41)$$

A tabela 61 apresenta as comparações múltiplas pareadas.

Tabela 61 - Comparações múltiplas pareadas para as médias do MOE transformado.

Tratamento	1 (Nº2-ND)	2 (Nº2-D)	3 (SS-ND)	4 (SS-D)
Média (\bar{y}_t)	33,965	40,270	34,900	49,265
Diferença ($\bar{y}_i - \bar{y}_j$)	*	-6,305**	-0,935	-15,300**
		*	-5,370**	-8,995**
			*	-14,365**
				*
IC 95% ($\bar{y}_i - \bar{y}_j$)	*	(-11,544;-1,066)	(-6,174;4,304)	(-20,539;-10,061)
		*	(0,131; 10,609)	(-14,234;-3,756)
			*	(-19,604; -9,126)

Portanto, conclui-se que há diferença estatisticamente significativa de f_{co} entre os corpos-de-prova da classe Nº2-D e SS-D, o que não era esperado. Muito provavelmente a diferença observada se deve à presença de peças de densidade muito elevada na classe SS-D.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise da revisão bibliográfica e do estudo experimental obtiveram-se as seguintes conclusões:

Na América do Norte, há uma tendência de se agruparem as espécies com características semelhantes e tratá-las como equivalentes. Nos Estados Unidos as espécies *Pinus elliottii*, *Pinus taeda*, *Pinus palustris* e *Pinus echinata* são unidas no grupo *Southern Pine*. Por exigência da *National Grading Rule*, todas as regras de classificação visual para a madeira de coníferas na dimensão de caibros e pranchas devem ser baseadas nos procedimentos descritos na norma ASTM D245. Sendo que o *Southern Pine Inspection Bureau* é o órgão responsável por escrever regras de classificação visual para *Southern Pine*, bem como oferecer treinamento a classificadores e inspecionar as serrarias associadas a ele.

A norma *National Grading Rule* fixa os valores da razão de resistência à flexão para cada classe, e a partir das equações dadas na norma ASTM D-245, e reproduzidas no anexo A, determina-se o limite permissível para os nós em cada classe. A razão de resistência à flexão é uma relação hipotética entre o MOR de uma peça de madeira com características de crescimento visíveis, e que reduzem a sua resistência, e o MOR de uma peça isenta de defeitos da mesma madeira. Com relação aos nós, deve-se medir os de maior diâmetro, posicionados na face estreita, no centro da face larga e na borda da face larga, sendo que para ser considerado na borda da face larga, a distância do centro do nó à borda da peça deve ser menor ou igual a $2/3$ (dois terços) de seu diâmetro. Com relação à inclinação de fibras, esta deve ser medida nas quatro faces da peça, tomando-se a maior inclinação observada e desconsiderando-se as inclinações associadas com nós.

No sistema de classificação visual, uma classe é descrita pelo seu nível de qualidade visual (SS, N°1, N° 2 e N° 3) seguida da densidade da madeira (D e ND).

Exemplificando, a classe SS-ND, indica uma madeira com qualidade visual *Select Structural* e com densidade não-densa. A densidade é medida pelo número de anéis de crescimento medidos em uma linha radial representativa de 2,5cm (1”).

A determinação das propriedades de resistência para uma determinada espécie com base na resistência de pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos apresenta inconvenientes com relação à distribuição de frequências e ao modo de ruptura. Há uma tendência mundial de se determinarem as propriedades de resistência por meio de testes com elementos de dimensões estruturais. Nesta nova filosofia, os valores característicos de resistência para cada classe de uma determinada espécie são fixados à partir de testes com elemento estruturais, sendo que tais testes devem refletir as condições finais de aplicação destes elementos.

Os métodos de classificação mecânica MSR e MEL utilizam o MOE como estimador do MOR. A classificação pelo sistema *E-rated* não pode ser considerada como classificação por tensões, pois ela é baseada somente na medida do MOE, não sendo feitos testes destrutivos para correlacionar o MOE com o MOR. Este sistema foi desenvolvido pela indústria de Madeira Laminada Colada.

Analisando a tabela 74 do apêndice A, observa-se que o limite da seção transversal ocupado pelo nó é praticamente constante para cada classe, independentemente da seção transversal da peça. Esta constatação traz simplificações no sistema de classificação visual, permitindo que os nós sejam limitados em função da proporção da área da seção transversal ocupada na peça. Desta forma tem-se:

Tabela 62 – Limitação da dimensão dos nós em função da proporção da área da seção transversal ocupada.

Características	Classe			
	Select Structural	Nº 1	Nº 2	Nº 3
Inclinação de fibras	1:12	1:10	1:8	1:4
Nós	Borda da face larga	1/5	1/4	1/3
	Centro da face larga	2/5	1/2	3/5
	Face estreita	1/5	1/4	1/3

A classificação visual estrutural das pranchas de *Pinus Sp* mostrou-se como um método barato e eficaz, considerando-se o volume de madeira classificada, em torno de 7m³, em apenas dois dias e empregando duas pessoas, sendo uma classificando e outra empilhando as peças, ambas sem prática nos procedimentos de classificação.

Para o lote avaliado neste trabalho, os valores característicos encontrados para o MOR e para o MOE em relação ao eixo de maior inércia de peças estruturais das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* agrupadas são dados na tabela 63. Para efeito de comparação, esta tabela também apresenta os valores estabelecidos pelo SPIB.

Tabela 63 – Propriedades mecânicas de peças estruturais de *Pinus taeda* e *elliottii* agrupados, e com dimensões nominais de 3,5cm x 12,5 cm.

Classe	Amostra em estudo		<i>Southern Pine</i> Norte Americano	
	MOR _k (MPa)	MOE _m (MPa)	MOR _k (MPa)	MOE _m (MPa)
Nº2-ND	21,9	7608	19,9	9520
Nº2-D	28,7	9182	25,0	11560
SS-ND	79,5	9899	40,6	11560
SS-D	107,6	14303	46,6	12920

Pode ser notada uma grande proximidade entre valores do MOR para as classes Nº2-ND e Nº2-D do lote avaliado e os fornecidos pelo *Southern Pine* norte-americano e a amostra em estudo, a grande diferença encontrada para as classes SS-ND e SS-D muito provavelmente se deve a presença de grande quantidade de madeira de alta densidade no lote, tendo peças com mais da metade da seção transversal contendo madeira de inverno, conforme mostrado na figura 109. Os valores obtidos para o MOE médio em relação o eixo de maior inércia para as quatro classes em estudo são próximos aos valores tabelados para o *Southern Pine* norte-americano. Assim, pode-se sugerir, a princípio, a utilização das propriedades mecânicas tabeladas para o *Southern Pine* norte-americano como indicadores das propriedades mecânicas de peças estruturais da espécie *Pinus* proveniente de florestas plantadas no Brasil.



Figura 109 – Peças de madeira com elevada densidade

Os valores médios do MOE medido nos testes e flexão estática em relação ao eixo de maior inércia para as quatro classes (N°2-ND, N°2-D, SS-ND, e SS-D) foram significativamente diferentes do MOE medido em relação ao eixo de menor inércia. Sendo que o MOE em relação ao eixo de menor inércia foi maior que o MOE em relação ao eixo de maior inércia em todas as classes. Dividindo-se o MOE em relação ao eixo de menor inércia pelo MOE em relação ao eixo de maior inércia obteve-se um coeficiente de ajuste médio de 1,19.

As classes N°2-D e SS-ND apresentaram valores equivalentes do MOE medido em relação ao eixo de maior inércia.

As quatro classes em estudo apresentaram diferenças significativas no MOR medido em relação ao eixo de maior inércia. Observou-se diferença da ordem de 275% nos valores característicos do MOR entre os grupos SS e N°2, ilustrando a necessidade de classificar a madeira de coníferas provenientes de florestas plantadas e destinadas a aplicações estruturais.

Os resultados dos testes de compressão paralela à fibra em corpos-de-prova revelam que existe diferença significativa entre os valores médios de f_{co} das classes N°2-D e SS-D. Este fato comprova a constatação da classe SS-D apresentar madeira de elevada densidade, sendo superior à densidade da classe N°2-D. A amostra coletada enquadra-se na classe C25 da norma NBR7190-97, considerando-se o valor característico de f_{co} .

A densidade média dos corpos-de-prova foi de 0,52 g/cm³, sendo inferior aos valores encontrado por SIMPSON & TENWOLDE (1999), que obtiveram uma densidade média de 0,61 g/cm³ para o *Pinus elliottii* e 0,54 g/cm³ para o *Pinus taeda*.

Observou-se que as classes SS-ND e SS-D apresentam valores de MOR muito acima dos valores do *Southern Pine*. Entretanto, a densidade da classe SS-ND é estatisticamente equivalente à densidade da classe N°2-ND que apresenta MOR coerente com o MOR do grupo *Southern Pine*. Teoricamente, a única diferença entre as classes é a presença de defeitos na classe N°2-ND. Portanto, conclui-se que para o MOR a presença de defeitos é muito mais significativa na redução da resistência do que a baixa densidade. Conclui-se também que a classe SS-ND apresenta valores de densidades coerentes. Como nesta classe praticamente não há presença de defeitos, a

probabilidade de haver erros na classificação é muito pequena, portanto, provavelmente a madeira em estudo, estando sem defeitos, apresentará valores de MOR superiores aos valores tabelados para o grupo *Southern Pine*.

Com relação às correlações entre as propriedades mecânicas e físicas para as espécies analisadas, a tabela 64 apresenta um resumo das equações de correlação entre propriedades mecânicas e físicas para as espécies amostradas.

Tabela 64 – Equações de correlação entre propriedades mecânicas e físicas para a amostra coletada.

