UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

**Classificação de peças estruturais de pínus spp
pela MSR (Machine Stress Rate)**

ROBERTO RAMOS DE FREITAS

Dissertação apresentada à Área de Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Tit. Carlito Calil Júnior

OK

USP/FSC/SBI

8-2-001573

São Carlos
2004

Freitas, Roberto Ramos

"Classificação de peças estruturais de Pínus spp pela MSR (Machine Stress Rate)" – São Carlos, 2004

Dissertação (Mestrado) – Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, 2004 – páginas: 146

Área: Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Tit. Carlito Calil Júnior

1. Título

1. Classificação mecânica; 2. Pínus.

Caixa Postal 369 - 13560-970 - São Carlos, SP • Fone (16) 273-9589 • Fax (16) 273-9777

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
ROBERTO RAMOS DE FREITAS, APRESENTADA À ÁREA INTERUNIDADES CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 18/02/2004.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Carlito Calil Júnior (Presidente) – EESC/USP

Prof. Dr. Guilherme Corrêa Stamato – UNESP

Prof. Dr. Almir Sales – UFSCar

*Ao meu amado irmão
Washington*

Agradeco

A Deus, inteligência suprema e causa primária de todas as coisas, por permitir esta e tantas outras etapas de minha vida.

Aos meus pais, pela educação recebida e por me colocarem no caminho estreito, porém correto.

A minha irmã, a qual muitas vezes fez o papel de mãe.

A minha querida, amada e futura esposa Tati, a qual vem iluminando minha vida durante estes anos e iluminará os próximos.

Ao meu cunhado Rogério e aos meus futuros sogro e sogra Reginaldo e Maria Amélia pelo apoio dado nesse período da minha vida.

Ao meu grande orientador, Prof. Dr. Carlito Calil Junior, por me ajudar a superar as dificuldades e indicar os caminhos neste trabalho, o qual é um "verdadeiro orientador".

Aos professores, Antônio Alves Dias, Francisco Antônio Rocco Lahr e à "Familia LaMEM", pelo convívio e aprendizado, considerando a forma na qual

este "verdadeiro grupo" de pesquisa se une e desenvolve seus trabalhos como responsável por seu sucesso.

A empresa "Battistella Indústria e Comércio", pelo fornecimento do material utilizado no trabalho.

Ao IBAMA-LPF, pelo empréstimo da máquina classificadora utilizada, através do convênio firmado com a USP.

Aos professores Antônio Carlos Hernandez e José Samuel Diongo, pelo apoio dado no momento de necessidade.

E a todos aqueles que de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

Olhem como crescem os lírios do campo (...)
(...) nem o rei Salomão em toda sua glória
jamais se vestiu como um deles.
(Jesus Cristo)

Deus não joga dados.
(Albert Einstein)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 O uso da madeira nas construções.....	3
1.2 O projeto de estruturas de madeira.....	6
1.2.1 Valores de cálculo.....	8
1.3 Justificativa do trabalho.....	10
2 O MATERIAL PINUS.....	18
3 CLASSIFICAÇÃO DAS PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA.....	23
3.1 Avaliação não-destrutiva.....	25
3.2 A classificação visual.....	27
3.2.1 Efeito dos nós.....	29
3.2.2 Efeito da inclinação da grã.....	30
3.2.3 Quantificação dos defeitos.....	31
3.3 A classificação Mecânica.....	32
4 A MÁQUINA DE CLASSIFICAÇÃO POR TENSÕES (MSR).....	35
4.1 O princípio da MSR.....	38
4.2 Regressões.....	40
4.3 Limites de confiança.....	41
4.4 Classes.....	44
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
5.1 Peças utilizadas.....	47
5.2 Classificação visual das peças	48
5.3 Classificação mecânica pela MSR.....	50
5.4 Ensaio de flexão estática para a determinação de MOE e MOR	51
5.5 Determinação da umidade média da amostra.....	55
5.6 Determinação da densidade aparente.....	55
5.7 Resistência e módulo de deformação à compressão paralela.....	55
6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	57

6.1 Classificação visual.....	58
6.2 Classificação mecânica.....	60
6.3 Valores do módulo dinâmico - MOE_{din}	63
6.3.1 Avaliação da normalidade dos valores de MOE_{din}	65
6.4 Ensaio de flexão estática - MOE / MOR.....	66
6.4.1 Avaliação da normalidade dos valores dos ensaios de flexão estática.....	68
6.5 Umidade das amostras.....	70
6.6 Densidade aparente - ρ_{ap}	70
6.6.1 Avaliação da normalidade das densidades aparentes.....	72
6.7 Resistência e módulo de elasticidade à compressão paralela - f_{c0} / E_{c0}	73
6.7.1 Avaliação da normalidade dos valores dos ensaios de compressão.....	74
7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA - ANOVA.....	76
7.1 Anova dos MOE_{din}	76
7.2 Anova das densidades aparentes - ρ_{ap}	78
7.3 Anova dos ensaios de flexão estática.....	79
7.4 Comparação entre classificação visual e mecânica.....	80
8 REGRESSÕES PARA MOE E MOR.....	85
8.1 Pressupostos da regressão e da correlação.....	85
8.2 Coeficientes de regressão e de correlação.....	86
8.3 Regressões para MOE_{din} e MOE.....	87
8.3.1 Análise dos resíduos das regressões entre MOE_{din} e MOE.....	89
8.4 Regressões entre MOE_{din} e MOR.....	92
8.4.1 Análise dos resíduos das regressões entre MOE_{din} e MOR.....	94
8.5 Regressões entre MOE e MOR	96
8.6 Análise das regressões.....	97
9 INFLUÊNCIA DA CLASSIFICAÇÃO VISUAL NAS REGRESSÕES.....	99
9.1 Regressões entre MOE_{din} e MOE_{fb} pelas classes visuais.....	99
9.1.1 Análise dos resíduos das regressões entre $MOE_{din,50}$ e MOE_{fb} com classificação visual.....	102
9.1.2 Regressões de MOE_{din} e MOE_{fb} pelas classes visuais sem outliers.....	105

9.1.3	Análise dos resíduos das regressões entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} com classificação visual sem <i>outliers</i>	107
9.2	Regressões de MOE_{din} e MOR pelas classes visuais.....	110
9.2.1	Regressão entre MOE_{din} e MOR_{fb} para as classes visuais sem <i>outliers</i>	114
9.3	Regressões de MOE_{din} , MOE_{fb} e MOR_{fb} pelas classes de densidades de anéis de crescimento.....	117
9.3.1	Análise dos resíduos das regressões entre MOE_{din} e MOE_{fb} pela densidade de anéis de crescimento.....	121
9.3.2	Regressões de MOE_{din} e MOE_{fb} pelas classes de densidades de anéis de crescimento sem <i>outliers</i>	122
10	REGRESSÕES PARA f_{c0} e E_{c0}	125
11	DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DE RIGIDEZ – MOE.....	131
11.1	Determinação das classes de MOE e dos intervalos de classificação.....	133
12	CONCLUSÕES.....	138
12.1	Conclusões obtidas.....	138
12.2	Considerações finais.....	139
13	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141
13.1	Bibliografias consultadas.....	145
ANEXO	METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE CONFIANÇA DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO "r".....	146
APENDICE	VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ensaio de tração paralela às fibras, conforme NBR 7190/97.....	11
Figura 2 – Montanha russa Montezum, parque Hopi Hari – (Calil Jr., 2002).....	21
Figura 3 – Nó ocupando toda a seção transversal da peça.....	29
Figura 4 – Máquina classificadora por tensões.....	39
Figura 5 – Esquema de classificação pela máquina.....	40
Figura 6 – Intervalo de confiança e de previsão.....	42
Figura 7 – Esquema da distribuição dos valores (Kretschmann; Green, 1999).....	43
Figura 8 - Classificação mecânica pela MSR.....	51
Figura 9 – Peças classificadas pela MSR.....	51
Figura 10 – Esquema de carregamento para ensaios de determinação de MOE e MOR.....	52
Figura 11 – Ensaio de MOR_{fb} (flatwise bending).....	54
Figura 12 – Ensaio de MOE_{eb} (edgewise bending).....	54
Figura 13 – Ensaio de resistência à compressão (f_{c0}) e módulo de elasticidade (E_{c0}).....	55
Figura 14 – Frequência absoluta da classificação visual por nós.....	59
Figura 15 – Frequência absoluta da classificação por nós e densidade de anéis.....	59
Figura 16 – Frequência relativa da classificação por nós e densidade de anéis – parcial.....	60
Figura 17 – Frequência relativa da classificação por nós e densidade de anéis – total.....	60
Figura 18 – Frequência absoluta da classificação mecânica por cores.....	61
Figura 19 – Frequência relativa da classificação mecânica por cores.....	61
Figura 20 – Frequência absoluta da classificação mecânica para os novos intervalos.....	62
Figura 21 – Frequência relativa da classificação mecânica para os novos intervalos.....	63
Figura 22 – Histograma da frequência relativa de $MOE_{din1,00}$	63
Figura 23 – Histograma da frequência relativa de $MOE_{din1,25}$	64
Figura 24 – Histograma da frequência relativa de $MOE_{din1,50}$	64
Figura 25 – Teste de normalidade para $MOE_{din1,00}$	65
Figura 26 - Teste de normalidade para $MOE_{din1,25}$	65

Figura 27 – Teste de normalidade para $MOE_{\text{din},50}$	66
Figura 28 – Histograma de frequência relativa de MOE_{fb}	66
Figura 29 – Histograma de frequência relativa de MOE_{eb}	67
Figura 30 - Histograma de frequência relativa de MOR_{fb}	67
Figura 31 – Histograma de frequência relativa de MOR_{eb}	67
Figura 32 – Teste de normalidade para MOE_{fb}	68
Figura 33 – Teste de normalidade para MOR_{fb}	69
Figura 34 - Teste de normalidade para MOE_{eb}	69
Figura 35 - Teste de normalidade para MOR_{eb}	69
Figura 36 – Histograma de frequência relativa de ρ_{ap}	71
Figura 37 – Histograma de frequência relativa de $\rho_{\text{ap,fb}}$	71
Figura 38 - Histograma de frequência relativa de $\rho_{\text{ap,eb}}$	71
Figura 39 – Teste de normalidade para ρ_{ap}	72
Figura 40 – Teste de normalidade para $\rho_{\text{ap,fb}}$	72
Figura 41 – Teste de normalidade para $\rho_{\text{ap,eb}}$	73
Figura 42 – Histograma de frequência relativa de f_{c0}	73
Figura 43 – Histograma de frequência relativa de E_{c0}	74
Figura 44 – Teste de normalidade por Shapiro para f_{c0}	75
Figura 45 – Teste de normalidade por Shapiro para E_{c0}	75
Figura 46 – Resíduos pelos valores ajustados de MOE_{din}	77
Figura 47 – Resíduos pelos valores ajustados de densidade aparente.....	79
Figura 48 – Resíduos pelos valores ajustados de MOE	80
Figura 49 – Resíduos pelos valores ajustados de MOR	80
Figura 50 – Resíduos pelos valores ajustados de amostras rejeitadas e não-rejeitadas de $MOE_{\text{din},00}$	82
Figura 51 – Resíduos pelos valores ajustados de amostras rejeitadas e não-rejeitadas de $MOE_{\text{din},25}$	82
Figura 52 – Resíduos pelos valores ajustados de amostras rejeitadas e não-rejeitadas de $MOE_{\text{din},50}$	82
Figura 53 – Resíduos pelos valores ajustados de amostras densas e não densas de $MOE_{\text{din},00}$	84
Figura 54 – Resíduos pelos valores ajustados de amostras densas e não densas de $MOE_{\text{din},25}$	84
Figura 55 – Resíduos pelos valores ajustados de amostras densas e não densas de $MOE_{\text{din},50}$	84

Figura 56 – Regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOE_{fb}	87
Figura 57 – Regressão entre $MOE_{din1,25}$ e MOE_{fb}	87
Figura 58 – Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb}	88
Figura 59 – Regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOE_{eb}	88
Figura 60 - Regressão entre $MOE_{din1,25}$ e MOE_{eb}	88
Figura 61 – Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{eb}	89
Figura 62 – Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOE_{fb}	89
Figura 63 – Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOE_{fb}	90
Figura 64 – Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,25}$ e MOE_{fb}	90
Figura 65 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,25}$ e MOE_{fb}	90
Figura 66 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb}	91
Figura 67 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb}	91
Figura 68 – Regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOR_{fb}	92
Figura 69 - Regressão entre $MOE_{din1,25}$ e MOR_{fb}	92
Figura 70 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb}	93
Figura 71 - Regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOR_{eb}	93
Figura 72 - Regressão entre $MOE_{din1,25}$ e MOR_{eb}	93
Figura 73 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_{eb}	94
Figura 74 – Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOR_{fb}	94
Figura 75 – Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOR_{fb}	94
Figura 76 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,25}$ e MOR_{fb}	95
Figura 77 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,25}$ e MOR_{fb}	95
Figura 78 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb}	95
Figura 79 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb}	96

Figura 80 – Regressões entre MOE_{fb} e MOR_{fb}	96
Figura 81 - Regressões entre MOE_{eb} e MOR_{eb}	97
Figura 82 – Resíduos pelos valores ajustados de MOE_{fb} e classificação visual por nós.....	100
Figura 83 – Sobreposição das classes visuais na regressão entre MOE_{din} e MOE_{fb}	100
Figura 84 – Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual SS.....	101
Figura 85 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C1.....	101
Figura 86 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C2.....	101
Figura 87 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C3.....	102
Figura 88 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual SS.....	102
Figura 89 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual SS.....	103
Figura 90 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C1.....	103
Figura 91 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C1.....	103
Figura 92 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C2.....	104
Figura 93 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C2.....	104
Figura 94 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C3.....	104
Figura 95 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C3.....	105
Figura 96 – Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual SS sem outliers.....	105
Figura 97 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C1 sem outliers.....	106
Figura 98 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C2 sem outliers.....	106
Figura 99 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C3 sem outliers.....	106
Figura 100 – Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual SS sem outliers.....	107

Figura 101 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual SS sem <i>outliers</i>	107
Figura 102 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C1 sem <i>outliers</i>	108
Figura 103 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C1 sem <i>outliers</i>	108
Figura 104 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C2 sem <i>outliers</i>	108
Figura 105 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C2 sem <i>outliers</i>	109
Figura 106 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C3 sem <i>outliers</i>	109
Figura 107 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C3 sem <i>outliers</i>	109
Figura 108 – Resíduos pelos valores ajustados de MOR_{fb} e classificação visual por nós.....	110
Figura 109 – Sobreposição das classes visuais na regressão entre MOE_{din} e MOR_{fb}	111
Figura 110 – Regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR para a classe visual SS.....	112
Figura 111 - Regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR para a classe visual C1 C2 e C3.....	112
Figura 112 - Regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR para a classe visual C1	113
Figura 113 - Regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR para a classe visual C2	113
Figura 114 – Regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR para a classe visual C3	114
Figura 115 - Regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR para a classe visual SS sem <i>outliers</i> ...	114
Figura 116 - Regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR para a classe visual C2 sem <i>outliers</i> ...	115
Figura 117 – Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb} da classe SS sem <i>outliers</i>	115
Figura 118 – Escores normais pelos resíduos para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb} da classe SS sem <i>outliers</i>	116
Figura 119 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb} da classe C2 sem <i>outliers</i>	116
Figura 120 - Escores normais pelos resíduos para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb} da classe C2 sem <i>outliers</i>	116
Figura 121 – Resíduos pelos valores ajustados de MOE_{fb} e classificação por anéis de crescimento.....	117

Figura 122 – Sobreposição das classes de densidades de anéis na regressão entre MOE_{din} e MOE_{fb}	118
Figura 123 – Resíduos pelos valores ajustados de MOR_{fb} e classificação visual por anéis de crescimento.....	118
Figura 124 - Sobreposição das classes de densidades de anéis na regressão entre MOE_{din} e MOE_{fb}	119
Figura 125 – Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para as peças não-densas.....	119
Figura 126 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para as peças densas.....	120
Figura 127 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb} para as peças não-densas.....	120
Figura 128 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb} para as peças densas.....	120
Figura 129 – Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para peças não-densas.....	121
Figura 130 – Escores normais pelos resíduos para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para peças não-densas.....	121
Figura 131 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para peças densas.....	121
Figura 132 - Escores normais pelos resíduos para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para peças densas.....	122
Figura 133 – Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para as peças não-densas sem <i>outliers</i>	122
Figura 134 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para as peças densas sem <i>outliers</i>	123
Figura 135 – Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para peças não-densas sem <i>outliers</i>	123
Figura 136 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para peças não-densas sem <i>outliers</i>	123
Figura 137 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para peças densas sem <i>outliers</i>	124
Figura 138 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para peças densas sem <i>outliers</i>	124
Figura 139 – Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e f_{c0}	125
Figura 140 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e E_{c0}	126
Figura 141 – Regressão entre E_{c0} e MOE_{fb}	126
Figura 142 – Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre E_{c0} e MOE_{fb}	127

Figura 143 – Escores normais pelos resíduos para a regressão entre E_{c0} e MOE_{fb}	127
Figura 144 – Regressão entre f_{c0} e MOR_{fb}	127
Figura 145 – Regressão entre E_{c0} e f_{c0}	128
Figura 146 – Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre E_{c0} e f_{c0} ..	128
Figura 147 – Escores normais pelos resíduos para a regressão entre E_{c0} e f_{c0}	128
Figura 148 – Regressão entre E_{c0} e MOE_{fb} sem <i>outliers</i>	129
Figura 149 – Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre E_{c0} e MOE_{fb} sem <i>outliers</i>	129
Figura 150 – Escores normais pelos valores ajustados para a regressão entre E_{c0} e MOE_{fb} sem <i>outliers</i>	129
Figura 151 - Regressões entre MOE_{din} e MOE , considerando a classificação visual.....	131
Figura 152 – Regressão entre MOE_{din} e MOE , desconsiderando a classificação visual.....	132
Figura 153 – Resíduos pelos valores normais da regressão MOE_{din} e MOE , desconsiderando a classificação visual.....	132
Figura 154 – Escores normais pelos resíduos da regressão MOE_{din} e MOE , desconsiderando a classificação visual.....	132
Figura 155 – Curvas de confiança e previsão da regressão para a regressão entre MOE_{din} e MOE	134
Figura 156 – Distribuição para as classes de MOE	136
Figura 157 – Distribuição da classificação por cor pela MSR.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência das coníferas.....	7
Tabela 2 - Classes de resistência das dicotiledôneas.....	7
Tabela 3 – Valores de “ γ_w ” para estados limites últimos.....	8
Tabela 4 – Valores de k_{mod1}	9
Tabela 5 – Valores de k_{mod2}	9
Tabela 6 – Classes de umidade.....	9
Tabela 7 – Série histórica da produção de serrados no Brasil (1000 m ³).....	13
Tabela 8 – Série histórica do consumo de serrados no Brasil (1000 m ³).....	14
Tabela 9 – Distribuição da área plantada de pinus no Brasil no ano de 2000.....	14
Tabela 10 – Análise dos resultados de ensaios com intensidade de carga variável e velocidade constante (<i>Freitas; Calil Jr – 2002</i>).....	15
Tabela 11 – Análise dos resultados de ensaios com velocidade variável e intensidade de carga constante (<i>Freitas; Calil Jr – 2002</i>).....	16
Tabela 12 – Valores médios e madeiras coníferas e florestamento, ensaios de amostras isentas de defeito – (<i>Calil Jr. – 2002</i>).....	19
Tabela 13 – Resumo das conclusões – (<i>Bortoletto, 1993</i>).....	20
Tabela 14 – Classificação visual em relação ao tamanho de nó (<i>Krestschmann, D.E.; Green, D.W, 1999</i>).....	31
Tabela 15 – Fator de qualidade para módulo de elasticidade – (ASTM D245-93).....	31
Tabela 16 - Tratamento estatístico dos resultados dos ensaios em viga produzidas com distribuição aleatória das lâmina (<i>Amuda; Szűcs – 1995</i>).....	34
Tabela 17 - Tratamento estatístico dos resultados dos ensaios em vigas produzidas com posicionamento planejado das lâminas (<i>Amuda; Szűcs – 1995</i>).	34
Tabela 18 – Tensões admissíveis para a S.A. pine classificado visualmente (<i>Bryant – 1978</i>).....	37
Tabela 19 – Tensões admissíveis para a S.A. pine classificado mecanicamente (<i>Bryant – 1978</i>).....	37
Tabela 20 – Resultados de certificação MSR para carvalho 2 x 8 s (<i>Green et al. – 1994</i>).....	38
Tabela 21 – Classes comuns para peças estruturais por classificação mecânica (<i>Krestschmann; Green, 1999</i>).....	44
Tabela 22 – Razão de resistência para as classes visuais.....	48
Tabela 23 – Classificação visual pelo tamanho dono e seu posicionamento.....	49

Tabela 24 – Distribuição absoluta e relativa das amostras classificadas visualmente por nós e densidade de anéis.....	58
Tabela 25 – Distribuição absoluta e relativa das amostras classificadas mecanicamente, com variação de intensidade de carga aplicada.....	61
Tabela 26 – Distribuição absoluta e relativa das amostras classificadas mecanicamente, com variação de intensidade de carga aplicada, para novos intervalos.....	62
Tabela 27 – Estatística descritiva de MOE_{din}	64
Tabela 28 – Teste de normalidade para MOE_{din}	65
Tabela 29 – Estatística descritiva dos ensaios de flexão estática.....	68
Tabela 30 – Teste de normalidade para ensaios de flexão estática.....	68
Tabela 31 – Estatística descritiva para ρ_{ap} , $\rho_{ap,fb}$, $\rho_{ap,eb}$	70
Tabela 32 – Teste de normalidade para ρ_{ap} , $\rho_{ap,fb}$, $\rho_{ap,eb}$	72
Tabela 33 – Estatística descritiva dos ensaios de resistência e rigidez paralela...	74
Tabela 34 – Teste de normalidade para f_{c0} e E_{c0}	75
Tabela 35 – Intervalo de confiança dos coeficientes de correlação para regressões entre MOE_{din} e MOE	97
Tabela 36 - Intervalo de confiança dos coeficientes de correlação para regressões entre MOE_{din} e MOR	98
Tabela 37 - Intervalo de confiança dos coeficientes de correlação para regressões entre MOE e MOR	98
Tabela 38 – Avaliação da regressão final entre MOE_{din} e MOE	133
Tabela 39 – Classes e intervalos de MOE	133
Tabela 40 – Limites dos intervalos para a classificação por MOE_{din}	134
Tabela 41 – Intervalos de confiança e previsão para MOE	135
Tabela 42 – Classes de MOE e intervalos de MOE_{din} para classificação mecânica.....	135
Tabela 43 – Intervalos de classificação por cores.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

ANOVA	Análise de variância (<i>analysis of variance</i>)
ASTM	American Society for Testinf and Materials
MLC	Madeira laminada colada
MOE	Módulo de elasticidade à flexão estática
MOE _{eb}	Módulo de elasticidade à flexão, em relação ao eixo de maior inércia (<i>edgewise bending</i>)
MOE _{fb}	Módulo de elasticidade à flexão, em relação ao eixo de menor inércia (<i>flatwise bending</i>)
MOE _{din}	Módulo de elasticidade dinâmico
MOE _{din25}	Módulo de elasticidade dinâmico, determinado com velocidade da peça no interior da MSR de 25 m/min
MOE _{din50}	Módulo de elasticidade dinâmico, determinado com velocidade da peça no interior da MSR de 50 m/min
MOE _{din75}	Módulo de elasticidade dinâmico, determinado com velocidade da peça no interior da MSR de 75 m/min
MOE _{din1,00}	Módulo de elasticidade dinâmico, determinado por aplicação de carga de 1,00 kN
MOE _{din1,25}	Módulo de elasticidade dinâmico, determinado por aplicação de carga de 1,25 kN
MOE _{din1,50}	Módulo de elasticidade dinâmico, determinado por aplicação de carga de 1,50 kN
MOR	Módulo de ruptura à flexão
MOR _{eb}	Módulo de ruptura á flexão, em relação ao eixo de maior inércia (<i>edgewise bending</i>)
MOR _{fb}	Módulo de ruptura à flexão, em relação ao eixo de menor inércia (<i>flatwise bending</i>)
MSR	Machine Stress Rate
NBR	Norma Brasileira Registrada
SBS	Sociedade Brasileira de Silvicultura
SR	Razão de resistência (<i>strength ratio</i>)
R	Indicação de peça rejeitada visualmente
NR	Indicação de peça não-rejeitada visualmente
D	Indicação de peça densa (densidade de anéis de crescimento)
ND	Indicação de peça não-densa (densidade de anéis de crescimento)

SS	Classe visual (<i>select structural</i>)
C1	Classe visual
C2	Classe visual
C3	Classe visual
n	Número de amostras
r	Coeficiente de correlação
r^2	Coeficiente de determinação
ρ_{ap}	Densidade aparente
$\rho_{ap,fb}$	Densidade aparente para peça ensaiada a <i>flatwise bending</i>
$\rho_{ap,eb}$	Densidade aparente para peça ensaiada a <i>edgewise bending</i>
ρ_{inf}	Limite inferior do intervalo de confiança do coeficiente de correlação
ρ_{sup}	Limite superior do intervalo de confiança do coeficiente de correlação

RESUMO

FREITAS, R.R. *Classificação de peças estruturais de pinus spp pela MSR (Machine Stress Rate)*. São Carlos, 2004. 146p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A madeira é um material de fonte renovável, porém com grande variabilidade em suas propriedades mecânicas, devendo ser adequadamente avaliadas e caracterizadas para o correto uso. Uma forma de avaliar estas propriedades é através de ensaios não destrutivos, que não danificam o material. Dentre os vários métodos de classificação destaca-se a classificação mecânica por tensões (MSR), a qual é um efetivo sistema de classificação e avaliação de peças estruturais de madeira, devido sua alta produtividade, podendo todas as peças produzidas serem avaliadas e certificadas. O processo de classificação por meio de ensaios não destrutivos, objetiva determinar os valores do modulo de elasticidade (MOE) e sua correlação com os módulos de resistência a flexão(MOR). A alta produção anual de peças estruturais do gênero pinus spp no Brasil e o conhecimento tecnológico de suas propriedades, tomará sua utilização viável na construção civil em maior escala. Este trabalho avalia a influência da velocidade de ensaio e a intensidade da carga aplicada, nos valores do módulo dinâmico, correlacionando este com os módulos de elasticidade estático e o modulo de resistência à flexão, considerando a classificação visual das peças ensaiadas. Os resultados mostram que a espécie pinus spp deve ser classificada visualmente e mecanicamente para o correto uso estrutural.

