

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

**FADIGA EM EMENDAS DENTADAS EM
MADEIRA LAMINADA COLADA**

ALCEBÍADES NEGRÃO MACÊDO

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Estruturas.

ORIENTADOR: Prof. Tit. Carlito Calil Junior

São Carlos

2000

Aos meus pais Admir e Goergina
pelo apoio concedido durante todas
as fases de minha vida.

À minha esposa Lêda pelo carinho,
compreensão e apoio.

Aos meus filhos Júnior e Luís.

Aos meus irmãos Márcia, Admir,
Georgette, Emanuel, Georgemir,
Wilson e George.

Aos meus avós Alcebíades,
Andradina, Antônio e Risoleta.

À todos os meus parentes e amigos
pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlito Calil Junior pela orientação e amizade durante a elaboração deste trabalho.

Aos professores Antônio Alves Dias, Francisco Antônio Rocco Lahr e Almir Sales pelo incentivo e amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pela bolsa concedida.

À todos os funcionários do LaMEM: Aparecido Galindo, Jaime, Roberto, Sílvio, Tânia, José Francisco e Bragatto pelo apoio e agradável convívio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao colega Mariano Martinez pela amizade e auxílio na parte estatística.

À todos os colegas do LaMEM pelo auxílio, angústias e amizade compartilhados.

À todos os colegas e professores do Departamento de Estruturas.

À todos os colegas e amigos feitos na cidade de São Carlos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Definições	1
1.3 Justificativas	3
1.4 Objetivos	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Conceitos importantes	7
2.1.1 Curvas S-N e e - N	8
2.1.2 A Relação R	11
2.1.3 Diagramas de vida constante	13
2.1.3.1 Cargas complexas	15
2.2 Planejamento S-N e respostas de ensaio	18
2.2.1 Ensaio preliminares e exploratórios	18
2.2.1.1 Forma conhecida da curva S-N	18
2.2.1.2 Forma desconhecida da curva S-N	20
2.2.2 Réplicas nos ensaios S-N	20
2.2.2.1 Dois níveis de tensão	21
2.2.2.2 Três níveis de tensão	21
2.2.2.3 Quatro ou mais níveis de tensão	21
2.2.3 Planejamento de ensaio	22
2.2.3.1 Amostragem	23
2.3 Aproximação da mecânica da fratura para a fadiga elástica	25

2.3.1 Fadiga elástica para a madeira.....	27
2.4 Comportamento visco-elástico da madeira e mecanismos de fratura.....	30
2.5 Influência do tempo na avaliação da fadiga.....	37
2.5.1 Propriedades dependentes do tempo.....	38
2.5.2 Influência da frequência.....	42
2.6 Madeira Laminada Colada (MLC).....	45
2.6.1 Fluência.....	45
2.6.2 Fadiga.....	47
2.6.2.1 Efeitos de variações cíclicas de temperatura e umidade na resistência a fadiga das ligações adesivas em MLC.....	50
2.7 Emendas dentadas.....	53
2.7.1 Parâmetros geométricos que influenciam na resistência das emendas dentadas.....	53
2.7.1.1 Área efetiva da seção (A_s) e área de topo (A_t).....	54
2.7.1.2 Área efetiva de cola (A_{ef}) e inclinação ($S = \text{tg } a$).....	54
2.7.1.3 Relação (s_r) entre a abertura e a folga da ponta do dente.....	55
2.7.2 Elementos finitos e distribuição de tensões nas emendas dentadas.....	55
2.7.2.1 Tensões normais à área líquida e tensões de cisalhamento no aderente ao longo da interface madeira/adesivo.....	58
2.7.2.2 Influência da rigidez e da plasticidade da linha de cola.....	60
2.7.2.3 Influência da espessura da linha de cola.....	64
2.7.3 Parâmetros de energia e resistência que influenciam no desempenho das emendas dentadas.....	67
2.7.3.1 Energia de deformação.....	67
2.7.3.2 Critério de resistência.....	68
2.7.3.3 Taxas de relaxação da energia de deformação.....	69
2.8 Considerações sobre a revisão bibliográfica.....	72
3 ENSAIOS PRELIMINARES.....	74
3.1 Ensaio para avaliação da variação da resistência dos corpos-	

de-prova nas peças de madeira.....	74
3.2 Ensaio cíclico.....	76
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	80
4.1 Materiais.....	80
4.1.1 As espécies de madeira.....	80
4.1.2 Os adesivos.....	80
4.1.3 Equipamentos.....	81
4.2 Metodologia.....	81
4.2.1 Confeção dos corpos-de-prova.....	81
4.2.2 Forma de retirada dos corpos-de-prova.....	83
4.3 Ensaio.....	84
4.3.1 Ensaio estático.....	85
4.3.2 Ensaio cíclico.....	85
4.3.2.1 Frequências de ensaio e níveis de tensão.....	85
4.3.2.2 Variabilidade das amostras.....	86
4.3.2.3 Execução dos ensaios cíclicos.....	88
4.4 Planeamento estatístico.....	89
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	91
5.1 Ensaio estático.....	91
5.2 Ensaio cíclico.....	96
5.2.1 Modos de ruptura das emendas dentadas.....	97
5.2.2 Verificação da normalidade.....	97
5.2.3 Resistência à fadiga.....	99
5.2.3.1 Emenda dentada: <i>Pinus caribea hondurensis</i> e adesivo Cascofen.....	100
5.2.3.2 Emenda dentada: <i>Pinus caribea hondurensis</i> e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	102
5.2.3.3 Emenda dentada: <i>Eucalyptus grandis</i> e adesivo Cascofen..	104
5.2.3.4 Emenda dentada: <i>Eucalyptus grandis</i> e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	106
5.2.3.5 Madeira maciça: <i>Pinus caribea hondurensis</i>	108

5.2.3.6 Madeira maciça: <i>Eucalyptus grandis</i>	110
5.2.3.7 Comparação entre as resistência à fadiga da madeira maciça para as frequências de 5 Hz e 9 Hz.....	112
5.2.4 Estimativa do coeficiente de redução da resistência à fadiga da emenda dentada em relação à madeira maciça.....	113
5.2.5 Variação da rigidez em função do número de ciclos.....	115
6 CONCLUSÕES.....	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130
ANEXO A: Ensaio programados.....	168
ANEXO B: Gráficos da variação de rigidez em função do número de ciclos.....	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Esquema geral de uma peça de MLC.....	2
FIGURA 2 - Tipos de laminados colados.....	3
FIGURA 3 - Emenda dentada.....	4
FIGURA 4 - Exemplo de emenda dentada na zona crítica de tração.....	5
FIGURA 5 - Ilustração de uma curva S-N ou ϵ -N.....	8
FIGURA 6 - Diagrama de <i>Wöhler</i> ou S-N para diferentes materiais.....	9
FIGURA 7 - Termos básicos para carregamento cíclico com amplitude constante.....	10
FIGURA 8 - Definição de nível de tensão.....	11
FIGURA 9 - Relação R para diferentes níveis de tensão.....	13
FIGURA 10 - Grupo de curvas S-N para diferentes relações R.....	13
FIGURA 11 - Diagrama de Goodman ou diagrama de vida constante.....	14
FIGURA 12 - Representação de história de carregamento com três níveis de tensão.....	16
FIGURA 13 - Três tipos elementares de curvas S-N.....	19
FIGURA 14 - Ilustração de uma curva S-N.....	23
FIGURA 15 - FIGURA 15 - Diagrama de vida constante para laminados de Khaya ivorensis/epoxy fatigadas axialmente para 10^5 , 10^6 e 10^7 ciclos.....	28
FIGURA 16 - Curvas S-N características para lâminas de Khaya ivorensis.....	30
FIGURA 17 - Curva típica de fluência com a recuperação após o descarregamento.....	31
FIGURA 18 - Modelo de fissura de <i>Dougdale</i>	32
FIGURA 19 - Ilustração das fases de crescimento da fissura.....	33
FIGURA 20 - Elementos básicos de um modelo de ruptura para a madeira.....	34
FIGURA 21 - Superfície de ruptura desenvolvida ao longo das fibras.....	34
FIGURA 22 - Superfície de ruptura das ligações em forma de dentes.....	35

FIGURA 23 - Esquema de propagação de uma fissura por tração.....	36
FIGURA 24 - Curva de duração de carga construída a partir de dados experimentais encontrados na literatura.....	38
FIGURA 25 - Fluência: (a) estágios da fluência, (b) taxa de fluência.....	40
FIGURA 26 - Curva de fluência incluindo a fluência terciária.....	41
FIGURA 27 - Diagramas S-N para a resistência à fadiga na compressão da madeira em diferentes níveis de frequência.....	42
FIGURA 28 - Esboço da correlação não linear entre $\log(f)$ e $\log(N)$	45
FIGURA 29 - Curva S-N para a emenda dentada estrutural.....	48
FIGURA 30 - Curva S-N para a emenda dentada não estrutural.....	49
FIGURA 31 - Comparação das curvas de resistência à fadiga na tração das emendas biseladas e emendas dentadas.....	49
FIGURA 32 - Geometria da emenda dentada.....	53
FIGURA 33 - Modelo de elemento finito para as emendas dentadas.....	56
FIGURA 34 - Malha de elementos finitos usada para avaliar o efeito da rigidez do adesivo no desempenho das emendas dentadas.....	57
FIGURA 35 - Distribuição de tensão na largura líquida da base do dente.....	58
FIGURA 36 - Exemplo da distribuição da tensão de tração ao longo da área líquida da base dos dentes.....	59
FIGURA 37 - Exemplo da distribuição da tensão de cisalhamento no aderente ao longo da linha de cola à esquerda da interface madeira adesivo.....	59
FIGURA 38 - Exemplo da distribuição da tensão de cisalhamento no adesivo para adesivos totalmente elásticos e adesivos com patamar de escoamento.....	61
FIGURA 39 - Efeito da rigidez do adesivo sobre a tensão longitudinal no aderente ao longo da linha de cola de uma emenda dentada.....	62
FIGURA 40 - Efeito da rigidez do adesivo sobre a tensão radial no aderente ao longo da linha de cola de uma emenda dentada.....	63

FIGURA 41 - Efeito da rigidez do adesivo sobre a tensão de cisalhamento no aderente ao longo da linha de cola de uma emenda dentada.....	64
FIGURA 42 - Efeito da espessura da linha de cola sobre a tensão longitudinal no aderente ao longo da linha de cola de uma emenda dentada.....	65
FIGURA 43 - Efeito da espessura da linha de cola sobre a tensão longitudinal no aderente ao longo da linha de cola de uma emenda dentada.....	65
FIGURA 44 - Efeito da espessura da linha de cola sobre a tensão de cisalhamento no aderente ao longo da linha de cola de uma emenda dentada.....	66
FIGURA 45 - Detalhe da malha de elementos finitos usada por <i>Aicher e Klöck</i> para modelar a região da ponta dos dentes.....	67
FIGURA 46 - Malha de elemento finito na região da folga da ponta dos dentes com as fissuras fictícias de cálculo.....	70
FIGURA 47 - Taxas de energia de relaxação versus comprimento da fissura de cálculo a) fissura I e b) fissura II.....	71
FIGURA 48 - Corpos-de-prova para avaliação da variação da resistência a tração paralela às fibras retirados de peças de 6cm x 12 cm.....	74
FIGURA 49 - Exemplo de copos-de-prova gêmeos na seção transversal..	76
FIGURA 50 - Disposição de retirada das amostras dos ensaios preliminares.....	76
FIGURA 51 - Malha de elemento finito na região da folga da ponta dos dentes com as fissuras fictícias de cálculo.....	79
FIGURA 52 - Peças de madeira com emendas dentadas.....	82
FIGURA 53 - Dimensões da geometria da emenda e do corpo-de-prova de resistência à tração nas emendas dentadas.....	82
FIGURA 54 - Forma de retirada dos corpos-de-prova das peças de madeira.....	84

FIGURA 55 - Variabilidade da resistência de referência <i>Pinus caribea hondurensis</i>	86
FIGURA 56 - Variabilidade da resistência de referência <i>Eucalyptus grandis</i>	87
FIGURA 57 - Variação de rigidez base de medida x LVDT.....	
FIGURA 58 - Número de repetições em cada nível de tensão.....	89
FIGURA 59 - Histograma dos resultados de resistência à tração das emendas dentadas para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	91
FIGURA 60 - Escores normais dos resultados resistência à tração das emendas dentadas para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	92
FIGURA 61 - Probabilidade normal dos resultados resistência à tração das emendas dentadas para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	92
FIGURA 62 - Histograma dos resultados transformados de resistência à tração das emendas dentadas para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	93
FIGURA 63 - Escores normais dos resultados transformados de resistência à tração das emendas dentadas para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	93
FIGURA 64 - Probabilidade normal dos resultados transformados de resistência à tração da madeira maciça para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	94
FIGURA 65 - Gráficos dos resíduos x valores estimados para a emenda dentada de <i>Pinus Caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	98
FIGURA 66 - Gráficos dos resíduos x escores normais para a emenda dentada de <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	98

FIGURA 67 - Gráficos dos resíduos x valores estimados para a emenda dentada de <i>Pinus Caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen (dados transformados).....	99
FIGURA 68 - Gráficos dos resíduos x escores normais para a emenda dentada de <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen (dados transformados).....	99
FIGURA 69 - Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	101
FIGURA 70 - Curvas S-N das emendas dentadas para o <i>Pinus Caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	
FIGURA 71 - Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	103
FIGURA 72 - Curvas S-N das emendas dentadas para o <i>Pinus Caribea hondurensis</i> e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	
FIGURA 73 - Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo Cascophen.....	105
FIGURA 74 - Curvas S-N das emendas dentadas para o <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo Cascophen.....	
FIGURA 75 - Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	107
FIGURA 76 - Curvas S-N das emendas dentadas para o <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	
FIGURA 77 - Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga da madeira maciça para o <i>Pinus caribea hondurensis</i>	109
FIGURA 78 - Curvas S-N da madeira maciça para o <i>Pinus caribea hondurensis</i>	

FIGURA 79 -Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga da madeira maciça para o <i>Eucalyptus grandis</i>	111
FIGURA 80 -Curvas S-N da madeira maciça para o <i>Eucalyptus grandis</i> .	
FIGURA 81 -Variação da rigidez em função do número de ciclos para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen ($\sigma_{\max} = 75\% f_{t0}$ e $f = 1$ Hz).....	113
FIGURA 82 -Diagramas S-N para a resistência a fadiga na compressão da madeira em diferentes níveis de frequência.....	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -Diferentes ciclos de tensões.....	12
TABELA 2 -Geometria das emendas avaliadas por <i>Bohannan e Kanvik</i> ...	48
TABELA 3 -Parâmetros geométricos relacionados à energia de deformação.....	68
TABELA 4 -Variação da resistência a tração no interior de uma peça de madeira corpos-de-prova A.....	74
TABELA 5 -Variação da resistência a tração no interior de uma peça de madeira corpos-de-prova B.....	75
TABELA 6 -Variação da resistência a tração no interior de uma peça de madeira corpos-de-prova C.....	75
TABELA 7 -Variação da resistência a tração no interior de uma peça de madeira corpos-de-prova D.....	75
TABELA 8 -Controles estáticos de <i>Pinus caribea hondurensis</i>	77
TABELA 9 -Controles estáticos de <i>Eucalyptus grandis</i>	77
TABELA 10 -Ensaio cíclico <i>Pinus caribea hondurensis</i> f = 10 Hz.....	77
TABELA 11 -Ensaio cíclico <i>Pinus caribea hondurensis</i> f = 5 Hz.....	78
TABELA 12 -Ensaio cíclico <i>Pinus caribea hondurensis</i> f = 1 Hz.....	78
TABELA 13 -Ensaio cíclico <i>Eucalyptus grandis</i> f = 10 Hz.....	78
TABELA 14 -Propriedades das peças de madeira usadas no estudo.....	87
TABELA 15 -Número de ciclos para a verificação da rigidez.....	88
TABELA 16 -Notações utilizadas no planejamento fatorial 3^2 , com p^* réplicas.....	90
TABELA 17 -Valores de resistência dos ensaios estáticos (KN/cm ²).....	95
TABELA 18 -Modos de ruptura das emendas dentadas.....	96
TABELA 19 -Incidência dos modos de ruptura para as emendas dentadas obtidas nos ensaios estáticos.....	97
TABELA 20 -Incidência dos modos de ruptura para as emendas dentadas obtidas nos ensaios cíclicos.....	98

TABELA 21 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para <i>Pinus caribea hondurensis</i> e adesivo Cascophen (dados originais).....	101
TABELA 22 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen (dados transformados)	102
TABELA 23 -Efeitos significativos das variáveis e suas iterações na resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Pinus Caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	102
TABELA 24 -Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Pinus Caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen.....	103
TABELA 25 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para <i>Pinus caribea hondurensis</i> e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (dados originais).....	104
TABELA 26 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (dados transformados).....	104
TABELA 27 -Efeitos significativos das variáveis e suas iterações na resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Pinus Caribea hondurensis</i> e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	105
TABELA 28 -Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Pinus Caribea hondurensis</i> e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	105
TABELA 29 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo Cascophen (dados originais).....	106

TABELA 30 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo Cascophen (dados transformados).....	107
TABELA 31 -Efeitos significativos das variáveis e suas interações na resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo Cascophen.....	107
TABELA 32 -Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo Cascophen.....	108
TABELA 33 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (dados originais).....	109
TABELA 34 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (dados transformados).....	109
TABELA 35 -Efeitos significativos das variáveis e suas interações na resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	110
TABELA 36 -Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga das emendas dentadas para o <i>Eucalyptus grandis</i> e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	110
TABELA 37 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga da madeira maciça para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> (dados originais).....	111
TABELA 38 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga da madeira maciça para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> (dados transformados).....	112

TABELA 39 -Efeitos significativos das varáveis e suas iterações na resistência à fadiga madeira maciça para o <i>Pinus caribea hondurensis</i>	112
TABELA 40 -Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga da madeira maciça para o <i>Pinus caribea hondurensis</i>	113
TABELA 41 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga da madeira maciça para o <i>Eucalyptus grandis</i> (dados originais).....	114
TABELA 42 -Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga da madeira maciça para o <i>Eucalyptus grandis</i> (dados transformados).....	114
TABELA 43 -Efeitos significativos das varáveis e suas iterações na resistência à fadiga da madeira maciça para o <i>Eucalyptus grandis</i>	114
TABELA 44 -Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga da madeira maciça para o <i>Eucalyptus grandis</i>	115
TABELA 45 Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga da madeira maciça para as freqüências de 5 Hz e 9 Hz.....	116
TABELA 46 -Estimativa do coeficiente redução de resistência à fadiga da emenda dentada em relação à madeira maciça.....	117
TABELA 47 -Variação da rigidez em relação à rigidez inicial para o <i>Pinus caribea hondurensis</i> e o adesivo Cascophen ($\sigma_{max} = 75\% f_{t0}$ e $f = 1$ Hz).....	113
TABELA 48 -Coeficiente de redução da resistência à fadiga da emenda dentada em relação a madeira maciça.....	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCE - American Society of Civil Engineering

ASTM - American Society for Testing Materials

CEN - Comitê Europeu de Normalização

DIN - Deutsche Institut für Nurmung

MLC - Madeira Laminada Colada

NBR - Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - comprimento da fissura.
- b - largura da ponta do dente.
- b_g - espessura da linha de cola.
- e - folga relativa.
- f_{c0} - resistência a compressão paralela às fibras da madeira.
- f_{c90} - resistência a compressão normal às fibras da madeira.
- f - frequência.
- f_{gt0} - resistência da emenda dentada a tração paralela às fibras.
- f_T - fator de correção de τ para outras temperaturas.
- f_{t0} - resistência a tração paralela às fibras da madeira.
- f_{t90} - resistência a tração normal às fibras da madeira.
- f_u - fator de correção de τ para outras umidades.
- f_x - tensão de tração ao longo da área líquida da base dos dentes.
- f_y - tensão de início de escoamento do adesivo; tensão de tração ou compressão na direção y.
- f_{vxy} - tensão de cisalhamento no aderente ao longo da linha de cola.
- g - largura total da emenda dentada.
- l - comprimento da emenda dentada.
- m - constante do material determinada empiricamente (relações S-N).
- n - número efetivo de ciclos.
- s - folga da ponta dos dentes.
- s_r - relação entre a abertura e folga da ponta do dente.
- t - largura do dente ou passo; tempo.
- A - área; constante do material determinada empiricamente (relações S-N); fator do planejamento fatorial.
- A_c - área característica.
- A_{ef} - área da superfície inclinada da emenda dentada ou área efetiva de cola.
- A_s - área efetiva da seção.
- A_t - área de topo.

- B - constante do material determinada empiricamente (relações S-N); fator do planejamento fatorial.
- C (t) - função de fluência.
- E - módulo de elasticidade.
- E_T - módulo tangente.
- E_x - módulo de elasticidade do aderente na direção x.
- E_y - módulo de elasticidade do aderente na direção y.
- G - taxa de relaxação de energia de deformação.
- G_{xy} - módulo de elasticidade transversal do aderente.
- K - fator de intensidade de tensão.
- M - fator de segurança na equação de Goodman fatorada; número de Miner.
- N - número de ciclos correspondente à fadiga (vida à fadiga).
- P_{rupt} - carga de ruptura.
- R - relação entre os níveis mínimo e máximo de carga, tensão ou deformação.
- R_f - comprimento da zona frontal da fissura.
- S - inclinação da parte biselada da emenda dentada; tensão ou nível de tensão.
- U - energia total de deformação.
- α - ângulo de inclinação da parte biselada da emenda dentada.
- δ - alargamento na zona frontal da fissura.
- ε - deformação ou nível de deformação.
- v - grau de enfraquecimento da emenda dentada.
- ν_{xy} - coeficiente de poisson do aderente.
- σ - tensão.
- σ_a - amplitude de tensão.
- σ_e - amplitude de tensão que produz fadiga após N ciclos.
- σ_m - tensão média.
- σ_{max} - tensão máxima ou nível máximo de tensão.
- σ_{min} - tensão mínima ou nível mínimo de tensão.

- σ_u - Tensão última.
- τ - tempo de duplicamento.
- ΔK - variação do fator de intensidade de tensão.
- $\Delta\sigma$ - variação de tensão.
- Φ - Fator de fluência.
- $2l$ - comprimento da fissura.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o estudo da resistência e rigidez das emendas dentadas à fadiga na tração com as finalidades de propor uma metodologia de ensaio e estimar um coeficiente redução da resistência à fadiga na tração das emendas dentadas em relação a madeira maciça, contribuindo para a caracterização destas ligações. Foram utilizadas duas espécies de madeira, *Pinus caribea hondurensis* e *Eucalyptus grandis*, e dois tipos de adesivos sendo um industrial à base de fenol-resorcinol e um poliuretano à base de resina de mamona desenvolvido no Instituto de Química de São Carlos. Foram realizados ensaios cíclicos para três níveis de frequência (1 Hz, 5 Hz e 9 Hz) e três níveis de tensão (90%, 75% e 60% da resistência) a uma relação $R = 0,1$. Com base nos resultados foram propostos coeficientes de redução de resistência à fadiga da emenda dentada em relação à madeira maciça e verificar que não há variação significativa da rigidez em função do número de ciclos.

Palavras chaves: fadiga, emendas dentadas, madeira laminada colada.

ABSTRACT

The aims of this work is the study of the fatigue strength and stiffness of the finger joints in tension, in order to propose an experimental methodology and to determine a strength reduction coefficient, in relation to solid wood, contributing to the characterization of these joints. Two wood species, *Pinus caribea hondurensis* and *Eucalyptus grandis*, and two adhesives types were used, being an industrial one phenol-resorcinol based and a poliuretane castor oil resin based, developed at the Institute of Chemistry of São Carlos. Cyclical tests were accomplished in three frequency levels (1 Hz, 5 Hz and 9 Hz) and three tension levels (90%, 75% and 60% of the strength) to a relationship $R = 0,1$. Based on the results, it were proposed strength reduction coefficients in relation to solid wood, for finger joints under fatigue in tension, and to concluded that there is no significant variation in stiffness with the cycle numbers.

Key words: fatigue, finger joints, glulam.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

A crescente necessidade de utilizar elementos estruturais de qualidade controlada, juntamente com o marcante avanço na tecnologia dos adesivos e a excelente disponibilidade de madeira, contribuíram para o surgimento de um novo material de construção, a Madeira Laminada Colada (MLC). Atualmente este é um material consagrado no contexto internacional como um dos mais versáteis e eficientes materiais para a aplicação estrutural. A técnica da MLC apresenta como grande vantagem o fato de poder empregar madeira de reflorestamento ou mesmo espécies nativas alternativas (baixa e média densidade), tornando as estruturas de madeira cada vez mais competitivas.

1.2 Definições

A MLC é constituída por lâminas de madeira de dimensões relativamente reduzidas em relação às dimensões finais do elemento estrutural. Estas lâminas são dispostas com as fibras paralelas ao eixo da peça, sendo solidarizadas entre si por meio de um adesivo, formando desta maneira peças com as mais variadas formas e dimensões.

O termo Madeira Laminada Colada (MLC) quando aplicado a elementos estruturais refere-se ao material obtido a partir da colagem de topo e de face de pequenas peças de madeira, na forma reta ou curva, com as fibras de todas as lâminas paralelas ao eixo da peça. As lâminas, de comprimentos suficientemente grandes, são obtidas através da emenda longitudinal de tábuas e podem ser coladas face a face e borda a borda para a obtenção da

altura e largura desejadas, podendo ainda serem arqueadas para obter uma forma curva durante a colagem. Todos estes fatores oferecem uma grande variedade de escolhas no projeto, sujeitos somente a restrições físicas industriais e econômicas envolvidas na produção e/ou uso. Na Figura 1, é mostrado um esquema geral de uma peça de MLC com o objetivo de facilitar a visualização dos elementos que a constituem.

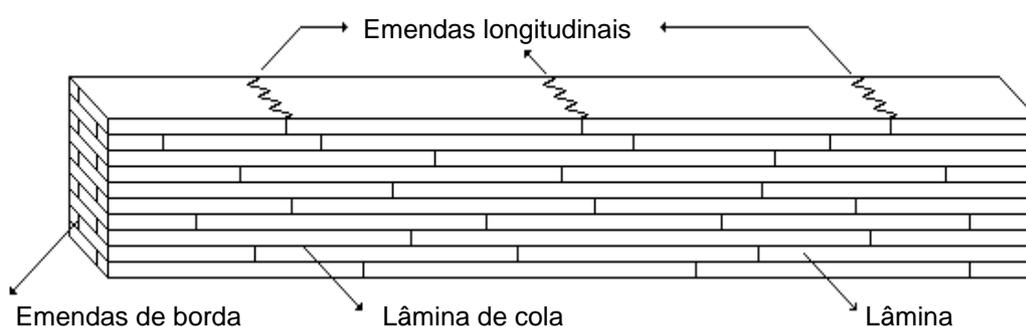


FIGURA 1 - Esquema geral de uma peça de MLC.

- Lâminas - apresentam espessura variável de acordo com o tipo do elemento estrutural, podendo variar de 1cm (3/8") a 5cm (2");
- Lâminas de Cola - são constituídas por um tipo de adesivo compatível com a madeira e a finalidade do elemento estrutural;
- Emendas longitudinais - são utilizadas para a obtenção de lâminas de comprimentos suficientemente grandes;
- Emendas de borda - são empregadas para obtenção de largura superior à largura das tábuas disponíveis.

Dependendo da disposição das lâminas em relação ao plano da peça flexionada, a MLC pode ser classificada em vertical ou horizontal, conforme mostrado no esquema da Figura 2, sendo mais comum o uso do primeiro tipo.

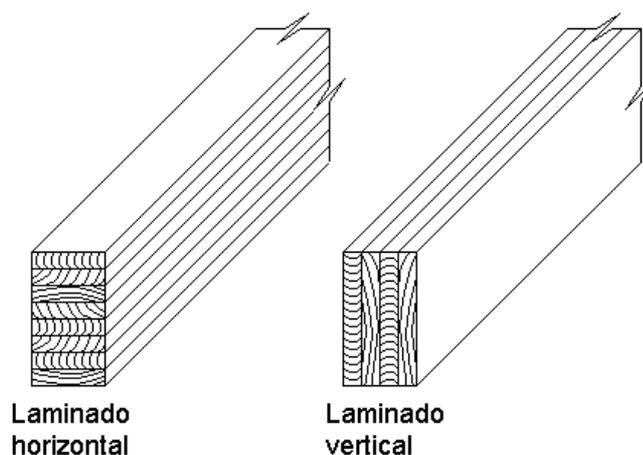


FIGURA 2 - Tipos de laminados colados.
Fonte: PEREZ GALAZ (1979).

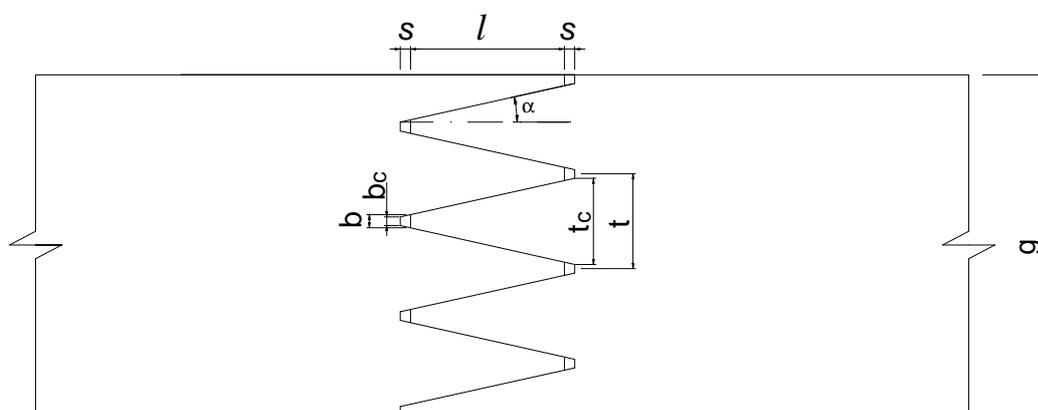
1.3 Justificativas

A produção mundial de madeira para fins estruturais encontra-se por volta de 10^9 toneladas por ano, o que torna este material muito importante no contexto mundial. O Brasil apresenta uma grande disponibilidade de madeira, reservas tropicais e de reflorestamento, que precisa ser explorada adequadamente. Só no Estado de São Paulo, encontra-se uma área de reflorestamento superior a 950.000 Ha. Apesar da abundância, a madeira no país ainda é pouco utilizada para fins estruturais, principalmente quando comparado com os países da Europa e da América do Norte.

A Indústria da MLC é uma alternativa promissora de aproveitamento racional de tais recursos. Desta forma, torna-se necessário o conhecimento dos vários fatores que influenciam nas características de resistência e rigidez da MLC, proporcionando aos projetistas suporte técnico para o dimensionamento destes elementos estruturais.

Para a produção dos elementos estruturais de MLC são necessárias lâminas de comprimentos suficientemente grandes, as quais são obtidas a partir de emendas longitudinais em tábuas. Diversas foram as configurações de emendas longitudinais usadas em MLC, sendo que os tipos principais foram as de topo, as biseladas e as emendas dentadas. A fragilidade das emendas de topo e o ônus imposto ao processo de produção gerados pelas

emendas biseladas conduziram à utilização das emendas dentadas (Figura 3). A explicação para o sucesso das emendas dentadas em MLC se deve ao fato da mesma reunir uma boa resistência da emenda aos limites práticos de produção. Devido às variações e limitações dos comprimentos das tábuas utilizadas na produção das lâminas, torna-se comum que os elementos estruturais de MLC tenham um grande número de emendas dentadas distribuídas no seu interior. Estas emendas apresentam uma descontinuidade do material e conseqüentemente são regiões consideradas potencialmente fracas. Deste modo, as emendas dentadas em MLC, representam, entre outros, um dos mais importantes fatores das características de resistência e rigidez dos elementos estruturais de MLC.



l - comprimento da emenda	$t \cong t_c$ - largura do dente ou passo
g - largura total da emenda	$b \cong b_c$ - largura da ponta do dente
s - folga da ponta do dente	s/l - folga relativa
$S = tg \alpha$ - inclinação dos dentes	$v = b/t$ - enfraquecimento da emenda
A_t - área de topo ou área da ponta dos dentes	A_{ef} - área da superfície inclinada ou área efetiva de cola
A_s - área efetiva da seção (sem a área da ponta dentes)	

FIGURA 3 – Emenda dentada.

As rupturas destes elementos estruturais iniciam freqüentemente nas emendas dentadas da zona crítica de tração (Figura 4), sendo na maioria das vezes de natureza frágil. Além disso, a falta do controle de qualidade adequado durante a fabricação também pode conduzir para a produção de

emendas de resistência inferior. O efeito das emendas dentadas no desempenho mecânico da MLC é de grande interesse para os projetistas e usuários de estruturas de madeira. Por esta razão, a resistência das emendas dentadas, principalmente nas dicotiledôneas, é um fator limitante na resistência dos elementos estruturais de MLC, sendo de fundamental importância um controle de qualidade adequado destas emendas, bem como o conhecimento de suas características de resistência e rigidez.

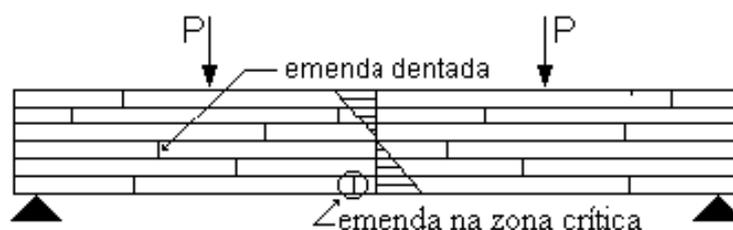


FIGURA 4 - Exemplo de emenda dentada na zona crítica de tração.