Propriedades	Equação	R ²
MOE _{MSR} x MOE _{estático}	$MOE_{MSR} (MPa) = 2,71828^{[0,5972 \cdot MOE (MPa)^{0,225} + 4,391]}$	92,5
MOE _{vibr.-transv.} x MOE _{estático}	$MOE_{vibr.-transv.} (MPa) = 0,9972 \cdot MOE (MPa) + 387,88$	98,1
MOE _{maior inércia} x MOR	$MOR (MPa) = 0,01419 \cdot MOE (MPa) - 41,22$	64,8
MOE _{menor inércia} x MOR	$MOR (MPa) = 0,00767 \cdot MOE (MPa) + 14,71$	29,8
E _{co} x f _{co}	$f_{co} (MPa) = 0,00200 \cdot E_{co} (MPa) + 18,66$	73,3
ρ _{ap12%} x f _{co}	$f_{co} (MPa) = 94,060 \cdot \rho_{ap12\%} (g / cm^3) - 8,444$	77,4
ρ _{ap12%} x E _{co}	$E_{co} (MPa) = 27274,6 \cdot \rho_{ap12\%} (g / cm^3) - 4167,74$	47,4

O diagrama de dispersão para os dados reais do MOE_{estático} e do MOE_{MSR} revela o aumento na dispersão dos pontos com o aumento da magnitude do MOE_{estático}, ou seja, a variância não permanece constante ao longo da reta de regressão. Acredita-se que a máquina MSR não esteja conseguindo manter a força constante para peças com grande rigidez, e tal oscilação na força aplicada estaria causando a heterogeneidade da variância. Em função da transformação inversa para representar os dados originais, a equação de correlação obtida para o MOE_{estático} e o MOE_{MSR} é de difícil aplicação prática.

A técnica de vibração transversal apresentou-se como um método expedito e de elevada confiabilidade para a estimativa do MOE, visto que o valor do coeficiente angular da reta de regressão (β) é muito próximo de 1,0. Observa-se que o coeficiente de determinação (R²) obtido com o equipamento de vibração transversal (0,981). Observa-se também que o equipamento de vibração transversal apresentou menor variabilidade na estimativa do MOE do que a máquina MSR.

A densidade a 12% de umidade apresentou-se como um bom estimador da resistência à compressão em corpos-de-prova isentos de defeitos, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,774.

A regressão entre o MOE medido em relação ao eixo de menor inércia e o MOR em relação ao eixo de maior inércia apresentou uma fraca correlação, com coeficiente de determinação igual a 0,298.

7 ANEXO A – CRITÉRIOS PARA A LIMITAÇÃO DOS DEFEITOS

7.1 Inclinação das fibras

A tabela 65, extraída da norma ASTM D245-93, fornece as razões de resistência para as várias inclinações de fibras.

Tabela 65- Razão de resistência associada com a inclinação das fibras

Inclinação das fibras	Razão de resistência máxima, %	
	Flexão ou tração paralela às fibras	Compressão paralela às fibras
1:6	40	56
1:8	53	66
1:10	61	74
1:12	69	82
1:14	74	87
1:15	76	100
1:16	80	"
1:18	85	"
1:20	100	"

Fonte: ASTM D245-93

Considerando as razões de resistência dadas na *National Grading Rule* para cada classe chega-se a seguinte tabela, com a máxima inclinação permitida para as fibras em cada classe.

Tabela 66 - Máxima inclinação das fibras em cada classe.

Classe	Inclinação das fibras
SS^a	1:12
Nº 1	1:10
Nº 2	1:8
Nº 3	1:4

^a SS é *Select Structural*

7.2 Nós

As seguintes equações retiradas da norma ASTM D245-93 limitam a dimensão dos nós em função da razão de resistência à flexão dada pela *National Grading Rule*.

Sendo:

b = largura da face estreita, cm;

h = largura da face larga, cm;

k = dimensão do nó, cm;

w = comprimento da fissura na face estreita, cm;

l = comprimento da fissura na face larga, cm;

SR = razão de resistência, %.

7.2.1 Nó na face estreita.

Limitações	Fórmula	
$SR \geq 45\% ; b \geq 152\text{mm}$	$SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{\sqrt{6 \cdot (b + 1,27)}} \right]$	(A1)
$SR \geq 45\% ; b < 152\text{mm}$	$SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{b + 0,953} \right]$	(A2)
$SR < 45\%$	$SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{b} \right]$	(A3)

As regras de classificação visual do SPIB adotam um critério diferente da norma ASTM D245-93 para a limitação dos nós na face estreita das peças. De acordo com este critério os nós são limitados pela proporção da área da seção transversal ocupada na peça. A tabela 67 apresenta esta limitação.

Tabela 67 – Máxima proporção permissível para os nós na face estreita.

Classe	Proporção da área da seção transversal
SS ^a	1/6
Nº 1	1/4
Nº 2	1/3
Nº 3	1/2

^a SS é *Select Structural*

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

7.2.2 Nó no centro da face larga

Limitações	Fórmula	
$SR \geq 45\% ;$		
$152\text{mm} \leq h \leq 305\text{mm}$	$SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{h + 1,27} \right]$	(A4)
$h < 152\text{mm}$	$SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{h + 0,953} \right]$	(A5)

$$h \geq 152\text{mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{\sqrt{12 \cdot (h + 1,27)}} \right] \quad (\text{A6})$$

SR < 45% ;

$$h \leq 305\text{mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{h} \right] \quad (\text{A7})$$

$$h \geq 305\text{mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{\sqrt{12 \cdot h}} \right] \quad (\text{A8})$$

7.2.3 Nó na borda da face larga.

Limitações

Fórmula

SR \geq 45% ;

$$152\text{mm} \leq h \leq 305\text{mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{h + 1,27} \right]^2 \quad (\text{A9})$$

$$h \leq 152\text{mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{h + 0,953} \right]^2 \quad (\text{A10})$$

$$h \geq 305\text{mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{\sqrt{12 \cdot (h + 1,27)}} \right]^2 \quad (\text{A11})$$

SR < 45% ;

$$h \leq 305\text{mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{h} \right]^2 \quad (\text{A12})$$

$$h \geq 305\text{mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{\sqrt{12 \cdot h}} \right]^2 \quad (\text{A13})$$

7.3 Fendas e Rachas

A tabela 68 apresenta as limitações no comprimento das rachas e fendas.

Tabela 68 - Limitações para rachas e fendas.

Defeitos	Tipo	Select Structural	Nº 1	Nº 2	Nº 3
Racha	atravessa a peça em espessura	igual à fenda	igual à fenda	igual à fenda	igual à fenda
	superficial	até 60 cm	até 60 cm	90cm ou 1/4 do comprimento, o que for maior	sem limitações
Fenda		1 vez largura	1 vez largura	1,5 vez a largura da peça	1/6 do comprimento da peça
Fendilhado		Sem limites			

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

7.4 Empenamento

7.4.1 Encurvamento

A tabela 69 apresenta o encurvamento máximo permissível para peças com espessura de 38mm.

Tabela 69 – Encurvamento permissível para peças com espessura de 38mm.

Comprimento (m)	Encurvamento permissível em cada classe (mm)			
	SS	Nº 1	Nº 2	Nº 3
1,8	-	10	13	19
2,4	-	13	19	25
3,1	-	35	38	70
3,7	-	38	50	76
4,3	-	50	63	102
4,9	-	63	83	127
5,5	-	76	102	152
6,1	-	86	114	171

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

7.4.2 Encanoamento

A tabela 70 apresenta o encanoamento máximo permissível em cada classe.

Tabela 70 – Encanoamento máximo admitido em cada classe.

Face larga (mm)	Encurvamento permissível em cada classe (mm)		
	Nº 1	Nº 2	Nº 3
38 e 64	-	-	-
89	-	-	16
114 e 140	16	16	32
184	24	32	48
235	32	48	64
286	48	64	95

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

7.4.3 Arqueamento

A tabela 71 apresenta as limitações no arqueamento para cada classe.

Tabela 71 - Arqueamento permissível em cada classe.

Comprimento (m)	Classe	Arqueamento permissível em cada classe (mm)					
		38 x 64	38 x 89	38 x 140	38 x 184	38 x 235	38 x 286
1,8	Nº 1	5	5	3	2	2	2
	Nº 2	6	6	5	3	2	2
	Nº 3	10	10	6	5	3	3
2,4	Nº 1	6	6	6	5	3	2
	Nº 2	10	10	8	6	5	3
	Nº 3	13	13	13	10	6	5
3,1	Nº 1	13	10	8	6	6	5
	Nº 2	16	13	11	10	6	5
	Nº 3	25	19	16	13	11	10
3,7	Nº 1	14	13	11	10	10	3
	Nº 2	19	16	16	13	11	4
	Nº 3	29	25	22	21	19	6
4,3	Nº 1	19	16	14	13	11	10
	Nº 2	25	22	19	16	13	10
	Nº 3	38	32	29	25	22	19
4,9	Nº 1	24	19	17	14	13	11
	Nº 2	32	25	22	19	16	13
	Nº 3	48	38	35	29	25	22
5,5	Nº 1	26	21	19	16	14	13
	Nº 2	35	29	25	22	19	16
	Nº 3	52	41	38	32	29	25
6,1	Nº 1	29	26	24	19	17	14
	Nº 2	38	35	32	25	22	19
	Nº 3	57	52	48	38	33	29

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

7.4.4 Torcimento

A tabela 72 mostra os valores máximos permissíveis para o torcimento em cada classe.