Palavras-chaves: Classificação de madeira; Classificação mecânica por tensões; Pinus spp; ensaios não-destrutivos.

ABSTRACT

Pinus spp Lumber grading using the MSR(Machine stress rating)

FREITAS, R.R. *Classificação de peças estruturais de pinus spp pela MSR (Machine Stress Rate)*. São Carlos, 2004. 146p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Wood is a material of renewable source, however with great variability in their mechanical properties and must be characterized for its correct use and in order to determine these properties using non-destructive tests. Among these tests, stands out the Machine Stress Rating (MSR), which is an effective system of grading and assessment of structural lumber, due to its high productivity, all being able to the produced pieces be assessed and certified. The process of grading by means of non-destructive test, objective to determine the values of MOE and correlate them with MOR values. The annual high production of structural pieces of pinus spp in Brazil, with the technologic knowledge of their properties, made their utilization feasible in the civil construction in great scale. This work proposes the study of mechanical stress grading for this species, correlating the values of the dynamic modulus obtained in the MSR, analysing the influence of the speed and test and the intensity of the force applied, with the static modulus and the modulus of rupture. The results showed that in order to use pinus spp to structural purpose the lumber must be visually and mechanically graded.

Key words: Grading lumber; Mechanical grading lumber; Pinus spp.; non-destructive test.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é o único dos materiais utilizados na construção civil, de fonte renovável. Contrariamente ao concreto e aço, os recursos necessários para sua produção são renováveis. Portanto, é perfeitamente possível a utilização deste material em maior escala, sendo competitivo diretamente com estes outros materiais estruturais. Fusco (1989), ressalta as características de resistência e elasticidade da madeira, comparáveis ao concreto e ao aço, porém tendo a vantagem do peso específico.

Fagundes (1998), além de citar estas, lembra também outras como, resistência ao choque e esforços dinâmicos, resistência à tração e à compressão, fácil montagem e de fácil substituição de peças estruturais, inércia química, resistência mecânica na presença de fogo e baixa condutividade térmica e acústica.

Entretanto, por ser um material produzido pela natureza, possui grande variabilidade de suas características de espécie para espécie, e até mesmo dentro de uma mesma espécie, em função das condições climáticas e de solo. Esta variabilidade é um dos fatores que desfavorece a maior utilização da madeira, principalmente em nosso país.

Outro problema na utilização da madeira, conforme Bittencourt (1995), é o desconhecimento de suas propriedades, originário do preconceito generalizado quanto sua durabilidade, e que o sistema educacional atualmente pouco contribui para aperfeiçoar esta área. Além disso este material é comercializado e utilizado

conforme a “crença popular”, carregado de preconceitos e com carência de base científica.

Barros Jr.; Hellmeister (1989), citam três importantes motivos pelos quais o dimensionamento de estruturas de madeiras estão aquém das possibilidades do país, sendo eles: a falta de conscientização dos proprietários das obras, falta de profissionais (arquitetos e engenheiros) interessados, com conhecimentos adequados na área e a inexistência de uma política de incentivo à utilização adequada e racional da madeira.

Desta forma, o Brasil está muito distante das hipóteses consideradas pelo EUROCODE Nº 5, conforme Rocco Lahr; Calil Jr. (1989):

- *os projetos são elaborados por profissionais qualificados e experientes;*
- *nas fábricas e/ou nas obras existe supervisão adequada;*
- *a construção é feita por pessoal capacitado;*
- *as estruturas são consideradas protegidas contra a demanda biológica, seja por tratamento preservativo, seja por adoção de detalhes de projeto adequados;*
- *as estruturas são periodicamente inspecionadas e recebem a necessária manutenção;*
- *não haverá mudança na utilização da estrutura sem prévia reavaliação do projeto.*

Para que ocorra um melhor conhecimento tecnológico deste material e uma maior escala de utilização, este deve ser adequadamente caracterizado, considerando a grande variabilidade de suas características decorrentes do processo de crescimento e secagem, para sua posterior utilização.

Um grande passo foi dado no sentido do desenvolvimento e aprimoramento da utilização da madeira no Brasil, com a revisão da norma de cálculo de estruturas

de madeira, *NBR 7190/1997 – Projeto de estruturas de madeira*, a qual datava do meio do século passado, *NB 11*.

Em países que possuem tradicional fama de grandes consumidores de madeira, como os Estados Unidos e Canadá, existem regras nacionais, de classificação visual de peças estruturais, conforme os defeitos que estas apresentam. Porém somente este sistema não propicia uma adequada caracterização das peças, pois a análise é feita visualmente, levando-se em conta os defeitos de crescimento e secagem e desconsiderando o interior da peça e seus possíveis efeitos.

1.1 O uso da madeira nas construções

O uso da madeira como material de construção é tão antigo quanto as próprias construções.

Rocco Lahr (1983a), faz uma abordagem histórica do uso da madeira em estruturas para cobertura, no decorrer dos milênios.

- **De 3000 a 500 a.C. no ocidente:** utilização pelo egípcios em estruturas treliçadas, para sustentação de palafitas à margens do rio Nilo; como cobertura de edificações na Mesopotâmia (atualmente, região localizada no Iraque)*; e em estruturas de coberturas plana pelos persas;
- **De 1000 a 500 a.C. no oriente:** na Índia, em abóbodas, arcos e coberturas de forma piramidal; na China, em telhados de forma côncava e com grandes beirais; no Japão, a madeira passou a ser utilizada como material de vedação;

* Nota do autor.

- **Arquitetura grega e romana:** na Grécia, a utilização de ferramentas de cobre e ferro para manuseio da madeira; na arquitetura romana; início de seções compostas dos banzos superior e inferior, diagonais e montantes;
- **Arquitetura a partir do século IV d.C.:** com os romanos e bizantinos, treliças com aspectos geométricos parecidos com as atuais; utilização de telhados de duas águas para residências, igrejas, edifícios públicos, palácios e outros; na arquitetura muçulmana, adaptação ao clima da região, através de pranchas sobrepostas apoiadas em vigas de madeira, com uma capa de material isolante e impermeabilizante, revestida de placas cerâmicas; a inovação da utilização de alguns pontos contraventados; na arquitetura Gótica, a utilização de treliças caracterizadas por acentuadas inclinações dos panos;

Em outro campo de utilização, Booth (1964) *apud* Rocco Lahr (1983 b)[†], cita Galileu Galilei (1564-1642), o qual utilizou vigas em balanço, de madeira e de outros materiais realizando estudo e dando origem a ciência hoje chamada de “Resistência dos Materiais”. Continua, citando os trabalhos de Mariotte (1620-1654), Hooke (1635-1703), Mussachebroek (1692-1761), entre outros que também utilizaram a madeira em seus estudos.

Utilizada pelo homem desde os primórdios, a madeira vem sendo ao longo dos tempos consagrada como um excelente material. Fusco (1989), comenta “... a madeira pode perfeitamente atender aos requisitos de qualidade, tão bem ou muitas vezes até melhor do que quaisquer outros materiais de construção.”.

Pinheiro (1996), destaca atualmente quatro formas do uso da madeira, as quais são viáveis caso sejam conhecidas as particularidades do material em cada uma delas, sendo:

[†] BOOTH, L.G. *The strength testing of timber during the 17th and 18th centuries. Journal of the Institute of Wood Science.* v.13, n.9, 1964.

- **Em toras:** a forma que mais se assemelha ao estado natural da matéria-prima, tendo uma menor transformação do material, estando voltada à estruturas e habitações, principalmente para edificações no meio rural e postes de eletrificação;
- **Serrada:** direcionada à construções de habitações, como material estrutural ou de vedação, podendo ser utilizada em caixilhos, portas, pisos, etc;
- **Madeira Laminada Colada (MLC):** capacidade de construção de peças de quaisquer dimensões e permite a redução da heterogeneidade aleatória natural do material;
- **Madeira reconstituída:** são os compensados, os aglomerados e as chapas de fibras, não possuindo obrigatoriamente as características iniciais encontradas no material natural.

A forma de peças estruturais retangulares são encontradas nas madeiras serradas ou nas laminadas coladas, tendo a diferença que a primeira trabalha isoladamente resistindo um determinado esforço e na segunda existe a solidarização com outras peças para resistir aos esforços.

Pinheiro (1996), ainda comenta que a madeira na forma serrada em vigas maciças com seções transversais retangulares, não é a mais eficiente na utilização do material, devido à forma geométrica que confronta com as características naturais do material (heterogeneidade, anisotropia, assimetria, inchamento e retração), podendo surgir problemas de instabilidade dimensional, principalmente do processo de secagem. Quanto ao uso das MLC, relata que sua maior vantagem é a capacidade de construção de peças estruturais com quaisquer dimensões e viabilidade na concepção da forma geométrica, possibilitando procedimentos de classificação de peças, sendo que as mais resistentes são destinadas às regiões de maiores esforços.

1.2 O projeto de estruturas de madeira

A madeira por suas características intrínsecas originárias de um material orgânico, possui grande heterogeneidade de suas propriedades físicas, função da variabilidade que ocorre em sua micro-estrutura.

Anteriormente, com a antiga norma de cálculo, a *NB 11*, o dimensionamento era realizado utilizando-se o “Método das Tensões Admissíveis”, que utilizava os valores médios das propriedades de resistência da madeira, dividindo tais valores por coeficientes de segurança, que levavam em conta as incertezas existentes nas propriedades dos materiais e do ambiente. Nesta linha de pensamento, quão maiores as incertezas do processo, maiores os coeficientes de segurança utilizados. Fusco (1989), comenta que esta metodologia representa o “método comparativo” de realização de um sistema, onde cada nova construção era baseada em exemplares já existentes, as quais apresentassem bom desempenho, tendo sido empregado desde os primórdios da civilização.

Contrariamente, tem-se o “método racional”, o qual justifica suas decisões por avaliação objetiva dos parâmetros que controlam o desempenho real do material, adequando este desempenho aos requisitos especificados. É o que ocorre atualmente, com a nova norma de cálculo, *NBR 7190/97 Projeto de estruturas de madeira*. O método de dimensionamento não adota uma resistência admissível (comparativa), e sim uma resistência característica (f_k) que possui apenas 5% de probabilidade de ter valores menores em um dado lote de material. Este, considerado como semi-probabilístico, é chamado de “Método dos Estados Limites”, racional, o qual já era adotado pela *NBR 6118*[†], e pela *NBR 8800*[§], no dimensionamento de estruturas de concreto armado e aço, respectivamente.

[†] *NBR 6118:1980 – Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento;*

No projeto de estruturas de concreto, defini-se inicialmente o tipo (armado, protendido ou massa), com a adoção da resistência característica (f_{ck}) em um intervalo contínuo, sendo que esta deverá atender as hipóteses de cálculo e de durabilidade. O projetista admite que o concreto será produzido atendendo estas hipóteses.

Para as estruturas em aço, escolhe-se inicialmente a resistência a ser utilizada dentro de valores já pré-estabelecidos, em função dos esforços atuantes e geometria do projeto e das peças estruturais

Para as estruturas de madeira, inicialmente o engenheiro escolhe uma classe de resistência que melhor se enquadre ao projeto, em seguida adotando a espécie que atenda tal classe, conforme Tabelas 1 e 2.

TABELA 1 – Classes de resistência das coníferas - (NBR 7190/97)

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

TABELA 2 – Classes de resistência das dicotiledôneas - (NBR 7190/97)

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

§ NBR 8800:1986 – Projeto de execução de estruturas de aço de edifícios (Método dos estados limites) – Procedimento;

Entretanto, com a grande variabilidade das características das peças estruturais, e os valores médios tabelados das propriedades de resistência e elasticidade da madeira, no momento da execução da estrutura, uma peça de baixa resistência pode ser colocada em uma posição que receba altos níveis de solicitação. Inversamente, uma peça que possua maior resistência pode ser colocada em uma posição que sofra pequeno esforço. Desta forma verifica-se a necessidade de uma pré-classificação das peças estruturais de madeira, a qual pode ser realizada através de uma classificação mecânica.

1.2.1 Valores de cálculo

Para os valores de cálculo (X_d), de uma determinada propriedade da madeira este é calculado conforme a Eq. (1),

$$X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (1)$$

onde " γ_w " é o coeficiente de minoração das propriedades da madeira e k_{mod} é o coeficiente de modificação.

Os valores de " γ_w " para os estados limites últimos, são adotados em função do tipo de solicitação à qual a peça está submetida, conforme Tabela 3.

TABELA 3 – Valores de γ_w para estados limites últimos – NBR 7190/97

Tipo de solicitação	γ_w
Compressão (γ_{wc})	1,4
Tração (γ_{wt})	1,8
Cisalhamento (γ_{ww})	1,8

Para o estado limite de utilização o valor de " γ_w " é "1,0".

O coeficiente de modificação k_{mod} é obtido pela Eq. (2), levando em conta a duração do carregamento (k_{mod1}), a umidade de equilíbrio da madeira (k_{mod2}) e a qualidade da madeira empregada na estrutura (k_{mod3}).

$$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3} \quad (2)$$

TABELA 4 – Valores de k_{mod1} - (NBR 7190/97)

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Madeira serrada	Madeira recomposta
	Madeira laminada colada Madeira compensada	
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,85	0,65
Curta duração	1,00	1,00
Instantânea	1,10	1,10

TABELA 5 – Valores de k_{mod2} - (NBR 7190/97)

Classes de umidade	Madeira serrada	Madeira recomposta
	Madeira laminada colada Madeira compensada	
(1) e (2)	1,0	1,0
(3) e (4)	0,8	0,9

TABELA 6 – Classes de umidade - (NBR 7190/97)

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente – U_{amb}	Umidade de equilíbrio da madeira
1	65%	12%
2	$65\% \leq U_{amb} < 75\%$	15%
3	$75\% \leq U_{amb} < 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longo período	$\geq 25\%$

Para madeiras submersas adota-se o valor de “0,65” para k_{mod2} .

Para o coeficiente k_{mod3} , deve-se adotar “0,8” para madeira de segunda categoria, e “1,0” para madeira de primeira categoria. Entretanto para as coníferas,

sempre deve ser utilizado o valor de “0,8”, considerando a presença de nós não detectáveis por inspeção visual.

No caso de madeira laminadas coladas, o valor de k_{mod3} deve ser obtido através da Eq. (3), onde “t” é a espessura da lâmina, e “r” o raio de curvatura das lâminas.

$$k_{mod3} = 1 - 2000 \cdot \left(\frac{t}{r} \right)^2 \quad (3)$$

Também não se permite classificar a madeira como de primeira categoria, apenas por inspeção visual.

1.3 Justificativa do trabalho

Geralmente a madeira é caracterizada e avaliada através de pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos, conforme o anexo B da NBR 7190/97, onde são descritos os ensaios para obtenção dos valores das características mecânicas: compressão paralela e normal as fibras, tração paralela e normal, cisalhamento, flexão, fendilhamento, dureza, tenacidade, entre outros.

Entretanto, estes ensaios por serem realizados com corpos-de-prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos (Figura 1 - ensaio de tração paralela às fibras), não exprimem o real comportamento de uma peça quando solicitada a um determinado esforço, pois se em exemplares isentos de defeitos, a variabilidade dos resultados obtidos é alta, soma-se também às peças estruturais, a variabilidade causada pela presença dos defeitos de crescimento e secagem.

Apesar da madeira ser um excelente material estrutural, esta vem sendo deixada de lado devido o desconhecimento de suas propriedades físicas. Infelizmente o desconhecimento técnico deste material, é conseqüência de muitos fatores, dentre os quais consideram a madeira como um material antigo e de baixa

durabilidade, pouco interessante para o desenvolvimento da tecnologia. Esta é a mesma cultura que considera em seu âmago, que apenas tecnologias como o dimensionamento de estruturas espaciais em aço, e também em concretos de elevado desempenho, são as que dão “status” ao meio técnico nacional, podendo este se equiparar aos dos países desenvolvidos.

FIGURA 1 – Ensaio de tração paralela às fibras, conforme NBR 7190/97

Um exemplo da inadequada comercialização da madeira é demonstrada por Bittencourt (1995), em estudo realizado na cidade de Guaratinguetá-SP, de 68 amostras fornecidas por estabelecimentos comerciais, foram registradas 21 espécies, das quais 29% destas eram comercializadas por nomes errados.

Desta forma, o engenheiro, projetando uma estrutura em madeira, além de não possuir o conhecimento da variabilidade das características do material empregado, pode também não ter certeza, se a espécie adotada nos cálculos está realmente sendo utilizada.

Contrariando esta prática existente, Pigozzo; Pletz; Rocco Lahr (2000) relatam que as peças estruturais poderiam ser comercializadas não por espécie e sim por classes de resistência, podendo várias espécies serem agrupadas juntamente, sendo esta uma recomendação da NBR 7190/97. O engenheiro

adotaria apenas as classes de resistência para o desenvolvimento do projeto, e tendo certeza que as peças possuiriam a característica adotada.

A adequada classificação das peças estruturais, é nada mais que um controle de qualidade do material a ser utilizado. Nada mais que correto que um material seja inspecionado para seu uso, principalmente quando este possuirá funções estruturais.

Todos os materiais utilizados na construção civil, seja para a construção de uma habitação popular, bem como de uma ponte ou até mesmo de uma barragem hidroelétrica, devem ser adequadamente avaliados, para que se saiba se estes estão aptos a serem utilizados.

A madeira utilizada como material da construção civil também deve passar por um rigoroso controle de qualidade, entretanto isto não ocorre no Brasil, devido a “crença popular”, citada anteriormente. Infelizmente em nosso país, profissionais não habilitados ou qualificado, muitas vezes são os que tem maior poder de convencimento junto ao empreendimento, ainda mais quando se trata de madeira, o que é fruto de uma inadequada formação de engenheiros civis e arquitetos, nos cursos de graduação, visto que este material o qual é tão abundante em nosso país é deixado de lado muito erroneamente.

A realização da classificação de peças estruturais de madeira deve ser feita por uma metodologia não destrutiva, pois permitirá o posterior uso desta peça na estrutura a ser construída.

Para isto, as avaliações qualitativas, como a classificação visual em função dos defeitos de crescimento, não devem ser as únicas metodologias para esta necessária classificação. O chamado “ensaio de obra”, é uma metodologia adequada, não apenas para controle de recepção em obra, mas também para

pequenos estabelecimentos, visto que o custo para a realização deste ensaio é muito baixo.

A classificação mecânica por tensões - MSR, além de ser um método não-destrutivo, possui alta produtividade, sendo assim muito interessante no uso de classificação de peças estruturais em larga escala.

Com o desenvolvimento de uma economia sustentável, a cada momento novas fontes de suprimentos são requisitadas à atual sociedade mundial. Sendo a madeira uma fonte renovável, nada mais do que correta a sua utilização racional. Entretanto, para o abastecimento de madeira para as regiões Sul e Sudeste, o grande mercado consumidor, as florestas naturais, das regiões Centro-Oeste e Norte, encontra-se em exaustão, Calil Jr. (2002).

Porém, uma adequada opção é a utilização de matéria-prima proveniente de florestamentos de coníferas. As tabelas 7 e 8, demonstram a série histórica da última década (1990-2000), para a produção de madeira serrada no Brasil.

TABELA 7 – Série histórica da produção de serrados no Brasil (1000 m³) – (SBS – 2002)**

Ano	Folhosas	Coníferas	Total
1990	10930	2800	13730
1991	12200	3500	15700
1992	12410	3480	15890
1993	12620	3720	16340
1994	12830	3780	16610
1995	13230	3950	17180
1996	13650	4050	17700
1997	14250	4250	18500
1998	14000	4200	18200
1999	14400	4500	18900
2000	15300	7800	23100

** SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura

Entre as coníferas, uma adequada opção encontrada é o gênero *pínus* spp, o qual o Brasil possuía no ano de 2000, uma área de 1,84 milhões de hectares plantados, sendo esta distribuída em vários estados, conforme Tabela a seguir.

TABELA 8 – Série histórica do consumo de serrados no Brasil (1000 m³) – (SBS – 2002)

Ano	Folhosas	Coníferas	Total
1990	10360	2850	13210
1991	11510	3440	14950
1992	12157	3407	15564
1993	12404	3670	16074
1994	12179	3451	15630
1995	13022	3570	16592
1996	13291	3653	16944
1997	13752	3648	17400
1998	13450	3660	17110
1999	13860	3840	17700
2000	14200	6100	20300

TABELA 9 – Distribuição da área plantada de *pínus* no Brasil no ano de 2000 (SBS – 2002)

Estado	Área plantada (Ha)
Amapá	80.360
Bahia	238.390
Espírito Santo	-
Mato Grosso do Sul	63.700
Minas Gerais	143.410
Pará	14.300
Paraná	605.130
Rio Grande do Sul	136.800
Santa Catarina	318.120
São Paulo	202.010
Outros	37.830
Total	1.840.50

Entretanto, a utilização do pinus como madeira estrutural está ligada a um forte preconceito quanto às suas propriedades mecânicas e sua durabilidade, o qual só poderá ser vencido com uma adequada, coerente e racional utilização.

O pinus como qualquer outra madeira deve passar por um rigoroso controle de qualidade, para posterior utilização. Apenas com uma adequada classificação pode ser otimizado processos construtivos para obtenção de segurança, qualidade e diminuição de custo.

Em ensaios preliminares de classificação do gênero pinus spp., através de MSR, bons resultados foram obtidos. Tais resultados foram publicados por Freitas; Calil Jr. (2002). As tabelas 10 e 11, apresentam os resultados da análise estatística para os valores obtidos através dos ensaios.

Os valores para a média, desvio padrão e mediana sofrem influência quando a intensidade de carga aplicada é variável. Entretanto, mesmo ocorrendo variação nestes valores, não ocorre com o coeficiente de variação, significativamente.

Com a variação de velocidade de ensaio e intensidade de carga constante, não ocorrem significativas mudanças de valores para a média, desvio padrão, mediana e coeficiente de variação.

TABELA 10 - Análise dos resultados de ensaios com intensidade de carga variável e velocidade constante - (Freitas; Calil Jr. – 2002)

Item	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE _{din} (MPa)		
			1,00 kN	1,25 kN	1,50 kN
Média	11217	68,5	17056	15199	13780
D. padrão	2794	25,9	5908	5150	4536
Coef. var.	24,9%	37,8%	34,6%	33,9%	32,9%
Mediana	11354	73,5	16571	15077	13493
Corr. MOE	-	0,74	0,94	0,92	0,93
Corr. MOR	-	-	0,72	0,69	0,69

Para as correlações entre MOE_{din} e MOE , os coeficientes obtidos são altos, até mesmo maiores que a correlação entre MOE e MOR . Porém os coeficientes de correlação entre MOE_{din} e MOR são menores, devido o coeficiente de variação do MOR , ser maior que o do MOE .