O estudo do comportamento estático das emendas, incluindo todos os fatores que afetam a eficiência das mesmas, foi abordado por MACÊDO (1996). Entretanto, os elementos estruturais de MLC são projetados para as mais variadas condições de solicitação, sendo que em boa parte destas aplicações são submetidos a muitas repetições de carregamentos durante a vida útil da estrutura como, por exemplo, ações de vento nas estruturas de cobertura, ações de veículos em pontes, ações do fluxo do produto em estruturas de armazenamento, etc. Muitos acréscimos de tensões são facilmente introduzidos nos elementos de MLC através da colagem de peças de madeira de pequenas dimensões (tábuas).

Apesar da madeira e derivados serem importantes materiais para aplicação estrutural, as informações sobre fadiga em madeira são bastante limitadas quando comparadas aos metais e outros materiais compósitos. Isto pode ser atribuído, provavelmente, ao maior uso da madeira na engenharia civil como um material onde a fluência ou duração de carga é o fator dominante. A resistência à fadiga da madeira é realmente muito maior do que a resistência à fadiga de materiais cristalinos quando comparada ao limite da resistência estática do material. A maior parte da literatura sobre fadiga em madeira foi obtida a partir de ensaios de flexão e compressão. De acordo

com a literatura isto é um legado da utilização da madeira em estruturas onde estes tipos de solicitações são fatores preponderantes, sendo ainda mais limitadas as informações sobre a resistência da madeira à fadiga na tração. Entretanto, em se tratando da MLC, é importante salientar que a tração é fator preponderante no modo de ruptura de peças fletidas, envolvendo em sua grande maioria as emendas dentadas.

Com o avanço tecnológico tornou-se comum a utilização de madeira em estruturas onde o carregamento cíclico é um fator importante. O efeito do carregamento cíclico nas ligações coladas, parafusadas ou pregadas tornou-se de grande interesse no campo das estruturas de madeira.

1.4 Objetivos

No caso particular da MLC, como mencionado anteriormente, as rupturas ocorrem com maior frequência nas emendas das regiões críticas de tração. A questão é qual seria o efeito das emendas dentadas na resistência à fadiga da MLC e qual o comportamento da linha de cola para este tipo de solicitação. O conhecimento de tais características é de fundamental importância para prever com segurança o comportamento das estruturas de MLC quando submetidas a carregamentos cíclicos. Assim sendo, este trabalho tem como objetivos avaliar o comportamento da resistência e da rigidez das emendas dentadas sujeitas às cargas repetidas de tração através de um estudo teórico e experimental, visando propor uma metodologia de ensaio e estimar um coeficiente de redução α_r , da resistência à fadiga das emendas dentadas em relação à madeira maciça, como forma de contribuição para a caracterização deste tipo de ligação para diferentes espécies de madeira e adesivos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é apresentar alguns fundamentos teóricos sobre a fadiga, bem como uma revisão atual das contribuições bibliográficas mais importantes sobre a fadiga em madeira. A revisão da literatura que trata das emendas dentadas é apresentada em MACÊDO (1996).

2.1 Conceitos importantes

Para o bom entendimento do assunto englobado neste estudo, é importante o conhecimento de alguns conceitos básicos. Portanto, neste item são apresentadas as definições das propriedades e dos parâmetros abordados nos demais itens do trabalho.

Antes que seja possível qualquer entendimento sobre fadiga, é necessário definir e descrever alguns conceitos importantes para o entendimento do trabalho:

Fadiga – segundo a ASTM E 1150 (1987) define-se fadiga como o processo de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva que ocorre em um material sujeito a variações de tensões e deformações no mesmo ponto ou pontos e que pode culminar em fissuras ou rupturas completas após um número suficiente de variações de tensões.

Resistência – segundo a NBR 7190/97 resistência é a aptidão da matéria suportar tensões e é determinada convencionalmente pela máxima tensão que pode ser aplicada a corpos-de-prova isentos de defeitos do material considerado, até o aparecimento de fenômenos particulares de

comportamento além dos quais há restrição de emprego do material em elementos estruturais. Geralmente estes fenômenos são os de ruptura ou de deformação específica excessiva.

Resistência à fadiga em N ciclos – segundo ASTM E 1150 (1987) é um valor de tensão capaz de causar ruptura em exatamente N ciclos conforme determinado a partir de um diagrama S-N. O valor de assim determinado é sujeito às mesmas condições as quais foram aplicadas ao diagrama S-N.

Vida à fadiga, N – segundo a ASTM E 1150 (1987) é o número de ciclos de carregamento de um caráter especificado que um determinado corpo-de-prova pode suportar antes que ocorra a ruptura de uma natureza especificada.

2.1.1 Curvas S-N e ϵ -N

O método mais tradicional e usado na determinação das características de fadiga de um determinado material é representado na forma de curvas S-N e ϵ -N ou diagramas de *Wöhler*, Figura 5, sendo o parâmetro S o nível de tensão, ϵ o nível de deformação e N o número de ciclos. O diagrama S-N ou ϵ -N é determinado com a carga ou deformação variando harmonicamente dentro de um dado intervalo, de carga ou deslocamento, e uma frequência constante. As curvas dos diagramas S-N e ϵ -N são construídas a partir de dados coletados empiricamente.

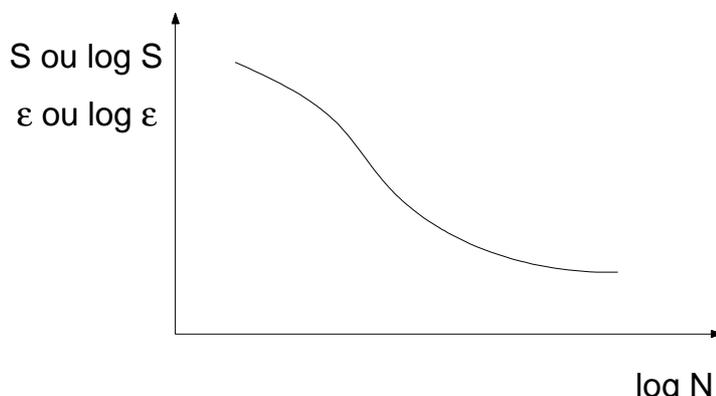
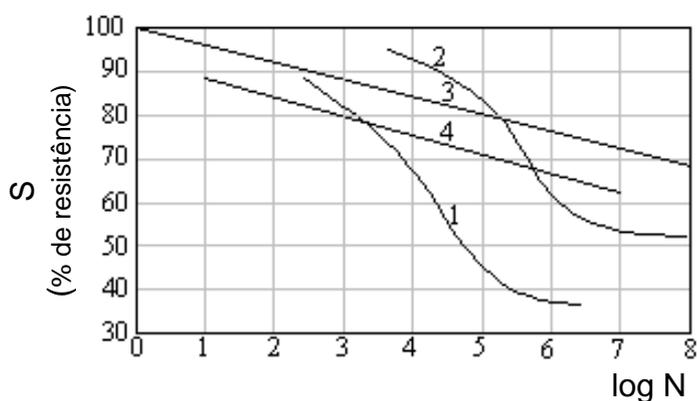


FIGURA 5 – Ilustração de uma curva S-N ou ϵ -N.

Em geral, as curvas S-N ou ϵ -N representam a deterioração estrutural progressiva e a danificação (quebra) gradual de ligações (moleculares) as quais podem ser analisadas como um processo estatístico sob tensões repetidas, MADAYAG (1969).

As curvas S-N ou ϵ -N podem ser obtidas para vários materiais com diferentes níveis de tensão e número de ciclos, Figura 6. Normalmente N é plotado como abcissa em escala logarítmica e S ou ϵ como ordenadas, podendo em alguns casos também estarem em escala logarítmica. O nível de tensão S é na maioria das vezes normalizado como um percentual da resistência do material.



1 - aço doce, 2 - Liga de alumínio, 3 - concreto e 4 - madeira.

FIGURA 6 - Diagrama de *Wöhler* ou S-N para diferentes materiais.
Fonte: HANSEN (1991).

É consenso que a forma das curvas S-N e ϵ -N dependem marcadamente do material e das condições de ensaio. Na literatura as relações entre os níveis de tensão ou deformação e o número de ciclos são, geralmente, encontrados nas formas a seguir:

$$\log N = A + B (S) \text{ ou } \log N = A + B (\epsilon) \quad (1a)$$

$$\log N = A + B (\log S) \text{ ou } \log N = A + B (\log \epsilon) \quad (1b)$$

Os parâmetros A e B das equações acima são constantes do material obtidos empiricamente. Os níveis de tensão (S) e deformação (ϵ) podem, de acordo com a ASTM E 739 (1991), se referir:

- ao valor máximo da tensão ou deformação cíclica de amplitude constante, dado um valor específico da taxa de tensão ou deformação, ou da tensão ou deformação mínima;
- a amplitude ou o intervalo da tensão ou deformação cíclica de amplitude constante, dado um valor específico da tensão ou deformação média (Figura 7); ou
- informações análogas estabelecidas em termos de alguma variável independente (controlada) apropriada.

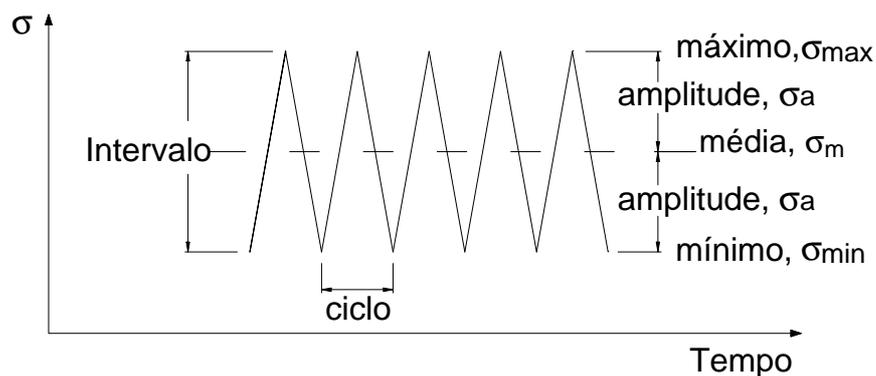


FIGURA 7 – Termos básicos para carregamento cíclico com amplitude constante.

Fonte: ASTM E 1150 (1987).

Exceto nos casos onde a resistência à fadiga deva ser determinada através de ensaios específicos, história de carregamento semelhante à história real para a qual o elemento será submetido, o comportamento à fadiga dos materiais estruturais é geralmente estudado por meio de ensaios simplificados. Nestes ensaios, os materiais são submetidos a variações de cargas de amplitude constante até serem atingidas deformações excessivas, limites de números de ciclos nos ensaios (*run outs*) ou ruptura. A representação dos resultados, obtidos nos ensaios de amplitude constante, é mostrada através de curvas S-N ou ϵ -N.

2.1.2 A Relação R

A resistência à fadiga dos materiais é influenciada pela amplitude dos ciclos de tensão, bem como pelo percentual da resistência que é atribuído ao nível de tensão, Figura 8. Quanto maior a diferença entre as tensões máximas e mínimas, menor será o número de ciclos para a ruptura.

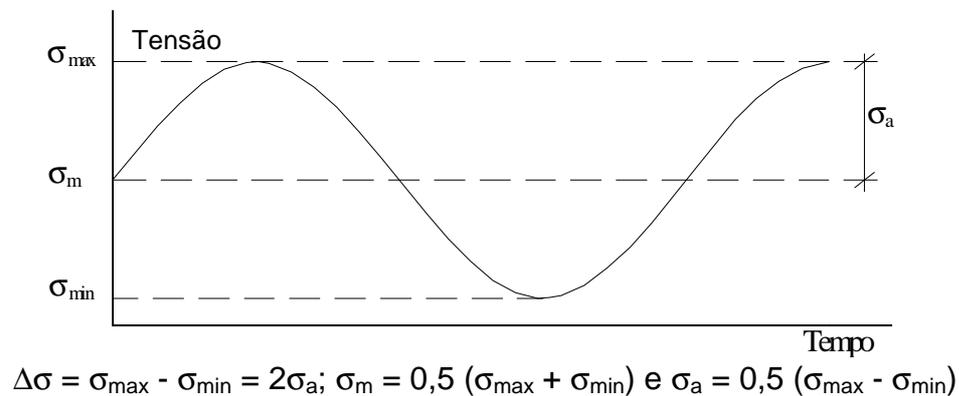


FIGURA 8 - Definição de nível de tensão.
Fonte: CLORIUS & PEDERSEN (1996).

Para definir o ciclo é necessário especificar o nível de tensão (intensidades máximas e mínimas das tensões), a lei temporal de variação e os parâmetros desta lei temporal. A intensidade máxima é proporcional a uma resistência de referência do material obtida em ensaios de curta duração, enquanto que a mínima é fixada como uma parcela da intensidade máxima.

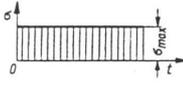
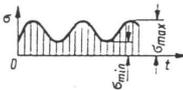
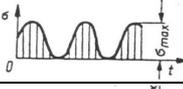
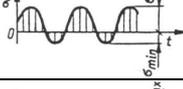
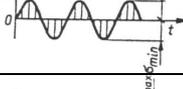
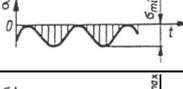
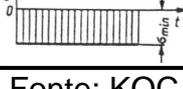
Segundo a ASTM E 1150 (1987), a relação R (relação de carga) em carregamento de fadiga é denominada como a relação algébrica dos dois parâmetros de carregamento de um ciclo; sendo que as relações mais usadas são:

$$R = \frac{P_{\min} \text{ (carga mínima)}}{P_{\max} \text{ (carga máxima)}} \text{ ou } \frac{\sigma_{\min} \text{ (tensão mínima)}}{\sigma_{\max} \text{ (tensão máxima)}} \quad (2a)$$

$$\text{ou } R = \frac{\text{vale de carga}}{\text{pico de carga}} \quad (2b)$$

Nos ensaios de fadiga podem ser aplicadas tensões com ondas senoidais, triangulares ou quadradas, mas é importante identificar a configuração do carregamento, isto é, se repetido, reverso ou de amplitude variável. A relação R pode ser definida como um código para o entendimento do tipo de carregamento nos ensaios que envolvem combinações de tensões. Algumas relações R são ilustradas na Tabela 1 e na Figura 9, onde σ_{\min} é a menor ou a mais negativa das tensões (máxima de compressão).

TABELA 1 – Diferentes ciclos de tensões.

Diagrama $\sigma = f(t)$	Nome	Tensões			Coeficientes	
		σ_{\max} e σ_{\min}	σ_m	σ_a	$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$	$x = \frac{\sigma_m}{\sigma_a}$
	Constante (positivo)	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} > 0$	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$	0	+ 1	+ ∞
	cíclico de tração	$\sigma_{\max} > 0$ e $\sigma_{\min} > 0$	> 0	$\neq 0$	$0 < R < 1$	$1 < x < +\infty$
	cíclico de tração (zero a tração)	$\sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\min} = 0$	$0,5 \sigma_{\max}$	$0,5 \sigma_{\max} $	0	1
	alternado	$\sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\min} < 0$ $\sigma_{\max} > \sigma_{\min} $	> 0	$\neq 0$	$-1 < R < 0$	$0 < x < 1$
	completamente reverso	$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} > 0$ $\sigma_{\min} < 0$	0	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} $	- 1	0
	Alternado	$\sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\min} < 0$ $\sigma_{\max} < \sigma_{\min} $	< 0	$\neq 0$	$-\infty < R < -1$	$-1 < x < 0$
	cíclico de compressão (zero a compressão)	$\sigma_{\max} = 0$ $\sigma_{\min} < 0$	$0,5 \sigma_{\min}$	$0,5 \sigma_{\min} $	$\pm \infty$	-1
	cíclico de compressão	$\sigma_{\max} < 0$ $\sigma_{\min} < 0$	< 0	$\neq 0$	$1 < R < +\infty$	$-\infty < x < -1$
	constante (negativo)	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} < 0$	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$	0	+ 1	- ∞

Fonte: KOCAÂNDA (1978).

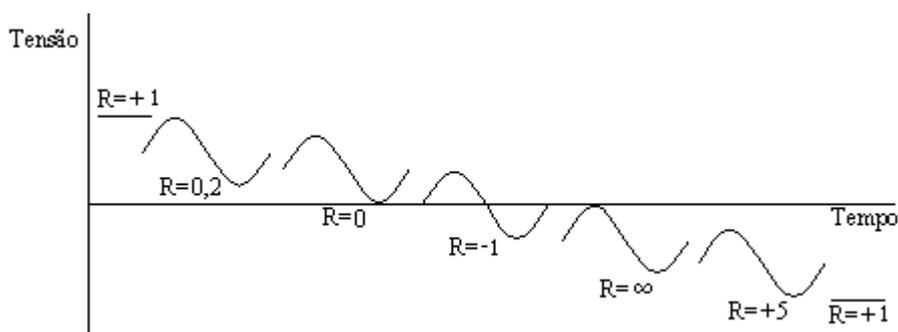


FIGURA 9 - Relação R para diferentes níveis de tensão.

Quando são agrupados ensaios com o mesmo material, mesmo grupo de corpos-de-prova e diferentes relações R, o resultado obtido será uma família de curvas S-N, Figura 10. Quanto menor a relação R mais crítico será o ensaio de fadiga. Em outras palavras, isto significa que a situação mais crítica para a fadiga é o carregamento totalmente reverso, ou seja, $R = -1$.

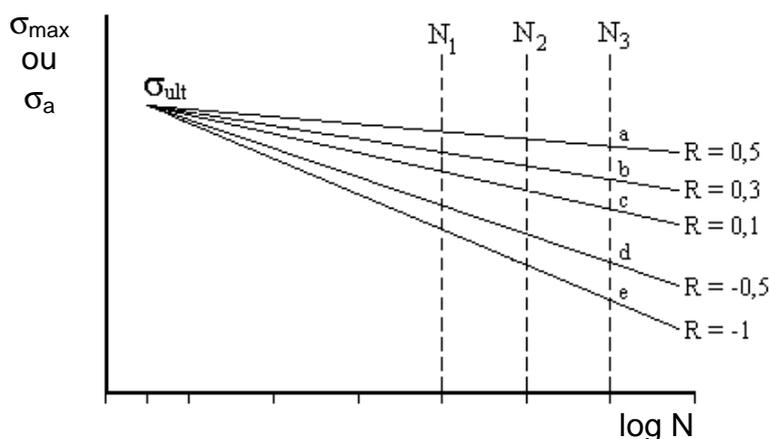


FIGURA 10 - Grupo de curvas S-N para diferentes relações R.
Fonte: ANSELL (1995).

2.1.3 Diagramas de vida constante

O diagrama de vida constante ou diagrama de *Goodman* é visto na literatura como um outro meio de expressar o desempenho dos materiais quando submetidos a carregamentos cíclicos, ANSELL (1995) e BOND & ANSELL (1998). *Ansell* afirma que é vantajoso poder prever o desempenho à fadiga para qualquer relação R através da interpolação de $\sigma - \log N$, Figura 11.

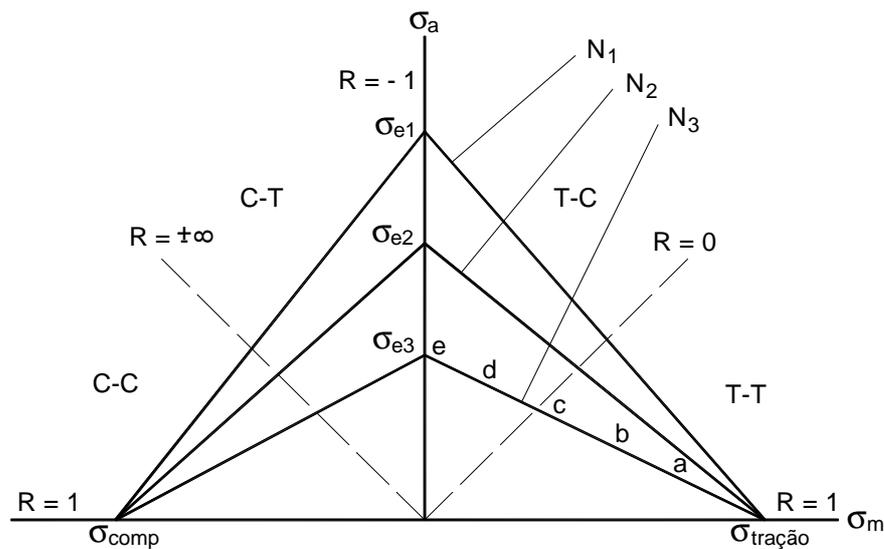


FIGURA 11 - Diagrama de Goodman ou diagrama de vida constante.
Fonte: ANSELL (1995).

A área abaixo das linhas de vida constante, em um diagrama de *Goodman*, representa as combinações de tensões médias (σ_m) e amplitudes de tensões (σ_a) que podem ser seguramente obtidas. As linhas tracejadas a partir da origem são linhas de R constante, onde a relação constante $\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ é igual a relação σ_a / σ_m . O conjunto mínimo de dados necessários para a construção do diagrama de *Goodman* é amplitude de tensão σ_a em $R = -1$ e as resistências últimas a tração e compressão. Os valores de amplitude σ_{e1} , σ_{e2} e σ_{e3} representam valores de tensões para os quais se obtêm as linhas de vida constante (N_1 , N_2 e N_3) e $\sigma_u = \sigma_{ult}$. A determinação de uma família de curvas S-N é demorada e muitas vezes dispendiosa, desta maneira, foram desenvolvidos métodos que permitem estimar as tensões máximas e mínimas do ciclo através de regras que levam em consideração a tensão que produz a fadiga por carga cíclica e resistência do material. ANSELL (1995), CLORIUS & PEDERSEN (1996), RODRIGUES JUNIOR (1997) e BOND & ANSELL (1998) relatam que a equação de *Goodman* para o diagrama de vida constante é representada por:

$$\sigma_a = \sigma_e \left[1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right] \quad (3)$$

onde σ_a é a amplitude, σ_e é a amplitude que produz fadiga para N_i repetições proveniente de curvas S-N, σ_m é a tensão média e σ_u é a resistência do material. Segundo os autores é possível obter outras versões da equação acima. Duas destas possibilidades são apresentadas a seguir:

Gerber

$$\sigma_a = \sigma_e \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Goodman fatorada

$$\sigma_a = \frac{\sigma_e}{M} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u / M} \right) \right] \quad (5)$$

A equação de *Gerber* representa um arranjo parabólico das linhas de vida constante, tendo as mesmas limitações da equação de *Goodman*. A equação de *Goodman fatorada* inclui apenas um fator de segurança $M > 1$, que tem a função de reduzir a área abaixo da linha de vida constante.

Um ponto importante do diagrama de vida constante, citado por ANSELL (1995), CLORIUS & PEDERSEN (1996) e BOND & ANSELL (1998), é que este permite a extrapolação dos dados para outras relações R. Para isto, é necessário obter apenas a amplitude de tensão em $R = -1$ (σ_e) e as tensões últimas de tração e compressão, reduzindo significativamente o tempo gasto nos ensaios de fadiga.

2.1.3.1 Cargas complexas

A previsão da fadiga com base nos diagramas S-N ou ε -N e de vida constante se fundamenta na condição de que a ruptura seja obtida por meio de carregamentos onde os valores da tensão média e da amplitude de tensão sejam constantes durante os ensaios. Em muitos casos, a história de carregamento de uma estrutura é de natureza aleatória e não pode ser simplesmente descrita em termos de carregamentos com níveis de tensão

ou deformação constantes. A história de carregamento pode, geralmente, ser separada em grupos de carregamentos com condições que possam ser consideradas constantes, tornando necessário a adoção de critérios capazes de superar a influência destas situações, MINER (1945), MADAYAG (1969) e FUCHS & STEPHENS (1980).

A teoria mais simples e mais usada para se levar em consideração a influência das cargas complexas é a apresentada por PALMGREEN¹ (1924) e proposta por MINER (1945), conhecida como regra de *Palmgren-Miner*. A idéia desta regra é subdividir o carregamento total em vários carregamentos com valores médios e de amplitudes constantes, Figura 12, considerando o dano acumulado como uma função do número de ciclos.

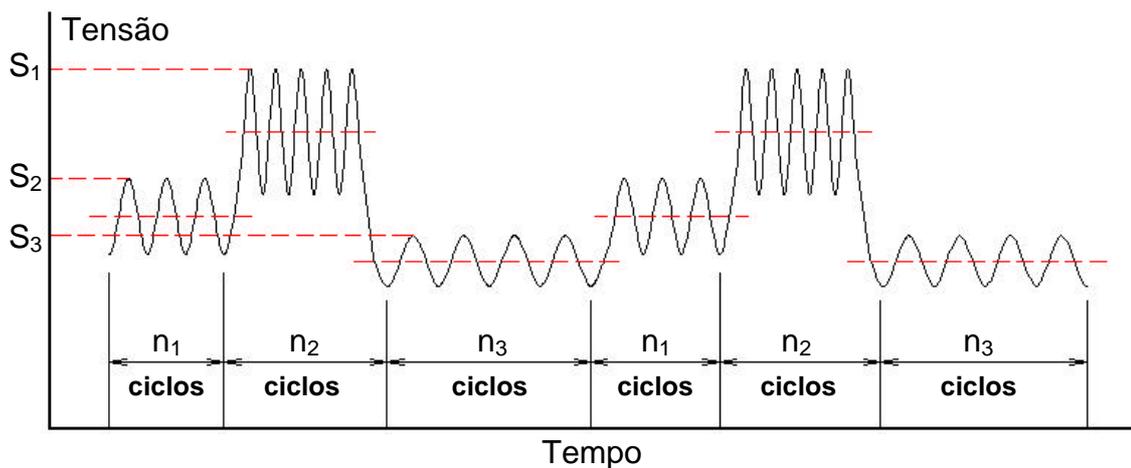


FIGURA 12 – Representação de história de carregamento com três níveis de tensão.

Fonte: MADAYAG (1969).

Para especificar analiticamente o conceito de dano para cada grupo de carregamento com n ciclos, apresentando valores médios e de amplitude constante, a regra propõe que estes n ciclos causarão uma quantidade de dano dada pela expressão:

$$M = n / N \quad (6)$$

¹ PALMGREEN, A. (1924). *Die Lebensdauer von Kugellagern*. Verfahrens-technik (Berlin) 68, pp 339-341.

Onde N é o número de ciclos para a ruptura sob a história de carregamento específica. A quantidade (n / N) é chamada de “relação de ciclo” e tem valor menor ou igual a unidade ($0 \leq M \leq 1$), onde o estado virgem é caracterizado pelo valor nulo de M e a ruptura por fadiga pelo valor unitário. O dano produzido por n repetições de um carregamento, para o qual se tem o número N de ciclos correspondente a fadiga, é dado por $M = n/N$.

O critério para a ruptura de um material submetido a um número c de variações de ciclos de carregamento é dado pelo número de M de *Miner*:

$$M = \sum_{i=1}^c \frac{n_i}{N_i} < 1 \quad (7)$$

O número efetivo de ciclos é denominado de n_i e N_i é o número total de ciclos capaz de causar ruptura para a condição de carregamento i . A hipótese da linearidade da resistência à fadiga corresponde a hipótese de um crescimento constante de micro-rupturas ou fraturas durante carregamentos de natureza cíclica. É evidente que os ciclos ocorridos durante a última parte de um carregamento podem introduzir mais danos que aqueles que ocorrem na fase inicial. De forma semelhante, a simples adição da vida à fadiga usada para diferentes condições de carregamento desconsidera que os ciclos de carga com curta duração possam ter maior influência se expostos após ciclos mais demorados. Apesar destas considerações e dos vários modelos propostos para a avaliação de carregamentos cíclicos de amplitude variável, a regra de *Palmgren-Miner* é geralmente a mais utilizada. No caso particular da madeira, por exemplo, o Comitê Europeu de Normalização CEN (1997) recomenda que para o carregamento periódico de amplitude variável seja utilizada a referida regra.

2.2 Planejamento S-N e respostas de ensaios

Nos ensaios de fadiga, geralmente, é necessário definir de forma clara qual o objetivo principal do trabalho. Dependendo deste objetivo, os procedimentos de ensaios poderão diferir de forma significativa.

2.2.1 Ensaios preliminares e exploratórios

Os ensaios preliminares e exploratórios, geralmente, apresentam restrições de tempo e custo. Assim sendo, estes ensaios devem conduzir tanto quanto possível ao conhecimento dos efeitos mais amplos sobre fadiga, no período mais curto de tempo e com o mínimo de corpos-de-prova sendo utilizado nos ensaios, LITTLE & JEBE (1975). Estas recomendações, geralmente resultam em ensaios para obter curvas S-N, onde corpos-de-prova singulares são testados na maioria, se não em todos, os níveis de tensão (ou deformação) selecionados para o programa de ensaio. É evidente, que conforme o grau de conhecimento da forma da curva S-N, o número de níveis de tensão abordados nos ensaios pode ser alterado.

2.2.1.1 Forma conhecida da curva S-N

Em muitas situações, onde a forma básica da curva S-N é bem conhecida, torna-se desnecessário traçar curvas S-N detalhadamente, isto é, raramente compensa usar mais que quatro a seis níveis de tensão nos ensaios, e em alguns casos apenas dois sejam suficientes (Figura 13), LITTLE & JEBE (1975). Uma vez reduzidos os níveis de tensão, as amostras remanescentes devem ser usadas como réplicas dos níveis previamente testados. Geralmente, quando são testados vários corpos-de-prova no mesmo nível de tensão os resultados dos ensaios de fadiga não são os mesmos, podendo haver uma grande dispersão de resultados.

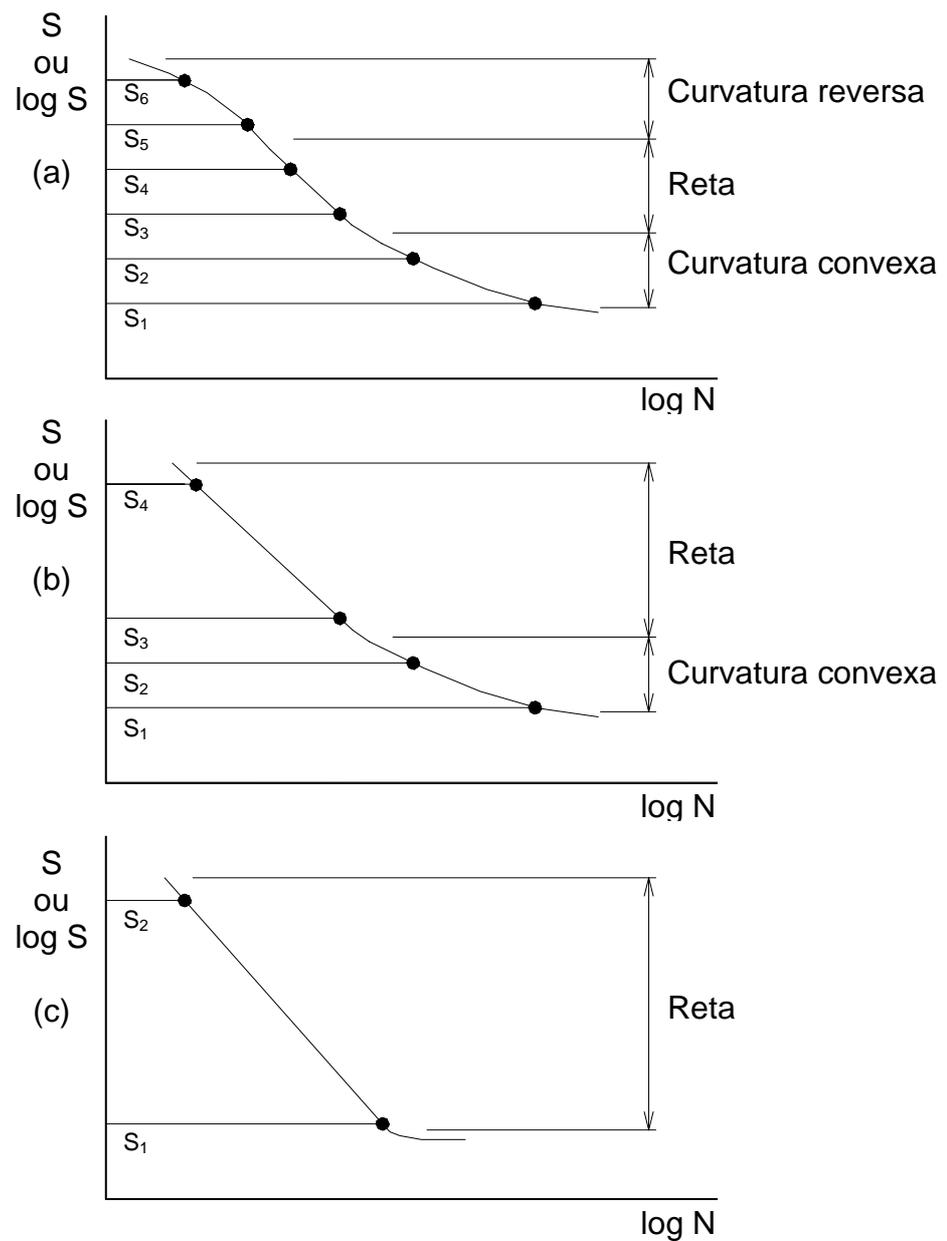


FIGURA 13 – Três tipos elementares de curvas S-N.
Fonte: LITTLE & JEBE (1975).

As dispersões nos resultados dos ensaios de fadiga tornam-se mais acentuadas nos ensaios de corpos-de-prova de longa vida (menores níveis de tensão). A variabilidade dos resultados de ensaios dos corpos-de-prova de longa vida excede a variabilidade dos resultados dos corpos-de-prova de vida mais curta, MADAYAG (1969), LITTLE & JEBE (1975), SPINDEL & HAIBACH (1981) e PUSCAR & GOLOVIN (1985).