Tabela 72 – Torcimento permissível em cada classe

Comprimento (m)	Classe	Torcimento permissível em cada classe (mm)					
		38 x 64	38 x 89	38 x 140	38 x 184	38 x 235	38 x 286
1,8	Nº 1	6	6	10	14	17	21
	Nº 2	10	10	13	19	22	29
	Nº 3	13	13	19	29	35	41
2,4	Nº 1	10	10	14	19	24	29
	Nº 2	13	13	19	25	32	38
	Nº 3	19	19	29	38	48	57
3,1	Nº 1	11	11	18	24	30	35
	Nº 2	16	16	22	32	38	48
	Nº 3	22	22	35	48	60	70
3,7	Nº 1	14	14	21	29	35	43
	Nº 2	19	19	29	38	48	57
	Nº 3	29	29	41	57	70	86
4,3	Nº 1	16	16	24	33	41	49
	Nº 2	22	22	32	44	54	67
	Nº 3	32	32	48	67	89	98
4,9	Nº 1	19	19	29	38	48	57
	Nº 2	25	25	38	51	64	76
	Nº 3	38	38	57	76	95	114
5,5	Nº 1	21	21	32	43	54	64
	Nº 2	29	29	41	57	70	86
	Nº 3	41	41	64	86	108	127
6,1	Nº 1	24	24	35	48	33	46
	Nº 2	32	32	48	64	79	95
	Nº 3	48	48	70	95	117	143

Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

8 ANEXO B – Códigos de ruptura utilizados nos testes de flexão estática e compressão paralela.

8.1 Flexão estática

Para a caracterização do modo de ruptura nos testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia, foram usados os códigos de ruptura dados na norma ASTM D4761-96.

O modo de ruptura de um espécime foi caracterizado pela causa da ruptura, por um código descrevendo as dimensões dos defeitos envolvidos na ruptura, bem como do modo de ruptura propriamente dito.

Causa

As peças romperam devido à inclinação de fibras ou à presença de nós. No caso de ruptura limpa, ou seja, sem a presença de defeitos foi marcado um traço (-) no campo causa. Nos casos em que a ruptura foi associada à inclinação de fibras foi marcado I.F. no campo causa e nos casos em que a ruptura esteve associada a um nó, ou a um conjunto destes, foi marcado nó-aa, sendo que aa indica o tipo do nó, conforme mostra a figura 110.

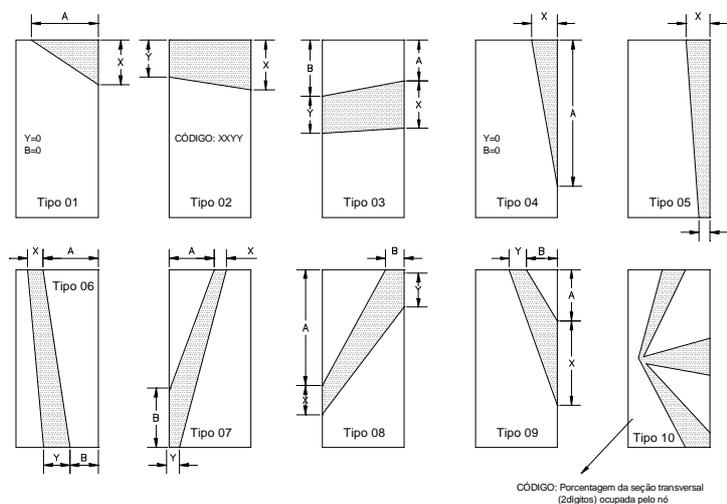


Figura 110 – Tipos de nós e medições para descrição do código

Código

O código que identifica as dimensões dos nós foi marcado com 8 dígitos, na forma “XXYYAABB”, de acordo com as dimensões dos nós, dadas na figura 110. Para o caso de inclinação de fibras o código anotado foi 1:S, sendo “S” o comprimento medido paralelo ao comprimento das peças para 1 centímetro de desvio das fibras.

Tipo de Ruptura

Neste campo foi anotado o modo de ruptura propriamente dito e para isto foi utilizada a codificação dada na tabela 73.

Tabela 73 – Tipo de ruptura.

Tipo de ruptura	Código
Ruptura na face tracionada	0
Ruptura na face comprimida	1
Ruptura combinada de tração e compressão	2
Perda de estabilidade lateral	3
Cisalhamento	4
Deslizamento na garra (somente para testes de tração)	5
Ruptura na borda da garra (somente para testes de tração)	6

Fotos dos testes

As figuras a seguir apresentam algumas fotos dos testes de flexão estática em relação ao eixo de maior inércia das peças.



Figura 111 – Ruptura por tração.



Figura 112 – Detalhe da ruptura.



Figura 113 – Ruptura por tração no nó.



Figura 114 – Ruptura frágil por tração.



Figura 115 – Ruptura por cisalhamento.



Figura 116 – Ruptura devido à inclinação de fibras.



Figura 117 – Ruptura por compressão (esmagamento de fibras).



Figura 118 – Detalhe do esmagamento das fibras.

8.2 Compressão paralela

Para a caracterização a caracterização da ruptura dos corpos-de-prova na compressão paralela às fibras, foi empregado um código numérico (um algarismo) para descrever o tipo da ruptura. As figuras 119 a 126 apresentam os oito modos de ruptura observados nos testes de compressão paralela à fibras.



Figura 119 – Modo de ruptura 1.



Figura 120 – Modo de ruptura 2.



Figura 121 – Modo de ruptura 3.



Figura 122 – Modo de ruptura 4.



Figura 123 – Modo de ruptura 5.



Figura 124 – Modo de ruptura 6.



Figura 125 – Modo de ruptura 7.



Figura 126 – Modo de ruptura 8.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITC 117 Manufacturing – 2001. *Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber of Softwood Species Manufacturing Requirements*. Englewood, CO.

AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION (1997). *Supplement. National Design Specification for Wood Construction (NDS)*. 58 p.

ANSI/AITC A190.1-92. *American National Standards for Wood Products – Structural Glued Laminated Timber*. Englewood, CO.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE MADEIRA (1990). *TB 397-90. Madeira Serrada de Coníferas Provenientes de Reflorestamento, Para Uso Geral - Terminologia*. Curitiba, PR.

ASTM (1998). West Conshohoken, PA: American Society of Testing and Materials.

ASTM D9 – 81. *Standard Definitions of Terms Relating to Wood*. .

ASTM D143 – 94. *Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber*.

ASTM D198-97. *Standard Methods of Static Test of Timber in Structural Sizes*.

ASTM D245-93. *Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*.

ASTM D1990-97. *Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Visually Graded Dimension Lumber From In-Grade Test of Full-Size Specimens.*

ASTM D2555-96. *Standard Test Methods for Establishing Clear Wood Strength Values.*

ASTM D2915-94. *Standard Practice for Evaluating Allowable Properties for Grades of Structural Lumber.*

ASTM D3737-96. *Standard Practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber.*

ASTM D4761-96. *Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material.*

BALLARIN, A. W. ; PALMA, H. A. L. (2002). *Propriedades de Resistência e Rigidez da Madeira Juvenil e Adulta de Pinus taeda L.* Revista Árvore. Universidade Federal de Viçosa. /No prelo/

BOX, G. E. P. ; COX, D. R. (1964). *An Analysis of Transformations.* In: Journal of the Royal Statistical Society. p 211-243.

BREYER, D.E.; FRIDLEY, K. J.; COBEEN, K. E. (1998). *Design of Wood Structures.* Fourth Edition. McGraw Hill, New York. NY.

CURRY, W.T. (1969). *Mechanical Stress Grading of Timber.* Timber Papers N° 18, Forest Products Research Laboratory, in: Conference on Non-Destructive Testing of Concrete and Timber, London.

DOYLE, D.V. ; MARKWARDT, L. J. (1966). *Properties of Southern Pine in Relation to Strength Grading of Dimension Lumber.* Research Paper FLP 64, Forest Products Laboratory.

DOYLE, D.V. ; MARKWARDT, L. J. (1967). *Tension Parallel-to-Grain Properties of Southern Pine Dimension Lumber*. Research Paper FLP 84, Forest Products Laboratory.

FALK, R. (1997). *Design and Performance Aspects of United States and European Glulam*. In Proceedings of the Conference on Research Standardization Applications. Technical University Graz, Austria.

FREAS, A. D.; SELBO M. R. (1954). *Fabrication and Design of Glued Laminated Wood Structural Members*. Technical Bulletin N° 1069, US. Department of Agriculture.

FURIATTI, M. (1981). *Classificação Estrutural de Peças de Madeira*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.

GALLIGAN, L. W. ; MCDONALD, K. A. (2000). *Machine grading of lumber – Practical concerns for lumber producers*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-7 USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison, WI.39 p.

GALLIGAN, W.L. ; SNODGRASS, D. V. (1970). *Machine stress-rated lumber: Challenge to design*, in: Proceedings, American Society of Civil Engineering. Journal of Structural Division.

GREEN, D. W. (1998). Techline - *Strength of Visually Graded Structural Lumber*. Was., D.C., FPL – FS – USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison.

GREEN, D. W. ; EVANS J. W. (1987). *Mechanical Properties of Visually Graded Lumber: Volume1*, A Summary. U.S Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin.

GREEN, D. W. ; HERNANDEZ, R. (1998). *Codes and standards for structural wood products and their use in the United States*. In: Proceedings of the Forest Products Study Group Workshop. Mérida, Yucatán, México.

GREEN, D. W. ; KRETSCHMANN, D.E. (1987). *Properties and Grading of Southern Pine Timbers*. Forest Products Journal Volume 47, Nº 9.

GREEN, D. W. ; KRETSCHMANN, D.E. (1999). *Wood handbook—Wood as an engineering material - Chapter 6 - Lumber Stress Grades and Design Properties*. Was., D.C., FPL – FS – USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison.

GREEN, D. W. ; KRETSCHMANN, D.E. (1990). *Lumber Property Relationship for engineering Design Standards*. Was., D.C., FPL – FS – USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison.

GREEN, D. W. ; ROSS, R. J.; MCDONALD, K. A. (1993). *Production of hardwood machine stress rated lumber*. In: Proceedings, 9th international symposium on nondestructive testing of wood. Madison, WI, Forest Products Society, p 141-150.