TABELA 11 – Análise dos resultados de ensaios com velocidade variável e intensidade de carga constante - (Freitas; Calil Jr – 2002)

Item	MOE_{din} (MPa)		
	25m/min	50 m/min	75 m/min
Média	9278	9312	9248
D. padrão	3179	3242	3144
Coef. var	34,3%	34,8%	34,0%
Mediana	8633	8694	8729

Para uma melhor avaliação, da existência de diferença significativa entre as populações de MOE_{din} , realiza-se um teste de hipótese por análise de variância, entre os valores de MOE_{din} ao se variar a intensidade da carga aplicada, e também ao variar a velocidade da peça. Sendo assim temos $MOE_{din1,00}$, $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$ para os valores ao variar a carga aplicada, e MOE_{din25} , MOE_{din50} e MOE_{din75} para os valores variando a velocidade da peça.

- Análise de variância para variação da intensidade de carga**

H_0 : a população dos valores de $MOE_{din1,00}$, $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$ são equivalentes

H_1 : nem todas as populações de $MOE_{din1,00}$, $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$ são equivalentes

$$H_0 : MOE_{din1,00} = MOE_{din1,25} = MOE_{din1,50} \quad H_1: MOE_{din1,00} \neq MOE_{din1,25} \neq MOE_{din1,50}$$

$$F_{obtido} : 3,160$$

$$F_{critico} : 3,094$$

$$p\text{-valor: } 0,047^{**}$$

Conclusão: rejeitar H_0

- **Análise de variância para variação da velocidade da peça**

H_0 : a população dos valores de MOE_{din25} , MOE_{din50} e MOE_{din75} são equivalentes

H_1 : nem todas as populações de MOE_{din25} , MOE_{din50} e MOE_{din75} são equivalentes

$$H_0 : MOE_{din25} = MOE_{din50} = MOE_{din75}$$

$$H_1 : MOE_{din25} \neq MOE_{din50} \neq MOE_{din75}$$

$$F_{obtido} : 0,003$$

$$F_{critico} : 3,094$$

$$p\text{-valor}: 0,998$$

Conclusão: aceitar H_0

Desta forma, conclui-se que realmente a variação da intensidade de carga aplicada acarreta diferença significativa nos valores de MOE_{din} , não ocorrendo o mesmo ao se variar a velocidade da peça.

Assim este trabalho tem por fim, a obtenção de curvas de correlação e de confiança, entre os módulos de elasticidade e ruptura à flexão (MOE e MOR , respectivamente), com o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{din}), obtido pela classificação mecânica, através de MSR, para o gênero *pínus spp.*, e avaliar os melhores valores dos parâmetros velocidade e intensidade de carga, utilizados pela máquina.

^{††} $p\text{-valor}$: nível de significância observado

2 O MATERIAL PÍNUS

Como dito anteriormente no capítulo 1, o Estados Unidos, que possuem tradicional fama de grande consumidor de madeira, produzem 15 m³/ha/ano. A Finlândia, a qual grande parte de sua economia está em função da madeira, produz em média 5 m³/ha/ano, e a África do Sul 18 m³/ha/ano. Entretanto, o Brasil produz apenas de pinus de florestamento, 25 m³/ha/ano, para o eucalipto, 30 m³/ha/ano e 50 m³/ha/ano para espécies tropicais da região amazônica, Calil Jr. (2002). Estes dados confirmam o grande potencial de nosso país no setor madeireiro, o qual não é aproveitado adequadamente.

Lima (1988), comenta os estudos desenvolvidos pelo IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, em 1979 direcionando o gênero *Pínus spp.* à área de habitações de interesse social, na região do sudeste do estado de São Paulo (região onde estão localizados os municípios de Itapeva, Jacupiranga, Agudos, Apiaí, Guareí, Itararé, Lençóis Paulistas, Buri, Capão Bonito, Eldorado, Águas de Santa Bárbara, Avaré, Itaberá, Rancharia). Tais estudos foram necessários, pois com a política de incentivos fiscais de reflorestamento em 1967, o plantio do gênero pinus foi desvinculado de um objetivo de aproveitamento industrial, o qual possuía ainda qualidade insatisfatória devido à baixa implementação tecnológica.

Para a utilização do pinus, Szücs (1992) considera a existência de um tabu, o qual está mais ligado à falta de conhecimento do material, do que à sua baixa densidade.

Bortoletto (1993), pesquisando as utilidades de seis espécies do gênero (bahamensis, caribaea, hondurensis, elliotti, oocarpa, taeda), descreve a madeira deste como de rápida e fácil secagem, sendo de grande importância para o retorno do capital investido, e que apresenta defeitos minimizados com a realização de um processo bem conduzido.

No que tange à durabilidade, Bortoletto considera que a madeira do gênero *Pinus spp.*, é reconhecidamente de baixa durabilidade natural, entretanto por suas características próprias, é de fácil preservação.

Pela Tabela 12, verifica-se os valores das características para algumas espécies, sendo perfeitamente adequados para uso em estruturas. Porém o desconhecimento por parte da maioria do meio técnico impossibilita que o este gênero adquira “status” de madeira estrutural. Pelos valores apresentados, verifica-se que a espécie *bahamensis*, é a que possui os menores valores para as todas as propriedades.

TABELA 12 – Valores médios e madeiras coníferas de florestamento, ensaios de amostras isentas de defeito – (Calil Jr. - 2002);

Nome Comum	Nome Científico	$\rho_{ap(12\%)}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)	N
Pínus caribea	Pinus caribea var. Caribea	579	35,4	64,8	3,2	7,8	8431	28
Pínus bahamensis	Pinus caribea var. Bahamensis	537	32,6	52,7	2,4	6,8	7110	32
Pínus hondurensis	Pinus caribea var. hondurensis	535	42,3	50,3	2,6	7,8	9868	99
Pínus elliottii	Pinus var. elliottii	560	40,4	66,0	2,5	7,4	11889	21
Pínus oocarpa	Pinus oocarpa shiede	538	43,6	60,9	2,5	8,0	10904	71
Pínus taeda	Pinus taeda L.	645	44,4	82,8	2,8	7,7	13304	15

A Tabela 13, resume as aplicações do gênero pinus, na construção civil. Nota-se que das seis espécies apresentadas, e dos cinco grupos de utilização da madeira citados, apenas o *Pinus bahamensis*, não apresenta ser adequado ao grupo da construção civil leve externa. Este fato se deve a sua baixa resistência à

flexão, bem como para todas as outras espécies, porém não possuindo outras propriedades de resistência que melhorem este baixo desempenho.

TABELA 13- Resumo das conclusões - (Bortoletto, 1993)

Grupos	Aplicações	Variedades					
		BAHIENSIS	CARIBAEA	HONDURENSIS	ELLIOTTII	OCCARPA	TAEDA
Construção civil leve externa	Moirões		X	X	X	X	X
	Pontaletes		X	X	X	X	X
	Porteiras		X	X	X	X	X
	Andaimes		X	X	X	X	X
	Longarinas		X	X	X	X	X
	Calhas		X	X	X	X	X
	Elementos de cobertura		X	X	X	X	X
	ESQUADRIAS EM GERAL: portas, venezianas, caixilhos, batentes		X	X	X	X	X
	Tabuado em geral, vigas		X	X	X	X	X
Construção civil leve interna	DECORATIVA: lambris, painéis molduras, perfilados, guarnições	X	X	X	X	X	X
	UTILIDADE GERAL: cordões, forros, guarnições, rodapé	X	X	X	X	X	X
	ESTRUTURAL: vigas, caibros, ripas	X	X	X	X	X	X
Chapas Compensadas	UTILIDADE GERAL: partes internas de móveis, armários, forros, divisórias, usos generalizados	X	X	X	X	X	X
	PARA CONSTRUÇÃO: formas para concreto, coberturas, anteparos, divisórias, usos generalizados	X	X	X	X	X	X
Lâminas	DECORATIVA: Lâminas para face de compensado decorativo; Face de móveis, caixas de aparelhos de som	X	X	X	X	X	X
	UTILIDADE GERAL: Miolo de chapas compensadas, portas; Outros usos	X	X	X	X	X	X
Chapas Aglomeradas	UTILIDADE GERAL: Divisórias, painéis de fechamento Móveis, usos generalizados	X	X	X	X	X	X

Pinheiro (1996), estudando sua utilização para as estruturas de cobertura através de treliças, constata sua viabilidade para vão entre 6,0 m à 12,0 m, e que

as dimensões da seção transversal são compatíveis com as disponíveis no mercado.

Calil Jr. (2002), cita alguns tipos de estruturas, nas quais podem ser utilizadas o pinus, tais como estruturas de cobertura, pontes de madeira laminada colada e de tabuleiro protendido e também silos para armazenamento de grãos. Como exemplo de obra construída no Brasil em pinus e de grande porte, indica a “montanha russa *Montezum*”, construída no parque temático “*Hopi Hari*”, na cidade de Vinhedo-SP, tendo 1.024 m de extensão, com pórticos de até 40 m de altura. No entanto, esta obra foi construída com “*yellow pine*”, de origem norte-americana, que equivale ao *Pinus taeda*. Este caso chega ser um contra-senso devido à produtividade anual do gênero pinus no Brasil é quase o dobro da norte-americana.

**FIGURA 2 – Montanha russa Montezum,
parque Hopi Hari – (Calil Jr., 2002)**

Atualmente, o Brasil dispõe de 6,29 milhões de hectares plantados com madeira de florestamento, dos quais 1,862 milhão está plantado com pinus, sendo assim uma alternativa para o abastecimento de madeira na construção civil, em vista que as florestas nativas, nas regiões norte e centro-oeste, encontram-se em exaustão e que elevados custos de transporte e recomendações de exploração

com manejo florestal dificultam a obtenção de madeira proveniente destas regiões, Calil Jr. (2002).

Bezerra (2002), cita a produção de pallets descartáveis, como sendo a opção mais lucrativa, na utilização de madeira de pinus em uma pequena serraria no interior do estado de São Paulo. Não há mal algum na utilização do gênero Pinus, na produção de forro ou de pallets, mas sim quando se utiliza este gênero apenas para tais fins. Por estes relatos, pode-se dizer que é um verdadeiro desperdício da madeira pinus, quando se utiliza este gênero na construção civil apenas como forro, ou pior ainda quando utilizado como pallet.

3 CLASSIFICAÇÃO DAS PEÇAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

Segundo Meseguer (1991), a qualidade de um material é definida por características que devem ser objeto de controle durante a fabricação. Destas características, algumas são mensuráveis e por consequência, são representadas por uma escala numérica, sendo chamadas de variáveis. Outras, contrariamente, são qualitativas, e não podem ser mensuradas quantitativamente, sendo estas chamadas de atributos.

Continuando, Meseguer relata as três etapas a serem implantadas quando se deseja implantar um controle de produção.

- 1. Estudo cuidadoso das especificações, e a partir desta elaborar duas listas diferentes, uma de variáveis e outra de atributos;*
- 2. Expressar junto a cada variável o seu limite de especificação;*
- 3. Expressar os atributos em forma de defeitos;*

Em seguida deve-se dividir cada uma das duas listas em duas (atributos e defeitos – item 1) ou três partes, podendo ser suficiente em duas categorias, principais e secundárias.

O defeito principal é aquele que faz com que o produto seja praticamente inútil e o defeito secundário aquele que reduz a utilidade ou durabilidade do produto. Caso haja um defeito que acarrete piores consequências, este deverá ser classificado como crítico, caracterizando o produto não apenas como inútil, mas também como perigoso.

Trazendo estes conceitos de controle dos materiais à madeira, pode-se associar às variáveis, os valores das propriedades de umidade, densidade (real, básica e aparente), de resistência e elasticidade, todas com valores mensuráveis em uma escala numérica. E aos atributos, os defeitos de crescimento e secagem, tais como nós, inclinação da grã, abaulamento, arqueadura, fendilhamento, etc.

Entretanto, tem-se algo um pouco mais complexo na madeira do que em outros materiais estruturais como concreto e aço. Supondo o controle de recebimento de concreto em uma dada obra, são coletadas amostras deste material, para posteriormente serem realizados os ensaios que possam avaliar a propriedade controle, sabendo-se que estes resultados obtidos em “pequenos” corpos de prova, quando comparados aos volume total da estrutura, não terão influência de defeitos inerentes à este, que ocorram em uma maior escala. Porém existe a influência da cura, pois a resistência do material da estrutura não é igual à dos corpos de prova, que são curados em condições de umidade e temperatura controladas.

Nos aços, garantido-se que as peças utilizadas são as adotadas pelo projeto, as propriedades avaliadas em ensaios em pequenos exemplares são as mesmas da estrutura. Não ocorre influência na mudança de escala, nem tão pouco outras como a cura nos concretos, porem existem imperfeições geométricas inerentes ao processo de laminação ou soldagem.

Entretanto, na utilização das madeiras ocorrem quatro fatores de grande importância:

- A caracterização das propriedades mecânicas de uma espécie é realizada através de variáveis (quantitativamente);
- Alta variabilidade das propriedades mecânicas nos resultados obtidos em ensaios;

- Os corpos de prova utilizados para obtenção das propriedades mecânicas são isentos de defeitos, enquanto que nas peças estruturais ocorrem a presenças destes defeitos;
- Controle de recebimento em obra das peças estruturais (quando existe) é realizado através de atributos (qualitativamente);

Assim, as estruturas em madeira estão sujeitas a maiores interferência à sua realização conforme projeto, que os outros materiais estruturais citados, fazendo-se mister o adequado conhecimento das propriedades do material utilizado.

Para a realização da avaliação de peças estruturais de madeira em tamanho real pode ser aplicada duas diferentes metodologias. A primeira é a classificação visual, e a segunda, a classificação mecânica.

3.1 Avaliação não-destrutiva

Ross *et al.* (1998), definem como “avaliação não-destrutiva”, como sendo a ciência de identificação das propriedades físicas e mecânicas de uma peça, sem a alteração de sua capacidade final, usando estas informações para fazer relações e aplicações apropriadas, sendo definidas por:

Avaliação de características visuais: cor, presença de defeitos;

- **ensaios químicos:** composição, presença de tratamentos (preservativos, retardadores de fogo);
- **ensaios físicos:** resistência elétrica, propriedades dielétricas, propriedades vibracionais, propagação de ondas, emissões acústicas, raio-x;
- **ensaios mecânicos:** rigidez à flexão, provas de carga (flexão, tração, compressão), dureza;

Conforme Ross (1992), em materiais homogêneos as quais as propriedades mecânicas são conhecidas e rigorosamente controladas, tais como metais, vidros, plásticos e cerâmicas, as técnicas de avaliação não-destrutivas são utilizadas para detectar a presença de descontinuidades, vazios ou inclusões. Em se tratando de madeira, os ensaios não-destrutivos são utilizados para avaliar as propriedades mecânicas da mesma, visto que esta, por se tratar de um material de origem biológica, já possui defeito, e também devido a ocorrência de agentes de degradação. Continuando, Ross cita que a *Hipótese de Jayne*^{*}, fundamental para o uso dos ensaios não-destrutivos na madeira, a qual propõe que a energia armazenada e a propriedade de dissipação dos materiais a base de madeira, podem ser medidas não-destrutivamente por uma variedade de técnicas estáticas e dinâmicas, sendo esta as que determinam o comportamento mecânico de tais materiais, e com a utilização de relações matemáticas entre estas propriedades de resistência e elasticidade, é possível uma análise estatística por métodos de análise de regressão.

Um fato importante que é citado por Galligan *et al.* (1979), na realização do ensaio destrutivo de tração em peças estruturais é o esmagamento da madeira na região de fixação, o que poderia ser resolvido com o aumento da seção da peça nesta região, ocorrendo a diminuição da distância livre para o ensaio, ou com a colagem de madeira adicional, o que tornaria o ensaio mais oneroso, com o aumento do custo da preparação das amostras.

Os ensaios de avaliação não-destrutiva são metodologias que podem em muito contribuir para melhoria da tecnologia da madeira, principalmente no Brasil.

^{*} JAYNE, B.A. *Indices of quality: vibrational properties of wood. Forest Products Journal*. v.9, n.11, p.413-16.

3.2 A classificação visual

A classificação visual é baseada na premissa que as propriedades mecânicas das peças estruturais diferem das mesmas propriedades de corpos de provas isentos de defeitos, devido suas características que podem ser observadas, julgando as peças visualmente, Kretschmann; Green (1999). As características de crescimento são utilizadas para classificar peças estruturais em classes de resistência.

Blass; Gard (1994) definem a classificação visual como a classificação da resistência baseada em relações estatísticas entre fatores visuais e a capacidade de carregamento, considerando as duas principais desvantagens: a impossibilidade de redigir um conjunto de regras cobrindo todas as complexas combinações de fatores de resistência de uma peça, e que as propriedades que são relacionadas intimamente com a resistência são apenas avaliadas visualmente, tais como a densidade e o módulo de elasticidade.

Em 1923, o “*USDA Forest Service, FPL – Forest Products Laboratory*”, publica as regras básicas de classificação associadas à valores de tensões, sendo projetadas apenas para as melhores peças cortadas de uma árvore, ficando essencialmente sem mudanças por mais de 20 anos, Galligan; McDonald (2000). Com a Segunda Guerra Mundial, ocorrem drásticas mudanças no sistema de classificação visual, tendo como efeito inicial, um provisório aumento nas tensões[†] de projeto, sendo desenvolvido um aumento de 85% pela marinha norte-americana (*U.S. Army*), ficando alguns deste provisórios aumentos, como permanentes.

Mudanças drásticas ocorrem novamente em 1970, sendo incorporados várias características, como retração por secagem da peças estruturais *in loco*. Após isto, a próxima grande mudança ocorre em 1991, com a adoção de novas tensões de projeto, baseados em ensaios em peças estruturais em tamanho real.

Galligan; McDonald (2000), comentam que a classificação visual tem servido bem durante muitos anos, tendo como ponto forte a grande quantidade de material que este método permite produzir sendo que um fator de preocupação é a larga variedade de combinações classe-espécie desenvolvido pelo sistema.

Segundo Uriartt (2001), são considerados defeitos na madeira todas as anomalias que alteram o desempenho e suas propriedades mecânicas podendo ser divididos em quatro grupos.

- **defeitos de crescimento:** devido à alterações no crescimento e estrutura fibrosa do material, tais como nós, inclinação da grã e bolsas de resina;
- **defeitos de secagem:** conseqüentes de secagem mal conduzidas, provocadas pela retratibilidade da madeira ao perder umidade, podendo ser rachaduras, fendas, fendilhamento, abaulamento, curvatura e curvatura lateral;
- **defeitos de produção:** decorrentes da desdobra e aparelhamento das peças, ocorridos no momento do abate e derrubada da árvore (fraturas, fendas, rachaduras e machucaduras) e pelo desdobro e serragem das peças (cantos esmoados, camadas de cortiça e fibras cortadas)
- **defeitos de alteração:** provocados por agentes de deterioração, como fungos e insetos, causando reduções na seção resistente de peças.

Dos quatro grupos de defeitos apresentados, o único no qual o homem não contribui para o aparecimento são os de crescimento, inerentes ao organismo vivo em desenvolvimento. Todos os outros três, podem ser minimizados ou eliminados, através de adequados processos de abate das árvores, secagem das toras, serragem das peças e posterior aplicação de produtos preservativos para evitar o deterioração por fungos e ou insetos.

^{††} Tensões resistentes - nota do autor

3.2.1 Efeito dos nós

Kretschmann; Green (1999), relatam que em geral os nós tem maior efeito na resistência à tração do que à compressão. Quanto à flexão, o efeito depende da posição do nó, se este está sofrendo esforço de tração ou de compressão. Entretanto quando este estiver posicionado no eixo da peça estrutural, também produzirá pouco efeito. Os nós firmes resistem à alguns tipos de tensões, enquanto os nós soltos e vazados pouco ou nada resistem às tensões.

FIGURA 3 - Nó ocupando toda a seção transversal da peça

Entretanto, as distorções da grã são maiores ao redor dos nós firmes, do que ao redor de um nó solto de equivalente tamanho, obtendo como resultado efeitos de mesmas proporções.

O efeito da presença de um nó é mais significativo nas propriedades de resistência do que na rigidez da peça. Seu efeito na resistência depende da proporção da seção transversal da peça que ocupa, sua localização e distribuições da tensão na peça.

Os limites das dimensões dos nós são definidos em função da largura da face e sua localização nesta. Nenhuma localização é imposta à um nó em uma peça comprimida, devido à todas as partes da peça estarem comprimidas igualmente. Entretanto em peças tracionadas os nós nas bordas causam excentricidade gerando tensões de flexão, sendo mais restrita a utilização destas peças do que a que apresentam nós fora das bordas.

3.2.2 Efeito da inclinação da grã

A inclinação da grã reduz as propriedades mecânicas das peças estruturais devido as fibras não estarem paralelas as bordas, gerando decomposição dos esforços, causando tensões de cisalhamento na peça, segundo Kretschmann; Green (1999).

Outro fator importante, é que peças estruturais com grandes desvios da grã tendem ao empenamento com a mudança da umidade. As tensões geradas por retração por secagem são maiores em peças estruturais do que em corpos de prova isentos de defeito com a grã reta.

A região com distorção da grã localizada ao redor de um nó tem menor rigidez que nas regiões onde possuem a grã reta, assim este efeito é associado ao nó, e não à inclinação localizada da grã. Estas regiões constituem pequena parte do total da peça estrutural, sendo que a rigidez global desta, reflete a de todas as partes. Dessa forma o desvio localizado da grã, não causa grande influência à rigidez da peça.

3.2.3 Quantificação dos defeitos

A norma *ASTM D245-93 Establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber*, propõe o conceito do “*Strength Ratios - SR*” (proporção de resistência) para a classificação de peças estruturais em classes de

resistência, em função da relação entre o tamanho do nó (k), e a dimensão da face (h) na qual esta localizado o nó.

TABELA 14 – Classificação visual em relação ao tamanho de nó (Krestschmann, D.E.; Green, D.W , 1999)

Classe Visual	Relação (k/h)
SS*	1/6
1	1/4
2	1/3
3	1/2

(*) – SS: *select structural*

Considerando que a resistência da peça estrutural é derivada das de pequenas amostras isentas de defeitos, uma forma de se levar em conta o tamanho do nó, é pela proporção de resistência, dada pela Eq. (4),

$$SR = 1 - \left(\frac{k}{h} \right)^2 \quad (4)$$

sendo “SR” (strength ratio), uma proporção hipotética da resistência da peça em relação a amostras isentas de defeitos, Krestschmann; Green (1999).

Para o módulo de elasticidade a *ASTM D 245*, estabelece “Fatores de Qualidade” em função de “SR”, devendo este multiplicar o valor do módulo da espécie.

TABELA 15 – Fator de qualidade para módulo de elasticidade – (ASTM D245-93)

Proporção de Resistência a flexão - %	Fator de qualidade para módulo de elasticidade - %
≥55	100
45 a 55	90
≤44	80

3.3 A classificação mecânica

A classificação mecânica é um método mais adequado, realizando uma análise quantitativa, não diferindo os valores em função do senso humano, pois a peça avaliada desta forma é classificada por um valor de módulo de elasticidade à flexão (MOE) e também podendo ser caracterizada em função do módulo de ruptura (MOR), quando é possível correlacionar estatisticamente estes valores.

Furiati (1981), demonstra em ensaios de carregamento em modelos reduzidos de tesoura simples e arcos treliçados, a necessidade da adequada classificação das peças estruturais de madeira, visando a segurança das estruturas, para as que as peças mais resistentes sejam colocadas nas posições de maiores solicitações. As peças foram classificadas através da realização do “ensaio de obra” o qual se obtém o módulo de elasticidade da peça, com esta em posição de viga bi-apoiada com posterior aplicação de carga centrada. Em seguida foram divididos os valores obtidos em intervalo em três classes. Para obras de pequeno porte, tal metodologia é adequada, pois o custo de realização deste ensaio, é mínimo.

Outro importante estudo foi realizado por Rocco Lahr (1983), onde concluiu que em ensaios para a determinação do módulo aparente à flexão (E_a – com aplicação de carga apenas em um ponto), a desconsideração da parcela referente ao esforço cortante conduz à variações nos valores obtidos para relações L/h (vão livre-altura) menores que 21. Entretanto para o valor do módulo de ruptura a flexão, esta relação não influi, podendo realizar os dois ensaios através da mesma peça.