Apesar da diferença de variabilidade nos resultados para diferentes níveis de tensão, é prática comum se manter o mesmo número de ensaios para todos os níveis de tensão analisados, a não ser que se tenha um interesse especial em um determinado nível.

2.2.1.2 Forma desconhecida da curva S-N

Para MADAYAG (1969), o método mais apropriado a ser utilizado para estudar as propriedades de uma população depende do conhecimento e da suposição da forma e da frequência de distribuição desta população. Quando não se tem informação anterior sobre a forma da curva S-N, o número de níveis de tensão deve ser aumentado (seis a oito), LITTLE & JEBE (1975). Desta forma, assume-se que a curva S-N obtida apresente uma forma conhecida (Figura 13). Para *Little e Jebe*, o número de níveis de tensão deve ser aumentado para dez até o máximo de doze, se for suposto que a curva S-N apresente particularidades. Uma vez definida a forma da curva S-N, a ênfase dos ensaios deve mudar imediatamente para o número de repetições em níveis de tensão pré-determinados, visando obter uma maior precisão da curva S-N média.

2.2.2 Réplicas nos ensaios S-N

Depois de identificados os efeitos gerais de fadiga e sua magnitude estimada através de ensaios exploratórios, a necessidade de ensaios adicionais de exemplares singulares diminui bastante (as réplicas vem a ser o ponto principal), LITTLE & JEBE (1975).

Geralmente, quando a quantidade de réplicas aumenta, o número de níveis de tensão diminui. Frequentemente, a razão para isto é que a necessidade de obter dados confiáveis é acompanhada por um estreito entendimento das vidas à fadiga de interesse na situação desejada, LITTLE & JEBE (1975). Em outros casos, o número de níveis de tensão usados em um programa de

ensaio S-N com réplicas, não deve ser maior do que os usados nos ensaios preliminares e exploratórios.

2.2.2.1 Dois níveis de tensão

Sempre que a variação de níveis de tensão é pequena, de maneira que a curva S-N possa ser representada razoavelmente por uma linha reta no intervalo de vida de interesse, então podem ser usados nos ensaios apenas dois níveis de tensão, LITTLE & JEBE (1975) e ASTM E 739 (1991). Se a variância do $\log N$ é uniforme ao longo do intervalo de interesse e o total do número de amostras para a experimentação é fixo, então se pode utilizar metade dos corpos-de-prova em cada nível de tensão.

2.2.2.2 Três níveis de tensão

Sempre que a experiência ou a literatura indicar que a curva S-N é suave com uma curvatura *convexa*, podem ser usados nos ensaios três níveis de tensão igualmente espaçados, supondo que o intervalo de interesse da vida à fadiga (N) possa ser limitado. Se a curva S-N é descrita em termos do $\log S$, então o espaçamento igual deve referir-se ao $\log S$, LITTLE & JEBE (1975), PUSKÁR & GOLOVIN (1985) e ASTM E 739 (1991).

Em alguns casos é desejável verificar a adequação do modelo linear para a curva S-N no intervalo de interesse. Nesta situação podem ser usados três níveis de tensão. Porém, não é adequado ensaiar em três níveis de tensão somente para verificar se a curva S-N apresenta uma curvatura ligeiramente convexa. *“Uma curvatura reversa, ou uma curvatura ligeiramente convexa serão observadas em 50% dos experimentos repetidos quando o modelo real é de fato linear!”* LITTLE & JEBE (1975).

2.2.2.3 Quatro ou mais níveis de tensão

Se o intervalo de vida à fadiga é suficientemente amplo, de maneira que se decide ajustar uma expressão de segunda ordem para os dados S-N, então

se pode considerar quatro níveis de tensão para permitir o estabelecimento da significância estatística do termo quadrático, LITTLE & JEBE (1975). Por outro lado, se são usados cinco ou mais níveis de tensão, o número de réplicas em cada nível diminui marcadamente ou número de corpos-de-prova do programa de ensaio excede as limitações práticas. Se a replicação for sacrificada para estender o intervalo de interesse da vida à fadiga, então o programa de ensaio apropriado para esta situação é o correspondente aos ensaios preliminares ou exploratórios.

2.2.3 Planejamento de ensaio

O planejamento de ensaios preliminares e exploratórios deve atender algumas metas básicas, MADAYAG (1969), LITTLE & JEBE (1975), e ASTM E 739 (1991). A primeira é obter uma amostra aleatória que ajude a garantir que as amostras ensaiadas sejam representativas do universo conceitual das amostras sobre a qual será feita a inferência estatística e de engenharia. A segunda é balancear os efeitos potencialmente ilegítimos de variáveis indesejáveis, através de um agrupamento planejado (agrupamento em blocos). A terceira, é admitir possíveis dificuldades como, por exemplo, mudança e mau funcionamento do equipamento de ensaio. Isto muitas vezes pode ser minimizado através da realização de ensaios em pequenos blocos de tempo, de maneira a formar uma seqüência de “ensaio rápidos”, detectando e evitando problemas associados com modificações obrigatórias que possam ocorrer no meio de ensaios mais demorados.

A escolha da ordem de ensaios é importante nos testes de grupos em vários níveis de tensão. Em particular, é recomendável não ensaiar todos os corpos-de-prova destinados ao nível de tensão mais alto sem antes testar todas aquelas destinadas aos níveis inferiores.

Quando se utilizam blocos na estrutura organizacional do programa de ensaio, recomenda-se a análise de variância para separar as variáveis indesejáveis das variáveis associadas com repetição real. Para qualquer

relação R, é muito difícil se determinar a relação entre a tensão e o número de ciclos para a ruptura através de regressão, LITTLE & JEBE (1975), ASTM E 739 (1991) e BOND & ANSELL (1998a). Geralmente, a análise global é simplificada quando se assume que a distribuição do log das vidas à fadiga ($\log N$) é normal (log normalmente distribuído), e que a variância do log das vidas é constante para todos os níveis da variável independente usados nos ensaios, LLOYD² (1963) apud MADAYAG (1969) e ASTM E 739 (1991). Em outras palavras, assume-se que a dispersão em $\log N$ é constante em todos os níveis de tensão e deformação.

De acordo com o Anexo B do Comitê Europeu de Normalização CEN (1994) e BOND & ANSELL (1998), a resistência à fadiga é definida por meio de curvas S-N com os valores σ_k - N_k (Figura 14), onde N_k representa o número de repetições do ciclo que tem 95% de probabilidade de não ser superado.

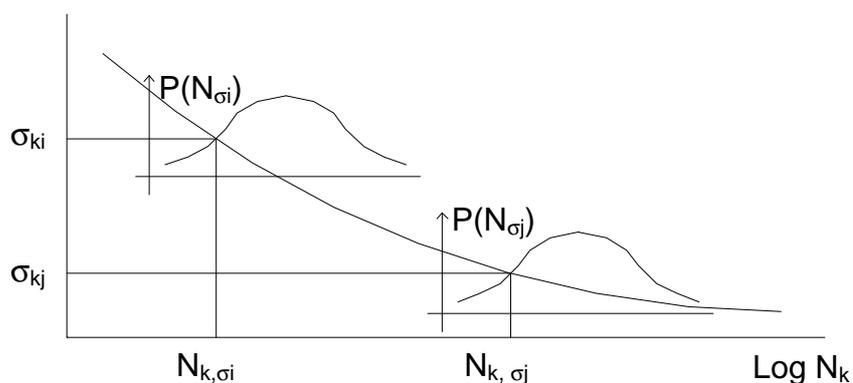


FIGURA 14 - Ilustração de uma curva S-N.

2.2.3.1 Amostragem

O número mínimo de amostras (corpos-de-prova) nos ensaios S-N ou ϵ -N é função do tipo de ensaio que será realizado. LITTLE & JEBE (1975) e ASTM E 739 (1991), apresentam as seguintes diretrizes para a repetição em ensaios S-N ou ϵ -N:

² LLOYD, K. (1963). *Review and Analysis of Cumulative-Fatigue-Damage Theory*. RM – 3650-PR, The Rand Corp., dec.; MADAYAG, A. F. (1969). *Metal Fatigue: Theory and Design*. John Wiley & Sons, Inc.

$$\% \text{ de repetições} = 100 \left[1 - \frac{\text{Total do número de diferentes níveis de tensão usados nos ensaios}}{\text{Total do número de exemplares ensaiados}} \right]$$

Tipo de ensaio	% de repetição
Preliminares e exploratórios (pesquisas exploratórias e desenvolvimento de ensaios)	17 a 33 mínimo
Pesquisa e desenvolvimento de ensaios de componentes e amostras (CP)	33 a 50 mínimo
Dados admissíveis de cálculo	50 a 75 mínimo
Confiabilidade de resultados	75 a 88 mínimo

É evidente que o número mínimo de corpos-de-prova exigido nos ensaios depende do tipo de programa utilizado. Para isto, as recomendações a seguir são ditas como razoáveis, ASTM (1991).

Tipo de ensaio	Número mínimo de exemplares
Preliminares e exploratórios (pesquisas exploratórias e desenvolvimento de ensaios)	6 a 12
Pesquisa e desenvolvimento de ensaios de componentes e amostras (CP)	6 a 12
Dados admissíveis de cálculo	12 a 24
Confiabilidade de resultados	12 a 24

Embora as diretrizes acima sejam consideradas razoáveis e bastante utilizadas, uma recomendação importante encontrada na literatura é que se deve alocar no mínimo duas amostras para efeito de repetição em todos os ensaios S-N, mesmo para aqueles ensaios envolvendo o número mínimo recomendado.

2.3 Aproximação da mecânica da fratura para a fadiga elástica

Segundo a literatura, a aproximação da mecânica da fratura para a fadiga oferece hipóteses para o fenômeno envolvido. A suposição básica na aproximação da mecânica da fratura é que todos os materiais apresentam microfissuras. No processo de carregamento cíclico (fadiga), estas fissuras crescem até atingirem dimensões críticas a partir das quais formam um conjunto de rupturas microscópicas que resultam na ruptura total. As fissuras associadas à ruptura por fadiga, quase sempre iniciam (ou nucleiam) em pontos de concentração de tensões na superfície de um componente.

Quando um material fissurado é submetido a um estado de tensão, as concentrações de tensões próximas às extremidades das fissuras elevam-se. O fator de intensidade de tensão, K , que depende da geometria e comprimento da fissura e do tipo de carregamento, expressa a relação para qual as tensões nas pontas das fissuras são críticas. Quando o material é submetido a níveis variáveis de tensão, $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, K varia entre K_{\max} e K_{\min} ($\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$). Para explicar o crescimento das fissuras, assume-se que a relação de crescimento da mesma para cada ciclo é uma função do fator de intensidade de tensão.

Assume-se ainda, que para ΔK abaixo de um certo valor de entrada não ocorre nenhum crescimento de fissura, correspondendo ao limite empírico de fadiga. A explanação de ruptura por fadiga no contexto de mecanismo de fratura divide o período de fadiga em três fases. Na fase inicial ou fase de iniciação da fissura, onde o fenômeno envolvido não é especificado, as fissuras se formam em pontos de alta concentração de tensões. Na segunda fase ou fase de propagação, as fissuras crescem incrementalmente com cada ciclo de tensão. Quando a fissura encontra um comprimento crítico é encontrada a fase final e uma relação de crescimento das fissuras até a ruptura, o que ocorre muito rapidamente.

Para a fase em que o estado de crescimento das fissuras torna-se constante foi sugerido por PARIS (1963), “*lei de Paris*”, uma relação entre a taxa de crescimento da fissura e a variação do fator de intensidade de tensão. Esta relação citada na literatura é representada nas formas a seguir:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (8)$$

$$\log \left(\frac{da}{dN} \right) = m \log \Delta K + \log C \quad (9)$$

onde a é o comprimento da fissura, N o número de ciclos, ΔK é a flutuação do fator de intensidade de tensões e as constantes C e m são parâmetros do material determinados experimentalmente e que dependem do ambiente, da frequência e da relação de tensão (R).

Deste modo, sendo conhecida a função ΔK dos parâmetros $\Delta\sigma$, forma da fissura e o comprimento máximo que a mesma pode atingir, o número de ciclos é determinado por integração da equação anterior. A expressão pode fornecer ainda, através de solução empírica, uma relação entre o nível de tensão e o número de ciclos, Equações 10 (diagramas S-N).

$$N = B (\Delta\sigma)^{-m} \quad (10a)$$

$$\log N = A - m (\log \Delta\sigma) \quad (10b)$$

Do estado inicial até a ruptura do corpo-de-prova são identificadas três fases: iniciação da abertura da fissura, desenvolvimento e ruptura. O processo de ruptura por fadiga em corpos-de-prova não previamente fissurados tem origem na microestrutura do material e a Mecânica da Fratura não explica esta fase inicial do processo de fadiga até a formação da fissura. A parte da Mecânica dos Sólidos que trata dos fenômenos relacionados com o processo de iniciação e desenvolvimentos das microfissuras é a Mecânica do Dano Contínuo, cujo objetivo é estabelecer modelos constitutivos racionais, capazes de representar em nível macroscópico o fenômeno de evolução dos defeitos que ocorrem no material em nível microscópico.

Experimentalmente demonstra-se que os defeitos distribuídos ao longo do material orientam o início do estado de fissuração e a fratura final, induzindo ainda a deterioração do material pelo decréscimo de resistência, rigidez e tenacidade, bem como pela redução do número de ciclos capaz de produzir fadiga, RODRIGUES JUNIOR (1997).

2.3.1 Fadiga elástica para a madeira

A interpretação do mecanismo de ruptura por fadiga não leva em consideração a influência da duração de carga, de fundamental importância para os materiais que apresentam propriedades que dependem do tempo, tal como a madeira. Portanto, torna-se limitado avaliar a fadiga somente pelo mecanismo de ruptura quando o material analisado apresenta variações reológicas.

As propriedades de fadiga da madeira na flexão foram investigadas por TSAI & ANSELL (1990). Este estudo foi realizado a pedido da indústria de energia eólica do Reino Unido, a qual notou o êxito obtido no uso de madeira laminada (lâminas finas) em hélices de turbinas eólicas nos Estados Unidos. O estudo gerou curvas S-N em vários níveis de umidade e relações R, a partir das quais foram produzidas linhas de vida constante e estabelecido o mecanismo de acumulação de dano na madeira. Segundo os autores, a vida à fadiga da madeira é independente da espécie desde que seja normalizada por sua resistência. Esta consideração parece ser um consenso na literatura, onde diversos autores sugerem que o desempenho de compósitos de madeira de diferentes espécies apresentam comportamento similar. Esta baixa variabilidade na vida à fadiga da madeira, para diferentes espécies, pode ser explicada pelo fato da resistência à fadiga do material estar relacionada com o teor de celulose que é função da densidade de madeira na parede celular, DINWOODIE (1981), BODIG & JAYNE (1982) e BOND & ANSELL (1998a).

Embora os resultados de fadiga à flexão apresentados por TSAI & ANSELL (1990) tenham sido apropriados para as hélices de turbinas eólicas de

madeira, existiam outras superfícies das turbinas que experimentavam cargas predominantemente de tração ou compressão. Assim sendo, BONFIELD³ (1991) apresentou na forma de tese de doutorado um extensivo trabalho experimental, cujo objetivo não foi estabelecer uma explicação sobre o fenômeno de fadiga, mas apenas o entendimento básico da lei *Paris* dando ênfase ao número de ciclos, de acordo com a aproximação da mecânica da fratura apresentada por ANSELL (1987) apud CLORIUS & PEDERSEN (1996), ANSELL et al (1991) e ANSELL (1995).

Os principais resultados encontrados por BONFIELD (1991) em sua tese são apresentados em BONFIELD & ANSELL (1991) e ANSELL et al (1991), sendo que o principal objetivo deste estudo foi estabelecer diagramas para auxiliar no cálculo da resistência à fadiga para laminados à base de madeira (*khaya ivorensis*) utilizados na fabricação de hélices para conversão de energia eólica. O número de ciclos necessários para a ruptura foi obtido através de ensaios com amplitudes constantes para diferentes níveis de tensão e relações R. Os resultados obtidos na forma de curvas S-N foram utilizados para a construção do diagrama de vida constante, Figura 15.

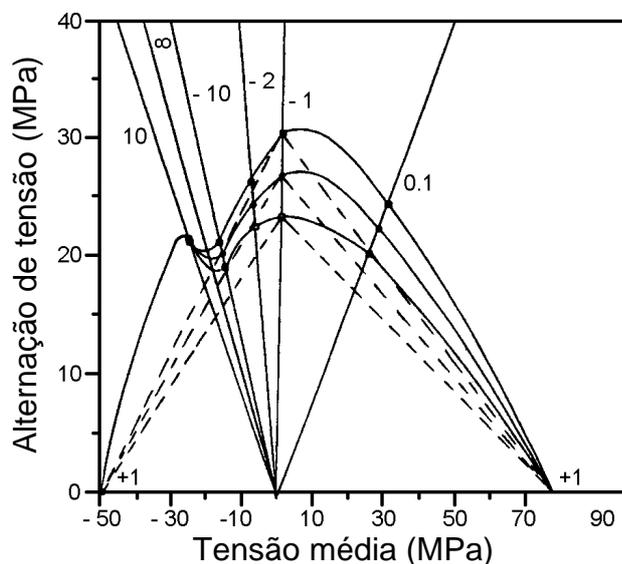


FIGURA 15 - Diagrama de vida constante para laminados de *Khaya ivorensis*/epoxy fatigados axialmente para 10^5 , 10^6 e 10^7 ciclos.
Fonte: BONFIELD & ANSELL (1991) e ANSELL et al (1991).

³ BONFIELD, P. W. (1991). *Fatigue evaluation of wood laminates for design of wind turbine blades*. Ph.D thesis, University of Bath.

De acordo com BONFIELD & ANSELL (1991) e ANSELL et al (1991), as resistências à fadiga obtidas nos ensaios de fadiga na tração ($R = 0,1$) são maiores que as obtidas nos ensaios de fadiga na compressão ($R = 10$). Isto ocorre porque a resistência à tração da madeira é significativamente maior que sua resistência à compressão. Os dados usados na construção dos diagramas de vida constante foram consistentes com o modo de ruptura examinados por meio de microscópio eletrônico. O ponto de inflexão do diagrama acima, nas relações R para as quais o carregamento vem a ser totalmente de compressão, é uma nova observação que, de acordo com os autores, deveria ser considerada em materiais onde o modo de ruptura é similar.

Adicionalmente, foram realizados ensaios com amplitudes variáveis cujo objetivo foi o de avaliar a regra de *Palmgren-Miner* (item 2.1.3.1). Segundo CLORIUS & PEDERSEN (1996), apesar do trabalho de *Bonfield* ser bastante extenso, surgiram duas questões referentes ao procedimento experimental. A primeira seria se o tipo de carregamento utilizado permite separar o dano do material dependente do tempo do dano relacionado ao número de ciclos. O segundo seria a determinação inadequada da resistência de referência questionando as conclusões relativas a duração da fadiga na compressão para amplitudes elevadas.

Segundo CLORIUS & PEDERSEN (1996), existem razões para acreditar que vidas à fadiga muito diferentes, obtidas nos ensaios totalmente de compressão, é devido a incerteza da resistência de referência de cada corpo-de-prova. A incerteza da resistência de referência tem maior influência quando o carregamento está em um nível próximo da referida resistência. É importante ressaltar que esta situação não é exclusividade dos ensaios de fadiga na compressão. Isto se reflete na dispersão dos dados nas curvas S-N, Figura 16, sendo que esta dispersão diminui com o decréscimo do nível do pico de tensão.

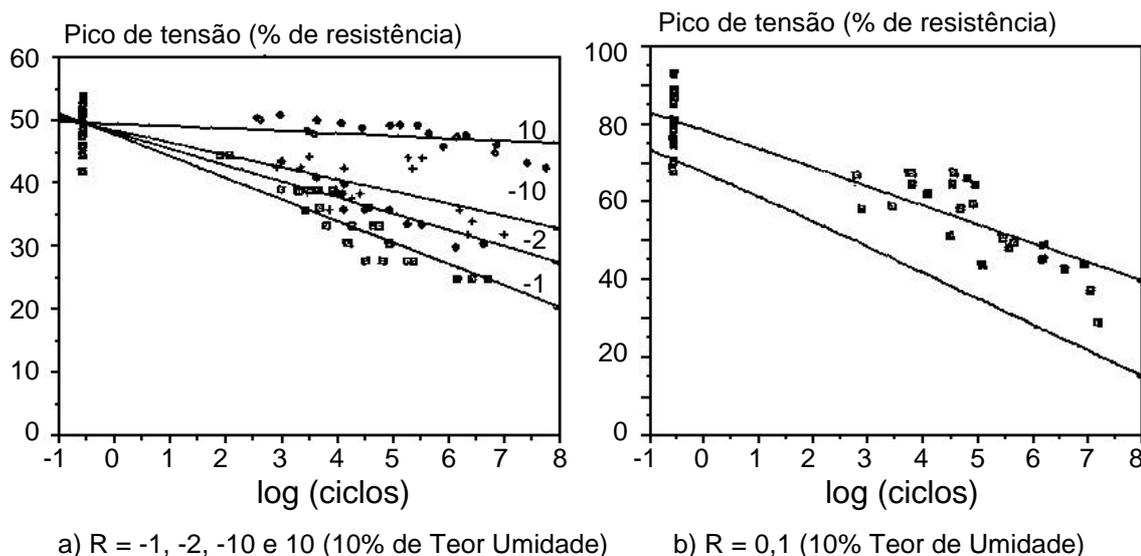


FIGURA 16 - Curvas S-N características para lâminas de *Khaya ivorensis*.
Fonte: BONFIELD & ANSELL (1991) e ANSELL et al (1991).

As resistências à flexão, tração, compressão e cisalhamento da madeira são amplamente diferentes por causa de seu mecanismo de ruptura em cada configuração de carregamento (por exemplo, instabilidade na compressão e extensão das células na tração). A madeira é mais fraca na compressão do que na tração, sendo esta última na maioria das vezes o fator dominante, e talvez a explicação para o pouco estudo da resistência à fadiga na tração. A influência de parâmetros como teor de umidade, temperatura, densidade, inclinação das fibras e defeitos na resistência à fadiga da madeira foram estudados por diversos pesquisadores. Os resultados obtidos mostraram que os mesmos fatores que afetam as propriedades mecânicas estáticas, também afetam a resistência à fadiga do material. O teor de umidade apresenta um efeito determinante no período de fadiga não reduzindo somente sua resistência, mas também acelerando o processo de fadiga.

2.4 Comportamento visco-elástico da madeira e mecanismos de fratura

Como observado na literatura, uma aproximação puramente elástica para a madeira não leva em consideração a variação de suas propriedades em função do tempo DINWOODIE (1981), BODIG & JAINE (1982), MADSEN (1992) e NIELSEN (1992). A madeira é conhecida por apresentar um comportamento de fluência visco-elástica (item 2.5.1) que pode ser

representada pela lei de *Clouser*, conforme ilustrado na Figura 17, juntamente com uma curva de fluência típica.

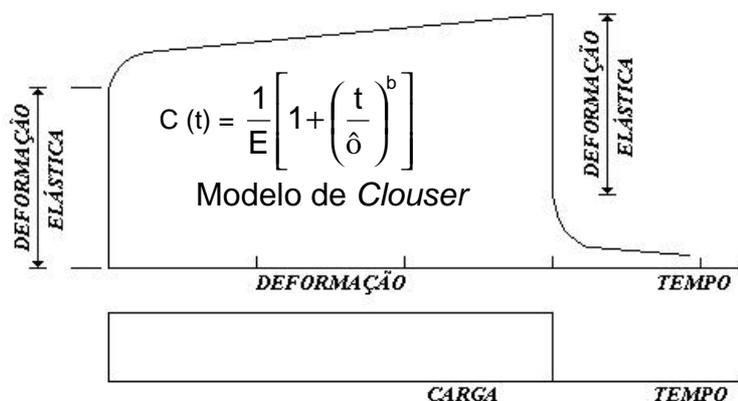


FIGURA 17 - Curva típica de fluência com a recuperação após o descarregamento.

Fonte: MADSEN (1992).

Na figura acima, t é o tempo e τ é chamado de tempo de duplicamento ou tempo para o qual a deformação total dobra em relação à deformação inicial. O nível de fluência depende do teor de umidade (maior fluência para madeira úmida) e da temperatura (maiores temperaturas implicam em maior nível de fluência). Os parâmetros usados na lei de Clouser devem ser selecionados de maneira a refletir o meio ambiente no qual o elemento estrutural será utilizado. O processo de variação da temperatura e umidade também incrementa a fluência da madeira. A finalidade deste tópico é descrever as tentativas de integrar a aproximação do mecanismo de fratura às propriedades visco-elásticas específicas da madeira.

Um tratamento mais completo e compreensivo estabelecido para a madeira como um material fissurado e visco-elástico, incluindo tanto a ruptura por ação de cargas permanentes quanto por carregamentos de fadiga, é apresentado por NIELSEN (1990) e (1992). Neste modelo, o comportamento mecânico da madeira só pode ser descrito, com suficiência de detalhes, quando as teorias de visco-elasticidade e mecânica da fratura são reunidas. A resistência de um material fissurado pode ser descrita pelo modelo de *Dougdale*, usado para o entendimento unificado do comportamento de madeiras, e representado pela Figura 18, MADSEN (1992) e NIELSEN

(1992). A figura representa alguma região de um corpo elástico na qual o processo de fissura se desenvolveu. O material é submetido a um estado de tensão (σ) perpendicular ao plano da fissura. A fissura é impedida de crescer por uma tensão (σ_1) na região frontal da fissura. A zona frontal tem um comprimento R_f quando a fissura tem um comprimento de $2l$ após o material desta região ter sofrido um alargamento δ . A hipótese da mecânica da fratura é que quanto maior o estado de fissuramento mais fraco estará o material, sendo, portanto a resistência associada com o comprimento da fissura contida no material. Para explicar o crescimento de fissuras em níveis elevados de tensão *Nielsen* utiliza o conceito de fluência terciária (item 2.5.1).

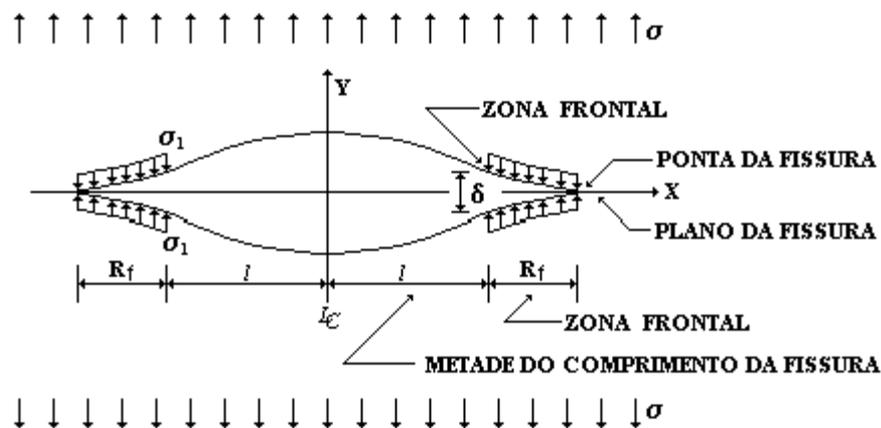


FIGURA 18 - Modelo de fissura de *Dougdale*.
Fonte: MADSEN (1992) e NIELSEN (1992).

A Figura 19 ilustra as fases que ocorrem com uma fissura quando a mesma é submetida ao processo de carregamento. A fissura apresenta um comprimento inicial $2l_0$. No início do carregamento, ocorre um estiramento instantâneo δ_0 do material, na entrada da fissura, representando a deformação elástica e início da fase 1. Com o passar do tempo, o material da região frontal da fissura se comportará plasticamente de maneira que a abertura da fissura será $\delta_0 < \delta < \delta_{cr}$ para $0 < t < t_s$. Nesta etapa, a fissura sofre um alargamento, mas não alonga, sendo δ_{cr} o limite para o qual a fissura ganha largura sem alongar e t_s representa o final da fase 1 e início da

fase 2. A abertura da fissura agora apresenta um valor crítico δ_{cr} e o material está quase na ruptura, com a fissura crescendo no sentido longitudinal.

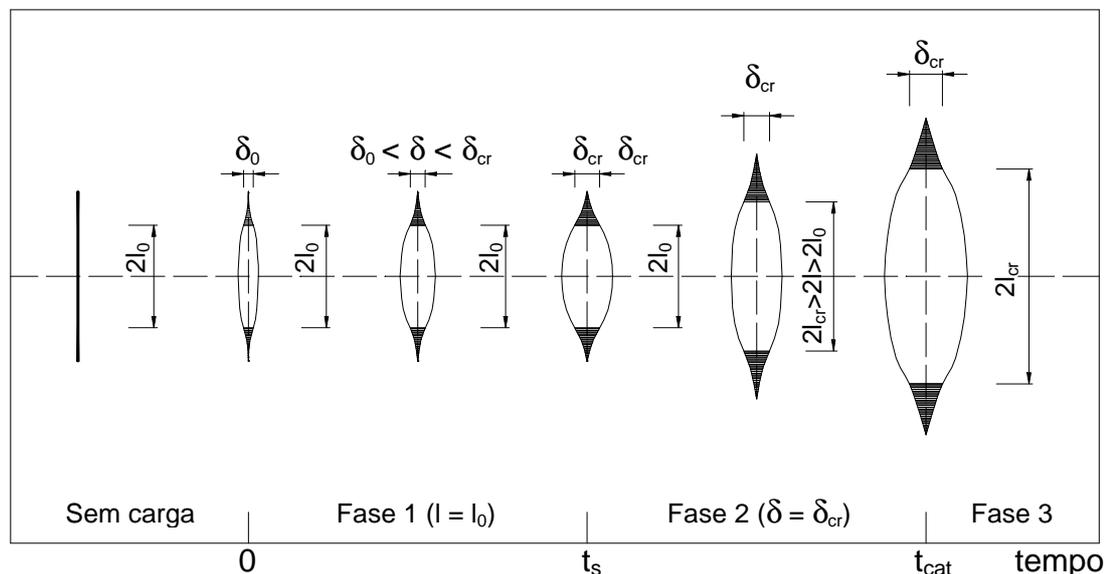


FIGURA 19 - Ilustração das fases de crescimento da fissura.
Fonte: MADSEN (1992).

A madeira é um material cuja disposição ortotrópica só permite a propagação de fissuras no sentido paralelo às fibras. Isto significa que qualquer tentativa de uma fissura atravessar as fibras fora das “áreas fracas” (por exemplo, concentrações de válvulas de comunicação na cadeia de fibras de madeira), é impedida pela ramificação paralela das mesmas, NIELSEN (1992).

As superfícies potenciais de ruptura, na madeira isenta de defeitos (nível macroscópico), são definidas por uma danificação inerente aos núcleos de sua estrutura interna como as más ligações entre traqueídeos nas coníferas ou entre fibras e vasos nas dicotiledôneas, zonas de sobreposição não efetivas e raios. Segundo NIELSEN (1992), o tratamento da madeira e a secagem, por exemplo, criam tensões internas nas regiões ocupadas pelos defeitos de núcleo, incluindo aqueles com a direção perpendicular às fibras, os quais contornam as fissuras reais com bordas paralela às fibras, Figura 20.

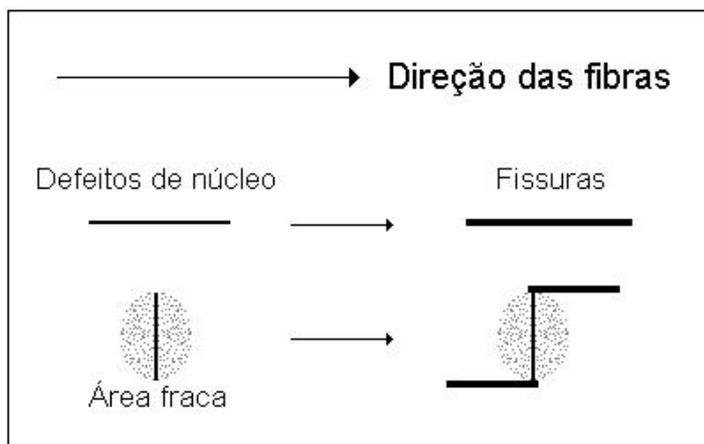


FIGURA 20 – Elementos básicos de um modelo de ruptura para a madeira
Fonte: NIELSEN (1992).

Em uma subestrutura característica, estas fissuras são todas partes de superfícies potenciais de ruptura, Figura 21. A superfície real de ruptura depende do modo de carregamento e da distribuição dos maiores defeitos singulares. As rupturas iniciam a partir dos maiores defeitos (comprimento de fissura 2l).

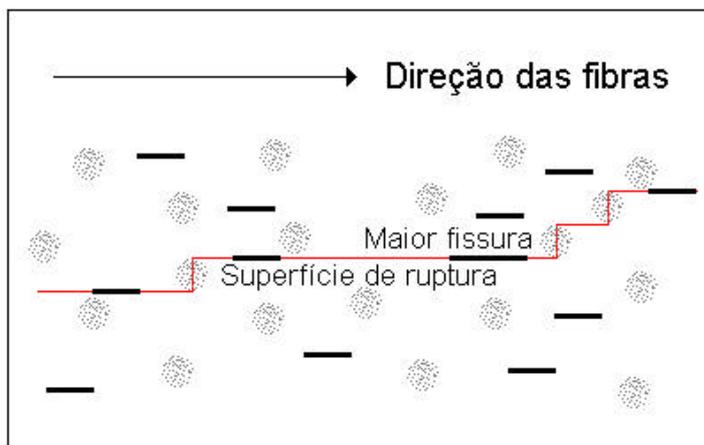


FIGURA 21 – Superfície de ruptura desenvolvida ao longo das fibras.
Fonte: NIELSEN (1992).