GREEN, D. W. ; WINANDY, J. E. ; KRETSCHMANN, D. E. (1999). *Wood handbook-Wood as an engineering material – Chapter 4 – Mechanical Properties of Wood*. Was., D.C., FPL – FS – USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison.

HERNANDEZ, R. ; MOODY, R. C. (1996). *Analisis of Glulam Timber Beams with Mechanically Graded (E-rated) Outer Laminations*. in: Proceedings of the international wood engineering conference, New Orleans, LA.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1986). *Regras NHLA Para Medição e Classificação de Madeiras Duras Serradas*. Tradução de FREITAS, A. R. São Paulo, SP.

JAYNE, B.A. (1959). *Vibrational properties of wood as indices of quality*. Forest Products Journal. 9(11):

LOO, J. A. ; TAUER, C. C.; McNEW, R.N. (1985). *Genetic variation in the time of transition from juvenile to mature wood in loblolly pine (Pinus taeda)*. *Silvae Genet*, n34, p.14-19.

MADSEN, B. (1992). *Structural Behaviour of Timber*. Timber Engineering Ltd. Vancouver, Canadá.

MARTINEZ, M. (2000). *Determinação do valor característico da resistência da madeira: Distribuições de probabilidade simétricas e assimétricas*. VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, São Carlos, SP.

MELO, J. M. (1984). *Classificação Mecânica de Peças Estruturais de Madeira*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.

MOODY, R. C. (1977). *Improved Utilization of Lumber in Glued Laminated Beams*. Research paper FPL 292, Forest Products Laboratory, Madison, WI.

NICHOL, K. (2002). *The Art of Lumber Grading*. <http://www.kalesnikoff.ca/kevin/sites/grading/toc.html>. (28/06/2002).

NBR 7190 (1997). *Projeto de Estruturas de Madeira*. Rio de Janeiro, ABNT.

OKIMOTO, F. S. ; PFISTER, G. M. ; CALIL, C. (1995). *Classificação visual e mecânica de madeiras estruturais*. Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 5. Anais. Belo Horizonte : UFMG, 1995.

PIGOZZO, J. C. ; PLETZ, E. ; ROCCO LAHR, F. A. (2000). *Aspectos da classificação mecânica de peças estruturais de madeira*. VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, São Carlos, SP.

PLESSEY TELECOMMUNICATIONS. (1973). *Computermatic MK PIVa Timber Stress Grading Machine*. New Sould Wates, Austrália.

PS 20 (1999). *American Softwood Lumber Standard*. National Institute of Standards and Technology, Washington, DC. 39p.

ROSS, J. R. ; PELLERIN, R. F. (1994). *Nondestructive testing for assessing wood members in structures*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70 USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison, WI.42 p.

SHAPIRO, S. S. ; WILK, M. B. (1965). *An analysis of variance test for normality (complete samples)*. Biometrika, 52, 3 e 4, p. 591-611.

SIMPSON, W. ; TENWOLDE, A. (1999). *Wood handbook—Wood as an engineering material - Chapter 3 – Physical Properties and Moisture Relations of Wood*. Was., D.C., FPL – FS – USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison.

SOLTIS, L. A. (1999). *Wood handbook—Wood as an engineering material - Chapter 8 – Structural Analysis Equations*. Was., D.C., FPL – FS – USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison.

SOUTHERN PINE COUNCIL (1999). *Southern Pine Use Guide*. Southern Forest Products Association, Kenner, LA.

SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994). *Standard Grading Rules for Southern Pine Lumber*. Pensacola, Fla.

SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1999). *Graders Manual for Boards and 2” Dimension*. Pensacola, Fla.

SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (2001). *Procedures for Mechanically graded lumber*. Pensacola, Fla.

STANALKER, J.J.; HARRIS, E.C. (1989). *Structural Design in Wood*, New York, N.Y.

TUKEY, J. (1977). *Exploratory Data Analysis*, Addison-Wesley.

ZIEGLER, G. (1997). *Machine grading process for softwood lumber*. Wood Design Focus. 8(2): 7-4.

ZOBEL, B. J. (1980). *Inherent differences affecting wood quality in fast-grown plantations*. In: IUFRO CONFERENCE, Oxford.Proceedings...Oxford:IUFRO Div 50, p169-188.

10 APÊNCICE A – EXEMPLO DE REGRAS DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL ESTRUTURAL PARA MADEIRA DE CONÍFERAS

Tabela 74 – Exemplo de regras de classificação visual para madeira de coníferas.

Características		Select Structural				Nº 1				Nº 2				Nº 3				
Inclinação de fibras		1:12				1:10				1:8				1:4				
Nós	Seção transversal		Borda da face larga	Centro da face larga	Face estreita		Borda da face larga	Centro da face larga	Face estreita		Borda da face larga	Centro da face larga	Face estreita		Borda da face larga	Centro da face larga	Face estreita	
	b (cm)	h (cm)			D (cm)	L (cm)			D (cm)	L (cm)			D (cm)	L (cm)			D (cm)	L (cm)
Nós	2,54	7,5	2	3	1	6	2	4	2	6	3	5	2	6	4	6	2	= largura
		10,0	2	4		8	3	5		7	4	6		8	8	8		
		12,5	3	5		10	4	6		9	5	8		10	6	9		
		15,2	3	6		12	4	8		11	6	9		13	8	11		
		20,0	4	8		16	6	10		15	7	12		17	10	15		
	3,2	7,5	2	3	2	6	2	4	2	6	3	5	2	7	4	6	3	
		10,0	2	4		8	3	5		8	4	6		9	8	8		
		12,5	3	5		10	4	6		10	5	8		11	6	9		
		15,2	3	6		12	4	8		12	6	9		13	8	11		
		20,0	4	8		16	6	10		16	7	12		18	10	15		
	3,5	12,5	3	5	2	10	4	6	2	10	5	8	3	11	6	9	3	
		18,0	4	7		15	5	9		15	6	11		16	9	13		
	3,8	7,5	2	3	2	6	2	4	2	3	3	5	3	7	4	6	3	
		10,0	2	4		8	3	5		4	4	6		9	8	8		
		12,5	3	5		11	4	6		5	5	8		12	6	9		
		15,2	3	6		13	4	8		6	6	9		14	8	11		
		20,0	4	8		17	6	10		8	7	12		19	10	15		
	4,0	8,0	2	3	2	7	2	4	2	7	3	5	3	8	4	6	3	
	4,5	12,0	3	5	2	11	4	6	3	5	4	7	3	11	6	9	3	
		14,5	3	6		13	4	7		6	5	9		14	7	11		
4,8	15,0	3	6	2	14	4	7	3	13	5	9	3	14	8	11	4		

11 APENDICE B - INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DE CRESCIMENTO NA RESISTÊNCIA.

11.1 Nós

Os nós causam desvios localizados nas fibras com inclinações excessivas. A figura 127 ilustra o efeito do enfraquecimento da madeira devido a presença do nó.

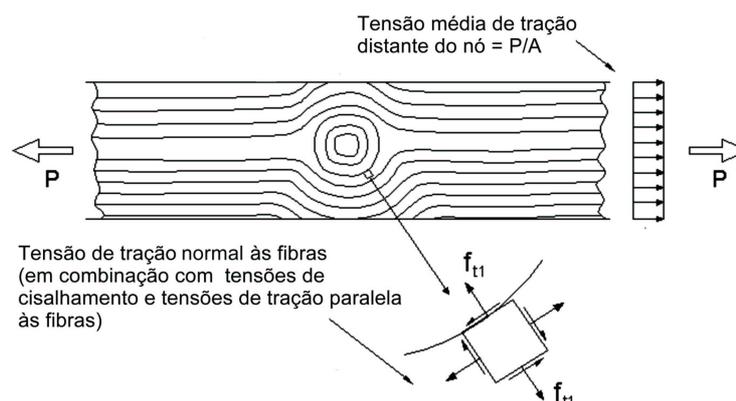


Figura 127 - Efeito do nó na resistência da madeira.

Fonte: STANALKER & HARRIS (1989)

A direção das fibras é severamente alterada em torno do nó. Conforme STANALKER & HARRIS (1989), nesta região as cargas aplicadas causam tensão de tração normal às fibras da madeira. Como a resistência à tração normal da madeira é muito baixa, o enfraquecimento devido ao nó torna-se bastante significativo.

Ainda de acordo com STANALKER & HARRIS (1989), em geral, o efeito dos nós na resistência da madeira é maior na resistência à tração do que na resistência a compressão; na flexão o defeito depende em qual face da viga o nó se encontra (tracionada ou comprimida). Nas peças tracionadas, os nós presentes na linha central da face larga tem menor efeito que os nós na borda da mesma face. Isso ocorre porque os nós ao longo da borda de um elemento causam uma excentricidade

que induz a tensões de flexão, e desta forma eles devem ser mais restritivos que os nós de centro.

Os nós firmes resistem a alguns tipos de sollicitação, porém os nós soltos não resistem ou não transmitem nenhuma tensão.

A zona de fibras inclinadas em torno do nó tem menor rigidez na direção paralela ao comprimento da peça que as zonas de fibras retas. Assim, áreas localizadas de baixa rigidez são mais frequentemente associadas com os nós. Entretanto, tais zonas geralmente constituem somente a menor parte do volume total de uma peça de madeira. Como a rigidez de uma peça reflete a característica de todas as partes, a rigidez não é muito influenciada pelos nós.

A presença de um nó tem maior efeito nas propriedades de resistência do que nas propriedades de rigidez. De maneira aproximada, a magnitude do efeito nas propriedades de resistência depende dos seguintes fatores: da proporção da seção transversal da peça de madeira ocupada pelo nó; da localização do nó e da distribuição de tensões na peça, STANALKER & HARRIS (1989).

Os limites nas dimensões dos nós são, desta forma, estabelecidos em relação a proporção da seção transversal ocupada pelo nó. Os elementos comprimidos são solicitados igualmente e nenhuma limitação relacionada à localização dos nós é imposta.

