

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 ESPESSURA 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.