Para NIELSEN (1992), na tração paralela às fibras, a madeira isenta de defeitos comporta-se como um material com ligações múltiplas em forma de dentes. Um dente é o arranque potencial da extremidade de uma “super fibra” formada por feixes de fibras de madeira, Figura 22. Os dentes são formados por uma subestrutura selecionada a partir da estrutura de danificação interna previamente considerada. A relação natural do

comprimento do dente (L) pelo diâmetro da base da super fibra (D) é de magnitude $L/D \approx$ (magnitude da resistência à tração paralela às fibras) / (2 x a magnitude da resistência ao cisalhamento paralela às fibras) ≈ 10 . O mecanismo de ruptura por tração é um modo combinado de extensão de fissuras por arrancamento e deslizamento, definindo o limite (contorno) entre os dentes.

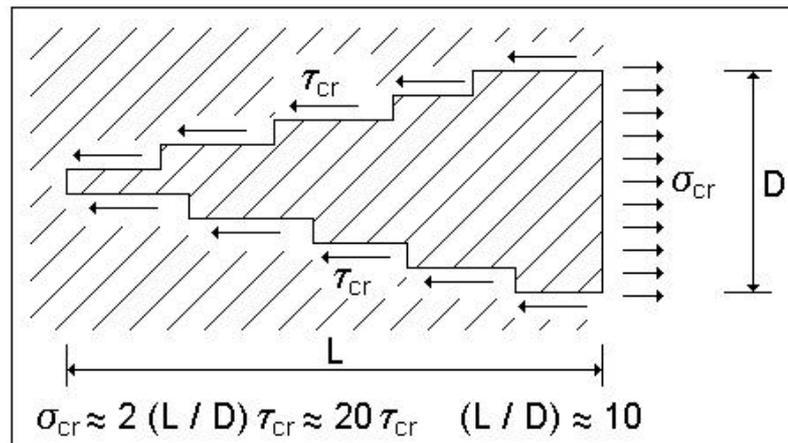


FIGURA 22 – Superfície de ruptura das ligações em forma de dentes.
Fonte: NIELSEN (1992).

Para a compressão paralela às fibras, *Nielsen* diz a madeira começa atuando de forma semelhante à tração paralela, como um material com ligações múltiplas em forma de dentes. Entretanto, outros mecanismos estão presentes. Um efeito cunha causará um modo de extensão da fissura por abertura, fendilhamento nas bases dos dentes onde as fibras estão também livres de cortes e falham por instabilidade. Como uma primeira aproximação, entretanto, a ruptura por compressão pode ser considerada como a ruptura de ligações múltiplas em forma de dentes semelhante à tração. Os parâmetros efetivos e ruptura por cisalhamento podem ser a idealização da qual se considera o efeito composto de deslizamento, abertura e instabilidade. Na tração perpendicular às fibras a madeira atua como um material em camadas, onde as camadas são separadas por fissuras colineares próximas na estrutura de danificação interna previamente definida. O mecanismo de ruptura é um modo de extensão por abertura destas fissuras.

Ainda segundo NIELSEN (1992), a madeira estrutural é pode ser analisada de forma semelhante a madeira isenta de defeitos, porém com suas danificações internas definidas por nós e outros defeitos maiores. Estes danos iniciam rupturas que então se propagam ao longo de caminhos determinados pela estrutura de danificação interna da madeira isenta de defeitos. Praticamente, podem ser usados modelos idênticos de ruptura à tração e compressão porque as áreas locais de fendilhamento e instabilidade das fibras são relativamente pequenas comparadas às áreas de deslizamento e arrancamento na madeira sem defeito entre os nós e outros defeitos.

De acordo com ANSELL (1995), a madeira não apresenta modo de propagação de fissura, por efeito de carregamento cíclico de tração, como os previstos pela Mecânica do Fratura para os metais. Para *Ansell*, o modelo empírico da abertura de uma fissura, *lei de Paris*, pode ser aplicado para os casos onde o modo de abertura da fissura for na direção das fibras, Figura 23a.

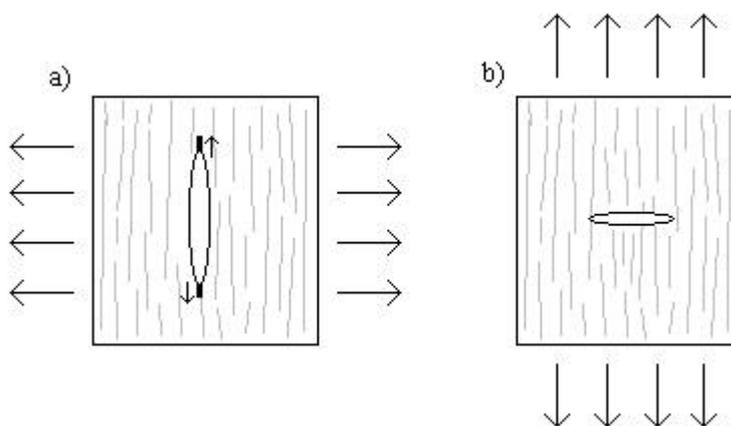


FIGURA 23 - Esquema de propagação de uma fissura por tração.
Fonte: RODRIGUES JUNIOR (1997).

Conforme RODRIGUES JUNIOR (1997), as formas de propagação descritas pela Mecânica da Fratura valem para os sólidos com descontinuidade macroscópica, assim uma fissura conforme representada na Figura 23a, submetida ao estado de tensão indicado, tem maior probabilidade de evoluir segundo a direção marcada na região de menor resistência ao longo do material que foi formado em uma mesma época do ano. Enquanto que na

situação da Figura 23b, as fissuras deverão atravessar materiais com resistências diferentes.

A lei de *Clouser* modela a madeira como sendo um material visco-elástico, sendo restrita em níveis baixos de tensão, 50% a 60% da resistência última. Partindo deste ponto de vista, a tentativa de integrar a mecânica da fratura com as propriedades visco-elásticas específicas da madeira, apresentada por *Nielsen*, apresenta algumas inconsistências, CLORIUS & PEDERSEN (1996). Por um lado, a aproximação enfatiza a variação do nível de tensão e utiliza isto como explicação do crescimento da fissura, ou seja, de forma semelhante ao crescimento da fissura quando o material elástico é submetido a carregamentos cíclicos. Por outro, os acontecimentos na ponta da fissura são modelados visco-elasticamente de forma a obedecer a lei da fluência de *Clouser*. Entretanto, de acordo com a mecânica da fratura, quando as tensões na ponta da fissura são muito elevadas (infinitas) existe uma violação clara desta lei, CLORIUS & PEDERSEN (1996).

Ainda segundo a interpretação de CLORIUS & PEDERSEN (1996), uma consequência interessante deste modelo é que a fadiga pode ser explicada por diferentes fenômenos quando o carregamento é aplicado em frequências diferentes. Assim sendo, é previsto que o período de tempo para frequências abaixo de 10^{-5} Hz pode ser abordado como um caso de carga permanente, enquanto que para frequências superiores a 0,1 Hz pode ser tratado como um caso de fadiga elástica. Em outras palavras, as propriedades viscosas e visco-elásticas da madeira devem ser desprezadas para frequências elevadas.

2.5 Influência do tempo na avaliação da fadiga

Como visto anteriormente, a madeira é um material que apresenta propriedades que influenciam em suas características de resistência e que estão diretamente relacionadas com o fator tempo. Assim sendo, o intuito

deste item é fazer uma abordagem sobre os parâmetros que levam em consideração as propriedades da madeira em função do tempo.

2.5.1 Propriedades dependentes do tempo (fluência)

Em materiais viscosos e visco-elásticos como a madeira, a resistência é uma função da duração da tensão aplicada (Figura 24), não sendo suficiente para descrição de sua resistência apenas um critério de tensão, DINWOODIE (1981), BODIG & JAYNE (1982), BONFIELD & ANSELL (1991) e MADSEN (1992). A visco-elasticidade implica que o comportamento do material é dependente do tempo, portanto em um instante qualquer sob carga seu desempenho será uma função de seu passado histórico.

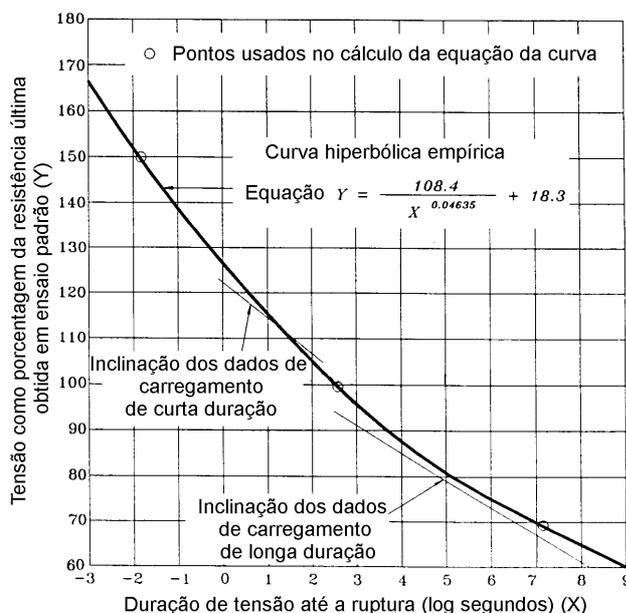


FIGURA 24 - Curva de duração de carga construída a partir de dados experimentais encontrados na literatura.
Fonte: MADSEN (1992).

Quando exposta à tensão constante a deformação aumentará com tempo, podendo causar a ruptura do material. A explicação para a influência do tempo na resistência da madeira é encontrada nas suas propriedades de viscosidade e visco-elasticidade, a madeira exhibe fluência. De acordo com a literatura, é possível quantificar a fluência por um número de parâmetros dependentes do tempo dentre os quais os dois mais comuns são conhecidos como *fluência específica* e *fluência relativa* ou *coeficiente de fluência*. A

fluência específica é a razão do incremento de deformação com o tempo por uma tensão constante Equação (11), enquanto que a fluência relativa é definida com a razão entre a deformação ou variação de deformação no tempo t pela deformação elástica inicial Equação (12).

$$C(t) = \frac{\text{deformação (variação)}}{\text{deformação constante}} \quad (11)$$

$$C(t) = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_i} \text{ ou } \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \quad (12)$$

Geralmente, os dados experimentais sobre a fluência da madeira são ajustados pela utilização do modelo de *Clouser*.

$$\Phi = a t^b = (t / \tau)^b \quad (13)$$

Escrevendo a deformação como função da deformação inicial ε_i e do fator Φ temos:

$$\dot{a}_t = \dot{a}(t) = \dot{a}_i \left[1 + \left(\frac{t}{\tau} \right)^b \right] \quad (14)$$

A função de fluência $C(t)$ expressa a deformação $\varepsilon(t)$ relativo a ε_i :

$$C(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_i} = 1 + \left(\frac{t}{\tau} \right)^b \quad (15)$$

Onde: Φ = denominado de coeficiente de fluência.

τ = o tempo de duplicamento ou o tempo necessário para que a deformação total dobre em relação a deformação inicial.

b = constante do material (adimensional).

Os parâmetros b e τ são obtidos a partir de ensaios de longa duração do material analisado. Entretanto, os valores reais de b estão normalmente no intervalo de 0,20 a 0,35, sendo dependente apenas da inclinação das fibras, isto é, não apresenta praticamente nenhuma dependência das condições climáticas. Para tensões paralelas às fibras, a literatura sugere este valor

variando entre 0,20 a 0,25. De modo diferente, o parâmetro τ é totalmente dependente das condições climáticas. NIELSEN (1984), propõe τ variando entre 10^4 a 10^5 para tensões paralela às fibras, teor de umidade de 15% e temperatura de 20°C. Para o ajuste destes valores para outras temperaturas (T) e teores de umidade (u) Nielsen sugeriu os seguintes fatores:

$$f_T = 10^{(20 - T) / 15} \quad (16)$$

$$f_u = 10^{10(0,15 - u)} \quad (17)$$

Como visto anteriormente, a Equação (14) descreve a fluência para níveis de tensão abaixo de 50% a 60% da resistência do material, medidos em ensaios de curta duração. Para níveis acima do mencionado, a fluência pode causar a ruptura do material. Se a fluência na madeira causar ruptura, então podem ser identificados três estágios distintos de deformação: a *fluência primária*, *secundária* e *terciária*, conforme mostrado na Figura 25.

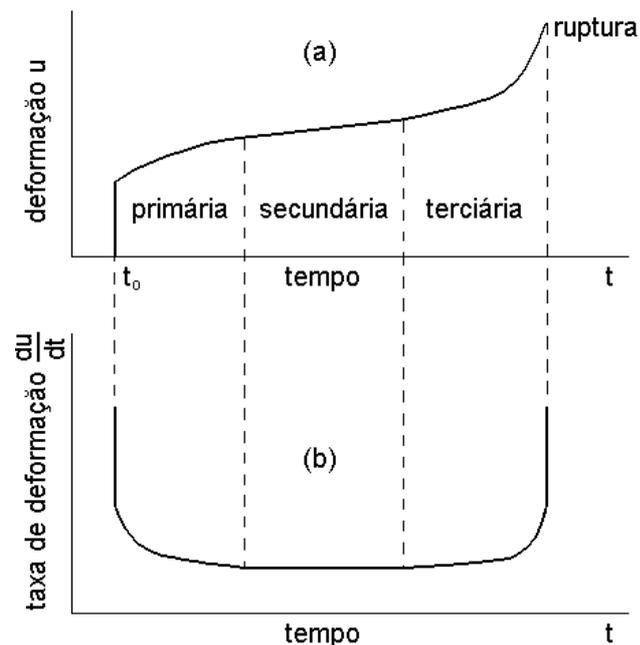


FIGURA 25 – Fluência: (a) estágios da fluência, (b) taxa de fluência.
 Fonte: BODIG & JAYNE (1982).

A fluência primária é desenvolvida na região na qual a taxa de deformação du/dt é decrescente, Figura 25b. A região na qual a deformação é aproximadamente linear ($du/dt = \text{constante}$) é designada como fluência secundária. A fluência terciária é caracterizada pela aceleração na

deformação (du/dt crescente), onde a ruptura é muitas vezes iminente. Segundo DINWOODIE (1981), BODIG & JAYNE (1982) e MADSEN (1992), nem todos os compósitos de madeira apresentarão os três estágios de fluência.

NIELSEN (1992), relata que a fluência terciária pode ser explicada pela teoria de crescimento visco-elástico da fissura. A Figura 26 mostra um exemplo típico do comportamento de uma viga submetida a um estado de tensão constante.

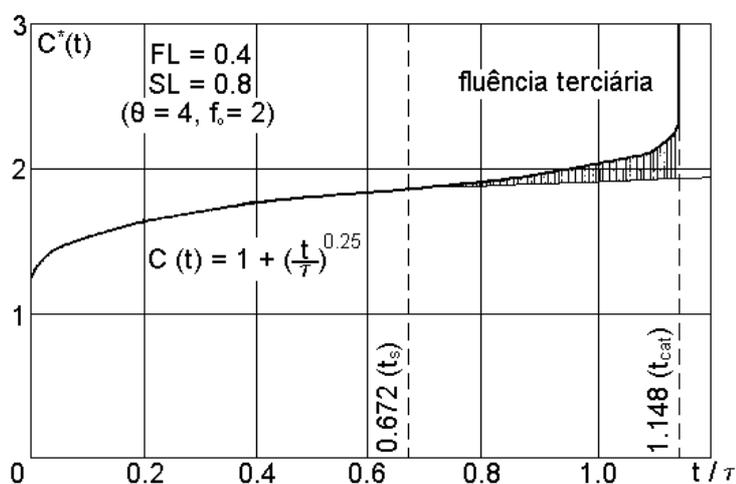


FIGURA 26 - Curva de fluência incluindo a fluência terciária.
Fonte: MADSEN (1992) e NIELSEN (1992).

Inicialmente, o deslocamento da viga é muito fechado para a curva de fluência visco-elástica prevista pela fórmula de *Clouser*. No tempo t_s , as fissuras na viga iniciam seu crescimento e o deslocamento da viga aumenta levemente, porém, de forma mais rápida do que previsto pela curva de *Clouser*. O deslocamento extra causado pelo crescimento das fissuras aumenta e no tempo t_{cat} ocorre a ruptura da viga. Para MADSEN (1992), a teoria de *Nielsen* gera uma explanação física muito persuasiva para um fenômeno previamente não tão bem entendido.

O fenômeno da fluência terciária é explicado com base na formação de planos de deslizamento (slip planes) nas paredes celulares da madeira. Entretanto, o valor limite do nível de tensão que conduz a esta situação é questionada por HOFFMEYER & DAVIDSON (1989), quando é citado que a

variação no teor de umidade pode causar a formação de planos de deslizamento em níveis de tensão inferiores ao valor limite para o teor de umidade constante. De acordo com a literatura, o modelo de *Clouser* mostrou-se bastante eficiente na descrição da fluência primária e secundária, tratando a deformação como sendo completamente reversível (visco-elástica). Porém, os dados experimentais disponíveis mostram deformações viscosas reversíveis e irreversíveis.

2.5.2 Influência da freqüência

A freqüência, e, portanto o período total de carregamento até o início da ruptura, é muito importante na avaliação da fadiga em madeira, HANSEN (1991). Como mencionado inicialmente a madeira é um material com propriedades dependentes do tempo e por esta razão o período de carregamento deve ser levado em consideração. Algumas curvas S-N para madeira na compressão são apresentadas na Figura 27, sendo observado que para freqüências muito baixas (correspondentes a carregamentos de longa duração) há uma grande influência da freqüência. Deve também ser mencionado que nos ensaios de alta freqüência, da ordem de 30 Hz, ocorre uma elevação na temperatura da madeira e um aquecimento adiabático, conduzindo a um decréscimo do teor de umidade e maiores resistências à fadiga, HANSEN (1991). Assim sendo, os ensaios com freqüências muito elevadas devem ser evitados.

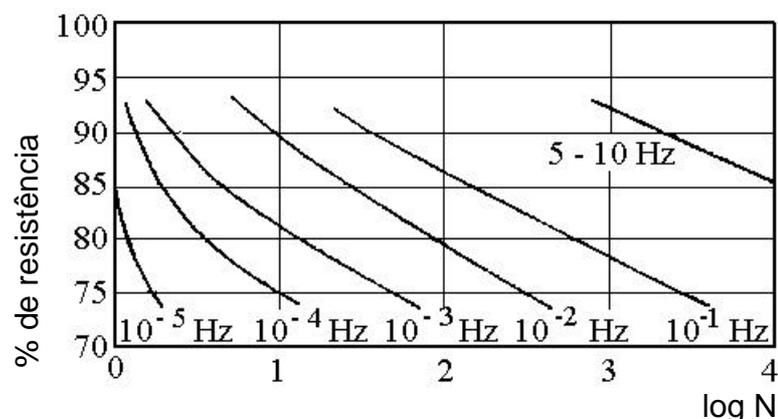


FIGURA 27 - Diagramas S-N para a resistência a fadiga na compressão da madeira em diferentes níveis de freqüência.

Fonte: HANSEN (1991).

O aquecimento adiabático nas corpos-de-prova é um consenso durante os ensaios de fadiga, porque o carregamento cíclico da madeira resulta em histerese o que leva a geração de calor. Segundo BOND & ANSELL (1998a), também ocorrerá aquecimento friccional em localizações tais como ligações de superfície. Estes dois efeitos de aquecimento conjugados com o baixo coeficiente de dispersão térmica da madeira conduz a um considerável acréscimo de calor, principalmente quando as freqüências de ensaios são aumentadas. Baseados nestas considerações *Bond e Ansell* encontraram 8 Hz como sendo a máxima freqüência de ensaio para amostras de laminados de madeira (com lâminas finas usados nas hélices de turbinas eólicas), uma vez que até este nível não ocorreu aquecimento adiabático capaz de gerar mudanças nas propriedades da madeira.

A observação feita por CLORIUS & PEDERSEN (1996) referente ao modelo de *Nielsen* (item 2.4) é que a fadiga em madeira pode ser explicada por diferentes fenômenos quando se trabalha com várias freqüências. Deste modo, se prevê que o período de tempo para freqüências inferiores a 10^{-5} Hz pode ser considerado como um caso de carga permanente, já as freqüências acima de 0,1 Hz podem ser consideradas como um caso de fadiga elástica, ou seja, as propriedades viscosas e visco-elásticas da madeira podem ser desprezadas para as freqüências elevadas.

CLORIUS & PEDERSEN (1996) relatam o estudo de BACH⁴ (1975) sobre as investigações de cargas cíclicas com ondas quadradas. Nesta pesquisa, as freqüências variaram de 0,1 Hz a 10^{-6} Hz durante uma década. A carga de compressão foi imposta axialmente para pequenos corpos-de-prova de madeira de *Pinus* na umidade de equilíbrio 15%. Foram usados níveis de excitação de tensões variando 74%, 80% e 86% da resistência de curta duração. A resistência de referência foi determinada individualmente em uma amostra gêmea a partir de ensaios com uma duração de 60 a 120 segundos.

⁴ BACH, L. (1975). *Frequency-dependent fracture in wood under pulsating loading*. FPRS—Annual Meeting, Portland, Oregon, USA.

Bach encontrou que os ensaios de baixas frequências são muito mais críticos que os de altas frequências, em se tratando do número de ciclos. Ele conclui que para uma determinada amplitude de tensão o número de ciclos é uma medida muito pobre de fadiga. O número de ciclos é reduzido de várias centenas quando a frequência é alterada de 0,1 Hz para 10^{-6} Hz. Foi observado, além disso, que a duração total dos períodos sob carga máxima é um critério para previsão da ruptura. Para CLORIUS & PEDERSEN (1996), a consequência destas observações gerais é que a aproximação tradicional da fadiga elástica não é válida para a fadiga em madeira para o intervalo de frequências avaliados. O número de variações de ciclos de tensão não é simplesmente o parâmetro mais importante.

Um trabalho considerado uma expansão do estudo de *Bach* para frequências mais elevadas (0,01 Hz, 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz) foi apresentado por CLORIUS & PEDERSEN (1996). Os resultados apresentados neste estudo indicam que a caracterização de fadiga em madeira em termos do número de ciclos não é suficiente. O número de ciclos obtidos em ensaios cíclicos (onda quadrada) a 80% da resistência de curta duração, mostrou-se altamente dependente da frequência de ensaio. O número de ciclos decresce de uma ordem de 10^3 em ensaios de 10 Hz para 10 em ensaios de 0,01 Hz. Desta forma, as curvas de *Wöhler* são consideradas por *Clorius e Pedersen* como sendo insuficientes na descrição de fadiga sem uma terceira dimensão que represente a frequência.

Os resultados apresentados por *Clorius e Pedersen* mostram que o tempo de ruptura decresce com o aumento da frequência. Devido a este “efeito do ciclo”, concluiu-se que a resistência à fadiga é uma função da duração total dos períodos de carregamento e do número de seqüências de carregamento e descarregamento. A influência do número de ciclos é refletida na correlação entre o tempo de ruptura e o número de ciclos.

Nielsen propõe que a ruptura em carregamento de baixa frequência é dominada pela fluência enquanto que nos carregamentos de frequências

mais elevadas o número de ciclos seja o fator dominante. Segundo *Clorius e Pedersen*, o implemento desta idéia conduzirá a uma relação não linear entre o $\log(N)$ e o $\log(f)$. Um esboço desta relação é mostrado na Figura 28, sendo que sua forma é determinada pelas razões dominantes de ruptura:

- rupturas dominadas pelo tempo para baixas freqüências conduzindo a inclinação inicial;
- tempo e número de ciclos interagindo no intervalo de transição de freqüência com considerável decréscimo na inclinação;
- número de ciclos limite que força a inclinação a zero nos intervalos de alta freqüência.

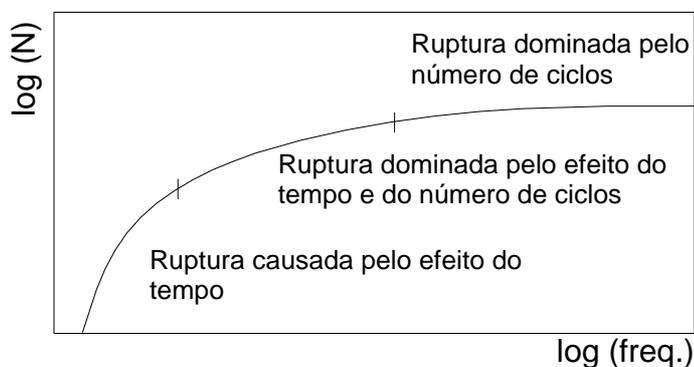


FIGURA 28 - Esboço da correlação não linear entre $\log(f)$ e $\log(N)$.
Fonte: CLORIUS & PEDERSEN (1996).

2.6 Madeira laminada colada (MLC)

Neste item pretende-se fazer uma abordagem das contribuições referentes aos efeitos da fluência e da fadiga nos elementos estruturais de MLC, com o objetivo de entender melhor o comportamento do material.

2.6.1 Fluência

É amplamente aceito que a fluência na madeira é significativamente afetada pelas mudanças de umidade, uma vez que isto afeta o nível e a distribuição da água de impregnação nas paredes celulares da madeira. A falta de informações detalhadas sobre o efeito da fluência em MLC levou alguns pesquisadores a atuar neste campo.

TAYLOR et al (1991) apresenta os resultados de uma série de ensaios de longa duração cujo objetivo foi fazer uma avaliação das propriedades comparativas entre a MLC e a madeira maciça. Para tal finalidade foram adotados três regimes de umidade constante, uma condição de umidade cíclica e uma condição de ambiente exterior (intempérie). Foram avaliados ainda os efeitos da dimensão da seção e das superfícies de revestimento. Como resultado obteve-se a confirmação de que as mudanças de umidade no interior da madeira são mais importantes na determinação da fluência do que o teor de umidade constante. As menores mudanças de umidade nos elementos maiores, especialmente naqueles com revestimento, reduziram a fluência em 50% ou mais. Os fatores de fluência são significativamente aumentados nas seções de pequenas dimensões e na ausência de superfícies de revestimento. A fluência em madeira maciça é muito mais variável que nas seções de MLC de dimensões similares.

Outro estudo com objetivo de avaliar o efeito do carregamento de longa duração em MLC foi apresentado por SRPCIC (1991). Neste estudo foram utilizados elementos estruturais retos e curvos de MLC com 3,65m de vão submetidos a três diferentes condições climáticas (umidade relativa elevada e constante, umidade relativa normal e umidade relativa ciclicamente variável). No ensaio dos elementos retos foi observado que as deformações aumentaram quando estes foram expostos a condições de umidade relativa elevada e ciclicamente variável, enquanto que a resistência à flexão foi influenciada apenas pelo teor de umidade das amostras e não pelo carregamento de longa duração. De acordo com SRPCIC (1991), o comportamento dos elementos curvos pode ser considerado similar, apesar da maior influência do teor de umidade na resistência normal às fibras do que na resistência à compressão.

As informações obtidas a partir da madeira maciça não deveriam ser diretamente aplicadas a MLC, pois estes elementos são geralmente maiores e providos de superfícies de revestimento e portanto menos afetados pela fluência. Além disso, o material usado é seco e comumente de melhor

qualidade, causando na MLC um comportamento mais uniforme que na madeira maciça, isto sem levar em consideração que o processo de fabricação permite a aplicação de contra-flechas nos elementos fletidos, compensando os efeitos da fluência.

Houve mais estudos sobre a fluência em MLC citados na literatura, mas de acordo com MADSEN (1992) a falta de medidas em estruturas em escala real é um sério obstáculo na obtenção de informações precisas sobre a fluência em MLC.

2.6.2 Fadiga

Os elementos estruturais de MLC, quando submetidos a carregamentos cíclicos, não se comportam de forma diferente dos elementos estruturais de madeira maciça, sendo necessário um cuidado especial com as emendas longitudinais, ASCE (1957) e LEWIS (1960). De acordo com estas publicações, as lâminas com emendas biseladas de inclinação 1:8 ou inferior podem ser consideradas como tendo a mesma resistência à fadiga da madeira maciça. No estudo de ASCE (1957), é relatado que os ensaios de fadiga para 30 milhões de repetições ($R = 0,1$) obteve-se uma resistência da emenda biselada da ordem de 40% a 45% da resistência da madeira.

Devido ao ônus imposto ao processo produtivo pelas emendas biseladas, bem como as dificuldades inerentes à sua confecção (colocando em dúvida sua confiabilidade), tornou-se comum o uso das emendas dentadas. A configuração ou geometria das emendas dentadas gera alguns problemas relacionados a concentração de tensões, principalmente na ponta dos dentes, quando comparada com as emendas biseladas. Assim, a resistência à fadiga das emendas dentadas, a exemplo da resistência, não é igual a da emenda biselada.

BOHANNAN & KANVIK (1969) realizaram ensaios para avaliar o comportamento a fadiga para duas geometrias de emenda, Tabela 2. Os níveis máximos de tensão usados foram 40%, 60%, 70%, 80% e 90% da

resistência ($R = 0,1$) com uma frequência de carregamento de 900 ciclos/minutos (15 Hz), sendo um total de 10 corpos-de-prova para cada nível de tensão. As curvas S-N resultantes da resistência à fadiga das emendas dentadas são mostradas nas Figuras 29 e 30. A Figura 31 ilustra uma comparação da resistência à fadiga das duas classes de emendas dentadas com a da emenda biselada de inclinação 1:8 determinada por LEWIS (1960). Os corpos-de-prova foram submetidos a carregamentos cíclicos até a ruptura ou até que atingissem 10^7 ciclos. Os números com setas nos gráficos indicam a quantidade de corpos-de-prova que não atingiram a ruptura para o limite imposto.

Tabela 2 - Geometria das emendas avaliadas por *Bohannan e Kanvik*.

Emenda	Largura (t)	Comprimento (l)	Largura da Ponta (b)
Estrutural	0,313	1,500	0,0310
Não estrutural	0,250	0,875	0,0625

Dimensões em polegadas

Fonte: BOHANNAN & KANVIK (1969)

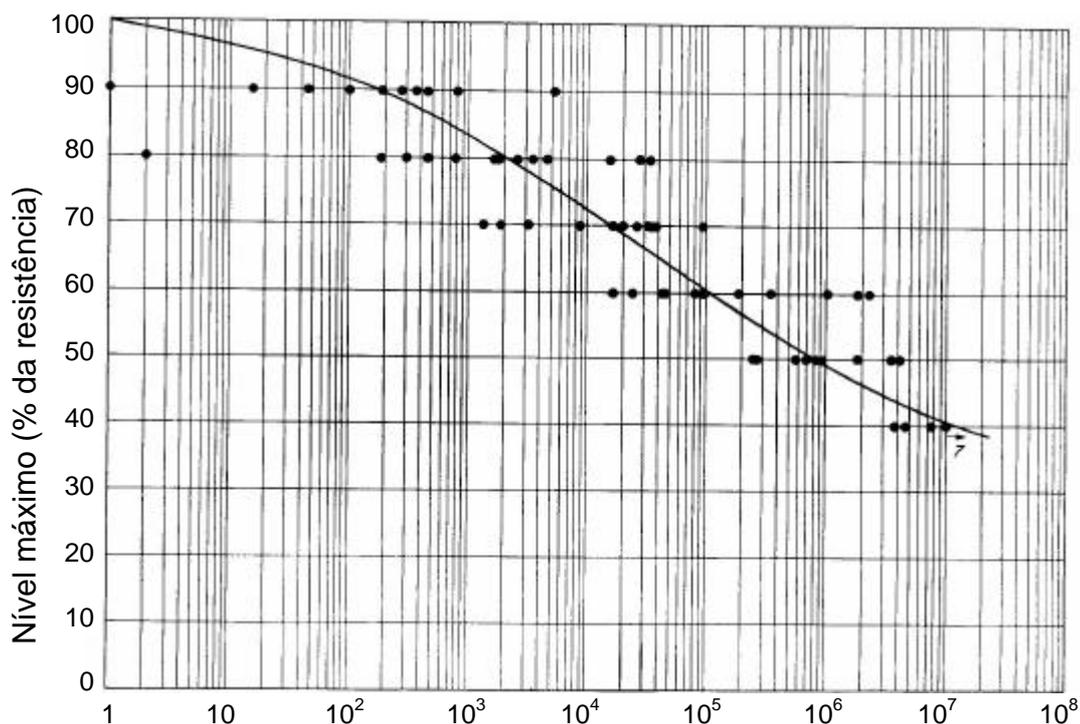


FIGURA 29 - Curva S-N para a emenda dentada estrutural.

Fonte: BOHANNAN & KANVIK (1969).