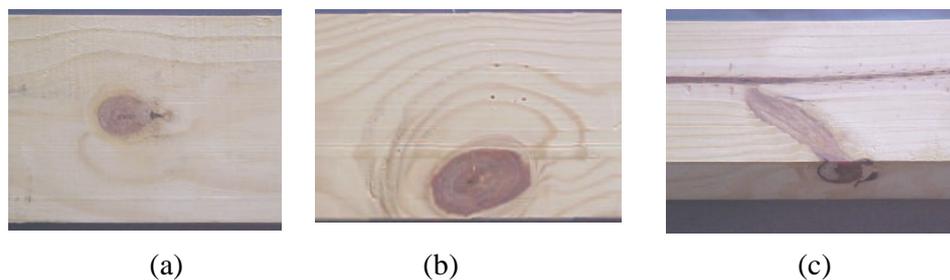


Figura 128 - Tipos de nós limitados na classificação visual: (a) centro da face larga; (b) borda da face larga e (c) face estreita.

Fonte: Autor.

11.2 Fibras cruzadas

Quando o eixo longitudinal das células não é paralelo à borda da peça, diz-se que a madeira tem fibras cruzadas. As fibras cruzadas envolvem tanto fibras espirais quanto às fibras diagonais. Quase toda madeira apresenta fibras cruzadas.



Figura 129 - Inclinação de fibras.

Fonte: NICHOL (2002).

Muitas árvores crescem em espiral. Assim, a direção e a inclinação das fibras variam ao longo do comprimento da peça de madeira. Este caso especial de fibras inclinadas é chamado de fibras em espiral. As fibras espiraladas dificultam a trabalhabilidade da madeira. Além disto, com a variação no teor de umidade, todas as superfícies planas empenam. As fibras espiraladas são comuns e são uma característica hereditária de algumas arvores.

As fibras diagonais são causadas pelo modo em que a peça de madeira é cortada do tronco, não sendo um defeito inerente à própria árvore. Entretanto, sempre há uma variação na direção das fibras (as células não são perfeitamente paralelas por todo o comprimento da peça). Assim, não é possível em uma serraria cortar a madeira de forma a eliminar completamente as fibras diagonais.

A figura 130 ilustra como as fibras inclinadas reduzem a resistência de uma peça de madeira.

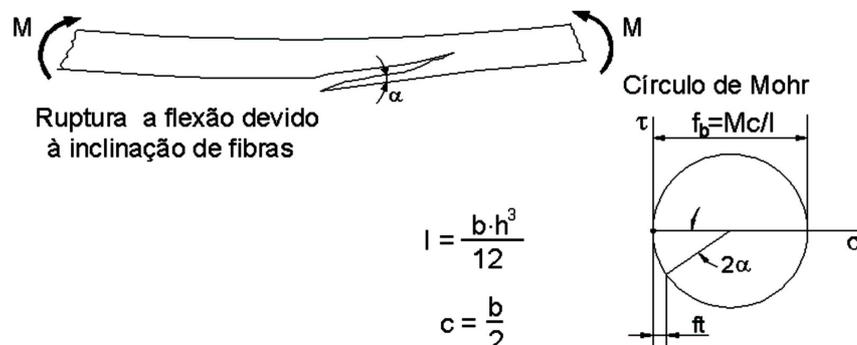


Figura 130 - Efeito das fibras inclinadas na resistência à flexão.

Fonte: STANALKER & HARRIS (1989)

Quase todas as peças de madeira contendo fibras inclinadas e submetidas à flexão rompem da maneira ilustrada na figura 130. Este tipo de ruptura ocorre porque as tensões de flexão têm uma componente normal às fibras e a resistência à tração nesta direção é muito baixa. O círculo de Mohr ilustra como uma apreciável tração normal às fibras pode ocorrer com pequenas inclinações nas fibras da madeira.

A figura 131 mostra como um elemento comprimido é enfraquecido pela presença de fibras inclinadas. Neste caso, a baixa resistência à compressão normal às fibras, ou a baixa resistência ao cisalhamento longitudinal antecipam a ruptura da peça de madeira. A resistência em um determinado ângulo com as fibras pode ser expressa pela conhecida equação de Hankinson dada abaixo.

$$f_{\alpha} = \frac{f_0 \cdot f_{90}}{f_0 \cdot \sin^2 \alpha + f_{90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (\text{B1})$$



Figura 131 - Efeito das fibras inclinadas na resistência a compressão.

Fonte: STANALKER & HARRIS (1989)

11.3 Racha anelar, fenda e fenda superficial.

A racha anelar é uma separação longitudinal do tecido lenhoso que ocorre predominantemente entre os anéis de crescimento. De acordo com STANALKER & HARRIS (1989), a racha anelar tem origem na árvore e provavelmente é causada por tensões de cisalhamento decorrentes da ação do vento na árvore.

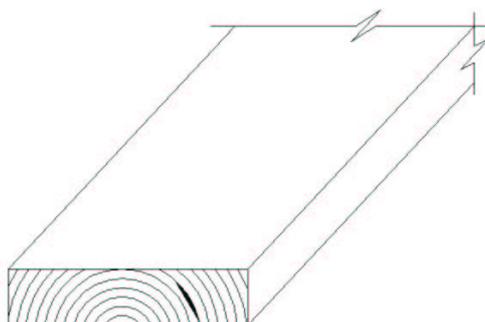


Figura 132 - Racha anelar.

Fonte: Autor.

Devido ao fato da racha anelar reduzir a resistência ao cisalhamento em elementos submetidos à flexão, as regras de classificação restringem mais severamente a dimensão da racha nas regiões onde as tensões de cisalhamento são maiores. Em elementos submetidos somente a tração ou a compressão, as rachas não afetam muito a resistência.

A fenda também é uma separação longitudinal da madeira, porém, usualmente perpendicular aos anéis de crescimento; as pequenas fendas superficiais que aparecem durante a secagem da madeira recebem a denominação de fendilhado.



Figura 133 - Fenda.

Fonte: NICHOL (2002).

As fendas ocorrem devido à secagem da madeira após o corte da árvore. Elas podem ocorrer na tora, ou em peças de madeira cortadas de uma tora. Elas ocorrem devido a tensões resultantes da variação diferencial das dimensões da peça nas direções radial e tangencial durante a secagem. Quanto mais rápida a secagem, maior são as fendas. Assim, o fendilhamento pode ser reduzido com cuidadosa atenção nos procedimentos de secagem. Os efeitos das fendas e fendas diametrais na resistência e os princípios de sua limitação são os mesmo das rachas.

11.4 Madeira comprimida

A madeira comprimida é uma forma de reação da madeira em que um padrão não simétrico de crescimento é causado pela permanência de tensões de flexão por longos períodos durante a vida da árvore. Por exemplo, uma árvore que se inclina durante o seu crescimento terá maior resistência ao momento fletor causada pelo peso próprio da árvore. As tensões de compressão devidas a esta flexão ocorrem no menor lado, e as tensões de tração devidas a flexão ocorrem no outro lado. As tensões de compressão se somam as tensões de compressão vertical (P/A) e elevadas tensões aparecem por toda a seção transversal. Estas tensões elevadas causam variação na espessura dos anéis de crescimento em um lado do tronco.

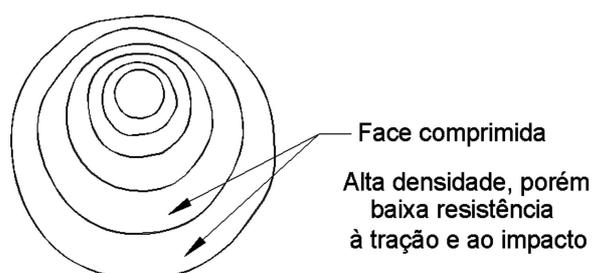


Figura 134 - Seção transversal de uma tora contendo madeira comprimida.

Fonte: STANALKER & HARRIS (1989)

A parede celular da madeira comprimida é mais espessa e a massa específica é maior que a madeira no normal. A madeira comprimida é indesejável por sofrer maior retração com a variação de umidade do que a madeira normal.

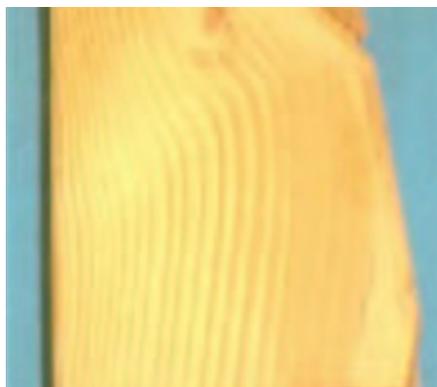


Figura 135 - Peça de madeira serrada com madeira comprimida.

Fonte: NICHOL (2002).

11.5 Madeira juvenil

A madeira juvenil é a madeira produzida próxima à medula da árvore. Segundo GREEN *et al* (1999), para as coníferas a madeira juvenil é usualmente definida como o material próximo ao 20º anel de crescimento contado a partir da medula. Ainda segundo GREEN *et al* (1999), a madeira juvenil apresenta uma diferença considerável entre as propriedades físicas e anatômicas em relação à madeira adulta. A figura 136 ilustra a variação destas propriedades ao longo de uma linha radial à partir da medula da árvore.

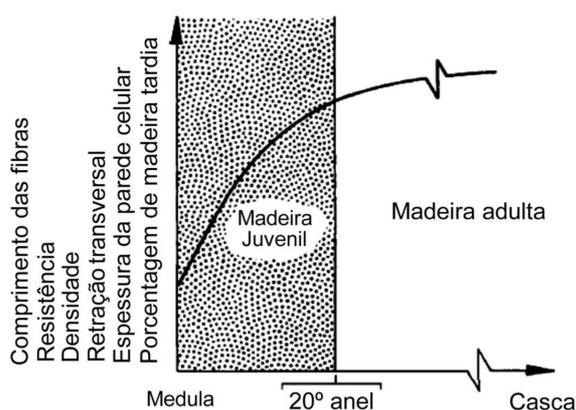


Figura 136 - Propriedades da madeira juvenil.