Confirmando a validade deste tipo de ensaio, Pigozzo *et al.* (2000), ensaiaram doze peças de seção transversal 6 x 12 cm, de Envira (*Sterculia sp*) obtiveram 95% de significância, que estas quando carregada em forma de tábua (menor inércia) ou viga (maior inércia), são idênticos os valores obtidos, e que em

mesmo nível de significância, com a realização do ensaio em dois pontos em peças de 4,0 m e em três pontos em peças de 5,0 m, que não existia diferença entre os valores obtidos, sendo possível a realização do ensaio em apenas um ponto. Concluíram também que este tipo de ensaio é adequado aos pequenos distribuidores no que diz respeito ao custo, pois em média aumentaria este em apenas 3,0% por metro cúbico.

Porém, para estruturas de maior vultosidade, este ensaio não é adequado, pois a necessidade de rápida classificação dificulta seu uso. Neste sentido de alta produção, industrial, o método de classificação mais utilizado em nível internacional é a classificação mecânica por tensões em máquina classificadora. Este tipo de classificação tem por base correlacionar valores do módulo de elasticidade dinâmico, obtido ao longo de toda a peça estrutural, pela flexão no sentido de menor inércia, com os valores do módulo de elasticidade estático (MOE) e módulo de ruptura à flexão (MOR). Visando caracterizar as propriedades mecânicas da peça estrutural e não apenas de um pequeno corpo-de-prova isento de defeitos. Desta forma, essa classificação considera os defeitos de crescimento presentes na peça, mesmo que estes não sejam visíveis superficialmente.

Arruda; Szücs (1995), compararam o desempenho de vigas em MLC quando produzidas com a realização da classificação das lâminas e com posicionamento adequado, e quando produzidas aleatoriamente. Foram produzidas doze vigas em *pinus taeda* e *elliottii*, com dimensões de 10 cm x 16 cm x 200 cm, sendo que seis destas foram produzidas aleatoriamente e seis com o posicionamento das peças de maior resistência nas extremidades.

Para todas as lâminas utilizadas no estudo foram classificadas através da realização da determinação por flexão à três pontos, do módulo de elasticidade. Para as vigas com o posicionamento em função de sua rigidez, adotou-se o critério

da lâmina mais resistente ser a da borda tracionada, a de rigidez imediatamente inferior, na borda comprimida e a seguinte novamente na borda tracionada.

Para determinação das propriedades de resistência e rigidez das vigas foi realizado ensaio de flexão à quatro pontos.

TABELA 16 - Tratamento estatístico dos resultados dos ensaios em viga produzidas com distribuição aleatória das lâmina (Arruda; Szűcs – 1995)

Elementos Estatísticos	Módulo de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Menor valor	20,99	6529
Valor médio	27,47	7431
Maior valor	31,98	8555
Desvio Padrão	3,76	662
Coef. De Variação (%)	13,69	9,00

TABELA 17 - Tratamento estatístico dos resultados dos ensaios em vigas produzidas com posicionamento planejado das lâminas (Arruda; Szűcs – 1995)

Elementos Estatísticos	Módulo de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Menor valor	38,63	12262
Valor médio	47,56	13646
Maior valor	54,49	14514
Desvio Padrão	5,69	1066
Coef. De Variação (%)	11,96	7,81

Verifica-se através das tabelas 16 e 17, que com o adequado posicionamento das peças em função de sua resistência, a tensão média de ruptura aumentou em 73,1%, e também ocorrendo aumento no módulo de elasticidade médio em 83,6%. Além da melhora nos valores absolutos com exceção do desvio padrão, obteve-se também decréscimo nos coeficientes de variação para tensão de ruptura, e do módulo de elasticidade.

4 A MÁQUINA DE CLASSIFICAÇÃO POR TENSÕES (MSR)

Blass; Gard (1994), relatam que um número de desvantagens da classificação visual, podem ser superadas com a classificação mecânica por tensões, em especial o erro humano. Além disso, são obtidas melhores correlações entre a resistência e os parâmetros de classificação, produzindo menor variabilidade nas classes das peças estruturais, corroborado por Erikson *et al* (1998), os quais afirmam ser de particular importância nos componentes engenharia estrutural como treliças com chapas de dentes estampados, vigas laminadas coladas estruturais e vigas “I”

A classificação mecânica por tensões, conhecida como MSR (Machine Stress Rating), embora tenha sido bem acolhida no seu início há mais de quarenta anos, Galligan; Mcdonald (2000), seu uso foi restringido devido ao desconhecimento, à má utilização da máquina de classificação no mercado e à falta de procedimentos de controle. Foram necessárias a criação de agências de classificação, com procedimentos de controle, as quais se tornaram responsáveis pelo controle de qualidade das peças classificadas. Com esta normatização, tais problemas foram superados, e em 1996 foram classificadas pela MSR 304,8 milhões de metros cúbicos.

No Brasil, o primeiro estudo realizado sobre este assunto, foi feito por Melo (1984), onde foram utilizadas seis espécies de madeiras tropicais (andiroba, copaíba, mururé, pau-jacaré, tachi-preto, tauari), obtendo altos coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de ruptura à flexão.

Entretanto, Della Lucia (1975), na Purdue University, já havia trabalhado no sentido de comprovar a possibilidade de classificação mecânica, para as madeiras brasileiras, utilizando peças estruturais de três espécies amazônicas, conforme Melo (1984).

As vantagens deste sistema de classificação são:

- não destrói as peças estruturais, pois se trata de um ensaio não-destrutivo;
- alto coeficiente de correlação entre o módulo dinâmico obtido e os valores do módulo estático de ruptura à flexão e resistência à tração;
- alta produtividade de classificação, podendo ser classificadas todas as peças estruturais, em velocidades de até 300 m/min, em função da máquina utilizada;
- obtenção da real variabilidade das peças estruturais, considerando que indiretamente avalia os defeitos existentes nas peças.
- no momento da execução, posicionamento adequado das peças estruturais em função da resistência e esforço solicitante.

Para utilização da MSR, deve-se realizar correlações entre os valores do MOE_{din} , com o MOE e o MOR, módulo de elasticidade à flexão e módulo de ruptura a flexão, respectivamente. Estas correlações são obtidas através da realização do ensaio estático em peças previamente classificadas através da MSR.

Uma outra vantagem, a qual é provavelmente a de maior importância, é o aumento do valor da resistência da peça, quando comparado com o método de classificação visual.

Bryant (1978) cita as tensões de projeto consideradas pela SABS 563-1971 – *Softwood structural wood*^{*}, para o “S.A. pine”, relatando que estudos estavam sendo realizado para auxiliar a SABS na revisão da norma supracitada.

TABELA 18 - Tensões admissíveis para a S.A. pine classificado visualmente (Bryant –1978)

Tensão de projeto	MPa
Flexão	6,0
Tração paralela às fibras	3,0
Compressão paralela à fibras (L/b = 10)	7,5
Módulo de elasticidade	7.700

TABELA 19 - Tensões admissíveis para a S.A. pine classificado mecanicamente (Bryant –1978)

Classe	Tensão de projeto (MPa)			
	Flexão	Tração Paralela	Compressão Paralela	Módulo de Elasticidade
4	4,0	2,2	5,5	6.000
6	6,0	3,8	9,3	8.500
8	8,0	5,7	11,5	10.500
10	10,5	8,0	13,8	12.500

Observa-se pelas tabelas anteriores, que a classificação visual, apenas um valor é associado a cada esforço resistente (flexão, tração e compressão paralela, e módulo de elasticidade). Entretanto, através da classificação pela MSR, são apresentadas quatro classes (4; 6; 8; 10), as quais cada uma desta possui um valor para cada esforço resistente.

Demonstrando, a adequação da MSR também para as madeiras de alta densidade, Green *et al.* apud Green (1997)[†], relatam interessantes resultados da

^{*} South African Bureau of Standards;

utilização de MSR, quando comparada com a classificação visual para peças estruturais provenientes de carvalhos, sendo estes demonstrados pela Tabela 20.

TABELA 20 – Resultados de certificação MSR para carvalho 2 x 8s (Green et al. – 1994)

Classe	Quantidade (%)	Propriedade Admissível†			
		MOR lb/in ²	MPa	MOE x 10 ³ lb/in ²	GPa
Classificação visual					
Select Structural	1	1350	9,3	1,4	9,6
Nº 1	3	990	6,8	1,3	8,7
Nº 2	33	960	6,6	1,2	8,3
Nº 3	63	540	3,7	1,1	7,6
MSR					
1650f-1,4E	36	1650	11,4	1,4	9,6
Se Nº 3 visual	95	1650	11,4	1,4	9,6

Conforme verificado, pela classificação visual apenas 1% das amostras foram classificadas como Select Structural com resistência à flexão de 1.350 lb./in.² (9,30 MPa), porém 36% das peças foram classificadas pela MSR com 1650 lb./in.² (11,4 MPa). As peças que possuíam defeitos de crescimento e de secagem eram classificadas como classe Nº 3, em vez de Nº 2. Nota-se que com a realização da classificação mecânica através da MSR, foi possível o aumento da resistência a flexão admissível em 22%, seguido de um enorme aumento na porcentagem de amostras que se enquadravam neste classe.

4.1 O princípio da MSR

O princípio de funcionamento deste tipo de máquina é muito simples. Utilizando como modelo explicativo o equipamento “COMPUTERMATIC MK P IVa”,

[†] Green, D.; et al. Production of hardwood machine stress rated lumber. In: Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Madison, Wisconsin, *Proceedings*. Forest Products Society, 1994. p.141-150.

[‡] 1 lb./in.² = 0,006895 MPa

da “Plessy Telecommunications PTY LTD”, segue a descrição da execução do ensaio.

FIGURA 4 – Máquina classificadora por tensões – Modelo “COMPUTERMATIC MK P IVa - Plessy Telecommunications PTY LTD”,

A peça estrutural é colocada (ver Figura 5) na máquina onde o “transdutor A” faz leituras de deslocamentos já existentes nesta (imperfeições geométricas). Em seguida a peça é levada para o interior da máquina pelo “cilindro de alimentação”, percorrendo todo o interior até alcançar o “cilindro de carga”, quando é acionado o “cilindro de pressão”, carregando a peça, ficando esta apoiada nos “cilindros de direção e de carga”. Desta forma a peça deforma, sendo feita a leitura de deslocamentos pelo “transdutor B”. Em seguida o “revolver de pintura” é acionado, pintando a peça em ponto espaçado a cada 15 cm, e no final fazendo uma faixa contínua que indica em qual classe a peça se enquadra em função do valor médio de MOE obtido para esta (MOE_{din}).

FIGURA 5 - Esquema de classificação pela máquina

4.2 Regressões

Após a classificação pela máquina, algumas peças são ensaiadas para a obtenção do MOE e MOR, para posterior correlação com os valores de MOE_{din} , podendo em seguida a peça ser classificada através desta correlação.

Apesar das inúmeras vantagens citadas por vários autores, Samson; Blanchet (1991) relatam que a correlação na qual o processo é baseado não é boa, sendo da ordem de 0,7 o valor do coeficiente de correlação (r), creditando este fato à limitada habilidade da máquina classificadora detectar nós.

Galligan & Mcdonald (2000), realizando seus estudos de comparação entre a classificação mecânica e visual, obtiveram para a espécie "hem-fir", coeficiente de correlação (r) igual a 0,64, entre o módulo dinâmico e o módulo de ruptura à flexão. Melo (1984), obteve de valores para o coeficiente de correlação entre 0,69 à 0,90 para espécies tropicais, devidos serem mais homogêneas.

4.3 Limites de confiança

Melo (1984), comenta que em virtude da variabilidade natural da madeira, deve-se traçar uma linha correspondente a um limite inferior da distribuição em relação a regressão obtida, sendo que da equação de correlação deve ser decrescida a parcela, abaixo descrita

$$t \cdot s \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{n}} \quad (5)$$

sendo,

- t: Valor apropriado do "t" Student;
- s: Erro padrão da estimativa da tensão de ruptura;
- n: Número de peças ensaiadas;

Melo, relata que o limite inferior da regressão linear, possuindo uma forma hiperbólica, porém podendo ser adotado a forma linha reta, para grandes amostras, sendo pequeno o erro cometido.

Costa Neto (2002), define como intervalo de confiança para um nível " α ", em uma regressão linear, a região de confiança de " $1-\alpha$ ", que o valor obtido pela regressão esteja neste intervalo, sendo dado por:

$$\hat{y}' \pm t_{n-2, \alpha/2} \cdot S_R \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x' - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (6)$$

O intervalo de previsão é a região na qual se tem " $1-\alpha$ " de confiança que os valores experimentais de "y", venham ocorrer para "x", sendo:

$$\hat{y}' \pm t_{n-2, \alpha/2} \cdot S_R \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x' - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (7)$$

Sendo:

Somatório dos desvios ao
quadrado

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Valor estimado pela curva
de regressão

$$\hat{y}_i$$

Variância residual

$$S_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}$$

Coeficiente de Student

$$t_{n-2, \alpha/2}$$

FIGURA 6 - Intervalo de confiança e de previsão

Para a correlação do MOE_{din} e o MOR, Kretschmann; Green (1999), fazem as mesmas considerações, analisando os pares de dados obtidos e relatando quatro categorias de peças classificadas, com relação a combinação dos valores, Figura 7.

**FIGURA 7 – Esquema da distribuição dos valores –
(Kretschmann; Green, 1999)**

- **categoria 1:** material aceito corretamente, peças de suficiente resistência e rigidez como definida;
- **categoria 2:** material aceito incorretamente, peças com insuficiente resistência;
- **categoria 3:** material rejeitado corretamente, peças com insuficiente resistência;
- **categoria 4:** material rejeitado corretamente, peças com insuficiente rigidez;

Continuando, consideram que as peças enquadradas nas categorias 1, 3 e 4 são corretamente classificadas, entretanto incorretamente para a categoria 2, sendo estas aceitas misturadas com peças da categoria 1, sendo que o número de peças que rompem dependem do modelo de predição.

Para minimizar as peças que rompem na categoria 2, ajustes são feitos por propriedades exigidas associadas ao material classificado. Uma forma é com adição de critério de classificação tal como a presença de nós de borda na peça classificada. Outra forma é a adoção da linha de confiança utilizada para previsão do modelo, sendo a probabilidade de peças romperem na categoria 2 controlada pela linha de confiança.

4.4 Classes

A comercialização das peças classificadas é feita através da identificação das propriedades sendo adotada a seguinte designação “f-E” (resistência e módulo de elasticidade, respetivamente). A Tabela 21, descreve as classe de resistência para MSR.

TABELA 21- Classes comuns para peças estruturais por classificação mecânica - (Krestschmann; Green, 1999)

Nome da Classe	fb		E		ft		fc	
	MPa	Lb/in ²	GPa	x10 ⁶ lb/in ²	MPa	lb/in ²	MPa	lb/in ²
1350f – 1.3E	9,3	1.350	9,0	1,3	5,2	750	11,0	1.600
1450f – 1.3E	10,0	1.450	9,0	1,3	5,5	800	11,2	1.625
1650f – 1.5E	11,4	1.650	10,3	1,5	7,0	1.020	11,7	1.700
1800f – 1.5E	12,4	1.800	11,0	1,6	81,0	1.175	12,1	1.750
1950f – 1.7E	13,4	1.950	11,7	1,7	9,5	1.375	12,4	1.800
2100f – 1.8E	14,5	2.100	12,4	1,8	10,9	1.575	12,9	1.875
2250f – 1.9E	15,5	2.250	13,1	1,9	12,1	1.750	13,3	1.925
2400f – 2.0E	16,5	2.400	13,8	2,0	13,3	1.925	13,6	1.975
2550f – 2.1E	17,6	2.550	14,5	2,1	14,1	2.050	14,0	2.025
2700f – 2.2E	18,6	2.700	15,2	2,2	14,8	2.150	14,4	2.100
2850f – 2.3E	19,7	2.850	15,9	2,3	15,9	2.300	14,8	2.150

Conforme Boughton; Falck (2002), a AS/ZNS 4063[§], a região dos dados deve ser subdividida por rigidez, como uma série de subdivisões verticais, sendo que cada classe possui pequena amplitude nos valores de rigidez, porém para os valores de resistência, a classe possui grande amplitude.

Cada classe possui um valor representativo^{**} de módulo de elasticidade e de ruptura. O valor de projeto para o módulo de elasticidade, é o médio da classe, e o característico do módulo de ruptura, é baseado no quinto percentil da classe. Adota-se esta metodologia para se poder predizer o comportamento médio da peças quanto as deformações, e para evitar a ruptura destas, considerando-se uma peça solicitada à flexão^{††}.

[§] Standards Australia Timber – stress-graded – in-grade strength and stiffness evaluation, AS/ZNS 4063 Standards Australia, Sydney NSW, 1992.

^{**} *Utiliza-se a expressão "valor representativo" para não se confundir com "valor característico" considerado este para o quinto percentil.*

^{††} *Nota do autor*

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Com a intenção de se determinar as curvas de regressão e de confiança para o gênero *pínus spp.*, foi verificada a influência da intensidade de carga aplicada pela máquina classificadora.

Entretanto, antes da classificação mecânica, realizou-se a classificação visual através dos nós e por quantidade de anéis de crescimento, para posterior comparação entre ambas as metodologias.

Resumidamente, foram realizados os seguintes passos para a classificação mecânica, os quais são detalhados em seguida:

- Amostragem das peças estruturais;
- Classificação visual das peças através do tamanhos dos nós e anéis de crescimentos;
- Classificação mecânica pela MSR, com a velocidade da peça pela máquina constante, e variação da intensidade de carga aplicada;
- Realização dos ensaios estáticos, sendo o módulo de elasticidade à flexão (MOE) e o módulo de ruptura (MOR), em ambos os eixos de inércia da peça, menor (tábua) e maior (viga);
- Verificação da umidade média de amostras ensaiadas à flexão;
- Determinação da resistência e do módulo de elasticidade à compressão paralela de corpos-de-prova extraídos das peças estruturais ensaiadas à flexão;

A seguir são descritas detalhadamente todas as etapas experimentais.

5.1 Peças utilizadas

Para a realização do estudo, foram utilizadas peças estruturais produzidas pela empresa *Battistella Indústria & Comércio Ltda.*, de madeiras oriundas da região de Lages, Santa Catarina, onde a mesma possui 23 fazendas, que totalizam aproximadamente 11.000 ha, sendo 6.000 ha de florestamento de pinus.

A peças utilizadas, retiradas de um lote, sendo que a quantidade de amostras para as classificações visual e mecânica foi obtida pela Eq. (8), a qual consta na “ASTM D 2915 – Standart Pratices for Evaluating Allowable Properties for Grades of Structural Lumber”, considerando uma distribuição normal dos dados, e estimando 95% de confiabilidade. Sendo assim, serão retiradas “*n*” amostras utilizadas.

$$n = \left(\frac{t \cdot s}{0,05 \cdot x_m} \right)^2 = \left(\frac{t}{0,05} \cdot cv \right)^2 \quad (8)$$

onde,

n: tamanho da amostra;

t: valor da distribuição de Student.;

s: desvio padrão da amostra;

x_m: média da amostra;

cv: coeficiente de variação da amostra – (*s* / *X_m*).

Para a utilização desta equação, é necessário o conhecimento estimado de “*s*”, “*x_m*” ou “*CV*”, desta forma como uma prévia para o cálculo do tamanho da amostra “*n*”, os valores obtidos por Freitas, Calil Jr. (2002). Supondo inicialmente

que os valores apresentarão uma distribuição normal, adota-se o valor de 0,41^{*}, para o coeficiente de variação, e 2,00[†] para “t”,

Assim,

$$n = \left(\frac{2,00}{0,05} \cdot 0,41 \right)^2 = 268,96$$

serão amostradas 270 peças estruturais.

5.2 Classificação visual da peças

A classificação visual foi realizada nas peças estruturais, função da razão de resistência conforme Krestchmann; Green (1999), Tabela 22, utilizando as equações descritas no apêndice da ASTM 245, para determinação dos diâmetros máximos dos nós para cada classe visual, descritas abaixo, sendo:

TABELA 22 – Razão de resistência para as classes visuais

Classe Visual	SR (%)
SS	67
C1	55
C2	45
C3	26

b: largura da face estreita (cm)

h: largura da face larga (cm)

k: dimensão do nó (cm)

SR: razão da resistência (%)

^{*} O valor adotado de CV = 0,41, é baseado no coeficiente de variação obtido para o MOR, apresentado pela Tabela 10 (pagina 15), obtendo o valor de 0,41 com o acréscimo de um décimo (1/10) deste mesmo valor (0,378 + 0,378/10). Este processo foi realizado considerando que o valor de coeficiente de variação apresentado foi obtido de uma amostragem.

[†] O valor de t = 2,00, adotado considera uma probabilidade de 0,95 bi-caudal;

- **Nó na face estreita**

$$SR \geq 45\%; b < 152 \text{ mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{b + 0,953} \right] \quad (9)$$

$$SR < 45\% \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{b} \right] \quad (10)$$

- **Nó no centro da face larga**

$$SR \geq 45\%; h < 152 \text{ mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{h + 0,953} \right] \quad (11)$$

$$SR < 45\%; h < 305 \text{ mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{h} \right] \quad (12)$$

- **Nó na borda da face larga**

$$SR \geq 45\%; h < 152 \text{ mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{h + 0,953} \right]^2 \quad (13)$$

$$SR < 45\%; h < 305 \text{ mm} \quad SR = 100 \cdot \left[1 - \frac{k - 0,106}{h} \right]^2 \quad (14)$$

Tendo as peças utilizadas, seção transversal de 38 mm x 125 mm, tem-se os seguintes valores para a classificação visual.

TABELA 23 – Classificação visual pelo tamanho do nó e seu posicionamento

Classe visual	Nó (mm)		
	Na face estreita	No centro da face larga	Na borda da face larga
SS	17	45	25
C1	22	62	36
C2	27	75	45
C3	29	94	62

Pela classificação visual, as peças que apresentavam nós maiores que os estabelecidos pela classe C3 e as que apresentavam medula ou bolsas de resinas foram consideradas rejeitadas (R).

Quanto a classificação em relação a quantidade de anéis presentes na seção transversal, foi considerado o número de anéis de crescimento em 2,5 cm (1"), sendo que as peças com 4 ou mais anéis classificadas como densas (D), e com menos de 4 anéis consideradas com não-densas (ND), conforme Carreira (2003).

5.3 Classificação mecânica pela MSR

Após a classificação visual, todas as peças foram classificadas mecanicamente pela MSR. Esta máquina classificadora é a mesma utilizada por Melo (1983), a qual permite que os valores para a intensidade de carga aplicada e velocidade da peça, sejam variáveis até 22,25 kN, e de 23 m/min à 152 m/min, respectivamente. Atualmente, esta máquina está nas instalações da empresa *Battistella*.

Apenas foi realizada a variação da intensidade de carga, pois este parâmetro é que demonstrou, nos ensaios preliminares, influência nos valores de MOE_{dn} , consequentemente afetando a correlação entre este e os de MOE e MOR, como demonstrado por Freitas, Calil Jr. (2002).

Os valores para a intensidade de carga foram de 1,0 kN, 1,25 kN e 1,50 kN, e a velocidade de 40 m/min, sendo esta a utilizada no processo já existente na empresa.

FIGURA 8 - Classificação mecânica pela MSR

FIGURA 9 - Peças classificadas pela MSR

5.4 Ensaios de flexão estática para a determinação de MOE e MOR

O ensaio para obtenção de MOE e MOR, foram realizados conforme a *ASTM D 198-94 – Standard Methods of Static Testes of Lumber in Structural Sizes*, o qual é utilizado para determinar as propriedades de flexão em vigas de madeira sólida ou colada. A peça a ser ensaiada é colocada sobre um dispositivo, apoiada em dois pontos. Posteriormente, a mesma é carregada através de dois pontos equidistantes dos apoios, Figura 10.

Esquema de carregamento - ASTM D198-94

Esquema de carregamento - NBR 7190/97

FIGURA 10 – Esquema de carregamento para ensaios de determinação de MOE e MOR

Os valores de MOE e MOR, também poderiam ser obtidos com a realização do mesmo ensaio utilizando-se apenas um ponto de aplicação de carga, conforme a NBR 7190/97. Porém deve ser seguida a relação L/h maior que 21 vezes obtida por Rocco Lahr (1983), conforme citado anteriormente, para que não ocorra a influência de esforços cortantes no resultados

No item 8.5.3 da ASTM D 198-94, é considerado como desprezível a influência do esforço cortante nos valores de MOE e MOR, quando a relação " a/h " for igual à 12 vezes, sendo " a " a distância entre os pontos de aplicação de carga e os apoios.