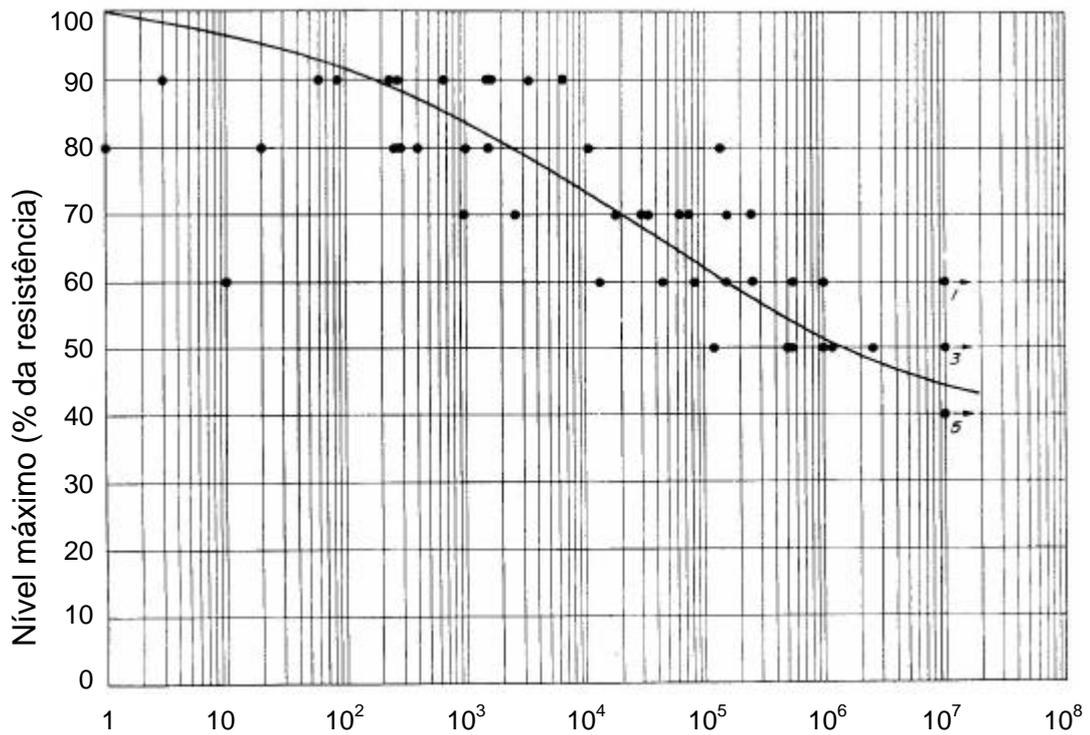


FIGURA 30 - Curva S-N para a emenda dentada não estrutural.
Fonte: BOHANNAN & KANVIK (1969).

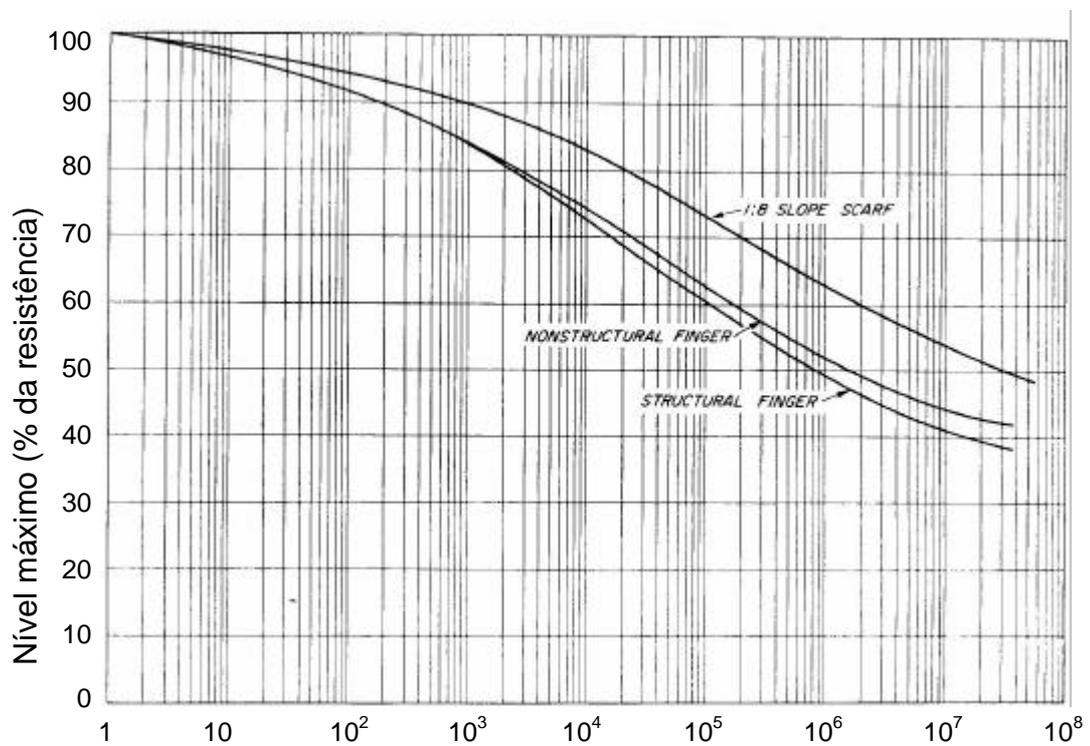


FIGURA 31 - Comparação das curvas de resistência a fadiga na tração das emendas biseladas e emendas dentadas.
Fonte: BOHANNAN & KANVIK (1969).

Baseado nos resultados encontrados e ilustrados nos gráficos anteriores os autores apresentam as seguintes considerações:

- o efeito do carregamento cíclico gerou quase a mesma porcentagem de redução de resistência para ambas as geometrias de emenda;
- a resistência à fadiga na tração das emendas dentadas para 30 milhões de ciclos foi 80% da resistência da emenda biselada de inclinação 1:8, o que é equivalente a 40% da resistência da madeira maciça.

Praticamente todas as considerações referentes à fadiga em madeira maciça são válidas para a MLC. Porém, quando se fala em fadiga em MLC outros fatores como o tratamento, a colagem, as emendas dentadas etc. devem ser levados em consideração. HANSEN (1991), apresenta os resultados de ensaios dinâmicos à flexão nos terços do vão, de uma série de vigas de MLC com lâminas contínuas. Como resultado, obteve-se que os tipos mais comuns de ruptura foram por compressão na parte superior das vigas, próximos aos pontos de aplicação de carga, ou por tração na região central inferior das mesmas. Uma consideração importante deste estudo seria: no caso da existência de emendas dentadas nas regiões críticas de tração uma grande parcela das rupturas iniciariam nestas emendas.

2.6.2.1 Efeito de variações cíclicas de temperatura e umidade na resistência à fadiga das ligações adesivas em MLC

A utilização das estruturas de MLC, em muitos casos, é caracterizada por condições instáveis de temperatura e umidade. As mudanças periódicas de temperatura e principalmente de umidade podem conduzir a ocorrência de tensões de tração e compressão que podem contribuir para a fadiga das ligações adesivas. A duração das tensões de retração e de temperatura e umidade, bem como a limitação do processo de relaxação podem influenciar significativamente a resistência e a fratura das ligações adesivas. OTA &

TSUBOTA⁵ (1966), concluíram que o tipo da resina usado na laminação também afeta a resistência à fadiga da madeira colada.

Para a confirmação destas hipóteses, PROKOFIEV et al (1991), realizou um extenso estudo experimental. Foram produzidos, em condições de fábrica de acordo com a tecnologia da MLC, uma centena de corpos-de-prova. Foram incluídos ainda no estudo vários corpos-de-prova serrados de elementos estruturais que estavam em serviço. Foram avaliados todos os tipos básicos de adesivos fenólicos e resorcinólicos e os testes foram realizados no período de 1970 a 1985. Para avaliar a influência da temperatura e umidade, na resistência da MLC, foi utilizado um método acelerado baseado no princípio de degradação das ligações adesivas durante as influências cíclicas de temperatura e umidade e nas condições de serviço.

Foi determinado que a degradação das uniões coladas, causada pela fadiga física das ligações adesivas, é substancialmente maior nas resinas fenólicas que nas resorcinólicas. A capacidade de resistência das ligações adesivas para carregamentos de curta duração é baseada na resistência ao cisalhamento da madeira.

A resistência à fadiga das ligações adesivas foi estudada, em condições normais de temperatura e umidade, imediatamente após a produção dos corpos-de-prova. A resistência à fadiga de ligações similares foi estudada após a influência acelerada de temperatura e umidade, visando fazer uma análise comparativa da resistência e do modo de ruptura para as várias ligações adesivas. Como resultado foi estabelecido que a resistência à fadiga das ligações adesivas em condições normais de temperatura e umidade é independente do tipo de cola e é caracterizado pela resistência da madeira.

⁵ OTA, M.; TSUBOTA, Y. (1966). J. Jpn Wood Res. Soc.12.

A resistência à fadiga dos adesivos fenólicos é muito menor que a dos resorcinólicos para as mesmas condições de degradação das ligações adesivas devido ao efeito da temperatura e umidade. Para as ligações feitas com os adesivos à base de resorcinol as rupturas ocorreram por cisalhamento na madeira enquanto que para as ligações fenólicas a ruptura ocorreu na cola.

Segundo *Prokofiev* as propriedades negativas dos adesivos fenólicos conduzem à aceleração do processo de fadiga sinérgica das ligações adesivas. Ao contrário disto, os adesivos à base de resorcinol garantem a solidez do comportamento das ligações que é determinada pela resistência ao cisalhamento da madeira.

A modificação da madeira pelos adesivos fenólicos é afetada em uma intensidade significativamente maior em comparação as resorcinólicas, reduzindo a coesão da ligação adesiva, PROKOFIEV et al (1991). Os adesivos fenólicos apresentam uma grande inomogeneidade estrutural e após as influências cíclicas mecânicas e de temperatura e umidade a mudança estrutural dos adesivos fenólicos causa a formação de trincas, sendo ainda observado um descascamento do adesivos nas camadas das paredes terciárias dos traqueídeos.

Os relatos encontrados na literatura, referentes ao desempenho de pontes de MLC durante anos em serviço, onde o carregamento cíclico e as influências de temperatura e umidade atuam simultaneamente, confirmam a solidez de comportamento mencionada sobre as ligações fenólicas e resorcinólicas. Os elementos estruturais de MLC são confeccionados com adesivos que garantam a eficiência da ligação adesiva por toda sua vida útil. No caso de utilização de adesivos fenólicos, por exemplo, estes jamais devem ser utilizados em ambientes que causam a degradação da ligação adesiva.

2.7 Emendas dentadas

Sem as emendas dentadas a produção dos elementos estruturais de MLC poderia ser antieconômica. De qualquer maneira, estas emendas são consideradas uniões potencialmente fracas e muitas vezes o fator limitante no desempenho dos elementos estruturais. Os perfis de emenda usados apresentam uma grande variedade de parâmetros geométricos que estão diretamente relacionados com a eficiência deste tipo de ligação, AICHER & KLÖCK (1991) e MACÊDO (1996).

2.7.1 Parâmetros geométricos que influenciam na resistência das emendas dentadas

Muitos são os fatores que afetam a resistência das emendas dentadas. Alguns são referentes à madeira, tal como a espécie, densidade, defeitos naturais e aceitação de colagem; e outros são referentes ao processo, como condições de usinagem, montagem, intensidade e o período de aplicação de pressão. Embora todos estes parâmetros sejam importantes para a eficiência da emenda dentada, a geometria (Figura 32) é considerada como um padrão de eficiência deste tipo de ligação.

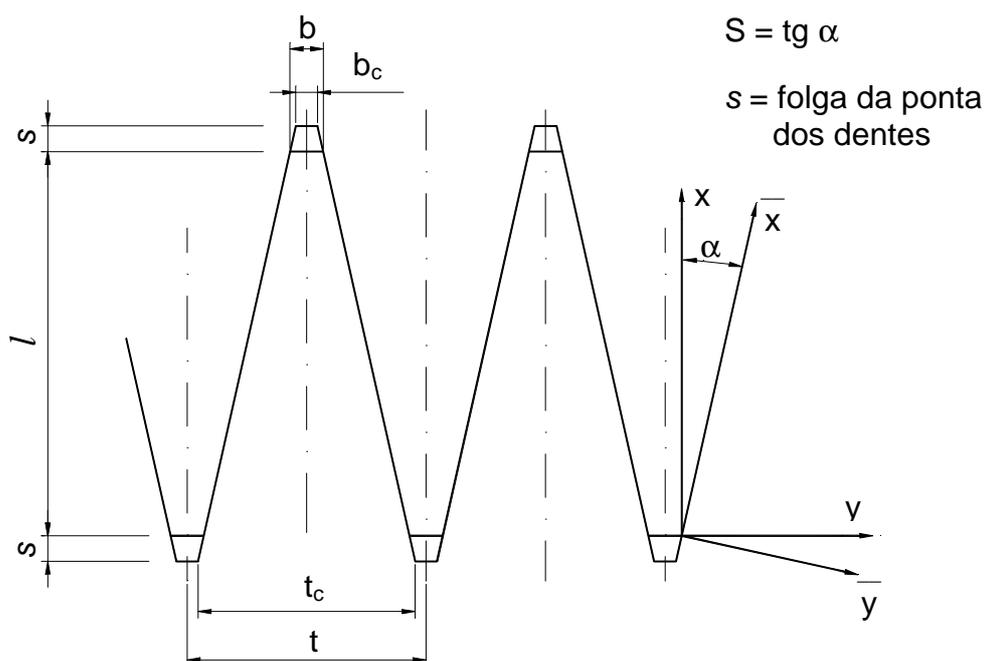


FIGURA 32 - Geometria da emenda dentada.

2.7.1.1 Área efetiva da seção (A_s) e área de topo (A_t)

A tensão normal em uma lâmina, por unidade de área (largura x espessura), submetida à tração paralela às fibras por uma força f_t , com emenda dentada tendo n divisões inclinadas (Figura 32) é dada por:

$$f_{tx} = f_t / A_s \quad (18)$$

$$A_s = 1 - (b / t) \quad (19)$$

$$A_t = b / t \cong b / t_c \quad (20)$$

2.7.1.2 Área efetiva de cola (A_{ef}) e inclinação ($S = \text{tg } \alpha$)

As tensões de cisalhamento nas áreas de fibras inclinadas dos dentes para o caso de aproximação do estado de tensão uniaxial resultam na Equação (21), mostrando-se ser inversamente proporcional à área efetiva de cola ou área inclinada (A_{ef}).

$$f_{vxy} = f_t \cos \alpha / A_{ef} \quad (21)$$

$$A_{ef} = \frac{2l\sqrt{1+S^2}}{t} \quad (22)$$

Como para baixas inclinações ($\sqrt{1+S^2} \rightarrow 1$):

$$A_{ef} \cong 2l / t \quad (23)$$

A hipótese de compatibilidade entre as resistências à tração (f_{t0}) e de cisalhamento (f_v) exige, para a maioria das espécies de madeira, uma área efetiva de cola da emenda (A_{ef}) de:

$$A_{ef} \cong 2l / t = f_{t0} / f_v = 8 \text{ a } 12 \quad (24)$$

A inclinação $S = \text{tg } \alpha$ da parte biselada do dente é dada por:

$$S = (\frac{1}{2}t - b_c) / (l + s) \cong (\frac{1}{2}t - b) / (l + s) \quad (25)$$

Foram realizadas várias investigações teóricas e experimentais para avaliar a inclinação ótima para as emendas dentadas. Para SELBO (1963), esta

inclinação é aproximadamente 1:14 seguido de um pequeno decréscimo na resistência quando a inclinação aumenta de 1:14 até 1:10, e de uma marcante queda quanto esta inclinação é maior que 1:10. Segundo STRIKLER (1980), devido a um distinto decréscimo de resistência que ocorre antes de 1:8 a 1:7, a DIN 1052 limita a inclinação das emendas biseladas no máximo em 1:10.

2.7.1.3 Relação (s_r) entre a abertura e a folga da ponta do dente

$$s_r = 2 s / (b + b_c) \cong s / b \quad (26)$$

A influência da relação entre a folga da ponta e abertura na distribuição de tensões na região da ponta dos dentes foi discutida por QU & FAN⁶ (1988) apud AICHER & KLÖCK (1991). De acordo com AICHER & KLÖCK (1991), a influência s_r pode ser entendida de acordo como segue:

- para $s_r < 1$, isto é, largura da ponta (b) maior que a folga (s), causam tensões extremamente maiores nos cantos de reentrância (Figura 33) e devem ser avaliados;
- para $s_r \geq 1$ causam apenas um decréscimo linear nas concentrações de tensão, as quais permanecem praticamente constantes a partir de uma relação $s_r \geq 1,5$.

2.7.2 Elementos finitos e distribuição de tensões nas emendas dentadas

Apesar de uma emenda dentada parecer ser uma união simples, a análise das distribuições de tensões que surgem em uma emenda quando esta é submetida a uma simples carga axial de tração é complexa. Fatores tais como anisotropia, variação de material entre aderentes, a presença de uma camada adesiva fina e isotrópica, geometria de emenda irregular e as variações geométricas contribuem para a complexidade da análise.

⁶ QU, Z.; FAN, Ch. (1988). *Tensile strength of glued finger joints in timber structures and recommendation for their series*. Proceed. 1988. Int. Conf. on Timber Engineering, Vol 1, pp. 654-662, Seattle, Washington 1988. AICHER, S.; KLÖCK, W. (1991). *Finger joint analysis and optimization by elastic, non linear and fracture mechanics finite element computations*. Proceedings of the International Timber Engineering Conference, London, 3.67-3.76.

O uso do método de elementos finitos como uma ferramenta de pesquisa envolvendo a análise das emendas dentadas foi utilizado por AICHER & KLÖCK (1991), MILNER & YEOH (1991) e PELLICANE (1994). Em geral, estes pesquisadores chegaram a conclusões similares aos estudos experimentais, isto é, que a redução da espessura da ponta resulta no aumento da resistência da emenda. As dificuldades encontradas nos estudos de *Milner e Yeoh* e *Pellicane* foram referentes à modelagem das camadas adesivas muito finas, que exigia o uso de uma malha razoavelmente fina de elementos com forma triangular ou quadrilateral.

A Figura 33 mostra o modelo de elemento finito usado por AICHER & KLÖCK (1991) para descrever o comportamento das emendas dentadas. Toda a análise foi realizada via ANSYS e as coordenadas nodais foram programadas como frações das dimensões da emenda (l , t , b_c e s). Este procedimento gera tensões nodais que podem ser comparadas para diferentes perfis de emenda. As condições de contorno adotadas no modelo impõem restrições à contração lateral que, segundo *Aicher e Klöck*, é aproximadamente correto para a parte interior da emenda. Considerando a espessura da emenda foram assumidas condições de estado plano de tensões.

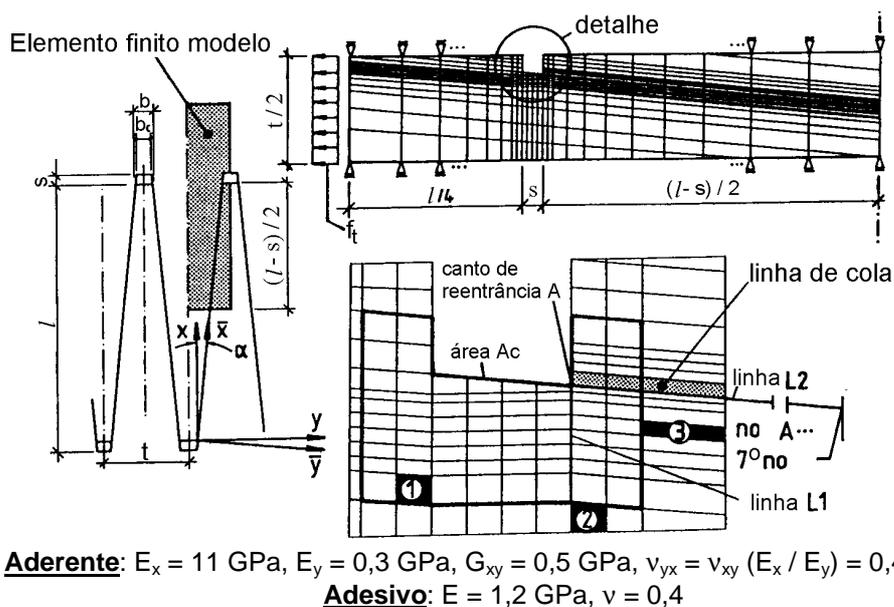
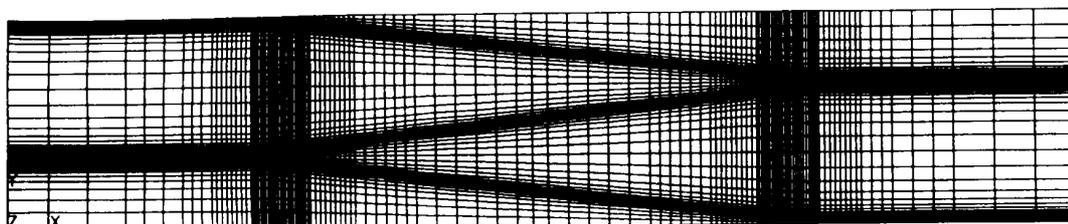


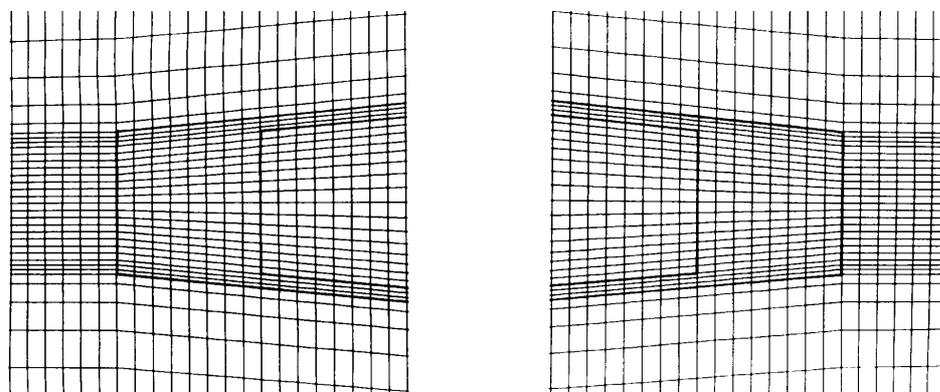
FIGURA 33 - Modelo de elemento finito para as emendas dentadas
 Fonte: AICHER & KLÖCK (1991).

A espessura da linha de cola b_g e a folga da ponta do dente foram relacionadas por $b_g = s \sin \alpha$. Baseado na DIN 68140 (1971), *Aicher e Klöck* assumiram uma relação s / l gerando valores de b_g da ordem de 0,04mm a 0,1mm; com $b_g > 0$ a quantidade s na equação (22) deve ser desprezada. As propriedades constitutivas para um adesivo isotrópico elástico linear e o aderente madeira ortotrópico estão representados na Figura 33. Devido à singularidade das tensões, os valores dos picos de tensão absolutos são submetidos a malhas semelhantes com elementos singulares.

Um outro modelo de elemento finito utilizado para descrever o efeito da rigidez e espessura da camada adesiva na distribuição de tensões em emendas dentadas estruturais é apresentado por GROOM & LEICHTI (1994) e ilustrado na Figuras 34. Neste modelo, a proporção entre os elementos próximos às áreas de altas concentrações de tensões foi de aproximadamente 3:1. Apesar da proporção de alguns elementos deste estudo serem da ordem de 1:30, os mesmos não se localizavam nas regiões críticas de tensões (pontas dos dentes).



(a) Malha do modelo completo



(b) Detalhes das malhas na região da ponta dos dentes.

FIGURA 34 – Malha de elementos finitos usada para avaliar o efeito da rigidez do adesivo no desempenho das emendas dentadas.

Fonte: GROOM & LEICHTI (1994).

O modelo de *Groom e Leichti* foi composto de três tipos de materiais básicos: aderente da esquerda ($E = 9,6$ GPa), camada de adesivo estrutural (6,9 GPa) e o aderente da direita ($E = 12,4$ GPa). Adicionalmente foram realizadas simulações com a rigidez do adesivo assumindo os valores de 3,40, 5,20, 6,90, 8,60 e 10,3 GPa. Foram construídos ainda cinco modelos paramétricos com a espessura da linha de cola variando de 0,025 mm a 0,41 mm. O modelo foi submetido a um estado de tensão de tração uniaxial utilizando o software ANSYS, sendo constituído unicamente por elementos de sólido, bi-dimensionais com quatro nós isoparamétricos quadrilaterais, compreendendo um total de 7.068 elementos e 7.250 nós.

Nos itens a seguir são apresentados os resultados dos estudos analíticos realizados por AICHER & KLÖCK (1991) e GROOM & LEICHTI (1994), modelos das Figuras 33 e 34.

2.7.2.1 Tensões normais à área líquida e tensões de cisalhamento no aderente ao longo da interface madeira/adesivo

Após um decréscimo exponencial, as concentrações de tensão se igualam às tensões aplicadas, 70% a 80% da largura líquida, Figura 35. A Figura 36, apresentada por AICHER & KLÖCK (1991), ilustra bem o efeito das concentrações de tensão nos cantos de reentrância, Figura 33, para diferentes configurações de emenda.

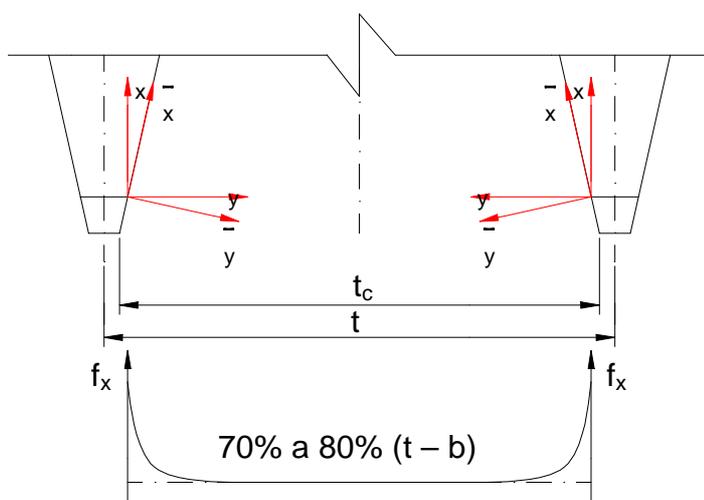


FIGURA 35 - Distribuição de tensão na largura líquida da base do dente.

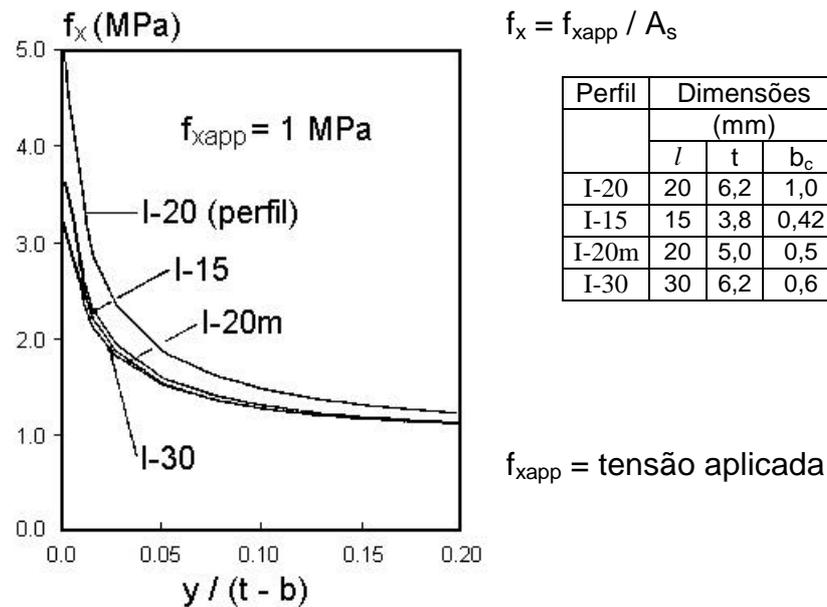


FIGURA 36 - Exemplo da distribuição da tensão de tração ao longo da área líquida da base dos dentes.
Fonte: AICHER & KLÖCK (1991).

A distribuição do cisalhamento (f_{vxy}) no aderente ao longo da interface madeira/adesivo assemelha-se à distribuição de cisalhamento da ligação colada (*glued lap joints*) com níveis de tensão constante na região central da linha de cola (60% a 80% de seu comprimento) e picos de tensão próximo às pontas das emendas, Figura 37.

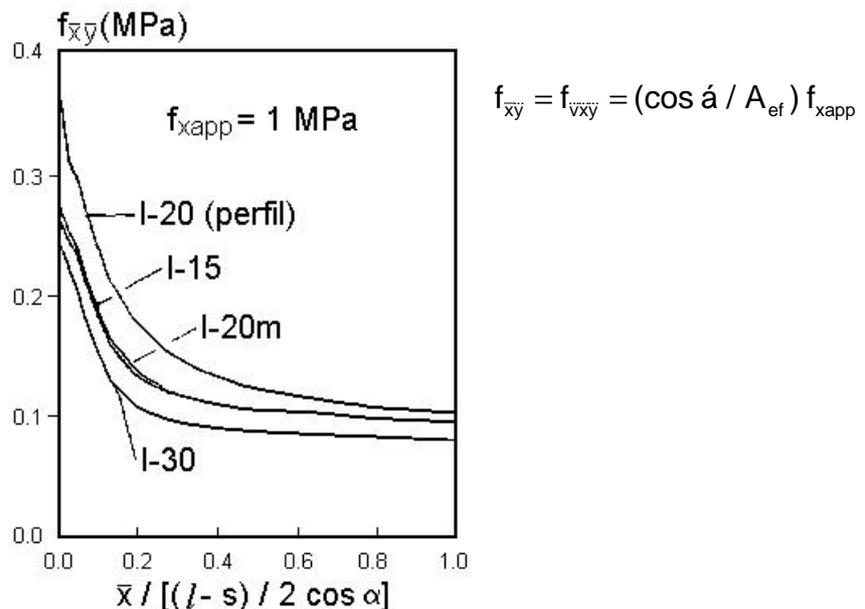


FIGURA 37 - Exemplo da distribuição da tensão de cisalhamento no aderente ao longo da linha de cola à esquerda da interface madeira adesivo.
Fonte: AICHER & KLÖCK (1991).

Os níveis de tensão constante na região central da linha de cola, bem como os picos de tensão estão diretamente ligados à geometria da emenda. Esta consideração é válida tanto para a distribuição de tensão na base do dente quanto para a distribuição do cisalhamento ao longo da linha de cola.

As distribuições de tensão relatadas neste item são consideravelmente influenciadas pelo módulo de elasticidade paralelo às fibras. Segundo AICHER & KLÖCK (1991), no caso de aderentes com propriedades diferentes, os picos de tensão são consideravelmente maiores na parte da emenda com material mais fraco.

Para com MILNER & YEOH (1991), as concentrações de tensões aumentam com o acréscimo da relação entre as propriedades do material de ambos os lados da emenda, sendo o aderente mais rígido responsável pela condução da maior proporção da carga.

2.7.2.2 Influência da rigidez e da plasticidade da linha de cola

As tensões de cisalhamento no adesivo, para os adesivos de policondensação⁷ completamente elásticos lineares, assemelham-se muito às tensões no aderente ao longo da linha de cola, Figuras 37 e 38. Os picos de tensão em ambas as extremidades da linha de cola são 30% a 50% maior que a dos respectivos aderentes, AICHER & KLÖCK (1991). As tensões no adesivo paralelas à linha de cola apresentam seus valores máximos nos cantos de reentrância, sendo constantes ao longo do comprimento dos dentes desaparecendo na ponta dos mesmos.

⁷ Adesivos que durante o processo de cura sofrem reações de condensação, isto é, reações que provocam uniões entre as cadeias poliméricas (cadeias existentes e independentes no adesivo até o início da cura).

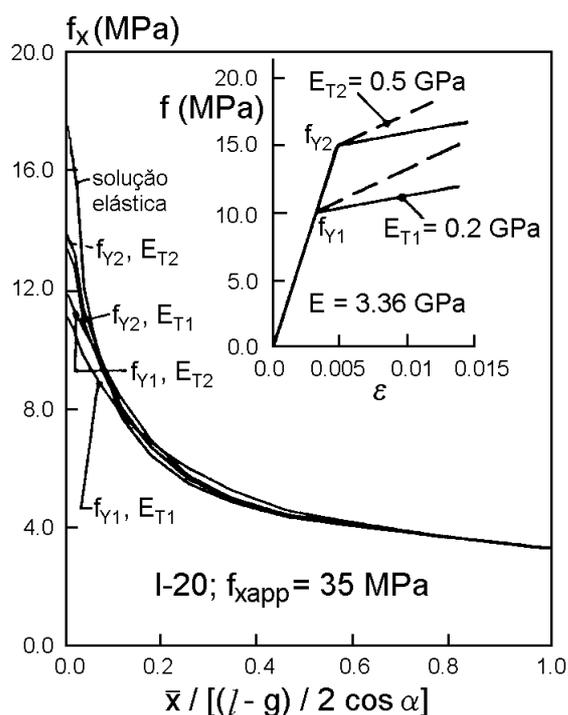


FIGURA 38 - Exemplo da distribuição da tensão de cisalhamento no adesivo para adesivos totalmente elásticos e adesivos com patamar de escoamento. Fonte: AICHER & KLÖCK (1991).

De acordo com *Aicher e Klöck*, a utilização de componentes Poliuretanos (PU) tornou-se atraente para a colagem de madeira estrutural. No trabalho apresentado por GOTH & RADOVIC⁸ (1990) apud AICHER & KLÖCK (1991), as emendas dentadas coladas com PU, utilizando o perfil 20mm correspondente a DIN - 68140, mostraram que os valores de resistência aumentaram da ordem de 50% a 70% quando comparados aos das emendas coladas com os adesivos à base de fenol-formaldeído. MILNER & YEOH (1991) também confirmam a redução nas concentrações de tensões quando a plasticidade da camada adesiva é aumentada. Ainda em comparação com as amostras coladas com fenol-formaldeído a ocorrência de rupturas na linha de cola foi reduzida em torno de 70%. Para *Aicher e Klöck*, o acréscimo de resistência e a mudança no modo de ruptura são devido ao comportamento elasto-plástico da PU que pode ser substanciado pelo caminho de cálculo. Como uma aproximação bilinear do trabalho de

⁸ GOTH, H.; RADOVIC, B. (1990). *Untersuchungen zur Keilzinkenverleimung von Holz mit höheren Holzfeuchten als 15% mit Einkomponenten - Poliurethaklebstoffen*. Forschungsbericht 14 - 35847, FMPA Baden-Württemberg, Otto-Graff-Institut.