Fonte: GREEN *et al* (1999).

De acordo com ZOBEL (1980) *apud* BALLARIN & PALMA (2002) a transição entre madeira juvenil e madeira adulta não ocorre em um ano, mas sim em vários anos. O período de transição da madeira juvenil para a madeira adulta é variável de uma espécie para outra. LOO *et al* (1985) *apud* BALLARIN & PALMA

(2002) afirmam que esta variação medida pela variação de densidade, dura em torno de 5 a 6 anos para o *Pinus elliottii*, *Pinus caribea* e *Pinus radiata*, para o *Pinus taeda* dura em torno de 10 anos e para o *Pinus ponderosa* o período de transição dura em média 20 anos.

De acordo com BALLARIN & PALMA (2002), a madeira de transição está compreendida entre o 14º e o 18º anel de crescimento, sendo a madeira juvenil compreendida entre a medula e o 14º anel de crescimento e a madeira adulta a porção de madeira contada a partir do 18º anel de crescimento.

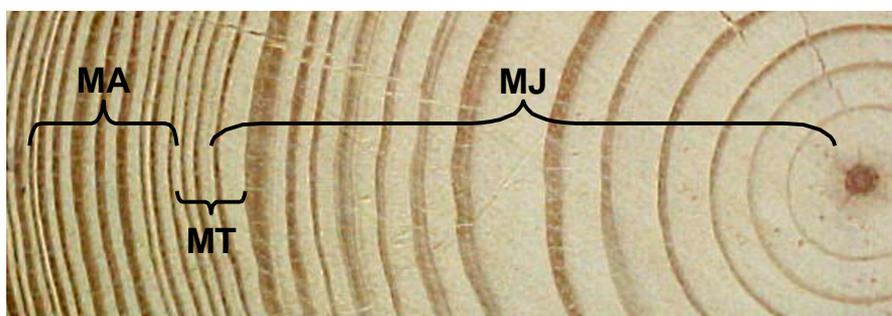


Figura 137 – Região de madeira juvenil, de transição e adulta.

Fonte: BALLARIN & PALMA (2002).

Ainda, segundo BALLARIN & PALMA (2002), as propriedades de rigidez à flexão estática são superiores e menos variáveis na madeira adulta do que na madeira juvenil. Os valores médios do MOE e do MOR são, respectivamente, 54% e 47% maiores do que aqueles observados na madeira juvenil. Além disso, os valores do MOE e do MOR apresentam uma maior dependência da densidade na madeira adulta do que na madeira juvenil.

12 APÊNDICE C - CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS PARA O EMPREGO DOS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA NA INDÚSTRIA DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Adotando os procedimentos da norma ASTM D3737-96 (*Standard Practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber*) o American Institute of Timber Construction (AITC), associação técnica de comércio que representa a maioria dos fabricantes de Madeira Laminada Colada (MLC) dos Estados Unidos, publica as normas AITC 117-2001 (*Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber of Softwood Species*) e AITC 119-96 (*Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber of Hardwood Species*) nas quais são estabelecidas as resistências de projeto para vigas e Madeira Laminada Colada produzidas com espécies de coníferas e dicotiledôneas respectivamente.

A norma americana D3737-96 aborda os procedimentos para o estabelecimento da resistência à flexão de cálculo de elementos estruturais de MLC. Esta norma envolve o conceito de multiplicar um índice de resistência (análogo à resistência de corpos-de-prova) por um fator de modificação de resistência (análogo à razão de resistência) conforme mostrado abaixo:

$$f_{m,d} = BSI_m \cdot SMF_m \quad (D1)$$

Sendo:

$f_{m,d}$ = resistência de cálculo à flexão para um elemento de MLC;

BSI_m = índice de resistência à flexão;

SMF_m = fator modificador da resistência à flexão.

A única exceção é para elementos fletidos laminados verticalmente formados de duas ou mais espécies diferentes de madeira. Neste caso as resistências de projeto são determinadas pela seguinte equação:

$$f_{byy} = \bar{E} \cdot \left(\frac{f}{E} \right) \quad (D2)$$

Sendo:

f_{byy} = resistência de cálculo para elementos laminados verticalmente formados por duas ou mais espécies de madeira;

\bar{E} = média ponderada dos valores do módulo de elasticidade das lâminas de madeira;

f / E = relação da resistência admissível pelo módulo de elasticidade de cada espécie. A menor relação deve ser usada;

f = resistência admissível de projeto para uma espécie. É obtida pela multiplicação da resistência em madeira isenta de defeitos (seção 6 desta norma) pela relação de tensão dada no item 7.2.2.1 das norma ASTM D3737 e modificando pelas condições específicas de uso dadas na seção 10 da mesma norma;

E = módulo de elasticidade correspondente a cada espécie (ASTM D 3737 item 7.5.1 e 7.5.1.1).

De acordo FALK (1997), devido ao fato da maioria dos elementos estruturais em MLC ser destinada a aplicações onde os esforços de flexão são predominantes (longarinas e tabuleiros de pontes, arcos, vigas, etc) as normas de dimensionamento dão ênfase nas propriedades de resistência e rigidez à flexão.

12.1 ÍNDICES DE RESISTÊNCIA (*Stress index*)

12.1.1 Madeira visualmente classificada

Neste caso, o termo índice de resistência se refere ao *produto da multiplicação do valor característico da resistência à flexão de corpos-de-prova isentos de defeitos da mesma madeira das lâminas da viga, pelos fatores de ajuste*

dados na seção 6 da ASTM D 3737-96. Os fatores de ajuste para madeira classificada visualmente são dados na tabela 75 abaixo.

Tabela 75 - Fatores de ajuste para resistência de corpos-de-prova isentos de defeitos.

Propriedade	Coníferas	Dicotiledôneas	Fator de correção para o teor de umidade de 12%
Flexão	0,476	0,435	1,35
Compressão paralela	0,526	0,476	1,75
Módulo de elasticidade	1,095	1,095	1,20
Cisalhamento horizontal	0,244	0,222	1,13

Fonte: ASTM D 3737-96

12.1.1.1 Resistência à flexão

A norma D 3737-96 oferece duas opções para a determinação do índice de resistência à flexão. A primeira opção é multiplicar as resistências características dadas na norma D2555-96 pelos coeficientes dados na tabela 30, multiplicando posteriormente por 0,743 para ajustar para as condições padrão de 30cm (12”) de altura, viga bi-apoiada com carregamento uniformemente distribuído e com relação vão:altura igual a 21. A segunda opção é usar os valores dados na tabela 76.

Tabela 76 - Índices de resistência à flexão em testes com grandes amostras e valores de módulo de elasticidade para madeira classificada visualmente

Grupos de Espécies	Classificação quanto à densidade de anéis	Índice de resistência a flexão		Módulo de Elasticidade	
		psi	Mpa	10 ⁺⁶ psi	Mpa
Douglas Fir-Larch	média	3000	20,7	1,9	13 100
	densa	3500	24,1	2,1	14 500
Southern Pine	leve	2000	13,8	1,5	10 300
	média	3000	20,7	1,8	12 400
	densa	3500	24,1	2,0	13 800
Hem-Fir	média	2560	17,7	1,7	11 700
	densa	3000	20,7	1,8	12 400

Fonte: ASTM D 3737-96

Como notado, a resistência determinada na classificação visual não é usada diretamente para a determinação da resistência de um elemento estrutural de MLC. A classificação visual é usada como um critério de seleção das lâminas de melhor qualidade para posiciona-las nas zonas mais solicitadas dos elementos estruturais de MLC.

12.1.1.2 Módulo de elasticidade

Neste caso a norma D3737-96 também oferece duas possibilidades para a determinação do índice para o módulo de elasticidade. Na primeira opção, o valor

médio do módulo de elasticidade dado pela D2555-96 deve ser multiplicado pelos fatores dados na tabela 75. Estes fatores ajustam os valores para uma relação vão:altura de 100:1 considerando carregamento uniforme. A segunda opção é a utilização da tabela 76. Os valores dados nesta tabela são resultado de testes em grandes amostras de madeira dos grupos de espécies listados.

12.1.2 Madeira classificada pelo sistema *E-rated*

12.1.2.1 Flexão

A norma ASTM D3737-96 estabelece que os índices de resistência à flexão devem ser determinados de acordo com os procedimentos estabelecidos por MOODY (1977). Alguns índices de resistência em função do módulo de elasticidade (relação vão:altura igual a 100) são dados na tabela 77.

Tabela 77 - Índices de resistência à flexão e compressão paralela para madeira classificada pelo sistema E-rated.

E, psi	Índice de tensão de flexão ^A , psi	Índice de tensão para compressão paralela ^B , psi
1 600 000	2560	1900
1 900 000	3000	2400
2 100 000	3500	2800
2 300 000	4000	3100

A Os valores não devem ser maiores que o obtidos por interpolação linear para valores intermediários do módulo de elasticidade.

B Os valores são para elementos de 30cm (12") de altura no teor de umidade de 12%.

Fonte: ASTM D 3737-96

Segundo HERNANDEZ¹, estes valores de resistência são usados para qualquer espécie norte-americana.

12.1.2.2 Módulo de elasticidade

De acordo com a norma D3737-96 a determinação do valor do módulo de elasticidade para a classificação da madeira deve ser realizada com uma relação vão:altura de 1:100.

12.2 FATORES MODIFICADORES DA RESISTÊNCIA

Os fatores modificadores de resistência levam em conta o efeito de redução da resistência da viga de MLC pela presença de nós e fibras inclinadas.

¹ HERNANDEZ, R. (Forest Products Laboratory).