Para o esquema de carregamento proposto pela ASTM D 198-94, os cálculos dos valores de MOE e MOR, são realizados segundo as equações:

$$MOE = \frac{3 \cdot P' \cdot a \cdot L^2}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta f} \quad (15)$$

$$MOR = \frac{3 \cdot P_{rup} \cdot a}{b \cdot h^2} \quad (16)$$

Sendo:

P' : valor da carga aplicada por ponto, abaixo do limite de proporcionalidade;

P_{rup} : valor da carga de ruptura aplicada por ponto;

a : distância entre os pontos de aplicação de carga e os pontos de apoio;

L : vão total entre os apoios;

b : largura da viga;

h : altura da viga;

Δf : deslocamento da viga, medida no meio do vão entre os apoios.

Utilizando-se o esquema proposto por Rocco Lahr (1983), o valores do MOE, chamado de “módulo de elasticidade aparente - E_A ”, e do MOR, este chamado de “módulo de resistência à flexão - MRF”, podem ser calculados conforme Eq. (17) e (18), respectivamente. Atualmente a metodologia proposta por Rocco Lahr, é a adotada pela NBR 7190/97, para a determinação do módulo de elasticidade à flexão (E_{MO}) e da resistência da madeira à flexão (f_M).

$$E_a = \frac{P' \cdot L^3}{48 \cdot \Delta f \cdot I} \quad (17)$$

$$MRF = \frac{P_{rup} \cdot a^2 \cdot y}{L \cdot I} \quad (18)$$

Sendo

P' : valor da carga aplicada abaixo do limite de proporcionalidade;

P_{rup} : valor da carga de ruptura aplicada;

a : distância entre o ponto de aplicação de carga e os pontos de apoio ($L/2$);

L : vão total entre os apoios;

I : momento de inércia do eixo de carregamento;

Δf : deslocamento da viga, medida no meio do vão entre os apoios;

y : distância entre a linha neutra e a fibra de maior tensão de tração.

Foram realizados os ensaios de flexão considerando os dois eixos de inércia da seção transversal, isto é com a peça carregada como tábua (*flatwise bending - fb*) e como viga (*edgewise bending - eb*).

FIGURA 11 - Ensaio de MOR_{fb} (flatwise bending)

FIGURA 12 - Ensaio de MOE_{eb} (edgewise bending)

5.5 Determinação da umidade média da amostra

Após os ensaios de flexão estática, foi determinada a umidade média do amostra conforme o ensaio descrito no “Anexo B” da NBR 7190 item B.5, através de 12 amostras.

5.6 Determinação da densidade aparente

Os corpos-de-prova para compressão paralela, extraídos das peças estruturais rompidas através dos ensaios de flexão estática, antes do ensaio de resistência a compressão e módulo de elasticidade, foram utilizados para a determinação da densidade aparente das peças ensaiadas, para verificação da homogeneidade das amostras ensaiadas à flexão.

5.7 Resistência e módulo de deformação à compressão paralela

Este ensaio foi realizado seguindo preceitos da norma *ASTM D4761 – Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material*. Entretanto a velocidade de carregamento utilizada no ensaio foi de 10 MPa/min conforme a NBR 7190.

FIGURA 13 - Ensaio de resistência à compressão (f_{c0}) e módulo de elasticidade (E_{c0})

A determinação do módulo de elasticidade foi realizado em carregamento monotônico, utilizando-se os valores de tensão de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ e deformação específica de $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$, sendo dado por:

$$E_{wc0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (19)$$

6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Apresenta-se neste capítulo a análise estatística dos resultados dos ensaios realizados (classificação visual, classificação mecânica, flexão estática, umidade, densidade, resistência e rigidez a compressão paralela), sendo apenas descritos os resultados das propriedades isoladamente, sem a realização de correlações. Os dados foram calculados e analisados com o auxílio dos *softwares* EXCEL e MINITAB.

Para todos os conjuntos dos dados são apresentadas as tabelas de estatística descritiva, histogramas de frequência, análise da normalidade e quando pertinente a análise de variância.

O número de intervalos para a elaboração dos histogramas de frequência seguem a fórmula citada por Fusco (1976), Eq. (20), onde “n” é o número de observações ou exemplares da amostra, e “N” o número de intervalos a serem utilizados.

$$N = 1 + 3,3 \cdot \log n \quad (20)$$

Para a avaliação da normalidade da distribuição dos dados foi utilizado o teste de SHAPIRO, conforme Espinosa (2001), sendo este baseado no teste de hipótese seguinte:

H_0 : Os dados seguem uma distribuição normal

H_1 : Os dados não seguem uma distribuição normal

A hipótese H_0 é rejeitada se o p -valor for menor que 0,10, se o p -valor for maior que 0,10, os dados seguem uma distribuição normal, pois $p\text{-valor} > \alpha^*$.

Os valores obtidos na realização dos ensaios são apresentados no Apêndice.

6.1 Classificação visual

A Tabela 24, apresenta os resultados da classificação visual por nós e por anéis.

TABELA 24 – Distribuição absoluta e relativa das amostras classificadas visualmente por nós e densidade de anéis.

Classificação	Distribuição Absoluta
SS	52
C1	53
C2	63
C3	33
Rejeitada (R)	99
Densa (D)	89
Não Densa (ND)	211

FIGURA 14 - Frequência absoluta da classificação visual por nós

As Figuras 14, 15, 16 e 17 mostram a classificação visual realizada por nós e por densidade de anéis. A distribuição relativa parcial, considera parcialmente a amostragem realizada em peças densas (D) ou não densas (ND). A distribuição relativa total, considera o total das amostras classificadas.

FIGURA 15 - Frequência absoluta da classificação por nós e densidade de anéis

FIGURA 16 - Frequência relativa da classificação por nós e densidade de anéis – parcial

FIGURA 17 - Frequência relativa da classificação por nós e densidade de anéis – total

6.2 Classificação mecânica

A Tabela 25, Figuras 18 e 19, apresentam os resultados da avaliação realizada nos dados da classificação mecânica, pela MSR, com a variação de intensidade de carga aplicada. Os intervalos de MOE_{din} são os utilizados pela MSR.

TABELA 25 – Distribuição absoluta e relativa das amostras classificadas mecanicamente, com variação de intensidade de carga aplicada

Classificação mecânica		Frequência					
Cor	Intervalo MOE _{din} (MPa)	MOE _{din1,00}		MOE _{din1,25}		MOE _{din1,50}	
		Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.
Azul	10 à 5.000	28	9%	29	10%	22	7%
Verde	5.000 à 6.000	130	43%	120	40%	105	35%
Amarelo	6.000 à 8.000	137	46%	144	48%	159	54%
Purpura	8.000 à 10.000	5	2%	6	2%	12	4%
Vermelho	10.000 à 100.000	0	0%	0	0%	0	0%
Total		300	100%	299	100%	298	100%

(*) Abs. = Absoluta / Rel. = Relativa

FIGURA 18 - Frequência absoluta da classificação mecânica por cores

FIGURA 19 - Frequência relativa da classificação mecânica por cores

Para uma melhor avaliação, a Tabela 26, Figuras 20 e 21, utilizam intervalos para a classificação, de 1000 MPa, sendo estes novos intervalos identificados por A, B, C, D e E. Optou-se por chamar estes intervalos por letras, para que não ocorra eventuais confusões com a classificação visual, identificada por números.

TABELA 26 – Distribuição absoluta e relativa das amostras classificadas mecanicamente, com variação de intensidade de carga aplicada, para novos intervalos

Classificação mecânica		Frequência					
Classe	Intervalo MOE _{din} (MPa)	MOE _{din1,00}		MOE _{din1,25}		MOE _{din1,50}	
		Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.
A	4.000 à 5.000	28	9%	29	10%	22	7%
B	5.000 à 6.000	130	44%	120	40%	105	35%
C	6.000 à 7.000	103	34%	105	35%	111	38%
D	7.000 à 8.000	34	11%	39	13%	48	16%
E	8.000 à 9.000	5	2%	6	2%	12	4%
Total		300	100%	299	100%	298	100%

(*) Abs. = Absoluta / Rel. = Relativa

FIGURA 20 - Frequência absoluta da classificação mecânica para os novos intervalos

FIGURA 21 - Frequência relativa da classificação mecânica para os novos intervalos

6.3 Valores do módulo dinâmico – MOE_{din}

As Figuras 22, 23 e 24, apresentam a distribuição relativa dos valores de MOE_{din}. A Tabela 27, apresenta a estatística descritiva destes

FIGURA 22 - Histograma da frequência relativa de MOE_{din1,00}

FIGURA 23 - Histograma da frequência relativa de MOE_{din1,25}

FIGURA 24 - Histograma da frequência relativa de MOE_{din1,50}

TABELA 27 – Estatística descritiva de MOE_{din}

Estatística	MOE _{din1,00}	MOE _{din1,25}	MOE _{din1,50}
N	300	299	298
Média (MPa)	6022	6102	6241
Mediana (MPa)	5936	6001	6135
Desvio padrão (MPa)	829	857	923
Coef. variação (%)	13,8	14,0	14,8
Mínimo (MPa)	4093	4046	4046
Máximo (MPa)	8402	8405	8715
Amplitude (MPa)	4310	4359	4669

6.3.1 Avaliação da normalidade dos valores de MOE_{din}

Analizando os dados através do teste de Shapiro, tem-se os seguintes resultados para MOE_{din} , Tabela 28, Figuras 25, 26 e 27.

TABELA 28 - Teste de normalidade para MOE_{din}

Item	r	p -valor
$MOE_{din1,00}$	0,9939	0,017
$MOE_{din1,25}$	0,9962	> 0,100
$MOE_{din1,50}$	0,9961	> 0,100

FIGURA 25 – Teste de normalidade para $MOE_{din1,00}$

FIGURA 26 – Teste de normalidade para $MOE_{din1,25}$

FIGURA 27 – Teste de normalidade para $MOE_{dln1,50}$

Verifica-se pelo teste de SHAPIRO, que os valores de MOE_{din} , para os três tratamentos, não seguem uma distribuição normal.

6.4 Ensaios de flexão estática – MOE / MOR

As Figuras 28, 29, 30 e 31, mostram a distribuição relativa dos ensaios de flexão estática e a Tabela 29, a estatística descritiva para os valores de MOE_{fb} , MOE_{eb} , MOR_{fb} e MOR_{eb} .

FIGURA 28 - Histograma de frequência relativa de MOE_{fb}

FIGURA 29 - Histograma de frequência relativa de MOE_{eb}

FIGURA 30 - Histograma de frequência relativa de MOR_{fb}

FIGURA 31 - Histograma de frequência relativa de MOR_{eb}

TABELA 29 – Estatística descritiva dos ensaios de flexão estática

Estatística	MOE_{fb}	MOE_{eb}	MOR_{fb}	MOR_{eb}
N	80	79	80	79
Média (MPa)	9251	9693	33,8	28,7
Mediana (MPa)	9046	9414	32,2	25,5
Desvio padrão (MPa)	1960	1428	10,9	12,9
Coef. variação (%)	21,2	14,7	32,2	44,9
Mínimo (MPa)	5567	7014	11,4	5,5
Máximo (MPa)	15857	13997	75,1	66,5
Amplitude (MPa)	10290	6983	63,7	61,0

6.4.1 Avaliação da normalidade dos valores dos ensaios de flexão estática

A Tabela 30, Figuras 32, 33, 34 e 35, apresentam o teste de Shapiro realizados para os ensaios de flexão estática.

TABELA 30 - Teste de normalidade para ensaios de flexão estática

Item	r	p-valor
MOE _{fb}	0,9829	0,042
MOR _{fb}	0,9728	< 0,010
MOE _{eb}	0,9871	> 0,100
MOR _{eb}	0,9636	< 0,010

FIGURA 32 – Teste de normalidade para MOE_{fb}

FIGURA 33 – Teste de normalidade para MOR_{fb}

FIGURA 34 – Teste de normalidade para MOE_{eb}

FIGURA 35 – Teste de normalidade para MOR_{eb}

Os valores de MOE e MOR tanto para a flexão no eixo de menor bem como para o eixo de maior inércia, não seguem uma distribuição normal.

6.5 Umidade das amostras

A umidade média das amostras foi 11,6% com desvio-padrão de 0,4% e coeficiente de variação de 3,4%. Considera-se portanto os resultados à umidade constante

6.6 Densidade aparente - ρ_{ap}

Antes da análise dos dados para os ensaios de flexão, verifica-se a homogeneidade da amostra quanto a densidade aparente. A Tabela 31 demonstra a estatística descritiva de ρ_{ap} , $\rho_{ap,fb}$, $\rho_{ap,eb}$, e as Figuras 36, 37 e 38, a distribuição relativa destes parâmetros.

TABELA 31 – Estatística descritiva para ρ_{ap} , $\rho_{ap,fb}$, $\rho_{ap,eb}$

Estatística	Densidade aparente (Kg/m ³)		
	ρ_{ap}	$\rho_{ap,fb}$	$\rho_{ap,eb}$
N	180	78	72
Média (Kg/m ³)	434	438	429
Mediana (Kg/m ³)	430	434	425
Desvio padrão (Kg/m ³)	45	48	42
Coef. variação (%)	10,5	10,9	9,9
Mínimo (Kg/m ³)	325	325	337
Máximo (Kg/m ³)	586	586	510
Amplitude (Kg/m ³)	261	261	173

FIGURA 36 - Histograma de frequência relativa de ρ_{ap}

FIGURA 37 - Histograma de frequência relativa de $\rho_{ap,fb}$

FIGURA 38 - Histograma de frequência relativa de $\rho_{ap,eb}$

6.6.1 Avaliação da normalidade das densidades aparentes

A Tabela 32, Figuras 39, 40 e 41, apresentam o teste de normalidade para as densidades aparentes para todas as amostras ensaiadas (ρ_{ap}), bem como separadas pelo tipo de flexão realizada ($\rho_{ap,fb}$, $\rho_{ap,eb}$)

TABELA 32 - Teste de normalidade para ρ_{ap} , $\rho_{ap,fb}$, $\rho_{ap,eb}$

Item	r	p -valor
ρ_{ap}	0,9897	0,034
$\rho_{ap,fb}$	0,9803	0,028
$\rho_{ap,eb}$	0,9907	> 0,100

FIGURA 39 – Teste de normalidade para ρ_{ap}

FIGURA 40 – Teste de normalidade para $\rho_{ap,fb}$

FIGURA 41 – Teste de normalidade para $\rho_{ap,eb}$

A distribuição dos valores de ρ_{ap} , $\rho_{ap,fb}$ e $\rho_{ap,eb}$ não seguem uma distribuição normal.

6.7 Resistência e módulo de elasticidade à compressão paralela – f_{c0} / E_{c0}

As Figuras 42 e 43, e a Tabela 33 mostram a frequência relativa e a estatística descritiva, respectivamente, para f_{c0} e E_{c0} .

FIGURA 42 - Histograma de frequência relativa de f_{c0}

FIGURA 43 - Histograma de frequência relativa de E_{c0}

TABELA 33 – Estatística descritiva dos ensaios de resistência e rigidez paralela

Estatística	f_{c0}	E_{c0}
N	150	150
Média (MPa)	38,0	7816
Mediana (MPa)	38,6	7807
Desvio padrão (MPa)	4,8	1778
Coef. variação (%)	12,6	22,8
Mínimo (MPa)	25,6	2789
Máximo (MPa)	50,1	12882
Amplitude (MPa)	25,1	10093

6.7.1 Avaliação da normalidade dos valores dos ensaios de compressão

As Figuras 44 e 45, e Tabela 34, apresentam o teste de normalidade para os ensaios de compressão paralela.

FIGURA 44 – Teste de normalidade por Shapiro para f_{c0}

FIGURA 45 – Teste de normalidade por Shapiro para E_{c0}

TABELA 34 - Teste de normalidade para f_{c0} e E_{c0}

Item	r	p -valor
E_{c0}	0,9932	> 0,100
f_{c0}	0,9967	> 0,100

Os valores de E_{c0} e f_{c0} , bem como todas as outras propriedades avaliadas, não seguem uma distribuição normal.

7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA

Neste capítulo, são realizadas as análise de variância dos dados para verificação da homogeneidade destes e ou a identificação da existência de populações distintas entre os dados de uma mesma propriedade. São apresentados, para avaliação os valores de F_{obtido} , $F_{critico}$ e o p -valor*.

7.1 Anova dos MOE_{din}

Para um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), são realizados os seguintes testes de hipótese, verificando se os tratamentos $MOE_{din1,00}$, $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$ são diferentes.

H_0 : a população dos valores de $MOE_{din1,00}$, $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$ são equivalentes

H_1 : nem todas as populações de $MOE_{din1,00}$, $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$ são equivalentes

- Verificação entre os três tratamentos

$$H_0 : MOE_{din1,00} = MOE_{din1,25} = MOE_{din1,50} \quad H_1 : MOE_{din1,00} \neq MOE_{din1,25} \neq MOE_{din1,50}$$

$$F_{obtido} : 4,851$$

$$F_{critico} : 3,005$$

$$p\text{-valor} : 0,008$$

Conclusão: rejeitar H_0

Sendo a H_0 rejeitada, realiza-se novamente a análise de variância para cada uma das seguintes combinações, $MOE_{din1,00}$ e $MOE_{din1,25}$, $MOE_{din1,00}$ e $MOE_{din1,50}$, e $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$.

• **Verificação entre $MOE_{din1,00}$ e $MOE_{din1,25}$**

$$H_0: MOE_{din1,00} = MOE_{din1,25}$$

$$H_1: MOE_{din1,00} \neq MOE_{din1,25}$$

$$F_{obtido} : 1,339$$

$$F_{critico} : 3,857$$

$$p\text{-valor} : 0,248$$

Conclusão: aceitar H_0

• **Verificação de $MOE_{din1,00}$ e $MOE_{din1,50}$**

$$H_0: MOE_{din1,00} = MOE_{din1,50}$$

$$H_1: MOE_{din1,00} \neq MOE_{din1,50}$$

$$F_{obtido} : 8,701$$

$$F_{critico} : 3,857$$

$$p\text{-valor} : 0,003$$

Conclusão: rejeitar H_0

• **Verificação de $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$**

$$H_0: MOE_{din1,25} = MOE_{din1,50}$$

$$H_1: MOE_{din1,25} \neq MOE_{din1,50}$$

$$F_{obtido} : 3,656$$

$$F_{critico} : 3,857$$

$$p\text{-valor} : 0,056$$

Conclusão: aceitar H_0

Desta forma existe uma diferença estatística significativa entre as populações de $MOE_{din1,00}$ e $MOE_{din1,50}$, que não ocorre com as outras combinações. Conclui-se que as populações de $MOE_{din1,00}$ e $MOE_{din1,50}$ não podem ser consideradas equivalentes. Entretanto as populações $MOE_{din1,00}$ e $MOE_{din1,25}$, e $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$, podem ser consideradas equivalentes.

A análise dos resíduos, Figura 46, demonstra claramente diferença entre as populações de $MOE_{din1,00}$ e $MOE_{din1,50}$. Porém essa diferença não fica muito nítida entre as populações de $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$.

FIGURA 46 - Resíduos pelos valores ajustados de MOE_{din}

* Nível de significância observado

7.2 Anova das densidades aparentes - ρ_{ap}

Antes de se realizar a análise de variância dos ensaios estáticos de flexão, realiza-se a análise para os resultados das densidades aparentes, ρ_{ap} , para identificar possíveis diferenças entre as amostras utilizadas.

Para $\alpha^* = 0,05$, tem-se o seguinte teste de hipótese:

H_0 : a população dos valores de $\rho_{ap,fb}$ é equivalente a população dos valores de $\rho_{ap,eb}$

H_1 : a população dos valores de $\rho_{ap,fb}$ não é equivalente a população dos valores de $\rho_{ap,eb}$

$$H_0: \rho_{ap,fb} = \rho_{ap,eb}$$

$$H_1: \rho_{ap,fb} \neq \rho_{ap,eb}$$

$$F_{obtido} : 1,651$$

$$F_{critico} : 3,905$$

$$p\text{-valor: } 0,201$$

Conclusão: aceitar H_0

Com a aceitação da hipótese H_0 , constata-se a equivalência das distribuições, e a existência de apenas uma população quanto a densidade das amostras, não existindo influência desta propriedade nos resultados dos ensaios estáticos de flexão, e posteriormente os ensaios de resistência e rigidez à compressão paralela. A Figura 47, mostra os resíduos pelos valores ajustados das densidades aparentes.

FIGURA 47 - Resíduos pelos valores ajustados de densidade aparente

7.3 Anova dos ensaios de flexão estática

Ao se realizar a análise de variância para as populações de MOE_{fb} e MOE_{eb} , MOR_{fb} e MOR_{eb} , para $\alpha = 0,05$, observa-se que apenas os valores de MOE podem ser considerados como pertencentes à populações equivalentes, não ocorrendo o mesmo para MOR.

- Verificação de MOE_{fb} e MOE_{eb}**

H_0 : as populações dos valores de MOE_{fb} e MOE_{eb} são equivalentes

H_1 : as populações dos valores de MOE_{fb} e MOE_{eb} não são equivalentes

$$H_0: MOE_{fb} = MOE_{eb}$$

$$H_1: MOE_{fb} \neq MOE_{eb}$$

$$F_{obtido}: 2,635$$

$$F_{crítico}: 3,901$$

$$p\text{-valor}: 0,107$$

Conclusão: aceitar H_0

- Verificação de MOR_{fb} e MOR_{eb}**

H_0 : as populações dos valores de MOR_{fb} e MOR_{eb} são equivalentes

H_1 : as populações dos valores de MOR_{fb} e MOR_{eb} não são equivalentes

$$H_0: MOR_{fb} = MOR_{eb}$$

$$H_1: MOR_{fb} \neq MOR_{eb}$$

$$F_{obtido}: 7,510$$

$$F_{crítico}: 3,901$$

$$p\text{-valor}: 0,007$$

Conclusão: rejeitar H_0

As figuras 48 e 49 mostram os resíduos pelos os valores ajustados de MOE e MOR, respectivamente.

FIGURA 48 - Resíduos pelos valores ajustados de MOE

FIGURA 49 - Resíduos pelos valores ajustados de MOR

7.4 Comparação entre classificação visual e mecânica

Tendo em vista que a grande proporção de amostras classificadas mecanicamente, apresentaram defeitos de crescimento que levam à rejeição (R) da peça estrutural e a distribuição dos valores de $MOE_{din1,00}$, $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$ não apresentaram uma distribuição normal, verifica-se por análise de variância a existência de populações distintas entre os valores de MOE_{din} .

Desta forma considera-se como uma amostra, as peças classificadas visualmente como rejeitadas (R) e uma outra amostra as peças classificadas visualmente como não-rejeitadas (NR), SS, C1, C2 e C3. Sendo assim tem-se o seguinte teste de hipótese:

- **Verificação para peça rejeitadas (R) e não-rejeitadas (NR)**

H_0 : a população dos valores de MOE_{dn} para as peças rejeitadas "R" são equivalentes à população dos valores de MOE_{dn} das peças não-rejeitadas "NR"

H_1 : a população dos valores de MOE_{dn} para as peças rejeitadas "R" são não equivalentes à população dos valores de MOE_{dn} das peças não-rejeitadas "NR"

$$H_0: MOE_{dn} R = MOE_{dn} NR$$

$$H_1: MOE_{dn} R \neq MOE_{dn} NR$$

Sendo este teste aplicado às três populações de MOE_{dn} ($MOE_{dn1,00}$, $MOE_{dn1,25}$ e $MOE_{dn1,50}$), são obtidos os seguintes resultados em um nível de significância de $\alpha^* = 0,05$:

- **Verificação para $MOE_{dn1,00}$**

$$H_0: MOE_{dn1,00} R = MOE_{dn1,00} NR$$

$$H_1: MOE_{dn1,00} R \neq MOE_{dn1,00} NR$$

$$F_{obtido} : 0,210$$

$$F_{critico} : 3,873$$

$$p\text{-valor} : 0,645$$

Conclusão: aceitar H_0

- **Verificação para $MOE_{dn1,25}$**

$$H_0: MOE_{dn1,25} R = MOE_{dn1,25} NR$$

$$H_1: MOE_{dn1,25} R \neq MOE_{dn1,25} NR$$

$$F_{obtido} : 2,081$$

$$F_{critico} : 3,873$$

$$p\text{-valor} : 0,150$$

Conclusão: aceitar H_0

- **Verificação para $MOE_{dn1,50}$**

$$H_0: MOE_{dn1,50} R = MOE_{dn1,50} NR$$

$$H_1: MOE_{dn1,50} R \neq MOE_{dn1,50} NR$$

$$F_{obtido} : 0,658$$

$$F_{critico} : 3,857$$

$$p\text{-valor} : 0,418$$

Conclusão: aceitar H_0

Conclui-se que não existe diferença significativa para as peças rejeitadas (R) e as não-rejeitadas (NR – SS/C1/C2/C3). Desta forma a classificação por MSR, não é eficiente para detectar defeitos de crescimento.