2.7.3 Parâmetros de energia e resistência que influenciam no desempenho das emendas dentadas

Neste item são apresentadas as aplicações da energia de deformação, critério de resistência e o mecanismo da fratura empregando fissuras fictícias de cálculo, visando contribuir para um melhor entendimento das emendas dentadas.

2.7.3.1 Energia de deformação

A energia de deformação é uma função comumente usada tanto na otimização estrutural quanto na otimização das ferramentas de máquinas. Durante a comparação de diferentes perfis nas bases da energia de deformação, estudo de AICHER & KLÖCK (1991), não são consideradas todas as emendas de topo (pontas) no modelo de elemento finito, Figura 33. Deste modo, em vez da energia total de deformação U , deve ser aplicada uma energia de deformação U' que é diretamente relacionada a uma área característica A_c (detalhe na Figura 45).

$$U = 0,5 d \int \sigma \varepsilon dA_c \quad (27)$$

$$U' = U / A_c \quad (28)$$

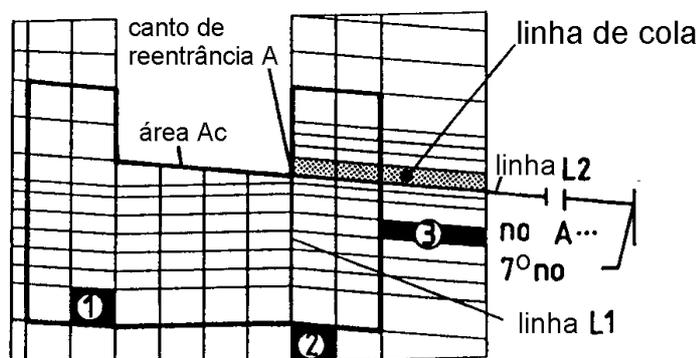


FIGURA 45 – Detalhe da malha de elementos finitos usada por Aicher e Klöck para modelar a região da ponta dos dentes.
Fonte: AICHER & KLÖCK (1991).

Em dimensões absolutas, A_c varia para diferentes perfis, mas sendo sempre uma fração do modelo da Figura 45. É evidente que a variação de energia $\Delta U'$ entre as diversas geometrias decresce com o acréscimo de A_c , principalmente quando as diferenças de tensão e deformação dos perfis são marcantes na região de abertura da ponta dos dentes. Entretanto, as investigações revelaram que U' resulta na mesma seqüência de perfis independente de que área A_c tenha sido escolhida. A Tabela 3 mostra a variação da energia de deformação para perfis de emenda com diferentes geometrias.

TABELA 3 - Parâmetros geométricos relacionados à energia de deformação

Perfil	Dimensões			Parâmetros geométricos				Energia de deformação U'	Critério de resistência de Norris FN [-] 10^3	Taxa de relax. da energia de deform. $G[N/mm] 10^4$		Relação
	l	t	b_c	A_t	A_{ef}	S^{-1}	s_r	(N/mm) 10^4		Fenda I	Fenda II	
I-20	20	6,2	1,0	0,16	6,5	9,8	0,6	1,07	0,82	4,77	0,355	P
I-15	15	3,8	0,42	0,11	7,9	10,4	1,1	0,83	0,58	1,99	0,148	3° P
I-20m	20	5,0	0,5	0,10	8,0	10,3	1,2	0,79	0,55	2,19	0,153	2° P
I-30	30	6,2	0,6	0,10	9,7	12,4	1,5	0,75	0,52	2,44	0,089	M

1 - Valores referentes a uma tensão unitária $f_t = 1$ MPa. 2 - P (pior) e M (melhor).

Fonte: AICHER & KLÖCK (1991).

2.7.3.2 Critério de resistência

A aplicação dos critérios de resistência para campos de tensões não homogêneos como nas redondezas de nós é extremamente complicado. No estudo realizado por AICHER & KLÖCK (1991) foi utilizado o critério de NORRIS (1962) para avaliação dos diferentes perfis:

$$F_N = (f_x / F_x)^2 + (f_y / F_y)^2 - (f_x f_y) / (F_x F_y) + (f_{xy} / F_{xy})^2 \geq 1 \quad (29)$$

Onde: $f_x = f_{tx}$ $f_y = f_{ty}$ ou f_{cy} $f_{xy} = f_{vxy}$ $F_x = f_{t0}$ $F_y = f_{t90}$ ou f_{c90} $F_{xy} = f_v$

Os resultados computacionais, gerados por Aicher e Klöck, foram obtidos desprezando o termo negativo das tensões normais que apresenta influência sobre o valor de F_N , mas não muito sobre seus gradientes. Devido à singularidade das tensões nos cantos de reentrância, a situação para a

avaliação da Equação (29) dispõe de algumas considerações referentes aos valores práticos de resistência. Para *Aicher e Klöck*, um caminho aceitável é calcular a equação acima para todos os elementos em torno da abertura da ponta dos dentes e então excluir uma área interna de transmissão não realística que reduz a resistência da emenda. O procedimento traçado gerou os elementos 1,2 e 3 na Figura 45, produzindo um valor médio pouco diferente da resistência de 35 MPa para o perfil I-20. Os valores de resistência usados para as espécies europeias spruce/fir foram $F_{tx} = 56$ MPa, $F_{cy} = 5,8$ MPa, $F_{ty} = 2,2$ MPa e $F_{xy} = 4$ ou 8 MPa se f_y é de tração ou compressão respectivamente.

A equação de resistência que resultou nos dados da Tabela 3, para diferentes perfis, mostra uma boa correlação entre os valores de energia de deformação dos vários perfis, mostrando uma diferença mais elevada para o perfil I-20 em relação aos outros.

2.7.3.3 Taxas de relaxação da energia de deformação

Com materiais extremamente frágeis como a madeira e os adesivos de *policondensação* combinados com a existência de singularidade de tensões torna-se evidente a necessidade de uma aproximação do mecanismo de fratura para classificação de diferentes perfis, AICHER & KLÖCK (1991). Segundo *Aicher e Klöck* existem algumas estratégias para aplicar o mecanismo de fratura às emendas. No estudo em questão foram simulados dois tipos de fissura (fissuras I e II) iniciando no canto de reentrância (ilustrado no detalhe da Figura 45) e propagando-se ao longo da área líquida e ao longo da interface aderente adesivo, Figura 46. Com exceção das malhas densas próximas da folga da ponta do dente, contendo as idealizações de fissura, os modelos foram basicamente os mesmos da Figura 33.

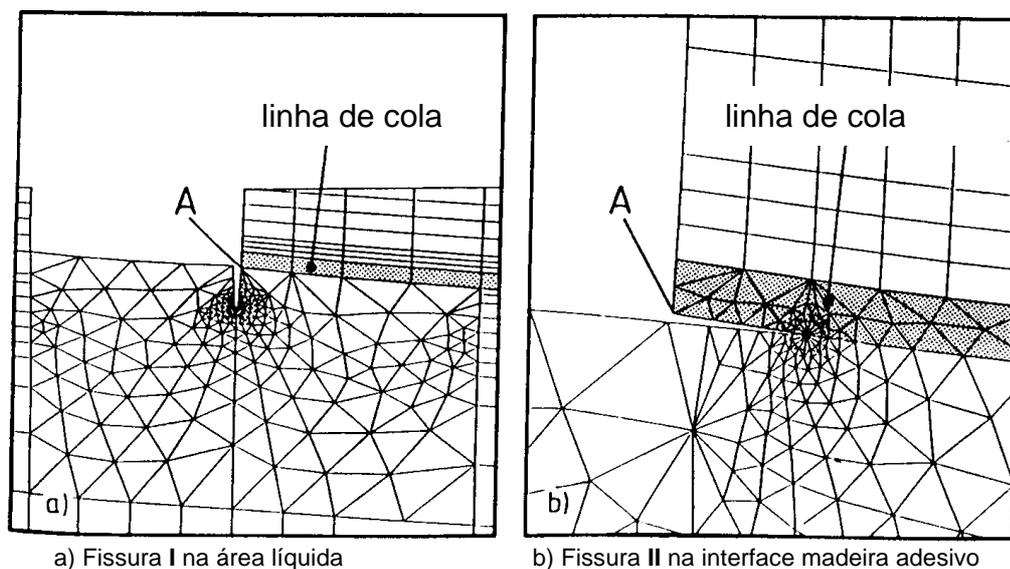


FIGURA 46 - Malha de elemento finito na região da folga da ponta dos dentes com as fissuras fictícias de cálculo.
 Fonte: AICHER & KLÖCK (1991).

Os resultados mostraram que distância entre a tensão aplicada f_t e a fissura teve uma marcante influência nas taxas de relaxação de energia de deformação ou nos fatores de intensidade de tensão, especialmente com a fissura I normal às fibras da madeira. De acordo com Aicher e Klöck uma elongação do modelo da Figura 33 para duas vezes ($t - b$), do lado esquerdo da fissura I, fez com que esta influência desaparecesse. Para a obtenção da singularidade (raiz quadrada) na fissura da ponta todos os elementos triangulares, conectados circunferencialmente, tiveram os nós centrais distorcidos em $1 / 4$ da posição. As taxas de relaxação da energia de deformação G foram calculadas utilizando a técnica de extensão das fissuras virtuais como uma aproximação de dois caminhos subsequentes com diferentes comprimentos de fissura finitamente pequenos $a_{1,2} = a (1 \pm 1/300)$ liberando energias de deformação $U_{1,2}$ do modelo de elemento finito global.

$$G = G_I + G_{II} = (1 / d) (|\partial U / \partial a|) \approx (1 / d) (U_2 - U_1) / (a_2 - a_1) \quad (30)$$

Os alongamentos das fissuras nas quais somente o nó da ponta foi movido não tiveram influência nos resultados para Δa acima de $a / 40$. Os cálculos foram realizados com os comprimentos da fissura no intervalo de 0,125mm a 0,3 mm, isto é, as dimensões das fissuras variaram de 10% a 50% das dimensões características da folga da ponta dos dentes s e b .

Os comprimentos das fissuras foram escolhidos de maneira que suas pontas estivessem dentro das áreas de altos gradientes de tensão. A Figura 47 apresenta a taxa de relaxação da energia de deformação versus o comprimento das fissuras fictícias para os perfis da Tabela 2.

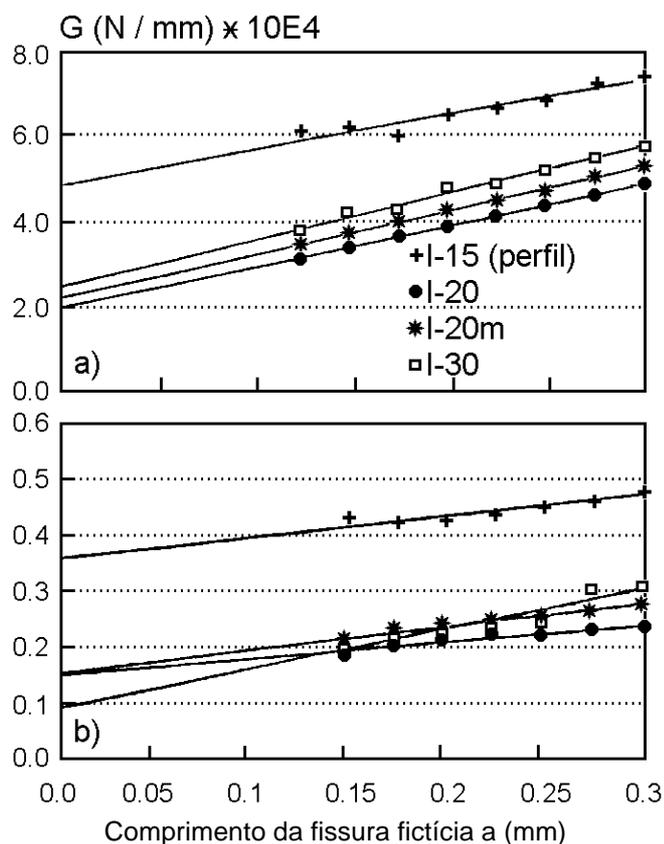


FIGURA 47 - Taxas de energia de relaxação versus comprimento da fissura de cálculo a) fissura I e b) fissura II.
Fonte: AICHER & KLÖCK (1991).

2.8 Considerações sobre a revisão bibliográfica

Da revisão bibliográfica podem ser obtidas as seguintes considerações:

- a vida à fadiga da madeira maciça é independente da espécie de madeira desde que os níveis de tensão sejam definidos em função de sua resistência;
- a determinação inadequada da resistência de referência (níveis de tensão definidos a partir das resistências estáticas de corpos-de-prova que possam apresentar variabilidades significativas de resistência em relação aos exemplares destinados ao ensaio cíclico) pode afetar de forma considerável os resultados de vida à fadiga na fadiga da madeira, aumentando bastante a dispersão de resultados;
- a fadiga em madeira pode ser explicada por diferentes fenômenos quando se trabalha com intervalos muito amplos de frequência, porém para frequências superiores a 0,1Hz a fadiga em madeira pode ser avaliada como um caso de fadiga elástica, devendo-se tomar cuidado apenas para não se trabalhar com frequências muito elevadas (20 Hz a 30 Hz) que podem causar um aquecimento considerável na madeira reduzindo seu teor de umidade e aumentando sua resistência à fadiga;
- a madeira não apresenta modo de propagação de fissura por efeito de carregamento cíclico de tração, como os previstos pela Mecânica da fratura para os metais, sendo que o modo de propagação das fissuras ocorre principalmente no sentido paralelo às fibras;
- o modelo apresentado por NIELSEN (1990) e (1992) é visto na literatura como um tratamento bastante interessante e compreensivo estabelecido para a madeira como um material fissurado e visco-elástico, incluindo análises referentes tanto ao efeito de cargas permanentes quanto ao efeito de cargas dinâmicas;
- embora os estudos referentes à fluência em elementos estruturais de MLC em escala real sejam limitados, é consenso que os efeitos da fluência na MLC são significativamente menores que na madeira maciça, pois tais elementos são geralmente maiores, produzidos a partir de

material selecionado e seco, além de serem providos de superfícies de revestimento (acabamento externo e lâminas de cola) que dificultam o fluxo de umidade atribuindo-lhes um comportamento mais uniforme;

- a resistência à fadiga das ligações adesivas (fenólicas e resorcinólicas) em condições normais de temperatura e umidade é independente do tipo de cola, sendo caracterizada pela resistência ao cisalhamento da madeira;
- a resistência à fadiga das ligações adesivas fenólicas é significativamente afetada pelas condições de degradação devido ao efeito da temperatura e umidade, enquanto que as ligações resorcinólicas garantem a solidez no comportamento das ligações que é semelhante a sua resistência à fadiga em condições normais de temperatura e umidade;
- as análises numéricas, via elementos finitos, utilizando o software ANSYS, apresentadas por AICHER & KLÖCK (1991) e GROOM & LEICHTI (1994) permitem uma melhor visualização do comportamento das emendas dentadas, mostrando que as concentrações de tensões na região da ponta dos dentes são responsáveis pelo enfraquecimento deste tipo de ligação. Estas análises mostram ainda que fatores como a rigidez, a plasticidade e a espessura da camada adesiva pode ter influência significativa na resistência da emenda dentada;
- no modelo apresentado por AICHER & KLÖCK (1991), são apresentadas aplicações da energia de deformação, critério de resistência e mecânica da fratura empregando fissuras fictícias. Estas análises permitem uma melhor visualização do comportamento das emendas dentadas, utilizando fissuras que representam os dois modos mais comuns de rupturas das emendas dentadas quando submetidas à tração.

3 ENSAIOS PRELIMINARES

Neste capítulo são apresentados os resultados de alguns ensaios preliminares que contribuíram para a definição da metodologia proposta.

3.1 Ensaios para avaliação da variação de resistência dos corpos-de-prova nas peças de madeira

Foram realizados alguns ensaios para fazer uma avaliação da variação da resistência a tração paralela às fibras no interior de uma peça de dimensões comerciais (6 cm x 12 cm). O objetivo desta verificação é atentar para melhor forma de se retirar os corpos-de-prova gêmeos e assim se obter uma maior precisão na resistência de referência. Os resultados destes ensaios são apresentados nas Tabelas 4, 5, 6 e 7, sendo que os corpos-de-prova pertencentes ao mesmo grupo foram retirados ao longo do comprimento das peças, Figura 48.

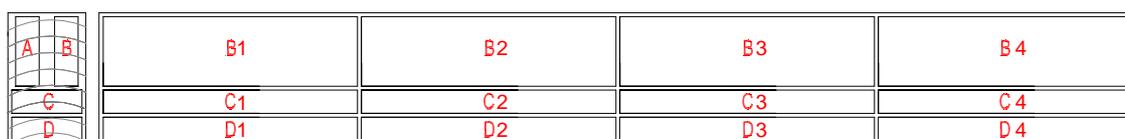


FIGURA 48 - Corpos-de-prova para avaliação da variação da resistência a tração paralela às fibras retirados de peças de 6cm x 12cm.

TABELA 4 - Variação da resistência a tração no interior de uma peça de madeira corpos-de-prova A.

<i>Pinus caribea hondurensis</i>				<i>Eucalyptus grandis</i>			
CP	P_{rupt} (kN)	A (cm ²)	f_{10} (kN/cm ²)	CP	P_{rupt} (kN)	A (cm ²)	f_{10} (kN/cm ²)
A1	18,43	3,510	5,25	A1	32,43	3,504	9,25
A2	18,67	3,498	5,34	A2	33,29	3,495	9,52
A3	19,51	3,601	5,42	A3	32,56	3,501	9,30
A4	18,55	3,507	5,29	A4	32,98	3,516	9,38

TABELA 5 - Variação da resistência a tração no interior de uma peça de madeira corpos-de-prova B.

<i>Pinus caribea hondurensis</i>				<i>Eucalyptus grandis</i>			
CP	P_{rupt} (kN)	A (cm ²)	f_{10} (kN/cm ²)	CP	P_{rupt} (kN)	A (cm ²)	f_{10} (kN/cm ²)
B1	18,67	3,451	5,41	B1	34,68	3,512	9,87
B2	18,20	3,426	5,31	B2	33,91	3,492	9,81
B3	19,51	3,517	5,36	B3	35,38	3,509	10,08
B4	18,55	3,488	5,46	B4	34,89	3,521	9,91

TABELA 6 - Variação da resistência a tração no interior de uma peça de madeira corpos-de-prova C.

<i>Pinus caribea hondurensis</i>				<i>Eucalyptus grandis</i>			
CP	P_{rupt} (kN)	A (cm ²)	f_{10} (kN/cm ²)	CP	P_{rupt} (kN)	A (cm ²)	f_{10} (kN/cm ²)
C1	18,78	3,504	5,36	C1	30,07	3,505	8,58
C2	19,00	3,490	5,44	C2	29,85	3,545	8,42
C3	18,41	3,487	5,28	C3	30,47	3,588	8,49
C4	18,70	3,495	5,35	C4	29,87	3,494	8,55

TABELA 7 - Variação da resistência a tração no interior de uma peça de madeira corpos-de-prova D.

<i>Pinus caribea hondurensis</i>				<i>Eucalyptus grandis</i>			
CP	P_{rupt} (kN)	A (cm ²)	f_{10} (kN/cm ²)	CP	P_{rupt} (kN)	A (cm ²)	f_{10} (kN/cm ²)
D1	19,90	3,506	4,82	D1	19,77	3,456	5,72
D2	16,83	3,521	4,78	D2	20,02	3,523	5,68
D3	16,55	3,499	4,73	D3	19,54	3,526	5,54
D4	17,01	3,620	4,69	D4	19,76	3,490	5,66

Os resultados das Tabelas acima mostraram não haver variações significativas de resistência entre os corpos-de-prova retirados ao longo do comprimento das peças analisadas, indicando não haver grande variabilidade de resistência ao longo do comprimento de peças isentas de defeito. Estes resultados confirmam as observações realizadas por LOGSDON (1995) para o cisalhamento paralelo às fibras da madeira, no plano radial-longitudinal. Assim sendo, a retirada de corpos-de-prova gêmeos é melhor caracterizada quando os mesmos são retirados no sentido do comprimento das peças de madeira. Para que os corpos-de-prova retirados no sentido transversal de uma peça madeira possam ser considerados gêmeos, é necessário que a disposição dos anéis de crescimento na seção permita a retirada de pares de amostras contendo os mesmos anéis, conforme exemplificado na Figura 49.

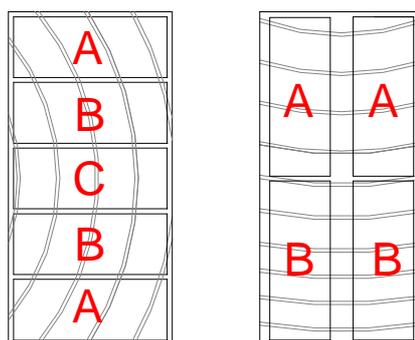


FIGURA 49 – Exemplo de corpos-de-prova gêmeos na seção transversal.

3.2 Ensaios cíclicos

São apresentados resultados de alguns ensaios preliminares que serviram de base para a definição da metodologia adotada nos ensaios definitivos deste estudo. As amostras utilizadas nesta fase do estudo foram retiradas ao longo do comprimento de peças de 6 cm x 12 cm de seção, conforme disposição apresentada na Figura 50.

Peça 1 (*Pinus caribea hondurensis*)

A							
B							
C							
D							

Peça 2 (*Pinus caribea hondurensis*)

A							
B							
C							
D							
E							

Peça1 (*Eucalyptus grandis*)

A							
B							
C							
D							
E							

FIGURA 50 – Disposição de retirada das amostras dos ensaios preliminares.

A identificação de cada corpo-de-prova foi realizada obedecendo a seguinte seqüência: posição na seção transversal (Figura 50), número da peça e posição no comprimento da peça. Por exemplo, para a amostra hachureada na peça 2 de *Pinus caribea hondurensis* da Figura 50, a identificação é E24. Nas Tabelas a seguir MFE significa que a ruptura ocorreu na madeira fora da região da emenda enquanto RE significa ruptura na região da emenda.

TABELA 8 - Controles estáticos de *Pinus caribea hondurensis*.

Madeira maciça				Emenda dentada (Cascophen)				Modo de ruptura
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f ₁₀ (kN/cm ²)	CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	
A14	19,89	3,715	5,35	A13	13,947	3,418	4,08	MFE: 80% RE: 20% na madeira
B11	18,79	3,503	5,36	B16	14,203	3,465	4,09	RE: 100% na madeira
C14	19,37	3,587	5,40	C11	15,263	3,630	4,20	RE: 100% na madeira
D11	16,58	3,515	4,71	D12	13,648	3,360	4,06	MFE: 100%
A22	24,84	3,621	6,86	A24	18,31	3,231	5,66	RE: 100% na madeira
B24	25,01	3,636	6,88	B23	18,58	3,435	5,41	MFE: 80% RE: 20% na madeira
D26	24,15	3,576	6,75	D22	20,10	3,541	5,68	MFE: 100%
C24	23,47	3,511	6,68	C22	19,60	3,560	5,50	MFE: 100%

TABELA 9 - Controles estáticos de *Eucalyptus grandis*

Madeira maciça				Emenda dentada (Cascophen)				Modo de ruptura
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f ₁₀ (kN/cm ²)	CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	
A13	33,00	3,528	9,35	A14	27,78	3,45	8,05	RE: 100% na interface mad/ades
B16	35,43	3,525	10,05	B13	30,39	3,62	8,39	RE: 100% na interface mad/ades
C15	30,52	3,645	8,37	C14	22,11	3,52	6,28	RE: 100% na interface mad/ades
D14	19,36	3,449	5,61	D13	16,03	3,31	4,84	MFE: 75% RE: 25% na interf.
E13	20,63	3,514	5,87	E14	16,72	3,40	4,92	RE: 100% na interface mad/ades

TABELA 10 – Ensaios cíclicos *Pinus caribea hondurensis* f = 10 Hz

Madeira maciça				Emenda dentada (Cascophen)				Modo de ruptura
CP	σ_{max}^9 (% f ₁₀)	σ_{min} (% σ_{max})	N (ciclos)	CP	σ_{max} (% f _{gt0})	σ_{min} (% σ_{max})	N (ciclos)	
A16	90	10	669	A26	90	10	598	RE: 100% na madeira
E25	90	10	1	E24	90	10	382	RE: 100% na madeira
E27	90	10	925	B15	90	10	27	MFE: 90% RE: 10% na madeira
A12	75	10	297.954	A11	75	10	26.908	RE: 100% na madeira
B13	75	10	287.931	A15	75	10	43.695	MFE: 80% RE: 20% na madeira
D13	75	10	373.929	B21	75	10	38.599	RE: 100% na madeira
A25	60	10	1.016.584	D14	60	10	90.302	MFE: 70% RE: 30% na madeira
-	-	-	-	B14	60	10	115.560	RE: 100% na madeira
-	-	-	-	C26	60	10	101.755	RE: 100% na madeira

⁹ Baseada nas resistências dos corpos-de-prova apresentadas nas Tabelas 8 e 9 e retirados no sentido longitudinal das peças de madeira. Por exemplo a resistência de referência para o A16 é a resistência do A14. O corpo-de-prova de controle E da peça 2 de Pinus não foi ensaiado devido a baixa variabilidade da resistência nesta peça.

TABELA 11 – Ensaios cíclicos *Pinus caribea hondurensis* f = 5 Hz

Madeira maciça				Emenda dentada (Cascophen)				Modo de ruptura
CP	σ_{max} (% f_{t0})	σ_{min} (% σ_{max})	N (ciclos)	CP	σ_{max} (% f_{qt0})	σ_{min} (% σ_{max})	N (ciclos)	
D27	90	10	381	B22	90	10	298	MFE: 35% RE: 65% na madeira
C15	90	10	584	C21	90	10	203	RE: 100% na madeira
E23	75	10	219.832	C16	75	10	9.615	MFE: 20% RE: 80% na madeira
C13	75	10	253.120	A27	75	10	12.084	MFE: 90% RE: 10% na interf
C25	60	10	791.034	D24	60	10	25	RE: 100% na madeira
D16	60	10	1.382.568	D15	60	10	47.630	RE: 100% na madeira
-	-	-	-	C23	60	10	67.159	RE: 100% na madeira

TABELA 12 – Ensaios cíclicos *Pinus caribea hondurensis* f = 1 Hz

Madeira maciça				Emenda dentada (Cascophen)				Modo de ruptura
CP	σ_{max} (% f_{t0})	σ_{min} (% σ_{max})	N (ciclos)	CP	σ_{max} (% f_{qt0})	σ_{min} (% σ_{max})	N (ciclos)	
B27	90	10	113	D25	90	10	67	MFE: 50% RE: 50% na madeira
E21	90	10	87	E22	90	10	49	RE: 100% na madeira
A23	75	10	72.917	A21	75	10	5.564	RE: 100% na madeira
B25	75	10	87.134	B26	75	10	3.921	RE: 100% na madeira
D21	60	10	252.510	D23	75	10	6.767	MFE: 80% RE: 20% na madeira
B21	60	10	400.197	C12	60	10	19.036	RE: 100% na madeira
-	-	-	-	E26	60	10	21.416	MFE: 30% RE: 70% na madeira
-	-	-	-	C27	60	10	14.595	RE: 100% na madeira

TABELA 13 – Ensaios cíclicos *Eucalyptus grandis* f = 10 Hz

Madeira maciça				Emenda dentada (Cascophen)				Modo de ruptura
CP	σ_{max} (% f_{t0})	σ_{min} (% σ_{max})	N (ciclos)	CP	σ_{max} (% f_{qt0})	σ_{min} (% σ_{max})	N (ciclos)	
D16	90	10	1.077	D12	90	10	39	RE: 100% na interface mad/ades
B12	90	10	745	B15	90	10	416	MFE: 35% RE: 65% na interf.
C13	90	10	14	E12	90	10	557	RE: 100% na interface mad/ades
A12	75	10	391.730	A11	75	10	26.689	RE: 100% na interface mad/ades
A16	75	10	304.343	A15	75	10	44.278	RE: 100% na interface mad/ades
E15	75	10	329.510	E11	75	10	45.029	MFE: 20% RE: 80% na interf.
D11	60	10	1.145.760	B14	60	10	85.031	MFE: 20% RE: 80% na interf.
E16	60	10	1.535.709	B11	60	10	77.322	RE: 100% na interface mad/ades
-	-	-	-	C12	60	10	139.487	RE: 100% na interface mad/ades
-	-	-	-	D15	60	10	95.618	RE: 100% na interface mad/ades

Com base nos resultados destes ensaios foi possível estimar o número de ciclos a partir dos quais podem ser feitos os ensaios estáticos, proposto na metodologia, para avaliação do comportamento da rigidez. Esta estimativa foi baseada nos valores médios de N de maneira que fosse possível fazer, para maioria dos casos, pelo menos 5 medidas da rigidez.

A ruptura por fadiga na tração das emendas dentadas se deu de forma semelhante a sua ruptura estática. A fissura fictícia do tipo I (Figura 51a), apresentada por AICHER & KLÖCK (1991), parece ser mais aplicável às coníferas enquanto que a fissura do tipo II (Figura 51b) se aplica melhor às dicotiledôneas.

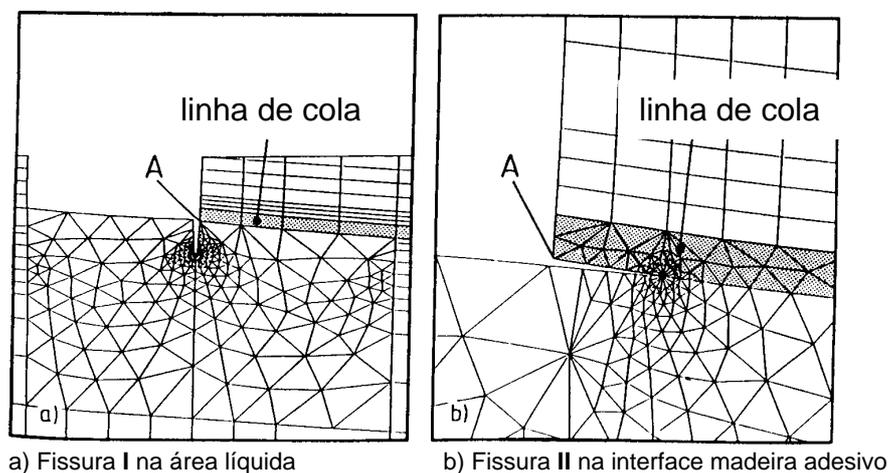


FIGURA 51 - Malha de elemento finito na região da folga da ponta dos dentes com as fissuras fictícias de cálculo.
Fonte: AICHER & KLÖCK (1991).

As rupturas dos corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis*, tanto dinâmicos quanto estáticos, ocorreram na sua grande maioria na interface madeira/adesivo, enquanto que para os corpos-de-prova de *Pinus caribea hondurensis* as rupturas sempre envolveram a madeira.

A consideração da revisão bibliográfica, em que a vida à fadiga da madeira maciça é independente da espécie de madeira desde de que os níveis de tensão sejam definidos em função de sua resistência tende a se confirmar nos ensaios preliminares deste estudo. Observou-se ainda, uma tendência da vida à fadiga das emendas dentadas seguir a mesma consideração.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando-se as informações encontradas na literatura e os resultados de ensaios preliminares realizados no LaMEM, utilizou-se o seguinte procedimento para que os objetivos do trabalho fossem atingidos.

4.1 Materiais

Neste item são descritos os materiais e equipamentos empregados no desenvolvimento do trabalho.

4.1.1 As espécies de madeira

As espécies de madeira que foram usadas no estudo são as de reflorestamento, particularmente, o *Pinus caribea hondurensis* e o *Eucalyptus grandis*. A escolha destas espécies se deve ao fato de que as mesmas estão sendo bastante utilizadas pelo parque produtor de MLC do país, bem como pela grande disponibilidade das mesmas, principalmente nas regiões sul e sudeste. Os lote de madeira de *Eucalyptus grandis* utilizado nos ensaios foi retirado do *Horto Florestal Navarro de Andrade* localizado na cidade de Rio Claro, enquanto que o lote de *Pinus caribea hondurensis* foi retirado do *Horto Florestal da Cidade de Itirapina*, ambas no estado de São Paulo.

4.1.2 Os adesivos

Os adesivos utilizados na colagem dos corpos-de-prova foram o CASCOPHEN RS-216-M, à base de resorcinol, produzido pela Alba Química Indústria e Comércio Ltda, e o adesivo poliuretano à base de óleo mamona

desenvolvido pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do Departamento de Química e Física Molecular do Instituto de Química de São Carlos.

A escolha do CASCOPHEN RS-216-M foi definida por ser o mesmo muito importante para o propósito estrutural e também ser amplamente empregado pelo parque produtor de MLC do país, MACÊDO (1996). O adesivo poliuretano à base de óleo de mamona foi escolhido por apresentar algumas vantagens como: o processo de cura a frio, a matéria prima ser um recurso natural renovável facilmente encontrado no território nacional, ser quimicamente menos agressivo ao homem e ao ambiente, e ter grande resistência ao intemperismo ARAÚJO (1992). Este adesivo ainda apresenta grande resistência mecânica, além de ser uma tecnologia nacional e um produto alternativo para a aplicação em MLC, HENRIQUES DE JESUS et al (1998).

4.1.3 Equipamentos

Para a condução dos ensaios, tanto estáticos quanto cíclicos, foi utilizada uma máquina universal DARTEC M1000/RC com atuador servo hidráulico de capacidade de 100 kN e com sistema de aquisição de dados totalmente informatizado. As dimensões dos corpos-de-prova foram obtidas de acordo com a NBR 7190/97 empregando-se paquímetro digital de precisão de 0,01 mm.