12.2.1 Madeira visualmente classificada.

12.2.1.1 Fatores de modificação para a resistência à flexão

O fator modificador para a resistência à flexão é o menor valor de dois fatores de modificação determinados um com base nos nós e outro na inclinação das fibras.

12.2.1.1.1 Elementos laminados horizontalmente:

12.2.1.1.1.1 Nós

Os nós irão afetar menos a resistência se localizados nas lâminas próximas à linha neutra do que em outras lâminas. Assim, a influência dos nós na resistência do elemento estrutural depende de sua dimensão e de sua posição, sendo melhor medida por seu momento de inércia. FREAS & SELBO (1954) estabeleceram correlações estatísticas e empíricas para determinar a relação I_k/I_g . I_k é definido como o momento de inércia de todos os nós da seção transversal e I_g é o momento de inércia total da viga sem considerar a presença dos nós. O valor de I_k/I_g é então relacionado empiricamente com o valor do fator modificador de resistência.

Os procedimentos para calcular o valor da relação I_k/I_g são dados no anexo A2 da ASTM D 3737 e em FREAS & SELBO (1954) e também em MOODY (1977).

O fator modificador da resistência à flexão é determinado pela seguinte relação empírica.

$$SMF_b = (1 + 3R) \cdot (1 - R)^3 \cdot \left(1 - \frac{R}{2}\right) \quad (D3)$$

Sendo:

SMF_b = fator modificador da resistência à flexão;

R = relação I_k/I_g .

12.2.1.1.1.2 Inclinação das fibras

Os fatores de modificação da resistência à flexão associados com as várias inclinações de fibras são dados na tabela 78. Os fatores dados para tração aplicam-se à face tracionada dos elementos fletidos e os fatores dados para a compressão aplicam-se à face comprimida dos mesmos.

Tabela 78 - Fatores modificadores de tensão associados com a inclinação das fibras.

Inclinação da fibra	Fator modificador da resistência	
	Tração	Compressão
1:4	0,27	0,46
1:6	0,40	0,56
1:8	0,53	0,66
1:10	0,61	0,74
1:12	0,69	0,82
1:14	0,74	0,87
1:15	0,76	1,00
1:16	0,80	1,00
1:18	0,85	1,00
1:20	1,00	1,00

Fonte: ASTM D 3737-96

O valor de SMF_b deve ser igual ou superior à razão de resistência em elementos fletidos na posição de menor inércia determinada pelas formulas norma D 245-93.

12.2.1.1.2 Elementos laminados verticalmente:

12.2.1.1.2.1 Nós

O efeito de redução da resistência de elementos laminados verticalmente devido à presença de nós é levado em conta por meio do fator modificador de resistência SMF_b dado pela fórmula abaixo.

$$SMF_b = C_1 \cdot (SR_1^\gamma) \cdot (N^\alpha) \cdot \left(1 - 1,645 \cdot \frac{\Omega_1}{N^{1/2}} \right) \quad (D4)$$

Sendo:

C_1 = constante empírica dada na tabela 79;

SR_1 = relação de resistência dada pela norma ASTM D 245-93, para uma peça individual de madeira carregada nas bordas;

γ = constante empírica = 0,81;

$\alpha = 0,329 \cdot (1 - 1,049SR_1)$;

N=número de lâminas. Usar N=5 para elementos com 5 ou mais lâminas;

Ω_1 = coeficiente de variação para a resistência à flexão de uma lâmina. O coeficiente de variação para uma lâmina de madeira classificada visualmente é igual a 0,36.

Tabela 79 - Constantes usadas para ajustar a relação de resistência em elementos laminados verticalmente.

Relação de resistência (SR_1)	C_1
0,45 ou superior	1,238
0,40	1,292
0,35	1,346
0,30	1,400
0,26 ou inferior	1,444

Fonte: ASTM D 3737-96

12.2.1.1.2 Inclinação das fibras

Os fatores de modificação de resistência para os vários ângulos de inclinação das fibras são iguais aos para resistência à tração dados pela tabela 77.

12.2.1.1 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade dos elementos estruturais de MLC é diretamente dependente do módulo de elasticidade das lâminas usadas na sua fabricação. As condições padrão para a determinação do módulo de elasticidade das lâminas devem ser relação vão:altura igual a 100:1 e carregamento centrado em um ponto. Nestas condições o módulo de elasticidade não é afetado pelas deformações de cisalhamento e aproxima-se do verdadeiro módulo de elasticidade. Os valores do módulo de elasticidade determinados por outros métodos podem ser ajustados utilizando a norma ASTM D2915-94. Os fatores de ajuste para o módulo de elasticidade são dados na tabela 80 e dependem da razão de resistência à flexão de peças individuais determinada de acordo com a norma D245-93.

Os valores do módulo de elasticidade dados na tabela 76 podem ser utilizados como alternativa.

Tabela 80 - Fatores de ajuste para o módulo de elasticidade.

Razão de resistência à flexão	Fator de ajuste
$\geq 0,55$	1,00
0,45 à 0,54	0,90
$\leq 0,44$	0,80

Fonte: ASTM D 3737-96

12.2.1.1.1 Elementos laminados verticalmente

O valor do módulo de elasticidade aplicável a elementos fletidos laminados verticalmente deve ser igual a 95% da média das lâminas.

12.2.1.1.2 Elementos laminados horizontalmente

O valor do módulo de elasticidade aplicável a elementos laminados horizontalmente deve ser igual a 95% do valor calculado pela transformação da seção em análise (Anexo A2 D3737-96).

12.2.2 Madeira classificada pelo sistema *E-rated*

A determinação dos fatores de modificação para elementos estruturais de MLC produzidos com madeira classificada pelo sistema *E-rated* é similar à feita com a madeira classificada visualmente com exceção que o efeito da inclinação das fibras é levado em conta no valor do módulo de elasticidade e, portanto, o fator de modificação da resistência devido à inclinação das fibras não é usado.

12.2.2.1 Fator de modificação da resistência à flexão.

12.2.2.1.1 Elementos laminados horizontalmente

A determinação dos fatores modificadores de resistência para madeira classificada pelo sistema *E-rated* segue os mesmos procedimentos usados para madeira classificada visualmente, para se levar em conta a qualidade da madeira no dimensionamento.

O fator modificador da resistência à flexão mínimo não deve ser menor que o fator modificador dado na tabela 81 para elementos com altura igual ou inferior à 38,1cm (15”).

Tabela 81 - Fatores modificadores mínimos para a resistência à flexão e à compressão paralela às fibras para elementos estruturais de MLC produzidos com madeira classificada pelo sistema E-rated..

Fator modificador de resistência mínimo			
Designação ^A	Elementos	Elementos	Compressão ^B
	Laminados Horizontalmente	Laminados Verticalmente	Paralela as Fibras
1/6	0,70	0,70	0,70
1/4	0,65	0,65	0,70
1/2	0,50	0,25	0,50

A A segunda parte da designação da classificação pelo módulo de elasticidade (por exemplo, 2,0- 1/8) indica a fração da seção transversal que pode ser ocupada por características como nós, nós soltos, burls, fibras distorcidas ou apodrecimento parcial ou total nas faces.

B Os valores são para elementos com duas ou mais lâminas.

Fonte: ASTM D 3737-96

12.2.2.1.2 Elementos laminados verticalmente

O fator modificador da resistência para elementos laminados verticalmente também é determinado pela equação D4. O coeficiente de variação Ω_1 para madeira classificada pelo módulo de elasticidade para uso na equação D4 é 0,24, exceto quando as características naturais de crescimento (nós, nós soltos, fibras inclinadas, fissuras de secagem) ocupam metade da seção transversal, neste caso, o coeficiente de variação é o mesmo usado para a madeira classificada visualmente (0,36).

12.2.1.1 Módulo de elasticidade

12.2.1.1.1 Elementos laminados verticalmente

O valor do módulo de elasticidade aplicável a elementos fletidos laminados verticalmente deve ser igual a 95% da média das lâminas.

12.2.1.1.2 Elementos laminados horizontalmente

O valor do módulo de elasticidade aplicável a elementos laminados horizontalmente deve ser igual a 95% do valor calculado pela transformação da seção em análise (Anexo A2 D3737-96).

13 APÊNDICE D – Valores das propriedades de resistência e rigidez para o *Southern Pine* norte-americano

Os valores das propriedades mecânicas dadas na tabela abaixo foram extraídos do livro de regras de classificação visual do SPIB. Os valores apresentados se referem ao teor de umidade de 12% e duração de carregamento instantânea

Tabela 82 – Valores de projeto para *Southern Pine* norte-americano.