FIGURA 50 - Resíduos pelos valores ajustados de amostras rejeitadas e não-rejeitadas de $MOE_{dln1,00}$

FIGURA 51 - Resíduos pelos valores ajustados de amostras rejeitadas e não-rejeitadas de $MOE_{dln1,25}$

FIGURA 52 - Resíduos pelos valores ajustados de amostras rejeitadas e não-rejeitadas de $MOE_{dln1,50}$

Utilizando o mesmo método, compara-se agora se existe diferença estatística significativa entre as peças classificadas como densas (D) e as não-densas (ND). Tendo o seguinte teste de hipótese:

- **Verificação para peça densas (D) e não-densas (ND)**

H_0 : a população dos valores de MOE_{dn} para as peças densas "D" são equivalentes à população dos valores de MOE_{dn} das peças não-densas "ND"

H_1 : a população dos valores de MOE_{dn} para as peças densas "N" são não equivalentes à população dos valores de MOE_{dn} das peças não-densas "ND"

$$H_0: MOE_{dn} D = MOE_{dn} ND$$

$$H_1: MOE_{dn} D \neq MOE_{dn} ND$$

Novamente aplica-se este teste à três populações de MOE_{dn} , para $\alpha^* = 0,05$, obtendo os seguintes resultados:

- **Verificação para $MOE_{dn1,00}$**

$$H_0: MOE_{dn1,00} D = MOE_{dn1,00} ND$$

$$H_1: MOE_{dn1,00} D \neq MOE_{dn1,00} ND$$

$$F_{obtido} : 0,026$$

$$F_{critico} : 3,873$$

$$p\text{-valor} : 0,871$$

Conclusão: aceitar H_0

- **Verificação para $MOE_{dn1,25}$**

$$H_0: MOE_{dn1,25} D = MOE_{dn1,25} ND$$

$$H_1: MOE_{dn1,25} D \neq MOE_{dn1,25} ND$$

$$F_{obtido} : 1,561$$

$$F_{critico} : 3,873$$

$$p\text{-valor} : 0,212$$

Conclusão: aceitar H_0

- **Verificação para $MOE_{dn1,50}$**

$$H_0: MOE_{dn1,50} D = MOE_{dn1,50} ND$$

$$H_1: MOE_{dn1,50} D \neq MOE_{dn1,50} ND$$

$$F_{obtido} : 7,354$$

$$F_{critico} : 3,873$$

$$p\text{-valor} : 0,007$$

Conclusão: rejeitar H_0

Para a classificação através de anéis, apenas para o $MOE_{dn1,50}$ existe diferença significativa entre os valores das peças densas (D) e não-densas (NR).

FIGURA 53 - Resíduos pelos valores ajustados de amostras densas e não-densas de $MOE_{dln1,00}$

FIGURA 54 - Resíduos pelos valores ajustados de amostras densas e não-densas de $MOE_{dln1,25}$

FIGURA 55 - Resíduos pelos valores ajustados de amostras densas e não-densas de $MOE_{dln1,50}$

Pelas Figuras 53, 54 e 55, verifica-se que para $MOE_{dln1,00}$, novamente, o valor médio das peças densas (D) é inferior ao valor médio das peças não-densas, o que não ocorre para as outras populações de MOE_{dln} .

8. REGRESSÕES PARA MOE E MOR

Juntamente com a regressão entre MOE_{din} e MOE, MOE_{din} e MOR, são realizadas as verificações da distribuição dos resíduos e a avaliação do intervalo de confiança para o coeficiente de correlação linear.

Os resíduos e escores normais, são apresentados apenas para as regressões que demonstram valores adequados do coeficiente de correlação, r^2 .

8.1 Pressupostos da regressão e da correlação

Conforme Levine *et al.* (2000), existem quatro pressupostos a serem considerado ao se realizar a regressão e correlação em relação aos dados, sendo eles:

- **Normalidade:** os valores de "Y", são normalmente distribuídos para cada valor de "X", sendo afetadas as inferências realizadas sobre a linha de regressão;
- **Homocedasticidade:** a variação em torno da linha de regressão seja constante para todos os valores de "X", isto é, "Y", varia na mesma proporção para "X" sendo um valor baixo ou elevado;
- **Independência dos erros:** requer que os resíduos observados deva ser independente para cada valor de "X";
- **Linearidade:** a relação entre as variáveis deve ser linear.

A avaliação dos três primeiros pressupostos, é realizada utilizando os gráficos dos "resíduos x valores ajustados" e "escores normais x resíduos".

8.2 Coeficientes de regressão e de correlação

Após a realização da regressão, faz-se necessário a verificação do coeficiente de correlação " r " obtido. Porém para que isto seja realizado, deve-se, inicialmente diferenciar os coeficientes de correlação r e de determinação r^2 .

Anderson et al (2002), explica a diferença entre estes coeficientes, os quais muitas vezes são mal entendidos e até mesmo confundidos.

- **Coeficiente de correlação (r):** também conhecido como *coeficiente de correlação linear de Pearson*, é uma medida descritiva da força da associação entre duas variáveis, variando de -1 à 1 ;
- **Coeficiente de determinação (r^2):** valor o qual pode ser expresso como porcentagem, podendo ser interpretado como o percentual da soma dos quadrados que pode ser explicado usando a regressão proposta, variando de 0 à 1 , (ou também de 0% à 100%)

Anderson et al, alerta que o coeficiente de correlação pode ser usado apenas para relações lineares entre duas variáveis ($x;y$). Já o coeficiente de determinação pode ser utilizado para relações não lineares e para mais de duas variáveis ($x;y;z$).

Conforme Costa Neto (2002), a simples avaliação do valores do coeficiente de correlação, r , não é suficiente para que se tenha condições de se dizer que existe uma adequada correlação entre os dados. Isto se deve ao fato que este coeficiente é calculado tendo como base " n " elementos de uma amostra, representando apenas uma estimativa do verdadeiro valor do coeficiente de correlação populacional, ρ .

Desta forma faz-se necessário o estudo de um intervalo de confiança, tendo seus limites inferior e superior, ρ_{inf} e ρ_{sup} , respectivamente, proporcionando uma adequada avaliação da correlação existente, em um certo nível de confiança, α^* .

8.3 Regressões entre MOE_{din} e MOE

As Figuras a seguir mostram as regressões entre os valores de MOE_{din} e MOE_{fb} e MOE_{eb} .

FIGURA 56 – Regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOE_{fb}

FIGURA 57 – Regressão entre $MOE_{din1,25}$ e MOE_{fb}

FIGURA 58 – Regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{fb}

FIGURA 59– Regressão entre $MOE_{dln1,00}$ e MOE_{eb}

FIGURA 60 – Regressão entre $MOE_{dln1,25}$ e MOE_{eb}

FIGURA 61 – Regressão entre $MOE_{dyn1,50}$ e MOE_{fb}

O valor do coeficiente de determinação, r^2 , diminui significativamente com a mudança do sentido de determinação do MOE, de MOE_{fb} para MOE_{eb} .

8.3.1 Análise dos resíduos das regressões entre MOE_{dyn} e MOE

Para verificação da adequação do modelo adotado, e avaliação da normalidade dos resíduos, são apresentados nas figuras seguintes os resíduos pelos valores ajustados e os escores normais pelo resíduos. Porém são demonstrados apenas para as regressões com MOE_{fb} por apresentarem valores adequados de r^2 .

FIGURA 62 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{dyn1,00}$ e MOE_{fb}

FIGURA 63 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre
 $MOE_{dln1,00}$ e MOE_{fb}

FIGURA 64 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre
 $MOE_{dln1,25}$ e MOE_{fb}

FIGURA 65 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre
 $MOE_{dln1,25}$ e MOE_{fb}

FIGURA 66 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb}

FIGURA 67 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb}

Nas correlações entre MOE_{din} e MOE_{fb} , nota-se a existência de aumento do valor absoluto dos resíduos com o aumento de $MOE_{din1,00}$, diminuindo esta tendência em $MOE_{din1,25}$ e $MOE_{din1,50}$. Pode-se observar também menor dispersão dos resíduos com o aumento da intensidade de carga aplicada. Observa-se a ocorrência de pontos de extrema discordância das correlações, também chamados de *outliers*.

Percebe-se que os princípios da normalidade, da homocedasticidade e independência dos erros, não são atendidos.

8.4 Regressões entre MOE_{din} e MOR

As Figuras seguintes, mostram as correlações iniciais para MOE_{din} e MOR, para ambos os tipos de flexão. Pode-se observar que os valores de r^2 são de baixa magnitude, mesmo para as peças ensaiadas em *flatwise bending* (menor inércia), as quais apresentavam para regressão entre MOE_{din} e MOE_{fb} , valores de r^2 muito melhores que estes apresentados para o módulo de ruptura.

FIGURA 68 – Regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOR_{fb}

FIGURA 69 – Regressão entre $MOE_{din1,25}$ e MOR_{fb}

FIGURA 70 – Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_b

FIGURA 71 – Regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOR_{eb}

FIGURA 72 – Regressão entre $MOE_{din1,25}$ e MOR_{eb}

FIGURA 73 – Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_{eb}

8.4.1 Análise dos resíduos das regressões entre MOE_{din} e MOR

São apresentados nas figuras seguintes os resíduos pelos valores ajustados e os escores normais pelo resíduos, para as regressões com MOR_{fb} , mesmo estes não apresentando valores de r^2 de adequada magnitude.

FIGURA 74 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOR_{fb}

FIGURA 75 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,00}$ e MOR_{fb}

FIGURA 76 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{dln1,25}$ e MOR_{fb}

FIGURA 77 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{dln1,25}$ e MOR_{fb}

FIGURA 78 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOR_{fb}

FIGURA 79 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb}

Bem como as regressão entre MOE_{din} e MOE_{fb} , as entre MOE_{din} e MOR_{fb} , apresentam também valores para resíduos positivos muito elevados e os princípios da normalidade, da homocedasticidade e independência dos erros, também não são atendidos.

8.5 Regressões entre MOE e MOR

Neste item são apresentadas as regressões entre MOE e MOR, para ambos os sentidos de ruptura.

FIGURA 80 – Regressão entre MOE_{fb} e MOR_{fb}

FIGURA 81 – Regressão entre MOE_{fb} e MOR_{fb}

Nota-se que para ambos os sentidos (*flatwise* e *edgewise*), os valores de r^2 são baixíssimos, não ocorrendo alteração significativa na mudança do sentido de ruptura.

8.6 Análise das regressões

Através da metodologia, demonstrada em Anexo, para a determinação do intervalo de confiança do coeficiente de correlação, conforme exposto em 8.2, avalia-se as regressões realizadas.

TABELA 35 - Intervalo de confiança dos coeficientes de correlação para regressões entre MOE_{din} e MOE

Regressão	N	r^2	r	$\mathcal{F}$	$\sigma(\mathcal{F})$	$\mathcal{F}_{inf}$	$\mathcal{F}_{sup}$	ρ_{inf}	ρ_{sup}
$MOE_{fb} \times MOE_{din1,00}$	80	0,573	0,757	0,989	0,114	0,766	1,212	0,644	0,837
$MOE_{fb} \times MOE_{din1,25}$	80	0,562	0,750	0,972	0,114	0,749	1,196	0,634	0,832
$MOE_{fb} \times MOE_{din1,50}$	80	0,638	0,799	1,095	0,114	0,872	1,319	0,702	0,866
$MOE_{eb} \times MOE_{din1,00}$	79	0,284	0,533	0,594	0,115	0,369	0,819	0,353	0,675
$MOE_{eb} \times MOE_{din1,25}$	79	0,223	0,472	0,513	0,115	0,288	0,738	0,280	0,628
$MOE_{eb} \times MOE_{din1,50}$	79	0,294	0,542	0,607	0,115	0,382	0,832	0,365	0,682

TABELA 36 - Intervalo de confiança dos coeficientes de correlação para regressões entre MOE_{din} e MOR

Regressão	N	r^2	r	$\mathcal{F}$	$\sigma(\mathcal{F})$	$\mathcal{F}_{inf}$	$\mathcal{F}_{sup}$	ρ_{inf}	ρ_{sup}
$MOR_{fb} \times MOE_{din1,00}$	80	0,107	0,327	0,340	0,114	0,116	0,563	0,116	0,510
$MOR_{fb} \times MOE_{din1,25}$	80	0,130	0,361	0,378	0,114	0,154	0,601	0,153	0,538
$MOR_{fb} \times MOE_{din1,50}$	80	0,173	0,416	0,443	0,114	0,219	0,666	0,216	0,582
$MOR_{eb} \times MOE_{din1,00}$	79	0,033	0,182	0,184	0,115	-0,041	0,409	-0,041	0,387
$MOR_{eb} \times MOE_{din1,25}$	79	0,043	0,207	0,210	0,115	-0,014	0,435	-0,014	0,410
$MOR_{eb} \times MOE_{din1,50}$	79	0,039	0,197	0,200	0,115	-0,025	0,425	-0,025	0,401

TABELA 37 - Intervalo de confiança dos coeficientes de correlação para regressões entre MOE e MOR

Regressão	N	r^2	r	$\mathcal{F}$	$\sigma(\mathcal{F})$	$\mathcal{F}_{inf}$	$\mathcal{F}_{sup}$	ρ_{inf}	ρ_{sup}
$MOE_{fb} \times MOR_{fb}$	80	0,271	0,521	0,577	0,114	0,354	0,800	0,340	0,664
$MOE_{eb} \times MOR_{eb}$	79	0,221	0,470	0,510	0,115	0,285	0,735	0,278	0,626

9 INFLUÊNCIA DA CLASSIFICAÇÃO VISUAL NAS REGRESSÕES

Neste capítulo são apresentadas as regressões considerando-se a classificação visual por nós (classes SS, C1, C2 e C3) e a classificação por densidade de anéis de crescimento (classes ND e D).

Inicialmente são realizados testes de hipótese para a comparação dos valores de MOE_{nb} e MOR_{nb} , quando separados pelas classes visuais.

Os resíduos e escores normais, são apresentadas apenas para as regressões que demonstram valores adequados de r^2 .

9.1 Regressões de MOE_{din} e MOE_{nb} pelas classes visuais

Realizando o teste de hipótese, verifica-se que não existe diferença significativa entre os valores de MOE_{nb} , ao se considerar as classes visuais.

H_0 : a população dos valores de MOE_{nb} para as classes visuais C1, C2, C3 e SS são equivalentes

H_1 : a população dos valores de MOE_{nb} para as classes visuais C1, C2, C3 e SS não são equivalentes

$H_0: MOE_{nb} C1 = MOE_{nb} C2 = MOE_{nb} C3 = MOE_{nb} SS$ $H_1: MOE_{nb} C1 \neq MOE_{nb} C2 \neq MOE_{nb} C3 \neq MOE_{nb} SS$

$F_{obtido} : 0,155$

$F_{critico} : 3,734$

$p\text{-valor} : 0,926$

Conclusão: aceitar H_0

FIGURA 82 – Resíduos pelos valores ajustados de MOE_{fb} e classificação visual por nós

FIGURA 83 - Sobreposição das classes visuais na regressão entre MOE_{din} e MOE_{fb}

Pela Figura 83, fica nítida a sobreposição das classes visuais, não sendo possível determinar intervalos que contenham separadamente cada classe visual, ratificando o teste de hipótese demonstrado anteriormente. Em seguida são mostradas as regressões entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} , considerando as classes visuais.

FIGURA 84 - Regressão entre MOE_{dln1,50} e MOE_{fb} para a classe visual SS

FIGURA 85 - Regressão entre MOE_{dln1,50} e MOE_{fb} para a classe visual C1

FIGURA 86 - Regressão entre MOE_{dln1,50} e MOE_{fb} para a classe visual C2

FIGURA 87 - Regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C3

9.1.1 Análise dos resíduos das regressões entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{fb} com classificação visual

Pela dispersão dos resíduos, observa-se a existência de valores divergentes, prejudicando as regressões.

FIGURA 88 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual SS

FIGURA 89 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual SS

FIGURA 90 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C1

FIGURA 91 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C1

FIGURA 92 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{nb} para a classe visual C2

FIGURA 93 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{nb} para a classe visual C2

FIGURA 94 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{nb} para a classe visual C3

FIGURA 95 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C3

9.1.2 Regressões de MOE_{dln} e MOE_{fb} pelas classes visuais sem *outliers*

Com a retirada dos valores outliers, para todas as classes visuais, os coeficientes de regressão, apresentam significativa melhora.

FIGURA 96 - Regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual SS sem *outliers*

FIGURA 97 - Regressão entre MOE_{dyn1,50} e MOE_{fb} para a classe visual C1 sem outliers

FIGURA 98 - Regressão entre MOE_{dyn1,50} e MOE_{fb} para a classe visual C2 sem outliers

FIGURA 99 - Regressão entre MOE_{dyn1,50} e MOE_{fb} para a classe visual C3 sem outliers

9.1.3 Análise dos resíduos das regressões entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} com classificação visual sem outliers

Com a retirada dos valores *outliers*, os resíduos ficam entre -1000 e 1000. Entretanto não possuindo uma distribuição adequada para as classes C1 e C3, ficando nítida a presença de duas populações.

FIGURA 100 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual SS sem outliers

FIGURA 101 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual SS sem outliers

FIGURA 102- Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C1 sem outliers

FIGURA 103 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C1 sem outliers

FIGURA 104 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para a classe visual C2 sem outliers

FIGURA 105 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{nb} para a classe visual C2 sem outliers

FIGURA 106 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{nb} para a classe visual C3 sem outliers

FIGURA 107 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{nb} para a classe visual C3 sem outliers

9.2 Regressões de MOE_{din} e MOR_{fb} pelas classes visuais

As regressões de MOE_{din} e MOR_{fb} , possuem valores de r^2 e de ρ_{inf} e ρ_{sup} , de baixa magnitude. Já as regressões entre MOE_{din} e MOR_{eb} , o limite ρ_{inf} é negativo, e ρ_{sup} positivo demonstrando a inexistência de correlação entre ambos. Assim a análise da influência dos nós nas regressões entre MOE_{din} e MOR , é realizada apenas considerando MOE_{fb} .

Pelas Figura 108 observa-se a existência de populações diferentes para MOR_{fb} ao se considerar a classificação visual por nós. Através de análise de variância constata-se que as peças classificadas visualmente como C1, C2 e C3 são equivalentes com apenas uma população para os valores de MOR , e que estas classes são consideradas diferentes da classe SS.

FIGURA 108 – Resíduos pelos valores ajustados de MOR_{fb} e classificação visual por nós

- **Verificação de MOR_{fb} entre as classes C1, C2, C3 e SS**

H_0 : a população dos valores de MOR_{fb} das classes visuais C1, C2 e C3 são equivalentes aos valores da classe SS

H_1 : a população dos valores de MOR_{fb} para as classes visuais C1, C2 e C3 não são equivalentes aos valores da classe SS

$$H_0: MOR_{fb} \text{ C1 C2 C3} = MOR_{fb} \text{ SS}$$

$$H_1: MOR_{fb} \text{ C1 C2 C3} \neq MOR_{fb} \text{ SS}$$

$$F_{obtido} : 16,764$$

$$F_{critico} : 3,976$$

$$p\text{-valor: } 0,000$$

Conclusão: rejeitar H_0

• **Verificação de MOR_{fb} entre as classes C1, C2 e C3**

H_0 : a população dos valores de MOR_{fb} para as classes visuais C1, C2 e C3 são equivalentes

H_1 : a população dos valores de MOR_{fb} para as classes visuais C1, C2 e C3 não são equivalentes

$$H_0: MOR_{fb} \text{ C1} = MOR_{fb} \text{ C2} = MOR_{fb} \text{ C3}$$

$$H_1: MOR_{fb} \text{ C1} \neq MOR_{fb} \text{ C2} \neq MOR_{fb} \text{ C3}$$

$$F_{obtido} : 0,201$$

$$F_{critico} : 3,179$$

$$p\text{-valor: } 0,819$$

Conclusão: aceitar H_0

FIGURA 109 - Sobreposição das classes visuais na regressão entre MOE_{din} e MOR_{fb}

Analisando a Figura 109, nota-se que as amostras classificadas como SS, possuem uma distribuição de valores acima das amostras C1, C2 e C3. A seguir são demonstradas as regressões entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb} , considerando a classe SS separadamente.

FIGURA 110 - Regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR para a classe visual SS

FIGURA 111 - Regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR para as classes visuais C1 C2 e C3

Ao separar as classes visuais C1, C2 e C3, apenas a classe C2 apresenta melhoria de r^2 , ocorrendo a diminuição para C1 e C3.

FIGURA 112 - Regressão MOE_{din1,50} e MOR para a classe visual C1

FIGURA 113 - Regressão MOE_{din1,50} e MOR para a classe visual C2

FIGURA 114 - Regressão $MOE_{din,50}$ e MOR para a classe visual C3

9.2.1 Regressão entre MOE_{din} e MOR_{fb} para as classes visuais sem outliers

Visto que apenas as classes SS e C2, apresentam valores de r^2 melhores, novamente são realizadas estas regressões, porém com a retidada dos valores outliers.

FIGURA 115 - Regressão $MOE_{din,50}$ e MOR para a classe visual SS sem outliers

FIGURA 116 - Regressão MOE_{din1,50} e MOR para a classe visual C2 sem outliers

Com a retirada dos valores divergentes ocorre significativa melhora de r^2 , porém tanto para a classe SS e C2, observa-se pelos resíduos a presença de duas populações para ambas as classes.

FIGURA 117 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão MOE_{din1,50} e MOR_{fb} da classe SS sem outliers

FIGURA 118 - Escores normais pelos resíduos para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR_{nb} da classe SS sem outliers

FIGURA 119 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR_{nb} da classe C2 sem outliers

FIGURA 120 - Escores normais pelos resíduos para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOR_{nb} da classe C2 sem outliers

9.3 Regressões de MOE_{din} , MOE_{fb} e MOR_{fb} pelas classes de densidades de anéis de crescimento

Ao se considerar a classificação visual por densidade de anéis, pelos testes de hipótese abaixo, não se pode considerar como duas populações os valores de MOE_{fb} ND e MOE_{fb} D, ocorrendo o mesmo para MOR_{fb} ND e MOR_{fb} D, porém apresentando estes testes, baixos valores de significância. As Figuras 122 e 124, evidenciam a sobreposição das classes de densidades, para as regressões entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} , e $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb} .

• Verificação de MOE_{fb} entre as classes ND e D

H_0 : a população dos valores de MOE_{fb} da classe visual ND são equivalentes aos valores da classe D

H_1 : a população dos valores de MOE_{fb} da classe visual ND não são equivalentes ao valores da classe D

$$H_0 : MOE_{fb} \text{ ND} = MOE_{fb} \text{ D}$$

$$H_1 : MOE_{fb} \text{ ND} \neq MOE_{fb} \text{ D}$$

$$F_{obtido} : 1,841$$

$$F_{critico} : 3,972$$

$$p\text{-valor} : 0,179$$

Conclusão: aceitar H_0

FIGURA 121 – Resíduos pelos valores ajustados de MOE_{fb} e classificação visual por anéis de crescimento

FIGURA 122 - Sobreposição das classes de densidades de anéis na regressão entre MOE_{din} e MOE_{fb}

• **Verificação de MOR_{fb} entre as classes ND e D**

H_0 : a população dos valores de MOR_{fb} da classe visual ND são equivalentes aos valores da classe D

H_1 : a população dos valores de MOR_{fb} da classe visual ND são equivalentes ao valores da classe D

$$H_0 : MOR_{fb} ND = MOR_{fb} D$$

$$H_1 : MOR_{fb} ND \neq MOR_{fb} D$$

$$F_{obtido} : 2,389$$

$$F_{crítico} : 3,972$$

$$p\text{-valor} : 0,127$$

Conclusão: aceitar H_0

FIGURA 123 – Resíduos pelos valores ajustados de MOR_{fb} e classificação visual por anéis de crescimento

FIGURA 124 - Sobreposição das classes de densidades de anéis na regressão entre MOE_{din} e MOE_{fb}

As regressões entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} , apresentam adequados valores de r^2 , entretanto ocorrendo valores de baixa magnitude para as regressões entre MOE_{din} e MOR_{fb} .

FIGURA 125 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para as peças não-densas

FIGURA 126- Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para as peças densas

FIGURA 127- Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb} para as peças não-densas

FIGURA 128- Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e MOR_{fb} para as peças densas

9.3.1 Análise dos resíduos das regressões entre MOE_{din} e MOE_{nb} pela densidade de anéis de crescimento

Quanto à distribuição dos resíduos, novamente verifica-se a presença de *outliers* prejudicando as regressões.