4.2 Metodologia

No presente item são descritas a metodologia de obtenção dos corpos-de-prova, suas dimensões e a forma de condução dos ensaios.

4.2.1 Confeção dos corpos-de-prova

A confeção de todos corpos-de-prova, levando-se em consideração todos os parâmetros e cuidados necessários, foi realizada de forma semelhante

ao descrito em MACÊDO¹¹ (1996) e adotados pela NBR 7190/97. A Figura 52 representa o procedimento utilizado para a obtenção de peças coladas destinadas a usinagem dos corpos-de-prova com emendas dentadas.

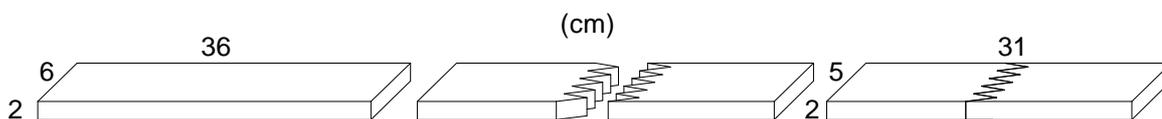


FIGURA 52 – Peças de madeira com emendas dentadas.

A geometria da emenda foi a correspondente ao comprimento de 20 mm da DIN 68140, Figura 53a, que é a utilizada pelo parque produtor no país. As dimensões dos corpos-de-prova (maciços e com emendas) usados nos ensaios estão representadas na Figura 53b.

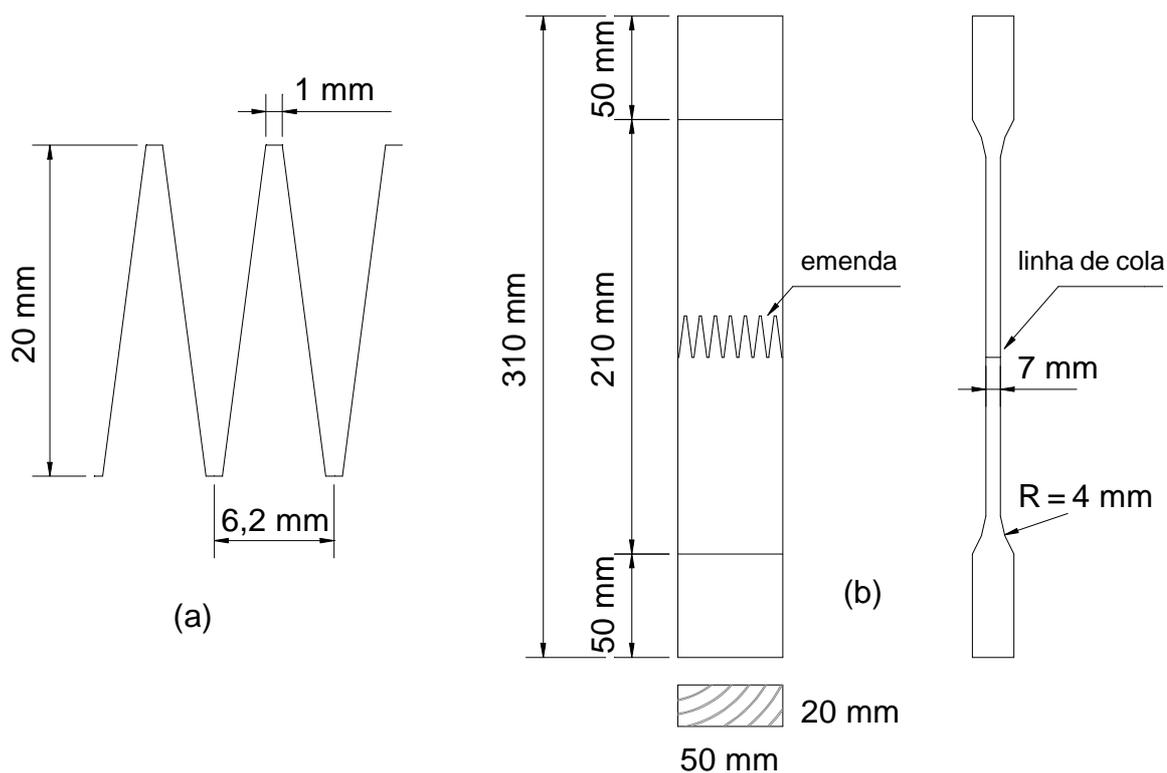


FIGURA 53 – Dimensões da geometria da emenda e do corpo-de-prova de resistência à tração nas emendas dentadas.

¹¹ MACÊDO, A. N. (1996). *Estudo de Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada (MLC): Avaliação de Método de Ensaio*. São Carlos, Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Orientador: Prof. Tit. Carlito Calil Junior, set.

Devido à garra da máquina utilizada nos ensaios (DARTEC M1000/RC) apresentar um sistema regulável de pressão, tornou-se possível uma redução de 12 cm para 5 cm no comprimento da região de ancoragem dos corpos-de-prova, mantendo-se os demais parâmetros de acordo com as recomendações da NBR 7190/97.

As intensidades das pressões de colagem das emendas dentadas usando o adesivo Cascophen foram de $0,80 \text{ kN/cm}^2$ para o *Pinus caribea hondurensis* e $1,00 \text{ kN/cm}^2$ para o *Eucalyptus grandis*, MACÊDO (1996). Para o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona estas pressões foram, conforme recomendações de HENRIQUES de JESUS (2000), de $0,9 \text{ kN/cm}^2$ para o *Pinus caribea hondurensis* e $1,0 \text{ kN/cm}^2$ para *Eucalyptus grandis*. Todas as emendas dentadas só foram ensaiadas após um período igual ou superior a 8 dias, tempo necessário para que todas as ligações adesivas atingissem a máxima resistência.

4.2.2 Forma de retirada dos corpos-de-prova

Na avaliação de fadiga em madeira deve-se tomar um cuidado especial com relação à resistência de referência (resistência) para definição dos níveis de tensão. De acordo com o que foi abordado na literatura, uma resistência de referência incorreta pode ter uma influência significativa nos resultados dos ensaios de fadiga, podendo aumentar significativamente a dispersão dos resultados dos ensaios. Portanto, para reduzir ao máximo esta possibilidade é interessante que os corpos-de-prova gêmeos sejam retirados ao longo do comprimento de peças isentas de defeitos. Esta consideração foi observada por LOGSDON (1995) para o cisalhamento paralelo às fibras da madeira, sendo confirmada também para a tração paralela nos ensaios preliminares deste estudo apresentados no capítulo 3.

A forma da retirada dos corpos-de-prova das peças de madeira foi executada de maneira que as amostras tivessem a maior probabilidade de serem consideradas gêmeas. A Figura 54 ilustra a forma de retirada dos

corpos-de-prova ao longo do comprimento de peças de madeira de 6cm x 12 cm de seção e 130 cm de comprimento com teor de umidade próximo de 12%. Os corpos-de-prova de controle foram usados para determinação das resistências estática de referência usadas nos ensaios de fadiga.

Seção	Fadiga	Controle	Fadiga
A			
B			
C			
D			
E			

FIGURA 54 – Forma de retirada dos corpos-de-prova das peças de madeira.

A identificação dos corpos-de-prova foi realizada de forma semelhante a dos ensaios preliminares acrescentando apenas a letra c ou m para indicar se o corpo-de-prova foi colado com o adesivo Cascophen ou com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. Assim sendo, a seqüência de identificação foi: posição na seção transversal, número da peça, posição ao longo do comprimento da peça e a letra c ou m. De cada peça de madeira foi retirada pelo menos uma seqüência de corpos-de-prova de madeira maciça, retirada aleatoriamente ao longo da seção, que foram identificados de maneira semelhante aos corpos-de-prova com emenda. É importante ressaltar que em alguns casos foi possível à retirada de mais corpos-de-prova por seção transversal do que ilustrado na Figura 54.

4.3 Ensaios

Neste item são abordados todos os procedimentos usados na realização dos ensaios estáticos e cíclicos.

4.3.1 Ensaios estáticos

Os ensaios estáticos tanto para os corpos-de-prova com emendas dentadas quanto para os corpos-de-prova de madeira maciça seguiram, as recomendações prescritas na NBR 7190/97 e MACÊDO (1996). Os resultados destes ensaios serviram, principalmente, para estabelecer a resistência de referência e os níveis de tensão máximo e mínimo para os ensaios de fadiga na tração.

4.3.2 Ensaios cíclicos

Para a coleta de dados necessária para a análise do comportamento das emendas dentadas a fadiga na tração foi realizado o seguinte procedimento de ensaio:

4.3.2.1 Freqüências de ensaio e níveis de tensão

As freqüências do carregamento cíclico utilizadas nos ensaios cíclicos foram 9Hz, 5Hz e 1Hz. Estas freqüências foram definidas por pertencerem a um intervalo onde os efeitos das propriedades reológicas da madeira não interferem nos resultados dos ensaios de fadiga, fadiga elástica segundo a literatura. Os níveis de tensão, máximos para os carregamentos cíclicos foram de 90%, 75% e 60% da resistência do material determinada nos ensaios estáticos dos corpos-de-prova gêmeos, sendo que o nível mínimo de tensão foi 10% do máximo ($R = 0,1$). Os intervalos iguais de variação tanto de freqüência quanto de nível de tensão foram adotados para facilitar na análise estatística e estão relacionados também com o tempo disponível para os ensaios.

Nos ensaios envolvendo a freqüência de 9 Hz foi observado, através da leitura de termopar, um pequeno acréscimo de temperatura nos corpos-de-prova (da ordem de 1°C a 3°C , temperatura ambiente 26°C). Entretanto, variações de temperatura desta ordem não são capazes de causar mudanças de umidade que gerem variações significativas de resistência na

madeira. Informações encontradas nos trabalhos de HELLMEISTER (1973) e GALVÃO (1985), reforçam esta justificativa.

4.3.2.2 Variabilidade das amostras

Como em todos os dados experimentais existe variabilidade para aplicar a metodologia estatística é preciso que eles sejam aleatórios, isto é, todos os corpos-de-prova devem ser representativos do universo conceitual sobre o qual será feita a inferência estatística. Para garantir a variabilidade de resistência dos corpos-de-prova as amostras foram retirados de vários trechos de vigas diferentes (peças diferentes), sem levar em consideração sua posição no tronco de árvore e nem de qual tronco foram retiradas. As diferentes formas de disposição dos anéis de crescimento na seção transversal também contribuem para a variabilidade na resistência dos corpos-de-prova. Esta variabilidade pode ser observada nos resultados dos ensaios dos corpos-de-prova destinados a obtenção da resistência de referência (Anexos A.1 e A.2 ilustrados nas Figuras 55 e 56).

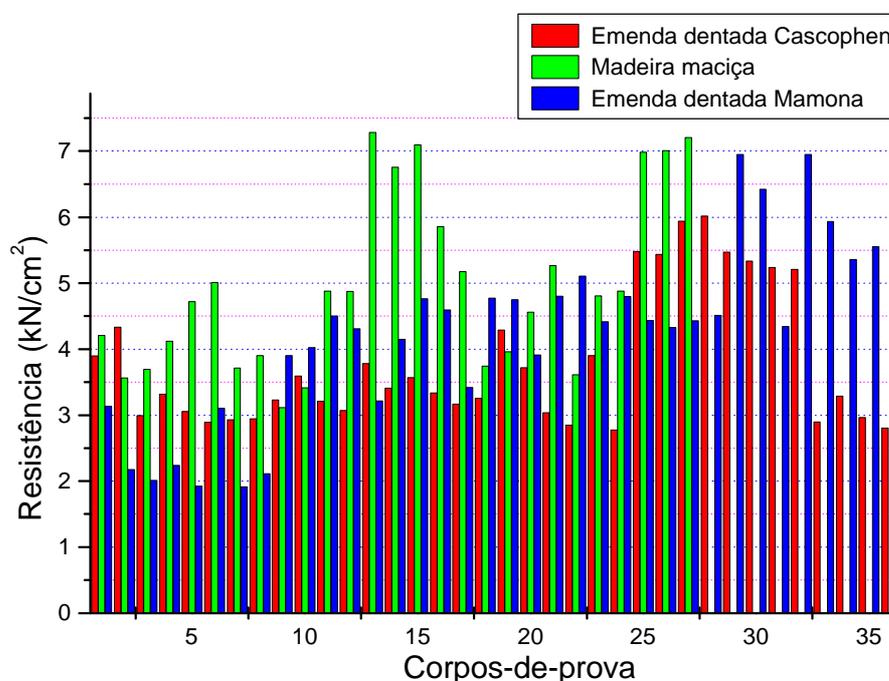


FIGURA 55 – Variabilidade da resistência de referência *Pinus caribea hondurensis*.

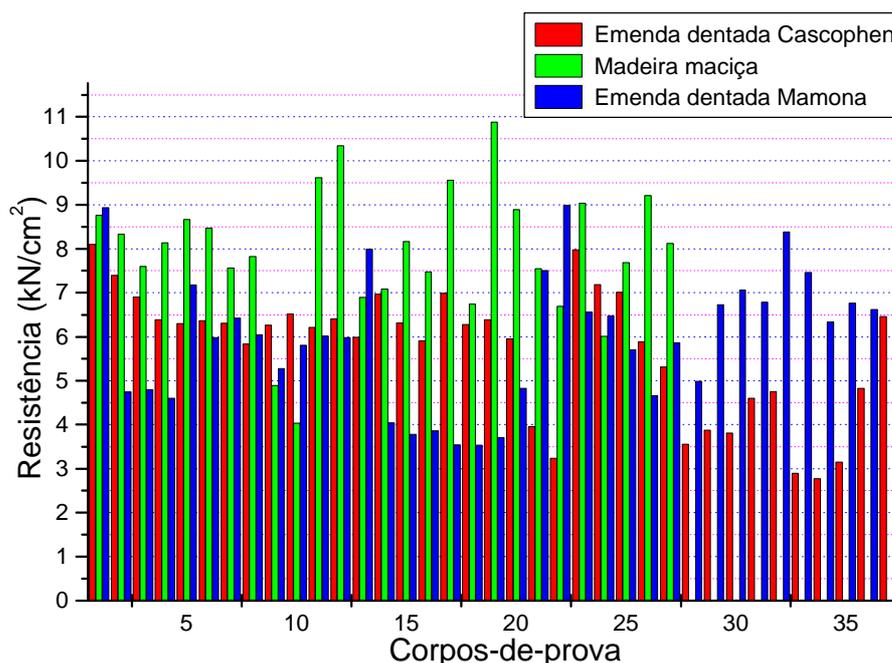


FIGURA 56 – Variabilidade da resistência de referência *Eucalyptus grandis*.

Os dados apresentados na Tabela 14 mostram algumas propriedades das peças de madeira usadas na retirada dos corpos-de-prova, confirmando a variabilidade das amostras de ensaio.

TABELA 14 – Propriedades das peças de madeira usadas no estudo.

<i>Pinus caribea hondurensis</i>				<i>Eucalyptus grandis</i>			
Peça	f_{t0} (kN/cm ²)	f_{c0} (kN/cm ²)	ρ_{ap} (g/cm ³)	Peça	f_{t0} (kN/cm ²)	f_{c0} (kN/cm ²)	ρ_{ap} (g/cm ³)
5c	4,213	3,307	0,440	2c	8,553	7,057	0,630
6c	3,633	2,700	0,390	3c	7,610	6,208	0,625
7c	4,125	3,345	0,470	4c	8,144	6,608	0,609
8c	4,871	3,871	0,540	5c	8,578	6,637	0,652
9c	3,810	3,067	0,460	6c	7,702	5,406	0,567
10c	3,267	2,927	0,451	7c	4,472	3,802	0,539
11c	4,882	3,103	0,476	8c	9,985	7,008	0,610
12c	7,027	4,100	0,610	9c	6,994	4,479	0,550
13c	7,100	4,903	0,600	10c	8,175	5,304	0,588
14c	5,862	4,633	0,575	11c	7,480	4,038	0,635
5m	5,177	3,400	0,453	3m	8,157	6,815	0,635
6m	3,859	2,952	0,420	4m	10,893	5,734	0,597
7m	4,561	3,029	0,451	5m	8,894	6,069	0,660
8m	5,270	3,834	0,570	7m	7,553	4,454	0,560
9m	3,614	3,323	0,460	9m	6,694	4,391	0,563
10m	4,812	3,409	0,476	10m	9,039	4,953	0,600
11m	4,884	3,618	0,484	11m	6,856	4,391	0,620
12m	6,999	4,445	0,590	12m	9,215	5,731	0,580
13m	7,210	5,175	0,610	13m	8,125	6,546	0,610

De cada viga de madeira utilizada nos ensaios foram retirados dois trechos, um destinado aos corpos-de-prova colados com o adesivo Cascophen e o outro destinado aos corpos-de-prova colados com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. Assim sendo, os corpos-de-prova de madeira da Tabela 14 também são identificadas com as letra c e m, pelas mesmas razões indicadas no item 4.2.2. Na Tabela 14, os valores de resistência à compressão (f_{t0}) e de densidade aparente (ρ_{ap}) são baseados nos resultados de exemplares singulares retirados de cada peça de madeira, enquanto que os valores de resistência à tração (f_{t0}) são baseados nos resultados dos ensaios dos corpos-de-prova de controle apresentados no Anexo A.2.

4.3.2.3 Execução dos ensaios cíclicos

A seqüência utilizada durante a execução dos ensaios cíclicos foi:

- 1) Ensaio estático do corpo-de-prova virgem até 50% da resistência do material para verificação da rigidez inicial, NBR 7190/97.
- 2) Ensaios cíclicos intercalados por ensaios estáticos após um determinado número de ciclos, Tabela 15. A finalidade do procedimento acima é avaliar a variação da rigidez do material em função do número de ciclos.

TABELA 15 - Número de ciclos para a verificação da rigidez

σ_{max} (% f_{t0})	Emendas dentadas			Madeira maciça		
	1 Hz	5 Hz	9 Hz	1 Hz	5 Hz	9 Hz
60	5.000	10.000	20.000	50.000	100.000	150.000
75	1.000	2.000	5.000	20.000	40.000	50.000

Obs: valores obtidos nos ensaios preliminares

Não houve diferença significativa na variação de rigidez em função do número de ciclos em relação à rigidez inicial para os valores determinados usando como referência a base de medida de 21 cm (distância entre as regiões de ancoragem) e as medidas de rigidez obtidas com base em LVDT instalado nos 10 cm centrais dos corpos-de-prova, conforme ilustrado na Figura 57. Assim sendo, por uma questão de praticidade, optou-se pela

medida de rigidez utilizando como referência a base de medida de 21cm uma vez que este procedimento facilita na aquisição dos dados e também por ser o objetivo do procedimento determinar a variação da rigidez em função do número de ciclos e não o seu valor real.

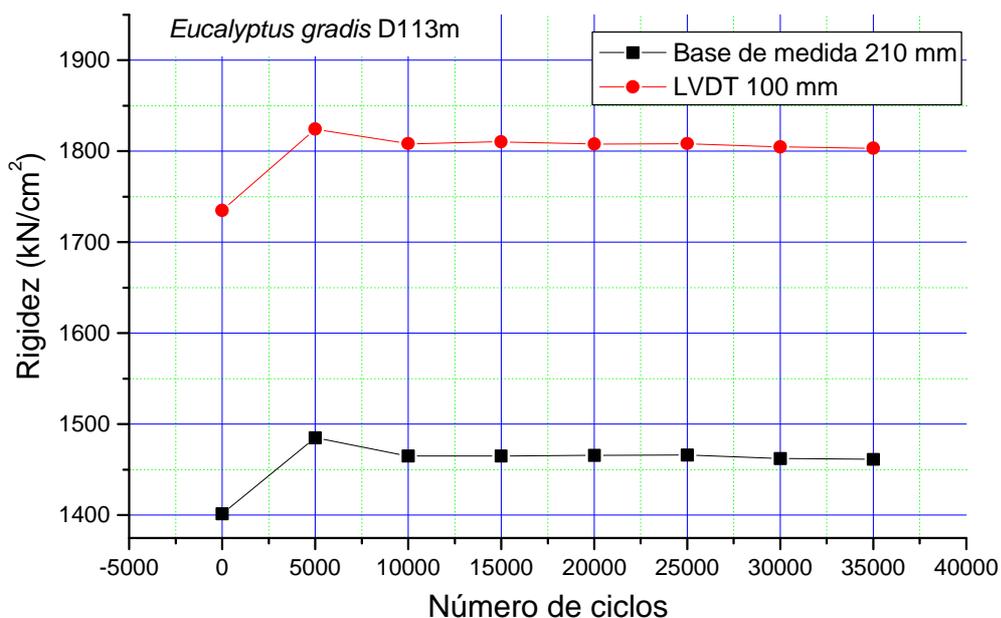


FIGURA 57 – Variação de rigidez base de medida x LVDT.

Em cada nível de tensão foram realizados um total de seis ensaios (Figura 58). Os corpos-de-prova de cada nível foram selecionados aleatoriamente de maneira que houvesse o mínimo possível de casos de nível de tensão com mais de um corpo-de-prova pertencente a mesma peça. Os ensaios foram realizados de maneira que os corpos-de-prova destinados aos níveis tensão mais altos só fossem ensaiados após a seqüência de ensaio estar completa para o níveis inferiores de tensão.

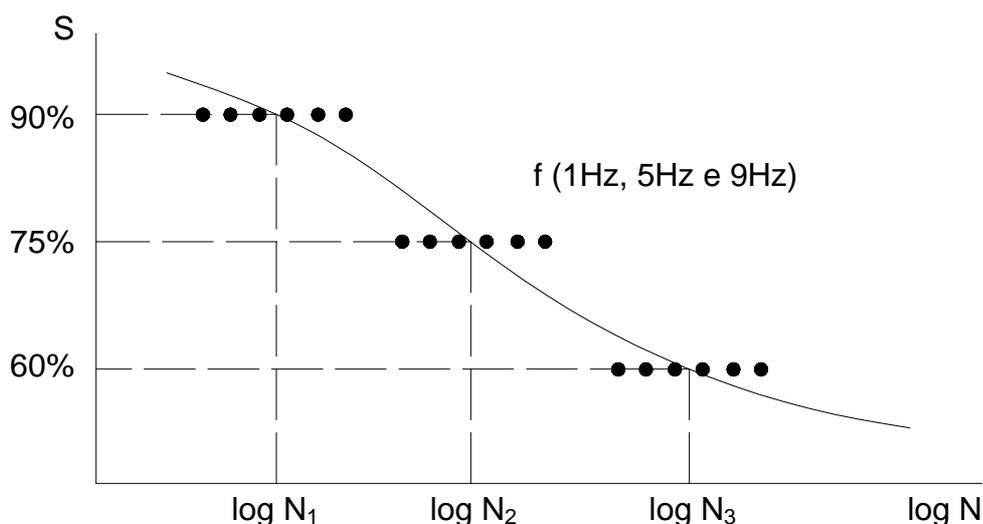


FIGURA 58 – Número de repetições em cada nível de tensão.

Este programa de ensaio foi definido com base na literatura, bem como nos ensaios preliminares realizados no LaMEM, sendo válido tanto para os corpos-de-prova de tração na emenda dentada quanto para os corpos-de-prova de madeira maciça ou controles. Não houve avaliação da rigidez para os níveis de tensão de 90% da resistência visto que os mesmos impõem danos imediatos aos corpos-de-prova, dificultando a coleta de dados para este tipo de análise.

4.4 Planejamento estatístico

A técnica empregada para o planejamento deste trabalho, foi motivada pela necessidade de se avaliar a resistência madeira maciça e das emendas dentadas à fadiga na tração para três níveis de tensão ($S_1 = 60\%$, $S_2 = 75\%$ e $S_3 = 90\%$ resistência) e três frequências de ensaio ($f_1 = 1$ Hz, $f_2 = 5$ Hz e $f_3 = 9$ Hz). Fatores como espécie de madeira, tipo de adesivo e tipo de corpo-de-prova (maciço ou com emenda) não foram considerados como variáveis.

Foram combinadas entre si as duas variáveis, nível de tensão (S) e frequência (f), com três variações distintas (S_i e f_i , onde $i = 1, 2$ e 3). A técnica estatística mais adequada para este problema é conhecida por "Planejamento Fatorial do tipo 3^2 ", MASON et al (1989) e MONTGOMERY (1991). Este tipo de planejamento consta de 2 fatores ou variáveis com 3

níveis cada um. Geralmente representam-se os fatores por letras maiúsculas (A,B) e seus níveis podem ser definidos por dígitos, como por exemplo, nível inferior (-1), intermediário (0) e superior (1).

A combinação desses fatores com os seus respectivos níveis ou variações totalizaram 9 grupos de ensaios e em cada grupo foram realizadas 6 repetições (Figura 57), com o propósito estimar o erro experimental. A Tabela 16 representa a matriz modelo de planejamento empregada na pesquisa experimental. Na Tabela 16, y_{11}, \dots, y_{9p^*} indicam as réplicas da resposta y .

TABELA 16 - Notações utilizadas no planejamento fatorial 3^2 , com p^* réplicas.

Ensaio (i)	Resposta (y)	Fatores	
		A	B
1	$y_{11} \dots y_{1p^*}$	-1	-1
2	$y_{21} \dots y_{2p^*}$	0	-1
3	$y_{31} \dots y_{3p^*}$	1	-1
4	$y_{41} \dots y_{4p^*}$	-1	0
5	$y_{51} \dots y_{5p^*}$	0	0
6	$y_{61} \dots y_{6p^*}$	1	0
7	$y_{71} \dots y_{7p^*}$	-1	1
8	$y_{81} \dots y_{8p^*}$	0	1
9	$y_{91} \dots y_{9p^*}$	1	1

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões dos ensaios estáticos e dinâmicos em corpos-de-prova com emendas dentadas e de madeira maciça.

5.1 Ensaio estáticos

Na análise dos resultados dos ensaios estáticos foi verificada a suposição de distribuição normal dos dados através de métodos descritivos e inferenciais, utilizando os recursos do software estatístico MINITAB. Nos casos onde não foi observada uma distribuição normal foram utilizadas técnicas de transformação de dados que permitem obter uma normalidade aproximada para os resultados, BOX et al (1978). As Figuras 59 a 64 exemplificam os procedimentos adotados na análise dos resultados estáticos para verificar a hipótese de distribuição normal e a transformação dos dados para obter valores mais próximos da referida distribuição.

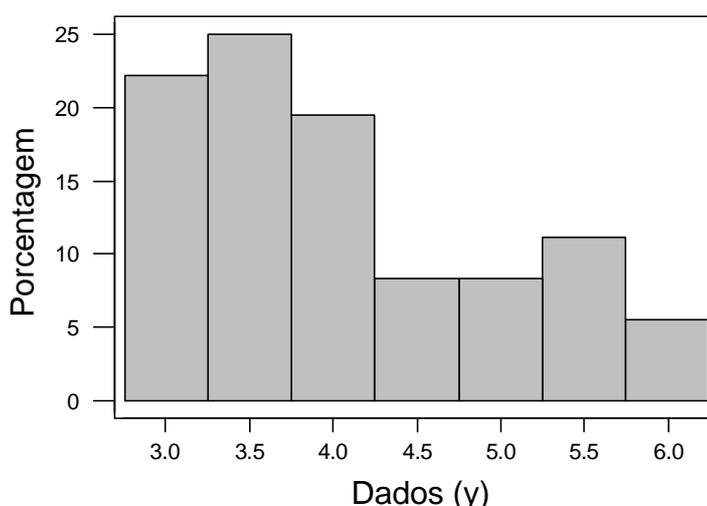


FIGURA 59 – Histograma dos resultados de resistência à tração das emendas dentadas para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

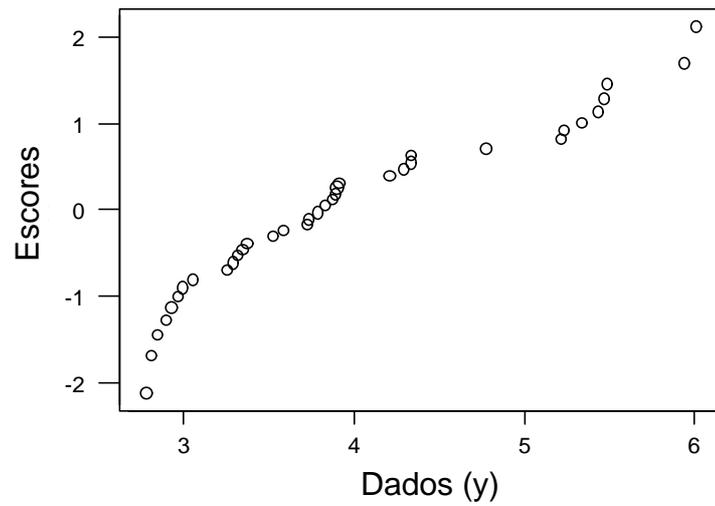


FIGURA 60 – Escores normais dos resultados resistência à tração das emendas dentadas para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

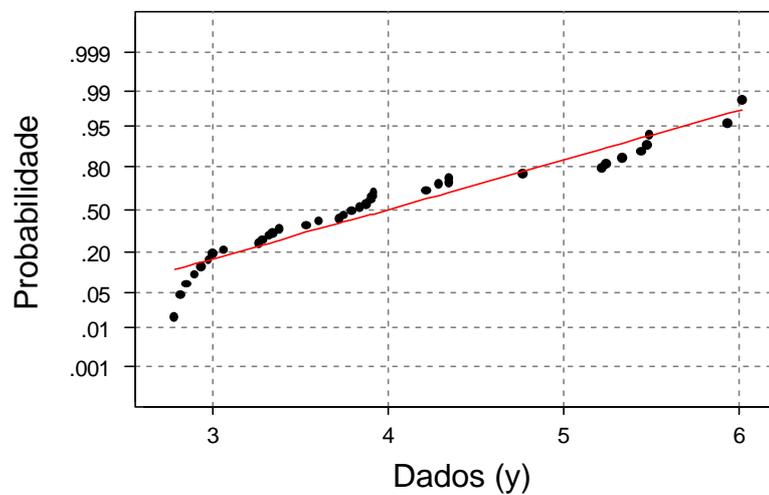


FIGURA 61 – Probabilidade normal dos resultados resistência à tração das emendas dentadas para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

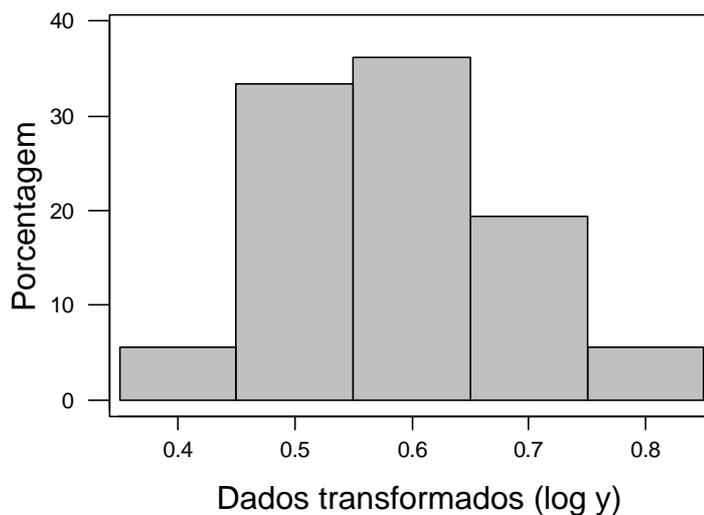


FIGURA 62 – Histograma dos resultados transformados de resistência à tração das emendas dentadas para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

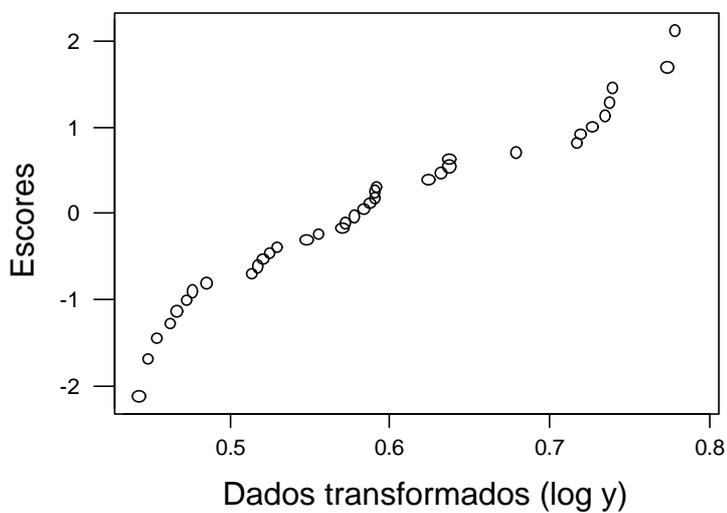


FIGURA 63 – Escores normais dos resultados transformados de resistência à tração das emendas dentadas para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

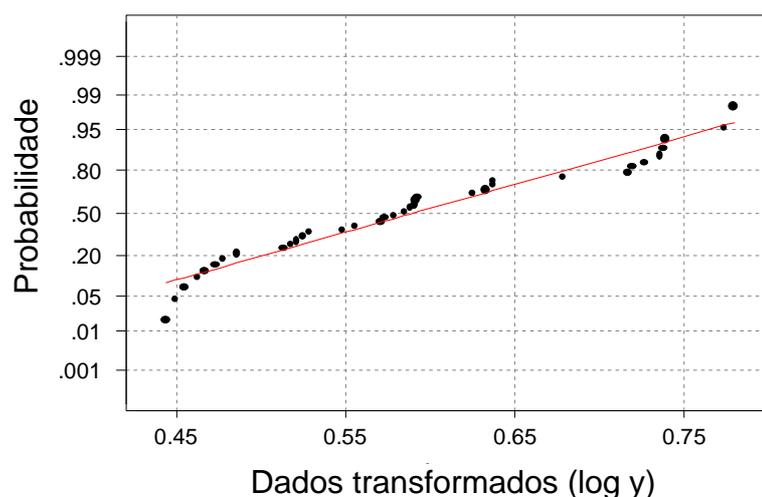


FIGURA 64 – Probabilidade normal dos resultados transformados de resistência à tração da madeira maciça para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

O histograma da Figura 59 juntamente com os gráficos dos escores normais e da probabilidade normal, Figuras 60 e 61, mostram que os dados apresentam uma distribuição que não pode ser considerada normal. A transformação dos dados permite que o histograma adquira uma distribuição aproximadamente simétrica (Figura 62), permitindo também que os gráficos dos escores normais e da probabilidade normal apresentem uma configuração mais próxima da linear, caracterizando uma distribuição normal aproximada.