PROPRIEDADES MECÂNICAS PARA *SOUTHERN PINE*

Baseados nas Regras de Classificação Visual do SPIB-1994
(Valores em MPa)

Seção transversal		Classe	Módulo de Ruptura à flexão "F _{mk} "	Tração Paralela às fibras "F _{tk} "	Cisalhamento Horizontal "F _{vk} "	Compressão Normal às Fibras "F _{ck} "	Compressão Paralela às Fibras "F _{c0k} "	Módulo de Elasticidade à flexão "E _m "
Base	Altura							
38mm	89mm	Select Structural -Densa	52,7	30	2,0	9,3	37	12920
		Select Struc não-Densa	45,8	25	2,0	6,8	32	11560
		No. 1 Densa	34,5	20	2,0	9,3	33	12240
		No. 1 Não-Densa	29,4	17	2,0	6,8	28	10880
		No. 2 Densa	29,4	16	1,8	9,3	30	11560
		No. 2 Não-Densa	23,3	14	1,8	6,8	26	9520
	114mm	Select Structural -Densa	46,6	28	1,8	9,3	35	12920
		Select Struc não-Densa	40,6	22	1,8	6,8	30	11560
		No. 1 Densa	30,2	17	1,8	9,3	31	12240
		No. 1 Não-Densa	25,9	15	1,8	6,8	26	10880
		No. 2 Densa	25,0	14	1,8	9,3	29	11560
		No. 2 Não-Densa	19,9	12	1,8	6,8	24	9520
	140mm	Select Structural -Densa	42,3	25	1,8	9,3	33	12920
		Select Struc não-Densa	36,3	20	1,8	6,8	29	11560
		No. 1 Densa	28,5	16	1,8	9,3	29	12240
		No. 1 Não-Densa	23,3	13	1,8	6,8	25	10880
		No. 2 Densa	24,2	12	1,8	9,3	28	11560
		No. 2 Não-Densa	19,0	11	1,8	6,8	24	9520
	184mm	Select Structural -Densa	42,3	25	1,8	9,3	33	12920
		Select Struc não-Densa	36,3	20	1,8	6,8	29	11560
		No. 1 Densa	28,5	16	1,8	9,3	29	12240
		No. 1 Não-Densa	23,3	13	1,8	6,8	25	10880
		No. 2 Densa	24,2	12	1,8	9,3	28	11560
		No. 2 Não-Densa	19,0	11	1,8	6,8	24	9520
235mm	Select Structural -Densa	37,1	22	1,8	9,3	33	12920	
	Select Struc não-Densa	32,0	17	1,8	6,8	29	11560	
	No. 1 Densa	25,0	14	1,8	9,3	29	12240	
	No. 1 Não-Densa	20,7	12	1,8	6,8	24	10880	
	No. 2 Densa	20,7	11	1,8	9,3	27	11560	
	No. 2 Não-Densa	16,4	10	1,8	6,8	23	9520	
286mm	Select Structural -Densa	35,4	20	1,8	9,3	32	12920	
	Select Struc não-Densa	30,2	17	1,8	6,8	28	11560	
	No. 1 Densa	23,3	13	1,8	9,3	28	12240	
	No. 1 Não-Densa	19,9	11	1,8	6,8	24	10880	
	No. 2 Densa	19,9	11	1,8	9,3	26	11560	
	No. 2 Não-Densa	15,5	10	1,8	6,8	22	9520	
286mm	Select Structural -Densa	35,4	20	1,8	9,3	32	12920	
	Select Struc não-Densa	30,2	17	1,8	6,8	28	11560	
	No. 1 Densa	23,3	13	1,8	9,3	28	12240	
	No. 1 Não-Densa	19,9	11	1,8	6,8	24	10880	
	No. 2 Densa	19,9	11	1,8	9,3	26	11560	
	No. 2 Não-Densa	15,5	10	1,8	6,8	22	9520	

Notas: Valores tabelados para teor de umidade de 12% e carregamento de duração instantânea

14 GLOSSÁRIO

DEFINIÇÕES DE TERMOS USADOS NA CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL

Baseado na norma TB 397-90 (Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral) da Associação Brasileira dos Produtores de Madeira, no glossário do livro de regras de classificação visual do SPIB-1994, e nas Normas NHLA para medição e classificação de madeiras duras serradas.

Alburno (*sapwood*): Lenho situado entre a casca e o cerne, geralmente de coloração mais clara que este e constituído por elementos celulares ativos (quando na árvore viva).

Anel de crescimento (*annual ring; growth ring*): Camada produzida pela árvore em um único ano de crescimento, incluindo madeira de verão e madeira de inverno.

Arqueamento (*crook*): É definido como um empenamento em relação ao eixo de maior inércia de uma peça de madeira.

Arrevesso (*burl*): Uma distorção das fibras da madeira, usualmente causada pelo crescimento anormal devido a ferimentos na árvore.

Bolsa de resina (*pitch pocket; resin pocket*): Pequena cavidade alongada e bem delimitada entre os anéis de crescimento contendo resina.

Borda (*edge*): Há três tipos de borda:

- (1) A face estreita de peças de seção transversal retangular.
- (2) O canto de uma peça na intersecção de duas faces longitudinais.

(3) A parte da face larga próxima ao canto da peça.

Buracos (*holes*): Buracos que se estendem parcialmente ou que atravessam a peça.

Caibro e prancha (*dimension lumber*): Peças de madeira de seção retangular em que a espessura é maior ou igual a 38mm e menor ou igual à 89mm, sendo que a largura é igual ou superior à 89mm.

Casca (*bark*): Camada da árvore externa ao câmbio.

Cerne (*heartwood*): Pare interna do lenho, envolvida pelo alburno, contituida de elementos celulares sem atividade vegetativa, geralmente caracterizada por possuir coloração mais escura que o alburno.

Coníferas (*softwoods*): Grupo botânico de árvores que, na maioria dos casos, apresentam folhas com forma de agulha ou escama.

Densa (*dense*): Termo usado na classificação estrutural de certas espécies de coníferas para madeiras com elevada densidade.

Dicotiledôneas (*hardwoods*): Grupo botânico de árvores que, geralmente, possuem folhas largas em contraste com as coníferas.

Empenamento (*warp*): Qualquer desvio na forma geométrica inicial de uma peça de madeira, incluindo encanoamento, empenamento, encurvamento e torcimento.

Encurvamento (*bow*): É definido como um empenamento em relação ao eixo de menor inércia de uma peça de madeira.

Esmoadado (*wane*): Casca ou falta de madeira.

Face estreita (*narrow face*): A face mais estreita de uma peça de madeira de seção retangular.

Face larga (*wide face*): A face mais larga de uma peça de madeira de seção retangular.

Faixas de resina (*pitch streak*): É uma acumulação bem definida de resina nas células de madeira na forma de faixas.

Fenda superficial (*surface check*): Pequenas fendas superficiais, em geral alinhadas longitudinalmente e perpendiculares aos anéis de crescimento.

Fenda (*through check, split*): Fenda longitudinal na extremidade de uma peça e que atravessa a mesma em espessura.

Fendilhado (*seasoning chek*): Pequenas fendas superficiais que aparecem nas extremidades das peças devido à secagem da madeira.

Fibra (*grain*): As fibras da madeira e sua direção, tamanho, organização, aparência ou qualidade.

Fibras cruzadas (*cross grain*): Um padrão na madeira em que as fibras estão dispostas de forma não paralela às extremidades da peça.

Madeira comprimida (*compression wood*): Madeira anormal que se forma em um dos lados de uma árvore que cresce inclinada. Apresenta alta densidade, baixa resistência e é uma madeira frágil.

Madeira de inverno (*latewood*): A parte mais densa, com células de paredes grossas formadas no segundo ciclo anual de crescimento.

Madeira de verão (*earlywood*): A parte menos densa, com células grandes, parte do anel de crescimento formada durante o primeiro ciclo anual de crescimento.

Medula (*pith*): Parte mais ou menos central do tronco, de pequeno diâmetro, constituída por tecidos menos resistentes do que o tecido que o circunda.

Nó (*knot*): A parte de um galho que foi incorporada em uma peça de madeira. Na madeira, os nós são classificados por sua forma, dimensão, qualidade e ocorrência. Um nó vermelho é significava que o galho estava vivo quando a madeira foi cortada, um nó escuro indica que o galho estava morto no momento do corte da madeira.

Nó cariado (*unsound knot*): Nó que se encontra parcialmente deteriorado por agentes biológicos.

Nó de gravata (*spike knot*): Conjunto de dois nós de formas alongadas e que convergem para o mesmo ponto na face da peça.

Nó firme (*vight knot*): Nó que se mantém firmemente retido na madeira seca.

Nó solto (*encased knot*): Nó que, normalmente, não se mantém retido na madeira e que se apresenta total ou parcialmente envolvido por casca.

Nó vazado (*knot hole*): Orifício na peça de madeira provocado pela queda de um nó; orifício do nó.

Podridão (*decay*): Decomposição gradual e avançada do tecido lenhoso produzida pela ação de fungos. É caracterizada pela mudança de consistência e coloração.

Postes e colunas (*timbers*): Peças de madeira de seção retangular em que ambos os lados são maiores ou igual a 114mm, sendo que o maior lado deve ser menos de 38mm superior ao menor lado.

Racha (*shake*): separação longitudinal do tecido lenhoso, predominantemente entre os anéis de crescimento.

Razão de resistência (*strength ratio*): Relação hipotética entre a resistência de um elemento contendo características naturais de crescimento que reduzem a resistência e a resistência de um mesmo elemento sem características que reduzem a resistência.

Resina (*pitch*): É uma acumulação de material resinoso.

Tábuas (*boards*): Peças de madeira de seção retangular em que a espessura é menor ou igual a 38mm, sendo que a largura é igual ou superior à 38mm, mas menor que 140mm.

Taxa de crescimento (*rate of growth*): A taxa em que a árvore cresceu. A unidade de medida é o número de anéis de crescimento por polegada (2,5cm) medidos em uma linha radial representativa no tronco, ou em uma peça de madeira. A taxa de crescimento expressa diretamente a densidade da madeira. As principais taxas de crescimento são:

- a. **Densa** (*dense grain*): Para ser considerada como densa a peça de madeira deve ter seis ou mais anéis de crescimento por polegada medidos em uma linha radial representativa e mais de 1/3 de madeira de inverno. Uma peça de madeira contendo quatro ou mais anéis de crescimento por polegada e mais da metade de madeira de inverno pode ser considerada como densa.
- b. **Média** (*medium grain*): Peça de madeira contendo quatro ou mais anéis de crescimento por polegada, medidos em uma linha radial representativa.
- c. **Leve** (*coarse grain*): Peça de madeira contendo menos de quatro anéis de crescimento por polegada, medidos em uma linha radial representativa.

Torcimento (*twist*): É definido como uma combinação de empenamentos em relação aos eixos de maior e de menor inércia da peça de madeira em forma espiralada.

Vigas e longarinas (*beams and stringers*): : Peças madeira de seção retangular com espessura igual a 114mm e tendo altura igual ou superior a 165mm. Estas peças são classificadas para resistirem a esforço de flexão em relação ao eixo de maior inércia.