FIGURA 129 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOE_{nb} para peças não-densas

FIGURA 130 - Escores normais pelos resíduos para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOE_{nb} para peças não-densas

FIGURA 131 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{din1,50}$ e MOE_{nb} para peças densas

FIGURA 132 - Escores normais pelos resíduos para a regressão $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{fb} para peças densas

9.3.2 Regressões de MOE_{dln} e MOE_{fb} pelas classes de densidades de anéis de crescimento sem outliers

Com a retirada dos valores divergentes para ambas as classificações, os valores de r^2 aumentam para aproximadamente 85%.

FIGURA 133 - Regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e MOE_{fb} para as peças não-densas sem outliers

FIGURA 134 - Regressão entre $MOE_{dyn1,50}$ e MOE_{fb} para as peças densas sem outliers

Apesar da melhora do coeficiente de regressão, os resíduos das peças densas, não apresentam adequada dispersão.

FIGURA 135 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{dyn1,50}$ e MOE_{fb} para peças não-densas sem outliers

FIGURA 136 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão $MOE_{dyn1,50}$ e MOE_{fb} para peças não-densas sem outliers

FIGURA 137 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão
 $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para peças densas sem outliers

FIGURA 138 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão
 $MOE_{din1,50}$ e MOE_{fb} para peças densas sem outliers

10 REGRESSÕES PARA f_{c0} E E_{c0}

Neste capítulo são apresentadas as regressões entre as propriedades de resistência, rigidez e $MOE_{din1,50}$.

Realizando a regressão entre $MOE_{din1,50}$ e f_{c0} , bem como entre $MOE_{din1,50}$ e E_{c0} , constata-se inexistência de correlação entre estas variáveis, não se fazendo necessária a apresentação dos resíduos e escores normais destas.

FIGURA 139 - Regressão entre $MOE_{din1,50}$ e f_{c0}

FIGURA 140 - Regressão entre $MOE_{dln1,50}$ e E_{c0}

Apenas a regressão entre MOE_{fb} e E_{c0} apresenta valor de r^2 considerável, Figura 141. Nota-se que os princípios da normalidade e da homocedasticidade dos resíduos, são afetados, prejudicando o valor de r^2 .

FIGURA 141 - Regressão entre E_{c0} e MOE_{fb}

FIGURA 142 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre E_{c0} e MOE_{fb}

FIGURA 143 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre E_{c0} e MOE_{fb}

Para a regressão entre f_{c0} e MOR_{fb} , a correlação é praticamente inexistente.

FIGURA 144 - Regressão entre f_{c0} e MOR_{fb}

A regressão entre E_{c0} e f_{c0} apresenta valor de r^2 a ser considerado, e adequada distribuição de resíduos.

FIGURA 145 - Regressão entre E_{c0} e f_{c0}

FIGURA 146 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre E_{c0} e f_{c0}

FIGURA 147 - Escores normais pelos resíduos para a regressão entre E_{c0} e f_{c0}

Nota-se pelas Figuras 142 e 143, dos resíduos e escores normais da regressão entre E_{c0} e MOE_{fb} , pontos que prejudicam a normalidade, *outliers*. Retirando estes pontos obtém-se melhora no valor de r^2 , bem como na distribuição dos resíduos.

FIGURA 148 - Regressão entre E_{c0} e MOE_{fb} sem *outliers*

FIGURA 149 - Resíduos pelos valores ajustados para a regressão entre E_{c0} e MOE_{fb} sem *outliers*

FIGURA 150 - Escores normais pelos valores ajustados para a regressão entre E_{c0} e MOE_{fb} sem *outliers*

A Tabela 38, apresenta a avaliação dos intervalos de confiança para os coeficientes de correlação. Apenas as regressões entre MOE_{fb} e E_{c0} , possuem ρ_{inf} e ρ_{sup} , de adequada magnitude.

TABELA 38 - Intervalo de confiança dos coeficientes de correlação para regressões com f_{c0} e E_{c0}

Regressão	N	r^2	r	$\mathcal{F}$	$\sigma(\mathcal{F})$	$\mathcal{F}_{inf}$	$\mathcal{F}_{sup}$	ρ_{inf}	ρ_{sup}
$f_{c0} \times MOE_{din1,50}$	149	0,003	0,055	0,055	0,083	-0,107	0,217	-0,107	0,214
$E_{c0} \times MOE_{din1,50}$	149	0,002	0,045	0,045	0,083	-0,117	0,207	-0,117	0,204
$MOE_{fb} \times E_{c0}$	78	0,533	0,730	0,929	0,115	0,703	1,155	0,606	0,819
$MOE_{fb} \times E_{c0}$ sem outliers	76	0,618	0,786	1,061	0,117	0,832	1,291	0,681	0,859
$MOR_{fb} \times f_{c0}$	78	0,006	0,077	0,078	0,115	-0,149	0,304	-0,148	0,295
$f_{c0} \times E_{c0}$	149	0,536	0,732	0,933	0,083	0,771	1,095	0,648	0,799

11 DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DE RIGIDEZ - MOE

Ao considerar as classes visuais nas regressões entre MOE e MOE_{din}, Capítulo 9, observou-se que estas não possuem distinção, tanto para a classificação por nós, bem como para anéis de crescimento. A Figura 151, mostra que as retas de regressão também se sobrepõem.

FIGURA 151 - Regressões entre MOE_{din} e MOE, considerando a classificação visual

Desta forma, opta-se pela determinação de classes de rigidez à flexão, sem serem consideradas as classificações visuais. A regressão a seguir é realizada entre MOE_{din1,50} e MOE_{fb}, porém sendo omitidos os índices, Figura 152

FIGURA 152 - Regressão entre MOE_{din} e MOE, desconsiderando a classificação visual

FIGURA 153 - Resíduos pelos valores normais da regressão MOE_{din} e MOE, desconsiderando a classificação visual

FIGURA 154 - Escores normais pelos resíduos da regressão MOE_{din} e MOE, desconsiderando a classificação visual

As Figura 153 e 154 demonstram adequada distribuição de resíduos, sendo esta melhor que ao se considerar as classes visuais separadamente. A Tabela 38 mostra os valores para ρ_{inf} e ρ_{sup} , sendo estes valores elevados.

TABELA 38 - Avaliação da regressão final entre MOE_{din} e MOE

N	r^2	r	$\mathcal{F}$	$\sigma_{\mathcal{F}}$	$\mathcal{F}_{inf}$	$\mathcal{F}_{sup}$	ρ_{inf}	ρ_{sup}
71	0,868	0,932	1,671	0,121	1,433	1,909	0,892	0,957

11.1 Determinação das classes de MOE e dos intervalos de classificação

Dividindo-se o a amplitude de MOE em quatro intervalos, estes são adotados como classes de rigidez à flexão, tendo os limites e valores médios respectivos, Tabela 39.

TABELA 39 - Classes e intervalos de MOE

Classe	Intervalo de MOE (MPa)		Valor médio (MPa)
MOE1	5567	7290	6429
MOE2	7290	9013	8152
MOE3	9013	10.736	9875
MOE4	10.736	12.459	11.598

Através do *software* MINITAB, são determinadas as curvas para o intervalo de confiança e de previsão, para 90% de confiança bilateral, Figura 155.

FIGURA 155 - Curvas de confiança e previsão da regressão para a regressão entre MOE_{din} e MOE

Pela equação de regressão, Eq. (21), calcula-se os limites dos intervalos de classificação de MOE_{din} , demonstrados na Tabela 40.

$$MOE = 1,6617 \cdot MOE_{din} - 1471,2 \quad (21)$$

TABELA 40 - Limites dos intervalos para a classificação por MOE_{din}

MOE (MPa)	MOE_{din} (MPa)
5567	4236
7290	5272
9013	6309
10.736	7346
12.459	8383

Cada valor médio das classes de MOE, o qual representa esta, possui um intervalo de confiança e previsão, Tabela 41.

TABELA 41 - Intervalos de confiança e previsão para MOE

Classe	MOE (MPa)*	MOE _{din} (MPa)	Intervalos de MOE (MPa) [†]	
			Confiança	Previsão
MOE1	6429	4754	6204 / 6653	5437 / 7420
MOE2	8152	5791	8023 / 8280	7178 / 9126
MOE3	9875	6828	9737 / 10.013	8900 / 10.850
MOE4	11.598	7865	11.358 / 11.838	10.603 / 12.593

Concluindo, são obtidas quatro classes de MOE, representadas por um valor médio, sendo estas classificadas pela MSR através dos respectivos intervalos de MOE_{din}, Tabela 42. A Figura 253, demonstra o valor percentual, a qual foi obtida para cada classe.

TABELA 42 - Classes de MOE e intervalos de MOE_{din} para classificação mecânica

Classe	MOE	Intervalo de MOE		Intervalo de MOE _{din}	
	(MPa)	(MPa)		(MPa)	
MOE1	6429	5567	7290	4236	5272
MOE2	8152	7290	9013	5272	6309
MOE3	9875	9013	10736	6309	7346
MOE4	11.598	10.736	12.459	7346	8383

* Valor médio das classes

FIGURA 156 - Distribuição para as classes de MOE

Considerando que a MSR utilizada, possui cinco bicos de pintura para a classificação das peças, opta-se pela seguinte representações, Tabela 43, demonstrando o percentual existente em cada classe, para os valores obtidos.

TABELA 43 - Intervalos de classificação por cores

Classe	Intervalo de MOE _{din} (MPa)		Frequência relativa (%)	Cor
Rejeitada	- ∞	4236	0,7	Azul
MOE1	4236	5272	14,1	Verde
MOE2	5272	6309	40,6	Amarela
MOE3	6309	7346	32,2	Púrpura
MOE4	7346	8383	10,4	Vermelha
Superior	8383	+ ∞	2,0	Vermelha

[†] Para os valores médios MOE das classes

FIGURA 157 - Distribuição da classificação por cor pela MSR

12 CONCLUSÕES

Com a realização do presente trabalho, foi possível constatar pontos importantes quanto à classificação mecânica de peças estruturais, sendo estes descritos a seguir.

12.1 Conclusões obtidas

Com a análise de variância, foi constatado que a velocidade da peça na MSR, não é um parâmetro que influencia os valores do MOE_{din} . Entretanto, a intensidade da carga aplicada influencia nos valores obtidos de MOE_{din} .

Avaliando o MOE e MOR, para as solicitações aos eixos de menor e de maior inércia, *flatwise bending* e *edgewise bending*, respectivamente, obteve-se diferença estatística apenas entre MOR_{fb} e MOR_{eb} .

As classes visuais SS, C1, C2 e C3 podem ser consideradas estatisticamente equivalentes para MOE_{fb} . Porém apenas as classes C1, C2 e C3 podem ser consideradas equivalentes para MOR_{fb} .

Quanto à classificação visual por densidade de anéis, as peças densas (D) e não-densas (ND), podem ser consideradas estatisticamente equivalentes para MOE_{fb} bem como para MOR_{fb} .

Ao se realizar as regressões dos ensaios de flexão estáticas com o módulo dinâmico, observou-se bons valores do coeficiente de regressão, r^2 , para as regressões entre MOE_{din} e MOE_{fb} , porém prejudicadas por valores *outliers*. Para

MOE_{din} e MOE_{eb}, baixos valores de r^2 , foram obtidos. E para as regressões entre MOE_{din} e MOR, para ambos os eixos de flexão, foram obtidos valores desprezáveis de r^2 . Entre MOE e MOR, para ambos os eixos de flexão, r^2 são de mesma magnitude, porém muito baixos.

Considerando a classificação visual por nós, bem como por densidade de anéis de crescimento, as classes visuais SS, C1, C2 e C3, e D e ND, se sobrepõem, quando realizadas as regressões entre MOE_{din}, MOE_{fb} e MOR_{fb}. Ao se estudar a correlação entre MOE_{din} e MOE_{fb}, foram obtidos adequados valores de r^2 , considerando em separadas, todas as classes visuais. Avaliando a correlação entre MOE_{din} e MOR_{fb}, apenas para as classes SS e C2, obteve-se r^2 considerável.

Considerando a resistência e módulo de elasticidade à compressão paralela, constatou-se inexistência de correlação com os valores da classificação mecânica. Apenas para regressão entre E_{co} e MOE_{fb}, obteve-se valor de r^2 adequado, 53,3%, sendo este melhorado, ao serem descartados os valores *outliers*, para 61,8%.

Na determinação das classes de rigidez, MOE, para a classificação pela MSR, não foi possível considerar um valor representativo para cada classe visual, devido estas se sobreporem na regressão entre MOE_{din1,50} e MOE. Desta forma optou-se por realizar a classificação por rigidez, em função dos quartis de MOE.

12.2 Considerações finais

O presente estudo verificou que é indispensável a classificação visual juntamente com a mecânica, não podendo uma ser realizada sem a outra, visto que não foi possível classificar as peças segundo a resistência, e sim apenas em função da rigidez à flexão.

Constata-se que os itens transcritos a seguir, da NBR 7190/97, devem continuar, considerando a revisão desta norma.

6.4.4 Coeficientes de modificação

"A condição de madeira de primeira categoria somente pode ser admitida se todas estruturais forem classificadas como isentas de defeitos, por meio de método visual normalizado, e também submetidas a uma classificação mecânica que garanta a homogeneidade da rigidez das peças que compõem o lote de madeira a ser empregado. Não se admite classificar as madeira como de primeira categoria apenas por meio de método visual de classificação".

10.6 Classificação das peças

- b) as peças serão consideradas como de segunda categoria quando não houver a aplicação simultânea da classificação visual e mecânica.*
- c) a utilização de máquinas automáticas de classificação mecânica permite enquadrar as peças em lotes de rigidez homogênea, mas não permite enquadramento nas classes de resistência especificada em 6.3.5 .*

13 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1994). ASTM D 198/94 – *Standart methods of static tests of lumber in structural sizes*. (CD ROM). Philadelphia.

_____ ASTM D 245/93 – *Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber*. (CD ROM). Philadelphia.

_____ ASTM D 2915/94 – *Standard practice for evaluating allowable properties for grades of structural lumber*. (CD ROM) Philadelphia.

ANDERSON, D.R.; SWEENEY, D.J.; WILLIAMS, T.A. *Estatística aplicada à administração e economia*. Trad. por Luiz Sérgio de Castro Paiva, 2.ed. São Paulo, Ed. Pioneira, 2002. p.439-509.

ARRUDA, H.A.C.; SZÜCS, C.A. Estudo da influência da classificação das lâminas na composição dos elementos de madeira laminada-colada. In: *ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA*, 5., Belo Horizonte, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA (1997). *NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeiras*. Rio de Janeiro.

BARROS JR., O.; HELLMEISTER, J.C. Industrialização de estruturas de madeira para cobertura. In: *ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA*, 3., São Carlos, 1989. *Anais*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1989, v.4, p.131-46.

BEZERRA, J.A. Madeira a dar com pau. *Globo Rural*, n.204, p.52-7, out., 2002.

BITTENCOURT, R.M. Madeira comercializada x madeira especificada para construção. In: *ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS*, 5., Belo Horizonte, 1995.

- BLASS, H., GARD, W. Machine strength grading of timber. In: *Pacific Timber Engineering Conference*, 1994. Gold Coast Australia, *Proceedings*, p.598-603.
- BOUGHTON, G.N.; FALCK, D.J. Determining the effectiveness of timber stress grading. In: *World conference on timber engineering*, 7., Shah Alam, 2002. *Proceedings...*: Shah Alam, Malaysia, 2002, p.199-210.
- BRYANT, P.A.V. The stress grading of S.A. pine. *Houtim*, jun. 1978.
- CALIL JR., C. O potencial do uso do pinus na construção civil. *Téchne*, n.60, p. 44-8, mar., 2002.
- CALIL JR., C.; OLIVEIRA, R. M.; PRADA, O.J. Classificação estrutural de pinus por máquina de classificação por flexão (MSR). In: *ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA*, 8., Uberlândia, jul., 2002.
- CARREIRA, M.R. *Crítérios para classificação visual de peças estruturais de pinus sp.* São Carlos, 2003, 179p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- COSTA NETO, P.L.O. *Estatística* 2.ed. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 2002. p. 177-228.
- ESPINOSA, M.M. *Desenvolvimento de um modelo estatístico para aplicação no estudo de fadiga em emendas dentadas de madeira.* São Carlos, 2001. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FAGUNDES, G.S.R. *Composição racional de vigas de madeira laminada colada de pinus.* Florianópolis, 1998, 91p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- FREITAS, R.R.; CALIL JR.,C. Classificação de peças estruturais de madeiras pela MSR (Machine Stress Rate). In: *Simpósio em Ciências e Engenharia dos Materiais*, 5., São Carlos, 2002. *Anais*. São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002. p.19-20.
- FURIATI, M. *Classificação estrutural de peças de madeira.* São Carlos, 1981. 131p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- FUSCO, P.B. Os caminhos da evolução da engenharia das madeiras. In: *ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA*, 3., São Carlos, 1989. *Anais*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1989. v.6, p.7-18.
- FUSCO, P.B. *Estruturas de concreto: fundamentos estatísticos da segurança das estruturas*. São Paulo, McGraw-Hill, 1977.
- GALLIGAN, W.L.; MCDONALD, K.A. (2000). *Machine grading of lumber: practical concerns for lumber producers*. Madison. Forest Products Laboratory, (Report FPL-GTR-7).
- GALLIGAN, W.L., et. al. (1979). *Evolution of tensile design stresses for lumber*. Madison. Forest Products Laboratory, (Report FPL-28)
- GREEN, D. et. al. Mechanical grading of timbers for transportation industry. In: *NATIONAL CONFERENCE ON WOOD TRANSPORTATION STRUCTURES*; 1996. Madison. *Proceedings...*: Madison, Forest Products Laboratory, 1996. p.186-91.
- GREEN, D.W. New opportunities for mechanical grading of lumber. *Wood design focus*, v.8, n.2, p.21-4, 1997.
- KRESTSCHMANN, D.E.; GREEN, D.W. Lumber stress grades and design properties. In: *Forest Products Laboratory, Wood handbook: wood as an engineering material*. Report FPL-GTR-113. Madison, 1999. Cap.6, p.6-1/6-14.
- LEVINE, D.M.; BERENSON, M.L.; STEPHAN, D. *Estatística: teoria e aplicações*. Trad. de Teresa Cristina Padilha de Souza. São Paulo, LTC, 2000.
- LIMA, G.L. Sistema construtivo para habitação de interesse social em madeira de reflorestamento de *pinus spp*. In: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.. *Tecnologia das edificações*. São Paulo, Ed. Pini, 1988. Cap.2, p.201-04.
- MELO, J.E. *Classificação mecânica de peças estruturais de madeira*. São Carlos, 1984. 84p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MESEGUER, A.G. Controle e garantia da qualidade na construção. Trad. Antonio Carmona Filho et. al. São Paulo, SINDUSCON/SP-Projeto/PW. Cap. 3-1, p.40-62.

- PIGOZZO, J.C.; PLETZ, E.; ROCCO LAHR, F.A. Aspectos da classificação mecânica de peças estruturais de madeira. In: *ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURA DE MADEIRAS*, 7. Anais, São Carlos, 2000.
- PINHEIRO, R.V. *Emprego da madeira do gênero pinus na construção de estruturas de cobertura*. São Carlos, 1996, 163p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROCCO LAHR, F.A. Aspectos históricos do emprego das estruturas de madeira para coberturas. In: *ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA*, 1., São Carlos, 1983. *Anais*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1983. p.1-13.
- _____. *Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira*. São Carlos, 1983. 221p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROCCO LAHR, F.A.; CALIL JR., C. Eurocode nº 5: algumas considerações. In: *ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA*, 3., São Carlos, 1989. *Anais*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1989, v.6, p.19-38.
- ROSS, R.J. Nondestructive testing of wood. In: *NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF CIVIL STRUCTURES AND MATERIALS*, 1992. Boulder. *Proceedings...*: University of Colorado, 1992. p.43-7.
- ROSS, R.J.; BRASHAW, B.K.; PELLERIN, R.F. Nondestructive evaluation of wood. *Forest products journal*, v.48, n.1, p.15-9, Jan., 1998.
- SZÜCS, C.P. Usando o pinus: uma questão de desenho. In: *ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA*, 4., São Carlos, 1992. *Anais*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1992. P.177-85.
- URIARTT, A.A. A madeira como material de construção. In: FALCÃO BAUER, L.A. *Materiais de construção*. 5.ed. Rio de Janeiro, LTC, 2001. v.2, Cap.17, p.437-525.

13.1 Bibliografias consultadas

NASCIMENTO, A.M. *Avaliação experimental de vigas retas de madeira laminada colada, e componentes, feitas com madeira de pinus spp. somente e também reforçadas com madeira de corymbia (=eucalyptus) citriodora*. Viçosa, 2000. 137p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa.

BARILLARI, C.T. *Durabilidade da madeira do gênero pinus tratada com preservantes: avaliação em campo de preservantes*. Piracicaba, 2002. 68p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade da São Paulo.

CALIL JR., C.; DIAS, A.A.; ROCCO LAHR, F. A. *SCM 5754 – Propriedades físicas de resistência e elasticidade da madeira – Notas de aula*. Laboratório de madeira e estruturas de madeira (LaMEM), São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

RODRIGUES, M.S. *Madeira: uma alternativa para habitações populares*. *Revista CREA-SP*, n.6, p.24-7, set./out., 2002.

ANEXO Metodologia de determinação do intervalo de confiança do coeficiente de correlação "r"

A avaliação do intervalo de confiança de r é realizada em função de *Fisher* ($\mathcal{F}$), sendo dado por:

$$\mu(\mathcal{F}) = \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{(1+r)}{(1-r)}$$

$$\sigma(\mathcal{F}) = \sqrt{\frac{1}{n-3}}$$

os valores de $\mathcal{F}$, do intervalo de confiança, são dados por:

$$\mathcal{F} = \mu \pm z \cdot \sigma$$

Sendo a distribuição $\mathcal{F}$, aproximadamente normal, conforme Costa Neto (2002), para o intervalo de confiança de 95% bicaudal, o valor z é de 1,96.

A obtenção dos valores de ρ_{inf} e ρ_{sup} , são obtidos através de $\mathcal{F}_{inf}$ e $\mathcal{F}_{sup}$, respectivamente, por:

$$\rho = \frac{e^{2\mathcal{F}} - 1}{e^{2\mathcal{F}} + 1}$$

APÊNDICE

VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS

VALORES DE MOE, MOR e MOE_{dln} DOS ENSAIOS INICIAIS

MOE_{dln} com variação da intensidade da carga aplicada

Velocidade constante - 25 m/min

Peça	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE _{dln} (MPa)		
			1,00 kN	1,25 kN	1,50 kN
1	10867	80,8	15810	15131	13323
2	13831	81,5	22116	17709	16311
3	5897	42,1	6789	6434	6270
4	12269	96,5	19111	15366	14830
5	13346	87,3	21595	19077	16995
6	11354	93,8	16406	15023	13790
7	14629	63,6	24472	20879	20003
8	7532	39,4	11214	10555	9749
9	8359	67,0	12611	11169	10756
10	11354	83,5	18393	15996	14726
11	14087	84,2	21875	28138	23363
12	14629	76,2	26954	21567	19988
13	15848	127,5	28368	24150	21209
14	13584	94,9	22623	18391	17078
15	11354	81,2	12910	12233	11934
16	8949	32,5	14639	12646	11727
17	13116	53,6	20302	18224	16624
18	14918	88,4	24057	20257	18926
19	14353	107,2	22687	19893	18008
20	10592	40,2	10565	12501	12169
21	10421	49,8	14212	13121	12174
22	11187	32,5	16736	14356	13664
23	10867	59,3	15639	12292	12493
24	7176	32,2	9714	9200	8664
25	13346	88,1	22136	18876	16739
26	12075	96,5	22431	19023	17384
27	4610	39,4	4702	4305	4704
28	8153	28,3	10479	9115	7482
29	9277	70,8	11055	10242	8478
30	11886	79,6	17420	15854	12056
31	8359	34,8	15643	12887	9927
32	10714	59,0	12129	11750	9402

MOE_{dln} com variação da velocidade da peça
Intensidade de carga aplicada constante - 1,25 KN

Peça	MOE _{dln} (MPa)		
	25 m/min	50 m/min	75 m/min
1	9461	9407	9047
2	7143	6988	7128
3	8578	8792	8958
4	8289	8474	8427
5	7988	7923	8064
6	10271	10844	10316
7	9995	10099	10385
8	12123	12447	11616
9	10753	10704	10971
10	4225	4283	4300
11	8969	8997	8961
12	8704	8503	8627
13	7441	7211	7240
14	11087	11260	11569
15	8050	8321	8279
16	7701	7596	7516
17	8950	8943	8890
18	8687	8621	8417
19	7650	7751	7612
20	8852	9350	8918
21	7582	7740	7981
22	8422	8068	8280
23	13546	12842	12800
24	17585	17568	17385
25	17600	18230	18089
26	8564	8768	8831
27	9812	9428	9435
28	4537	4693	4530
29	8504	8300	8467
30	15290	15542	14648
31	4375	4344	4398
32	6148	5959	5861

CLASSIFICAÇÃO VISUAL

Peça	Classe	Anéis*	Peça	Classe	Anéis*	Peça	Classe	Anéis*
1	3	3/4	41	D	4	81	1	2/3
2	2	1/2	42	D	3	82	D	3/4
3	2	3/4	43	D	3/4	83	D	3/4
4	1	3/4	44	2	3/4	84	1	3/4
5	3	4/5	45	2	2/3	85	2	2/3
6	3	3	46	2	3	86	1	4
7	D	3/4	47	3	2/3	87	1	3/4
8	3	3	48	D	2/3	88	D	4
9	2	3	49	SS	4	89	3	4
10	3	3	50	3	2	90	3	4
11	3	3/4	51	2	3	91	1	2/3
12	1	4	52	1	4	92	2	3/4
13	D	3	53	D	3	93	1	3/4
14	D	4	54	1	5	94	1	3/4
15	2	4	55	2	4	95	D	2/3
16	3	4	56	SS	3/4	96	SS	5
17	D	4	57	D	3/4	97	2	3/4
18	3	4/5	58	1	4	98	SS	3
19	3	4/5	59	D	3	99	SS	4
20	2	3/4	60	2	3	100	SS	3/4
21	D	3	61	2	4	101	3	5/6
22	2	3	62	D	3/4	102	SS	4
23	D	2/3	63	1	4/5	103	SS	3
24	3	5	64	D	3	104	3	2/3
25	2	3/4	65	1	3/4	105	D	3
26	2	3/4	66	SS	3	106	D	3/4
27	2	4	67	1	3	107	2	3
28	3	3	68	2	2/3	108	2	2
29	D	3/4	69	D	3/4	109	SS	3
30	1	4/5	70	3	2/3	110	2	3
31	D	3	71	1	2/3	111	1	4
32	D	2/3	72	D	2	112	1	2/3
33	1	4	73	D	3/4	113	SS	2
34	D	3/4	74	2	3/4	114	1	3/4
35	2	3	75	D	4	115	2	2/3
36	3	4	76	D	3/4	116	3	2/3
37	3	3/4	77	D	4	117	SS	3
38	1	4/5	78	2	4	118	D	3
39	D	3/4	79	2	3/4	119	D	3
40	D	3	80	D	3/4	120	3	3/4

(*) Quantidade de anéis em 2,5 cm

A notação "X / Y" indica a quantidades diferentes de anéis nas extremidades da peças

Peça	Classe	Anéis*	Peça	Classe	Anéis*	Peça	Classe	Anéis*
121	3	3	161	SS	6/7	201	3	4
122	D	3	162	1	2	202	D	5
123	2	5	163	1	3/4	203	D	4/5
124	SS	3	164	2	3	204	D	4
125	2	4	165	2	4/5	205	D	3
126	2	3	166	1	3/4	206	2	3
127	1	4	167	D	4/5	207	1	3
128	1	4	168	2	4	208	D	3
129	SS	4/5	169	D	3	209	2	4
130	SS	4	170	SS	3	210	D	3
131	2	4	171	1	3/4	211	2	2/3
132	2	5	172	D	3	212	D	2
133	3	3/4	173	1	3/4	213	1	3
134	SS	4/5	174	2	3	214	D	4
135	SS	4	175	3	4	215	1	4
136	SS	3/4	176	1	3	216	2	4
137	1	3/4	177	SS	3	217	D	3/4
138	2	4	178	D	2/3	218	D	2/3
139	SS	6	179	1	3/4	219	2	3
140	SS	3	180	D	4/5	220	SS	3
141	D	3	181	SS	3/4	221	SS	3
142	1	3/4	182	D	3	222	SS	4
143	3	4	183	D	3	223	SS	4
144	2	3/4	184	2	3	224	1	3
145	1	3/4	185	2	2	225	2	3
146	1	3	186	SS	3	226	1	4
147	1	3	187	2	2/3	227	D	3/4
148	SS	2	188	1	3/4	228	1	3/4
149	2	3	189	1	4/5	229	2	3
150	SS	2/3	190	1	3	230	D	3/4
151	2	2/3	191	2	3/4	231	D	4
152	D	5/6	192	SS	4	232	1	3
153	3	3/4	193	SS	3	233	D	3/4
154	SS	3	194	1	3	234	SS	3
155	SS	3	195	1	3/4	235	D	3/4
156	2	3	196	SS	2/3	236	3	4
157	SS	3	197	D	3/4	237	D	3/4
158	2	3	198	SS	3/4	238	D	4
159	1	2/3	199	D	2/3	239	D	4/5
160	SS	4	200	SS	2/3	240	D	2/3

(*) quantidade de anéis em 2,5 cm

A notação "X / Y" indica a quantidades diferentes de anéis nas extremidades da peças

Peça	Classe	Anéis*	Peça	Classe	Anéis*	Peça	Classe	Anéis*
241	D	3/4	261	D	4	281	2	3
242	D	3/4	262	SS	3/4	282	2	3
243	1	4	263	D	2	283	D	3
244	D	3/4	264	D	3	284	2	4
245	D	3/4	265	D	2	285	D	3
246	D	3	266	2	3/4	286	2	3/4
247	1	3	267	D	3	287	SS	4
248	3	4	268	2	3	288	D	4
249	D	3/4	269	SS	3	289	D	3/4
250	D	2	270	SS	3/4	290	3	4
251	SS	2	271	3	4	291	D	3
252	SS	3	272	D	3/4	292	3	3
253	D	3/4	273	D	3	293	1	4
254	SS	2/3	274	D	3	294	D	3
255	D	3	275	SS	3	295	D	3/4
256	D	3/4	276	SS	4	296	D	4
257	SS	2/3	277	2	4	297	D	4
258	D	3/4	278	2	3/4	298	D	4
259	2	4	279	SS	4	299	D	3
260	1	4	280	D	3	300	D	3/4

(*) quantidade de anéis em 2,5 cm

A notação "X / Y" indica a quantidades diferentes de anéis nas extremidades da peças

CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA - MOE_{din}

Velocidade constante - 40 m/min

Peça	MOE_{din} (MPa)			Peça	MOE_{din} (MPa)		
	1,00 kN	1,25 kN	1,50 kN		1,00 kN	1,25 kN	1,50 kN
1	5074	5269	5379	41	5998	5638	6239
2	6669	6720	6977	42	5518	5631	5774
3	6312	6416	6523	43	4435	4365	4414
4	6530	6844	6982	44	5052	5250	5150
5	5405	5517	5644	45	5457	5731	5747
6	5504	5757	5986	46	6525	6871	6872
7	5513	5717	5836	47	5085	5192	5276
8	4775	4972	4961	48	5437	5526	5604
9	4768	4866	4384	49	6451	6797	6930
10	5615	5775	5856	50	5306	5404	5436
11	6916	6979	7569	51	5788	5885	5949
12	5603	5916	6130	52	5289	5369	5560
13	6078	6034	6430	53	6109	6469	6534
14	6429	6647	7050	54	6377	6760	6764
15	6509	6633	7005	55	7195	7397	7414
16	5211	5178	5528	56	7505	7784	7837
17	6555	6615	6777	57	4648	4735	4808
18	6004	5878	6093	58	6180	6399	6568
19	5422	5533	5850	59	5983	6297	6684
20	5569	7160	6670	60	5347	5231	5333
21	7170	6424	7439	61	5496	5626	5735
22	6403	5893	6115	62	5316	5484	5594
23	5719	6234	6242	63	5545	5645	5836
24	6268	6754	6770	64	5105	5262	5254
25	6562	6909	7060	65	6297	6643	6793
26	6694	6560	7112	66	5173	5331	5467
27	6857	6860	6959	67	4302	4372	4436
28	6869	7030	7303	68	6554	6736	6979
29	6122	6202	6539	69	6452	6623	X
30	6090	6161	6314	70	5376	5378	5181
31	6899	6843	6938	71	5410	5506	5603
32	6503	5968	6090	72	4755	4652	4754
33	5857	5852	7466	73	5783	5975	6111
34	5682	7271	6129	74	6006	6240	6375
35	6580	6760	5849	75	5437	5604	5620
36	6179	6293	6943	76	5125	5287	5278
37	6480	6493	6436	77	5116	5264	5269
38	5839	5871	6771	78	6197	6406	6442
39	6134	6128	6063	79	5366	5566	5716
40	7178	6034	6197	80	5227	X	X

Peça	MOE _{dl} (MPa)			Peça	MOE _{dl} (MPa)		
	1,00 kN	1,25 kN	1,50 kN		1,00 kN	1,25 kN	1,50 kN
81	5003	5201	5257	121	5826	5910	6023
82	5720	5710	5647	122	6153	6180	6487
83	5755	5943	5858	123	7851	8177	8221
84	6022	6228	6323	124	4981	5127	5165
85	5326	5507	5596	125	7301	7542	7767
86	7219	7403	7277	126	6198	6706	6495
87	6367	6587	6716	127	5983	6139	6114
88	5628	5678	5888	128	5679	5864	5969
89	5857	6056	6162	129	7553	7987	8164
90	6338	6491	6581	130	5898	6061	6343
91	5525	5651	5640	131	6594	6712	6846
92	5345	5501	5524	132	5848	5899	6158
93	5898	5915	6033	133	5592	5721	5866
94	5265	5172	5324	134	5924	6106	6095
95	6409	6377	6514	135	7046	7398	7354
96	7240	7425	7701	136	4159	4200	4205
97	6122	6384	6536	137	5665	5726	5695
98	5338	5185	5200	138	5905	6035	6196
99	4821	4972	5014	139	7195	7431	7701
100	7507	7655	8031	140	4819	4897	4822
101	6613	7055	7213	141	4652	4589	4698
102	6870	7051	7286	142	5422	5538	5579
103	7408	7506	7937	143	5488	5713	5831
104	5084	5153	5255	144	6114	6191	6260
105	5661	5876	5946	145	5511	5688	5729
106	5937	6206	6395	146	6513	6449	6476
107	6169	6464	6715	147	4093	4046	4046
108	4481	4535	4642	148	5246	5310	5348
109	4700	4676	4656	149	6013	6737	6930
110	6071	6318	6293	150	6016	6247	6294
111	5831	6270	6388	151	5037	4997	5047
112	6133	6239	6743	152	5860	5906	6030
113	5374	5432	5495	153	6650	6645	6736
114	6424	6702	6834	154	5496	5487	5709
115	5886	6001	6174	155	6044	6094	6177
116	5886	6053	6110	156	6272	6290	6519
117	7254	7349	7425	157	5178	5100	5168
118	5361	5504	5729	158	5331	5243	5289
119	6028	6123	6254	159	4865	4915	5084
120	6698	6860	6829	160	8188	8005	8131

Peça	MOE _{dln} (MPa)			Peça	MOE _{dln} (MPa)		
	1,00 kN	1,25 kN	1,50 kN		1,00 kN	1,25 kN	1,50 kN
161	8369	8406	8654	201	5891	5895	5995
162	4512	4476	4610	202	7137	7281	7366
163	5717	5731	5822	203	6541	6684	6662
164	5822	5880	5884	204	6539	6182	6352
165	6432	6291	6555	205	4926	5035	5051
166	5118	5288	5243	206	5850	5910	5952
167	5868	5975	6040	207	5444	5412	5553
168	5077	5022	5043	208	5644	5728	5856
169	7520	7420	7544	209	7087	7194	7342
170	5279	5324	5466	210	5489	6476	6549
171	7202	7324	7660	211	5020	4964	5012
172	5393	5394	5455	212	5551	5641	5868
173	7237	7418	7444	213	4748	4799	4859
174	5730	5811	5901	214	5660	5831	5786
175	4854	4842	4879	215	6546	6632	6649
176	5831	5843	5938	216	5688	5825	6040
177	6121	6157	6385	217	5344	5590	5330
178	6015	5992	6072	218	5333	5505	5532
179	6126	6256	6366	219	5426	5500	5609
180	7085	7277	7316	220	7982	7932	8306
181	6491	6696	6617	221	6414	6507	6690
182	6580	6980	7145	222	6862	7192	7365
183	6599	6682	6694	223	5512	5539	5618
184	6679	6797	6766	224	6269	6372	6493
185	5438	5549	5507	225	6641	6689	7016
186	6891	7032	7012	226	6013	6055	6193
187	4782	4933	4923	227	7734	7698	7688
188	7947	7582	7710	228	5439	5789	5928
189	7868	8136	8442	229	5056	5157	5306
190	5312	5434	6487	230	5763	5779	6020
191	5974	5989	6038	231	7241	7457	7277
192	7261	7427	7426	232	6215	6401	6479
193	6539	6643	6780	233	6970	7299	7489
194	6370	6499	6433	234	5761	5970	6117
195	8112	8236	8465	235	4627	4713	4797
196	6876	7253	7602	236	6595	6725	6781
197	4777	4792	4767	237	6838	6835	6974
198	8207	8385	8266	238	5892	5888	5880
199	5507	5624	5323	239	6884	7171	7141
200	6275	6228	6399	240	6283	6375	6470

Peça	MOE _{dln} (MPa)			Peça	MOE _{dln} (MPa)		
	1,00 kN	1,25 kN	1,50 kN		1,00 kN	1,25 kN	1,50 kN
241	5465	5384	5432	271	5204	5138	5294
242	6141	6421	6487	272	6104	5969	6124
243	5274	5279	5364	273	6079	6138	6314
244	6751	6953	6999	274	7778	7678	7887
245	5238	5247	5304	275	7953	7702	7939
246	5180	5260	5231	276	5781	5749	5933
247	6403	6407	6623	277	5985	5988	6096
248	7047	7035	7089	278	6288	6253	6322
249	5501	5487	5473	279	6693	6730	6972
250	4899	4758	4725	280	5459	5429	5497
251	5425	5562	5624	281	5921	5984	6136
252	6561	6997	7120	282	5199	4976	5096
253	5827	5874	5994	283	5984	5687	5799
254	5449	5619	5707	284	6460	6475	6629
255	5783	5807	5919	285	5972	5743	5955
256	6880	6840	7041	286	6599	6225	6411
257	6968	7096	7126	287	7031	6825	6972
258	7180	6929	7083	288	7246	6993	7253
259	4887	5035	5116	289	5935	6018	6069
260	5614	5319	5099	290	6420	6133	5982
261	6946	6822	7097	291	5750	5670	5711
262	4591	4488	4570	292	8402	7607	7973
263	7007	6881	6972	293	6896	6411	6662
264	5716	5469	5637	294	4484	4437	4510
265	7256	7370	7479	295	6528	6543	6918
266	5868	5961	6163	296	5803	5381	5214
267	5423	5516	5610	297	4923	4995	5112
268	5972	6078	6171	298	4913	5059	5039
269	5482	5532	5713	299	5860	5373	5654
270	6148	5915	6134	300	5708	5825	6957

ENSAIOS ESTÁTICOS DE FLEXÃO

MOE_{fb} , MOR_{fb} , MOE_{eb} , MOR_{eb}

Peça	MOE _{fb} (MPa)	MOR _{fb} (MPa)	Peça	MOE _{fb} (MPa)	MOR _{fb} (MPa)
6	7965	35,8	159	7062	41,7
19	8578	33,4	163	8280	16,7
22	9799	28,6	165	8721	27,4
24	9428	28,6	166	6615	38,1
27	10571	28,6	168	6922	33,4
33	10970	41,7	171	11706	47,7
35	7129	11,4	172	7752	43,7
50	8038	31,0	173	9948	38,1
51	8721	26,2	175	6683	17,2
54	9116	23,8	179	9164	23,8
56	11253	48,9	181	10362	50,1
67	6163	25,0	183	9967	33,4
68	9428	26,2	188	10260	26,2
85	7639	25,0	191	9378	30,3
99	7218	34,6	200	8765	51,2
101	12459	42,9	201	7810	31,0
107	9100	38,1	207	7833	17,9
109	5801	25,0	209	15857	40,5
113	7401	40,5	222	11133	28,6
114	10141	32,2	225	11133	31,0
116	8899	29,8	228	8176	26,2
117	10260	45,3	231	11501	48,9
120	9378	35,8	233	11947	54,8
121	8151	29,8	236	9873	36,9
122	13770	64,4	247	9873	33,4
125	12459	44,1	248	10856	23,8
128	8707	35,8	252	11110	47,7
133	8399	31,0	254	8372	32,2
134	8721	42,9	257	10879	35,3
136	5567	29,8	262	10260	48,9
137	7562	22,6	269	9053	34,6
138	9038	42,9	270	8440	29,8
139	11351	75,1	271	7857	27,4
140	6289	23,8	275	12459	47,7
144	8869	23,8	278	9311	26,2
149	10424	35,8	281	7916	22,6
151	6343	21,5	282	8481	21,5
153	9328	19,1	286	8578	34,6
156	9344	23,8	287	9022	38,1
157	6343	29,9	293	14617	33,4

Peça	MOE _{eb} (MPa)	MOR _{eb} (MPa)	Peça	MOE _{eb} (MPa)	MOR _{eb} (MPa)
1	10929	29,5	90	10294	24,9
2	7899	18,5	91	7978	19,9
3	9498	24,0	92	8767	19,4
4	10196	15,7	93	9789	16,6
5	11081	29,9	96	12043	53,6
8	10131	31,6	102	12274	28,6
9	9197	48,0	103	12614	44,3
11	9973	18,5	104	8990	43,2
12	10294	39,2	108	9671	16,4
15	10395	36,9	110	9250	53,6
16	11479	42,1	111*	19945	31,0
18	8443	22,2	115	9250	17,5
20	9331	29,2	120	13997	32,3
25	9973	50,8	131	10131	19,4
26	11820	30,5	132	9277	20,1
28	10361	32,3	135	9612	48,0
30	10818	24,0	142	9304	45,2
32	10567	21,2	143	10818	24,9
34	7253	22,2	145	7562	12,0
36	8311	19,9	148	8289	25,5
37	9386	27,7	154	7014	16,6
44	9359	31,6	155	8939	32,7
45	10131	25,5	164	9414	40,1
46	9911	25,9	170	9304	45,4
47	10131	22,5	185	8465	18,5
49	10395	33,2	186	12043	46,2
55	11277	26,8	190	9304	14,8
58	11521	50,2	192	12274	62,1
60	8183	18,1	194	10294	31,4
61	8914	20,3	215	10294	14,8
63	8487	16,3	216	9819	27,7
66	8625	57,3	243	7727	23,1
70	8038	5,5	251	8816	32,3
71	7939	13,9	259	8743	24,9
72	7598	13,9	260	7880	19,2
74	7919	13,9	266	12614	25,9
78	8398	22,2	276	11997	66,5
84	8696	26,0	279	9304	41,6
86	11317	20,3	284	9066	18,5
89	9819	27,1	290	8510	11,1

(*) peça desconsiderada por não apresentar valor adequado à população

DENSIDADE APARENTE DAS PEÇAS

Peça	ρ_{ap} kg/m ³	Peça	ρ_{ap} kg/m ³	Peça	ρ_{ap} kg/m ³	Peça	ρ_{ap} kg/m ³
1	448	66	440	133	382	191	445
2	378	67	463	134	462	192	502
3	456	68	443	135	496	194	430
4	397	70	393	136	426	200	466
5	469	71	410	136	428	201	440
6	411	74	403	137	364	207	436
8	374	78	461	138	466	209	479
9	446	84	499	139	586	215	420
11	424	85	398	140	460	220	433
15	416	86	394	142	429	222	491
16	468	89	458	143	392	225	423
18	495	90	452	144	487	228	439
19	373	91	481	145	419	231	436
20	433	92	373	148	349	233	430
22	387	93	385	149	467	236	409
24	431	96	457	151	407	243	418
25	458	99	389	153	513	247	477
26	447	101	448	154	494	248	405
27	404	102	469	155	426	251	356
28	440	103	471	156	497	252	473
30	442	104	399	156	467	254	396
32	473	107	396	157	501	257	534
33	463	108	389	159	396	259	491
35	477	109	375	163	484	260	382
36	510	110	381	164	472	262	448
37	415	111	484	165	458	266	402
44	395	113	424	168	417	269	404
45	392	114	431	170	422	270	450
46	456	115	390	171	325	271	384
47	353	116	439	172	433	275	399
49	403	116	400	173	413	276	493
50	372	117	403	175	435	279	458
51	422	120	469	179	415	281	403
54	401	121	387	181	449	282	407
55	404	122	512	183	400	284	414
56	480	125	497	185	337	286	391
60	383	128	530	186	427	287	584
61	378	131	475	188	414	290	409
63	385	132	413	190	369	293	430

COMPRESSÃO (f_{c0}) E MÓDULO DE ELASTICIDADE (E_{c0})

Peça	E_{c0} (MPa)	f_{c0} (MPa)	Peça	E_{c0} (MPa)	F_{c0} (MPa)
1	9606	42,3	70	6298	30,5
2	8878	33,0	71	8943	36,9
3	8770	43,2	74	8302	35,0
4	6695	36,8	78	7784	37,4
5	8821	43,2	84	7873	33,8
6	8561	37,4	85	8448	39,4
8	7228	36,6	86	9445	39,2
9	7187	38,5	89	7279	43,9
11	7750	39,0	90	8583	41,2
15	6996	40,6	91	5651	38,6
16	7982	41,4	92	5639	32,7
18	6743	43,0	93	6316	32,5
19	7070	34,5	96	11562	44,8
20	5801	38,2	99	6990	34,2
22	7938	32,5	101	12168	47,9
24	8261	36,6	102	9995	42,7
25	8212	39,5	103	7949	37,8
26	11412	43,4	107	6261	32,7
27	8086	33,5	108	4253	30,3
28	7396	35,0	109	4558	29,9
30	8837	40,7	110	6813	34,1
32	7758	40,8	111	6870	39,1
33	9195	42,4	113	5493	34,7
35	11223	43,0	114	10087	44,3
36	12882	50,7	115	9522	38,5
37	5911	36,2	116	6253	36,1
44	5747	29,3	117	9743	41,1
46	9487	43,4	120	8823	38,8
47	5639	31,2	121	8190	38,6
49	7725	35,2	122	11262	46,6
50	6281	31,5	125	11346	47,4
51	6954	38,0	128	9449	45,2
54	8889	32,6	131	9788	40,2
55	7552	40,7	132	7457	38,2
56	11275	42,2	133	7329	33,9
60	7159	35,2	134	6627	39,9
61	5832	30,6	135	6703	36,1
63	6564	32,9	137	6269	29,4
67	3629	31,1	138	6615	43,5
68	8692	39,4	139	6417	38,6

Peça	E _{co} (MPa)	f _{co} (MPa)	Peça	E _{co} (MPa)	F _{co} (MPa)
140	5944	36,4	201	7469	37,9
142	5994	33,3	207	7396	40,1
143	5631	26,1	209	10500	43,4
144	8930	44,2	215	10431	39,0
145	7535	39,0	220	7832	33,3
148	4433	26,7	222	11494	46,7
149	9669	39,8	225	8362	39,0
151	5244	36,1	228	6801	39,0
153	7836	42,6	231	9586	39,2
154	6484	37,9	233	8590	42,5
155	7593	44,2	236	8158	38,8
156	9624	44,9	243	5985	34,0
157	5435	33,7	247	8271	42,2
159	2789	25,6	248	8101	37,2
163	8157	37,0	251	6255	32,1
164	7979	39,0	252	8927	38,6
165	9030	43,4	254	6594	34,9
166	5768	40,0	257	8862	42,3
168	6202	34,9	259	7346	36,2
170	5434	30,9	260	6286	35,2
171	11059	46,3	262	8957	37,8
172	6357	36,2	266	8247	43,9
173	8715	41,2	269	8450	40,7
175	5548	39,8	270	7008	37,5
179	9918	39,3	271	8138	31,6
181	6773	41,5	275	9152	37,9
183	8181	31,9	276	7877	41,0
185	6299	30,2	279	10695	48,0
186	8931	39,9	281	6806	28,9
188	9818	40,7	282	7945	39,5
190	6931	32,6	284	6658	33,9
191	7616	38,8	286	7371	35,3
192	8391	42,3	287	6041	42,3
194	8318	39,3	290	5826	38,6
200	7830	39,4	293	11629	42,6

UMIDADE

Peça	Umidade (%)	Peça	Umidade (%)
16	11,6	149	11,8
19	11,6	155	11,5
50	11,4	160	11,9
66	11,5	163	11,1
70	11,3	269	11,1
139	12,4	271	11,9