Depois de determinados o valor médio e o desvio padrão para cada grupo de resultados, os valores característicos dos dados foram calculados segundo as recomendações da NBR 7190/97 item 6.4.7. Os resultados são apresentados na Tabela 17, onde os valores entre parênteses representam a relação entre as resistências das emendas dentadas e as resistências da madeira maciça. Estes valores mostram uma melhor eficiência das emendas dentadas de *Pinus caribea hondurensis* em relação às emendas de *Eucalyptus grandis*, e que as emendas coladas com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona foram mais eficientes quando comparadas às emendas coladas com o Cascophen, principalmente para o *Pinus Caribea hondurensis*.

TABELA 17 – Valores de resistência dos ensaios estáticos (kN/cm²)

Nº CP	Emenda dentada Cascophen		Emenda dentada Mamona		Madeira maciça	
	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus</i>
	log y	Normal	Normal	Normal	log y	Normal
1	3,350	8,108	3,138	8,938	4,213	8,767
2	3,533	7,401	2,180	4,756	3,569	8,339
3	3,596	6,908	2,019	4,798	3,697	7,610
4	4,213	6,390	2,240	4,613	4,125	8,144
5	3,378	6,308	1,928	7,182	4,726	8,677
6	3,786	6,372	3,104	5,990	5,016	8,478
7	3,912	6,313	1,918	6,427	3,717	7,574
8	3,873	5,844	2,119	6,051	3,904	7,830
9	4,341	6,269	3,906	5,278	3,117	4,902
10	4,775	6,520	4,027	5,813	3,416	4,041
11	3,259	6,218	4,505	6,023	4,882	9,623
12	4,292	6,418	4,315	5,989	4,879	10,346
13	3,724	5,995	3,219	7,999	7,290	6,899
14	3,742	6,980	4,158	4,052	6,763	7,089
15	2,850	6,326	4,768	3,791	7,100	8,175
16	3,906	5,912	4,600	3,867	5,862	7,480
17	2,779	6,990	3,422	3,545	5,177	9,566
18	5,485	6,284	4,777	3,539	3,750	6,747
19	5,440	6,391	4,752	3,712	3,968	10,893
20	5,945	5,957	3,916	4,831	4,561	8,894
21	6,019	3,964	4,805	7,508	5,270	7,553
22	5,473	3,242	5,112	8,995	3,614	6,694
23	5,337	7,982	4,418	6,568	4,812	9,039
24	5,240	7,189	4,803	6,483	4,884	6,017
25	5,213	7,018	4,439	5,718	6,985	7,694
26	3,840	5,892	4,336	4,667	7,013	9,215
27	3,293	5,318	4,437	5,877	7,210	8,125
28	2,971	3,565	4,515	4,990	-	-
29	2,813	3,882	6,956	6,732	-	-
30	3,350	3,817	6,427	7,073	-	-
31	3,533	4,615	4,348	6,792	-	-
32	3,596	4,761	6,958	8,393	-	-
33	4,213	2,900	5,940	7,467	-	-
34	3,378	2,778	5,365	6,347	-	-
35	3,786	3,155	5,554	6,774	-	-
36	3,912	4,829	4,635	6,627	-	-
37	-	6,469	-	-	-	-
Média	3,889 (81%)	5,710 (72%)	4,224 (88%)	5,950 (75%)	4,785	7,941
Desv. Pad.	1,262	1,438	1,321	1,488	1,295	1,508
Val. Carac.	2,779 (83%)	3,997 (72%)	2,957 (88%)	4,165 (75%)	3,350	5,559

Quanto aos modos de ruptura das emendas dentadas, os mais comuns são representados na Tabela 18. Os modos de ruptura de todos os corpos-de-prova usados nos ensaios estáticos são apresentados nas tabelas do Anexo A.1.

TABELA 18 – Modos de ruptura das emendas dentadas

Tipo	Modos de ruptura				
1	1a			1b	
	1c			1d	
2	2a			2b	
	2c			2d	

Os modos de ruptura observados nos ensaios desta fase do estudo confirmam o que foi observado nos ensaios preliminares. As rupturas dos corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* ocorreram na grande maioria na interface madeira/adesivo, enquanto que para os corpos-de-prova de *Pinus caribea hondurensis* as rupturas quase sempre envolveram a madeira, Tabela 19. É interessante ressaltar que dos dois tipos da Tabela 18, os dois modos de ruptura que tiveram a maior incidência foram o do Tipo 1a para o *Pinus caribea hondurensis* e o do Tipo 2a para o *Eucalyptus grandis*, conforme mostrado na Tabela 19.

TABELA 19 – Incidência dos modos de ruptura para as emendas dentadas obtidas nos ensaios estáticos

Tipos	Emenda dentada			
	Cascophen		Mamona	
	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus</i>
1	92%	14%	100%	12%
2	8%	86%	0%	78%
1a	61%	-	53%	-
2a	-	78%	-	67%

5.2 Ensaios cíclicos

Nos ensaios cíclicos foram avaliados os modos de ruptura das emendas dentadas, assim como o número de ciclos correspondentes à resistência a fadiga e a variação da rigidez em função do número de ciclos para emenda

dentada e para a madeira maciça.

5.2.1 Modos de ruptura das emendas dentadas

A ruptura por fadiga na tração das emendas dentadas foi de uma forma geral semelhante a sua ruptura estática, ou seja, as rupturas dos corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis* ocorreram principalmente na interface madeira/adesivo, enquanto que para os corpos-de-prova de *Pinus caribea hondurensis* as rupturas na maioria dos casos envolveram a madeira, Tabela 20. Os modos de ruptura de todos os corpos-de-prova usados nos ensaios cíclicos são ilustrados no Anexo A.3.

TABELA 20 – Incidência dos modos de ruptura para as emendas dentadas obtidas nos ensaios cíclicos

Tipos de ruptura	Emenda dentada			
	Cascophen		Mamona	
	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Eucalyptus</i>
1	85%	17%	89%	14%
2	15%	83%	11%	76%
1a	54%	-	48%	-
2a	-	72%	-	63%

Obs: Os valores apresentados nesta tabela são baseados nos modos de ruptura da Tabela 18.

5.2.2 Verificação da normalidade

Como apresentado na literatura, a variabilidade dos resultados dos ensaios de fadiga é maior para os corpos-de-prova ensaiados nos níveis mais baixos de tensão, sendo necessário para se determinar a relação entre a tensão e número de ciclos através de regressão, uma transformação dos dados, já que a dispersão dos resultados para os dados originais (N) não é constante. Em geral, assume-se que a distribuição dos logaritmos das vidas à fadiga é normal, ou seja, o log N é normalmente distribuído. Esta hipótese foi verificada para todos os grupos de ensaios cíclicos realizados neste estudo e encontram-se exemplificadas nas Figuras 65 a 68.

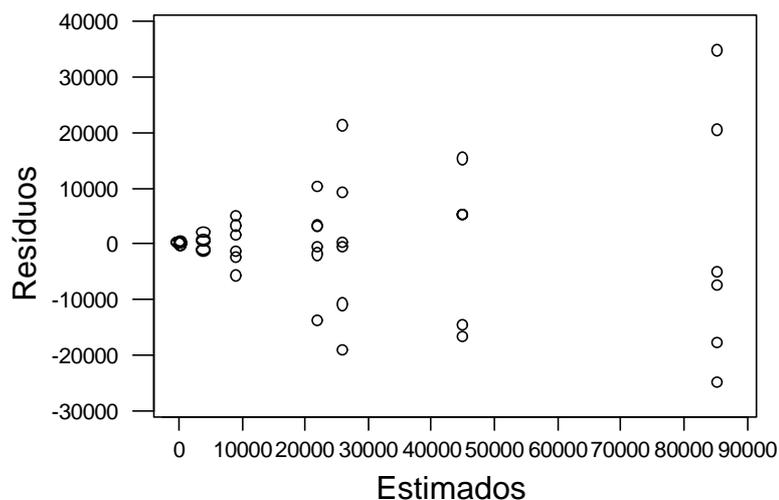


FIGURA 65 – Gráficos dos resíduos x valores estimados para a emenda dentada de *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

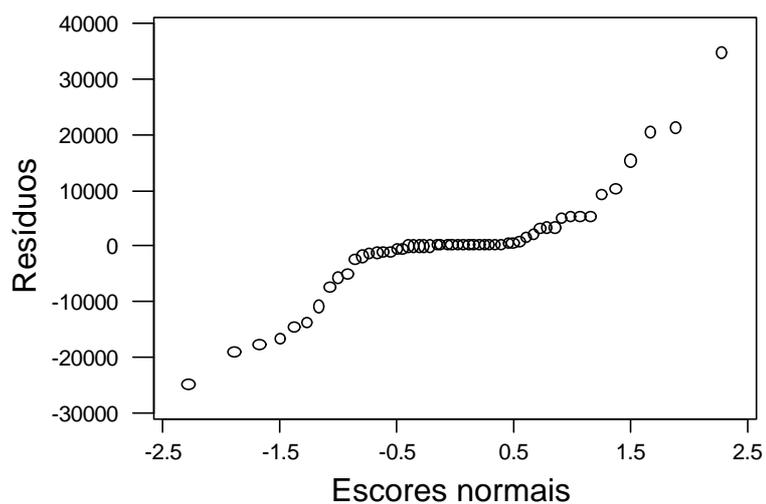


FIGURA 66 – Gráficos dos resíduos x escores normais para a emenda dentada de *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

Da Figura 65 pode-se concluir que a variância não é constante, tomando a forma de um funil. A Figura 66 mostra que os resíduos não estão normalmente distribuídos, pois o gráfico dos resíduos versus os escores normais não segue uma linha reta, portanto a distribuição dos dados originais não é considerada normal, BOX et al (1978). A seguir estes dois tipos de gráficos são construídos utilizando-se os dados transformados (log N), Figuras 67 e 68.

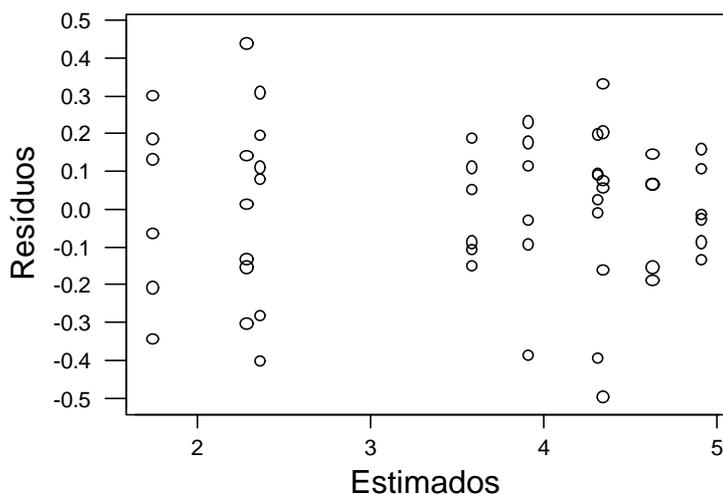


FIGURA 67 – Gráficos dos resíduos x valores estimados para a emenda dentada de *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen (dados transformados).

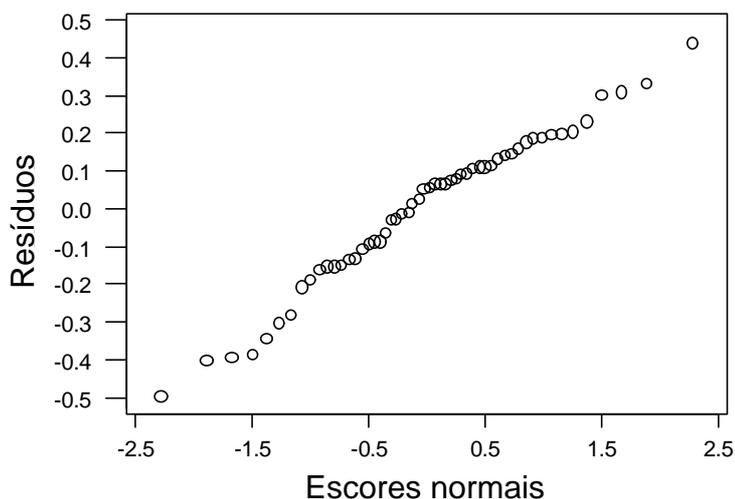


FIGURA 68 – Gráficos dos resíduos x escores normais para a emenda dentada de *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen (dados transformados).

Com os dados transformados a variância torna-se praticamente constante (Figura 67) e o gráfico dos resíduos versus os escores normais assume uma distribuição aproximadamente linear (Figura 68), o que indica uma distribuição normal aproximada.

5.2.3 Resistência à fadiga

Na análise dos resultados de resistência à fadiga, procurou-se determinar os valores mais significativos dos efeitos das variáveis independentes

individualmente e de suas interações até 2ª ordem, sobre a variável resposta (número de ciclos). Com o auxílio do programa estatístico MINITAB foi elaborada a sub-rotina do *Algoritmo de Yates*¹². Estes efeitos são quantificados na coluna “efeitos” e identificados na coluna “identificação” das tabelas “*Efeitos significativos das variáveis e suas interações*”, bem como através das figuras “*Efeitos x Escores normais*”. Os valores plotados nestes gráficos, não alinhados, são provavelmente os valores mais significativos. As tabelas “*Intervalo de confiança a 95%*” (colunas “*limite inferior - efeitos - limite superior*”) auxiliam na confirmação dos valores detectados nos gráficos efeitos x escores normais, por meio dos intervalos que não contiverem o zero.

5.2.3.1 Emenda dentada: *Pinus caribea hondurensis* e adesivo Cascophen

Na Tabela 21 são apresentados os dados originais dos números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga na tração das emendas dentadas de *Pinus caribea hondurensis* coladas com o adesivo Cascophen. Na Tabela 22 estes dados são apresentados, por combinação de parâmetros e níveis, na forma transformada ($Y = \log N$).

TABELA 21 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para *Pinus caribea hondurensis* e adesivo Cascophen (dados originais)

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis Dependentes (N)					
	f	S	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆
1	1	60	20007	25001	8232	32240	21424	25254
2	5	60	50144	27771	30155	60000	50018	50178
3	9	60	80000	60348	67514	120062	78108	105919
4	1	75	4368	2738	3150	6003	5001	3027
5	5	75	14019	12315	10692	3374	6667	7655
6	9	75	26214	47513	25374	35325	15180	7027
7	1	90	85	34	48	110	25	75
8	5	90	272	145	98	138	202	542
9	9	90	364	301	92	473	121	279

Os valores y₁, y₂, y₃, y₄, y₅ e y₆ são as réplicas.

¹² O Algoritmo de Yates é uma técnica de análise de dados consagrada que pode ser usada para calcular efeitos individualmente, até 2ª ordem, para planejamentos fatoriais 3^k, BOX et al (1978). Os valores dos efeitos calculados através desta técnica são compatíveis com os valores estimados através de técnicas de regressão múltiplas.

TABELA 22 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen (dados transformados)

Ensaio	Variáveis Independentes		Variáveis Dependentes (log N)						
	f	S	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	\bar{Y}
1	1	60	4,30118	4,39796	3,91551	4,50840	4,33090	4,40233	4,30938
2	5	60	4,70022	4,44359	4,47936	4,77815	4,69913	4,70051	4,63349
3	9	60	4,90309	4,78066	4,82939	5,07941	4,89270	5,02497	4,91837
4	1	75	3,64028	3,43743	3,49831	3,77837	3,69906	3,48101	3,58908
5	5	75	4,14672	4,09043	4,02906	3,52815	3,82393	3,88395	3,91704
6	9	75	4,41853	4,67681	4,40439	4,54808	4,18127	3,84677	4,34598
7	1	90	1,92942	1,53148	1,68124	2,04139	1,39794	1,87506	1,74276
8	5	90	2,43457	2,16137	1,99123	2,13988	2,30535	2,73400	2,29440
9	9	90	2,56110	2,47857	1,96379	2,67486	2,08279	2,44560	2,36778

Os valores Y₁, Y₂, Y₃, Y₄, Y₅, Y₆ e \bar{Y} são as réplicas e a média da variável resposta, respectivamente.

As análises dos valores encontrados nas Tabelas 23 e 24, e a análise gráfica da Figura 69, permitem identificar os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações.

TABELA 23 - Efeitos significativos das variáveis e suas interações na resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

Ensaio	Resposta	(1)	(2)	Divisor	Efeitos	Identificação	SQ
1	25,8563	83,1674	192,710	54	3,56870	Média	687,722
2	27,8010	71,1126	11,946	36	0,33182	f	3,964
3	29,5102	38,4296	-2,499	108	-0,02314	f ²	0,058
4	21,5345	3,6540	-44,738	36	-1,24272	S	55,596
5	23,5022	4,5414	0,096	24	0,00401	fS	0,000
6	26,0759	3,7502	-2,634	72	-0,03659	f ² S	0,096
7	10,4565	-0,2354	-20,628	108	-0,19100	S ²	3,940
8	13,7664	0,6059	-1,679	72	-0,02331	fS ²	0,039
9	14,2067	-2,8695	-4,317	216	-0,01998	f ² S ²	0,086

Obs: As colunas Resposta, (1), (2), Divisor e SQ são passos do Algoritmo de Yates, BOX et al (1978).

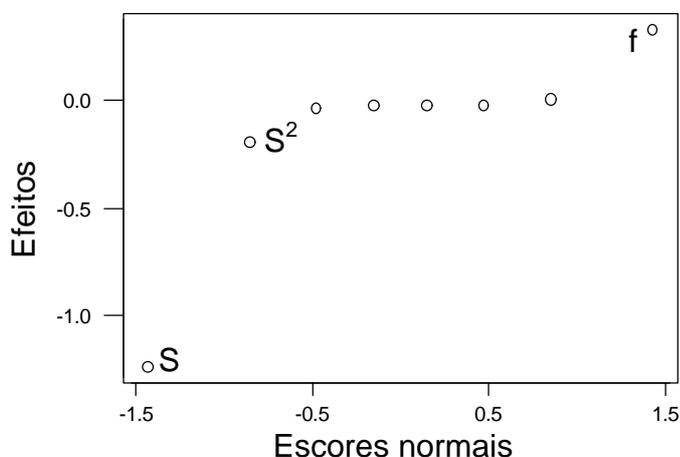


FIGURA 69 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

TABELA 24 – Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

Ensaio	Lim. Inferior	Efeitos	Lim. Superior	Identificação
1	3,50965	3,56870	3,62775	Média
2	0,27277	0,33182	0,39087	f
3	-0,08219	-0,02314	0,03591	f ²
4	-1,30177	-1,24272	-1,18367	S
5	-0,05504	0,00401	0,06306	fS
6	-0,09564	-0,03659	0,02247	f ² S
7	-0,25005	-0,19100	-0,13195	S ²
8	-0,08237	-0,02331	0,03574	fS ²
9	-0,07904	-0,01998	0,03907	f ² S ²

Os resultados apresentados nas Tabelas 23 e 24, e a análise da Figura 69, definem o efeito linear da tensão (S), o efeito linear da frequência (f) e o efeito quadrático da tensão (S²) como os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações, sendo o primeiro o fator preponderante. A Figura 70 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates para as emendas dentadas de *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

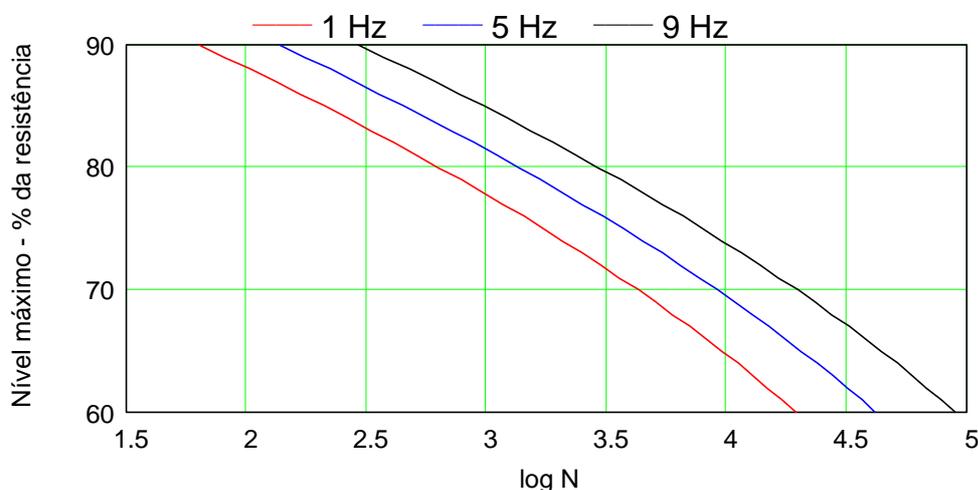


FIGURA 70 – Curvas S-N das emendas dentadas para o *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

5.2.3.2 Emenda dentada: *Pinus caribea hondurensis* e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona

Na Tabela 25 são apresentados os dados originais dos números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga na tração das emendas dentadas

de *Pinus caribea hondurensis* coladas com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. Na Tabela 26 estes dados são apresentados, por combinação de parâmetros e níveis, na forma transformada ($Y = \log N$).

TABELA 25 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para *Pinus caribea hondurensis* e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (dados originais)

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis Dependentes (N)					
	f	S	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆
1	1	60	20269	28210	32824	18370	18865	33526
2	5	60	40011	48331	45326	72388	38887	31605
3	9	60	105933	89235	37879	104860	34625	122984
4	1	75	3459	7229	6337	4237	5445	2513
5	5	75	10095	3295	13724	9144	9127	4138
6	9	75	24629	20084	33358	22472	18430	15161
7	1	90	58	38	19	78	90	81
8	5	90	256	201	96	276	544	139
9	9	90	193	157	328	260	509	286

Os valores y₁, y₂, y₃, y₄, y₅ e y₆ são as réplicas.

TABELA 26 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (dados transformados)

Ensaio	Variáveis Independentes		Variáveis Dependentes (log N)						
	f	S	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	\bar{Y}
1	1	60	4,30683	4,45040	4,51619	4,26411	4,27566	4,52538	4,38976
2	5	60	4,60218	4,68423	4,65635	4,85967	4,58980	4,49976	4,64866
3	9	60	5,02503	4,95054	4,57840	5,02061	4,53939	5,08985	4,86730
4	1	75	3,53895	3,85908	3,80188	3,62706	3,73600	3,40019	3,66053
5	5	75	4,00411	3,51786	4,13748	3,96114	3,96033	3,61679	3,86628
6	9	75	4,39145	4,30285	4,52320	4,35164	4,26553	4,18073	4,33590
7	1	90	1,76343	1,57978	1,27875	1,89209	1,95424	1,90849	1,72946
8	5	90	2,40824	2,30320	1,98227	2,44091	2,73560	2,14301	2,33554
9	9	90	2,28556	2,19590	2,51587	2,41497	2,70672	2,45637	2,42923

Os valores Y₁, Y₂, Y₃, Y₄, Y₅, Y₆ e \bar{Y} são as réplicas e a média da variável resposta, respectivamente.

As análises dos valores encontrados nas Tabelas 27 e 28, e análise gráfica da Figura 71, permitem identificar os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações.

TABELA 27 - Efeitos significativos das variáveis e suas interações na resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

Ensaio	Resposta	(1)	(2)	Divisor	Efeitos	Identificação	SQ
1	26,3386	83,4344	193,576	54	3,58474	Média	693,920
2	27,8920	71,1763	11,116	36	0,30878	f	3,432
3	29,2038	38,9654	-1,733	108	-0,01604	f²	0,028
4	21,9632	2,8652	-44,469	36	-1,23525	S	54,930
5	23,1977	4,0522	1,333	24	0,05556	fS	0,074
6	26,0154	4,1986	-2,833	72	-0,03934	f²S	0,111
7	10,3768	-0,2416	-19,953	108	-0,18475	S²	3,686
8	14,0132	1,5832	-1,041	72	-0,01445	fS²	0,015
9	14,5754	-3,0743	-6,482	216	-0,03001	f²S²	0,195

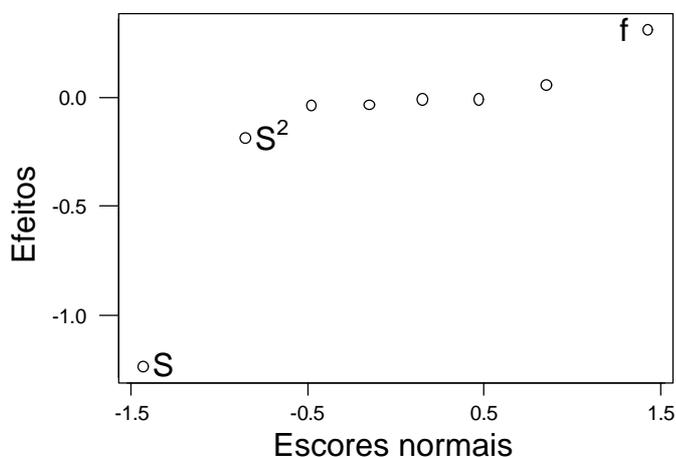


FIGURA 71 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

TABELA 28 – Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

Ensaio	Lim. Inferior	Efeitos	Lim. Superior	Identificação
1	3,53154	3,58474	3,63794	Média
2	0,25558	0,30878	0,36198	f
3	-0,06924	-0,01604	0,03715	f²
4	-1,28845	-1,23525	-1,18205	S
5	0,00236	0,05556	0,10876	fS
6	-0,09254	-0,03934	0,01386	f²S
7	-0,23795	-0,18475	-0,13155	S²
8	-0,06765	-0,01445	0,03875	fS²
9	-0,08321	-0,03001	0,02319	f²S²

Os resultados apresentados nas Tabelas 27 e 28, e a análise da Figura 71, definem o efeito linear da tensão (S), o efeito linear da frequência (f) e o efeito quadrático da tensão (S²) como os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações, sendo o primeiro o fator preponderante. A

Figura 72 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates para as emendas dentadas de *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

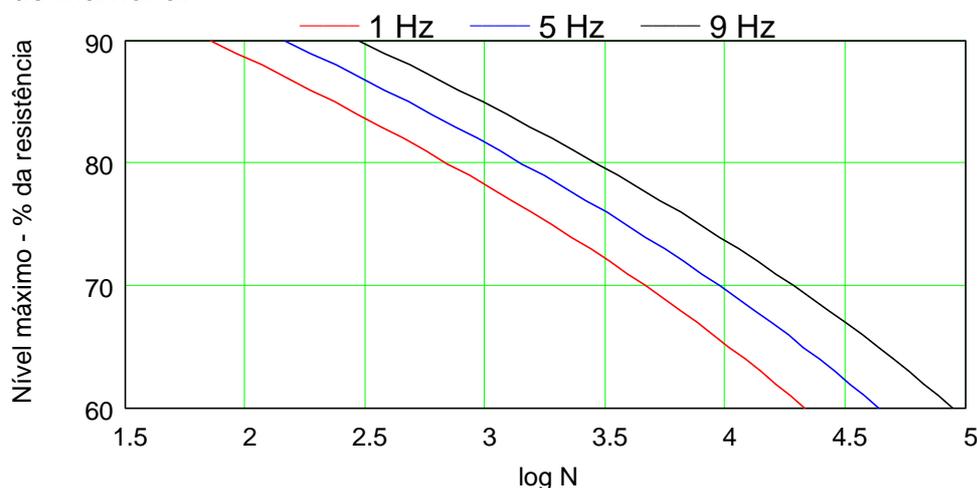


FIGURA 72 – Curvas S-N das emendas dentadas para o *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

5.2.3.3 Emenda dentada: *Eucalyptus grandis* e adesivo Cascophen

Na Tabela 29 são apresentados os dados originais dos números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga na tração das emendas dentadas de *Eucalyptus grandis* coladas com o adesivo Cascophen. Na Tabela 30 estes dados são apresentados, por combinação de parâmetros e níveis, na forma transformada ($Y = \log N$).

TABELA 29 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para *Eucalyptus grandis* e o adesivo Cascophen (dados originais)

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis Dependentes (N)					
	f	S	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆
1	1	60	30000	26052	16135	36250	25161	16019
2	5	60	50073	35106	26022	66561	21410	47202
3	9	60	80135	40166	70910	101142	104429	95920
4	1	75	6007	2924	6014	2075	4321	5378
5	5	75	9205	4138	13371	6027	10327	9535
6	9	75	25796	51125	30239	10556	17613	31451
7	1	90	69	31	108	67	49	40
8	5	90	325	264	139	216	413	335
9	9	90	627	155	198	400	130	203

Os valores y₁, y₂, y₃, y₄, y₅ e y₆ são as réplicas.

TABELA 30 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para *Eucalyptus grandis* e o adesivo Cascophen (dados transformados)

Ensaio	Variáveis Independentes		Variáveis Dependentes (log N)						
	f	S	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	\bar{Y}
1	1	60	4,47712	4,41584	4,20777	4,55931	4,40073	4,20464	4,37757
2	5	60	4,69960	4,54538	4,41534	4,82322	4,33062	4,67396	4,58135
3	9	60	4,90382	4,60386	4,85071	5,00493	5,01882	4,98191	4,89401
4	1	75	3,77866	3,46598	3,77916	3,31702	3,63558	3,73062	3,61784
5	5	75	3,96402	3,61679	4,12616	3,78010	4,01397	3,97932	3,91340
6	9	75	4,41155	4,70863	4,48057	4,02350	4,24583	4,49763	4,39462
7	1	90	1,83885	1,49136	2,03342	1,82607	1,69020	1,60206	1,74699
8	5	90	2,51188	2,42160	2,14301	2,33445	2,61595	2,52504	2,42533
9	9	90	2,79727	2,19033	2,29667	2,60206	2,11394	2,30750	2,38463

Os valores Y₁, Y₂, Y₃, Y₄, Y₅, Y₆ e \bar{Y} são as réplicas e a média da variável resposta, respectivamente.

As análises dos valores encontrados nas Tabelas 31 e 32, e análise gráfica da Figura 73, permitem identificar os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações.

TABELA 31 - Efeitos significativos das variáveis e suas interações na resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo Cascophen.

Ensaio	Resposta	(1)	(2)	Divisor	Efeitos	Identificação	SQ
1	26,2654	83,1176	194,014	54	3,59286	Média	697,066
2	27,4881	71,5551	11,585	36	0,32181	f	3,728
3	29,3640	39,3417	-2,547	108	-0,02358	f ²	0,060
4	21,7070	3,0986	-43,776	36	-1,21600	S	53,231
5	23,4804	4,6607	0,727	24	0,03030	fS	0,022
6	26,3677	3,8258	-4,967	72	-0,06899	f ² S	0,343
7	10,4820	0,6532	-20,651	108	-0,19121	S ²	3,949
8	14,5520	1,1140	-2,397	72	-0,03329	fS ²	0,080
9	14,3078	-4,3142	-5,889	216	-0,02726	f ² S ²	0,161

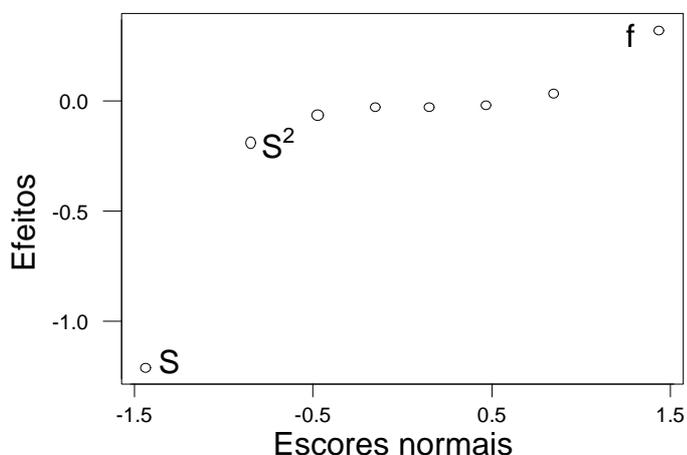


FIGURA 73 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo Cascophen.

TABELA 32 – Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo Cascophen.

Ensaio	Lim. Inferior	Efeitos	Lim. Superior	Identificação
1	3,54114	3,59286	3,64458	Média
2	0,27009	0,32181	0,37353	f
3	-0,07530	-0,02358	0,02813	f ²
4	-1,26771	-1,21600	-1,16428	S
5	-0,02142	0,03030	0,08201	fS
6	-0,12071	-0,06899	-0,01727	f ² S
7	-0,24293	-0,19121	-0,13950	S ²
8	-0,08501	-0,03329	0,01843	fS ²
9	-0,07898	-0,02726	0,02445	f ² S ²

Os resultados apresentados nas Tabelas 31 e 32, e a análise da Figura 73, definem o efeito linear da tensão (S), o efeito linear da frequência (f) e o efeito quadrático da tensão (S²) como os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações, sendo o primeiro o fator preponderante. A Figura 74 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates para as emendas dentadas de *Eucalyptus grandis* e o Cascophen.

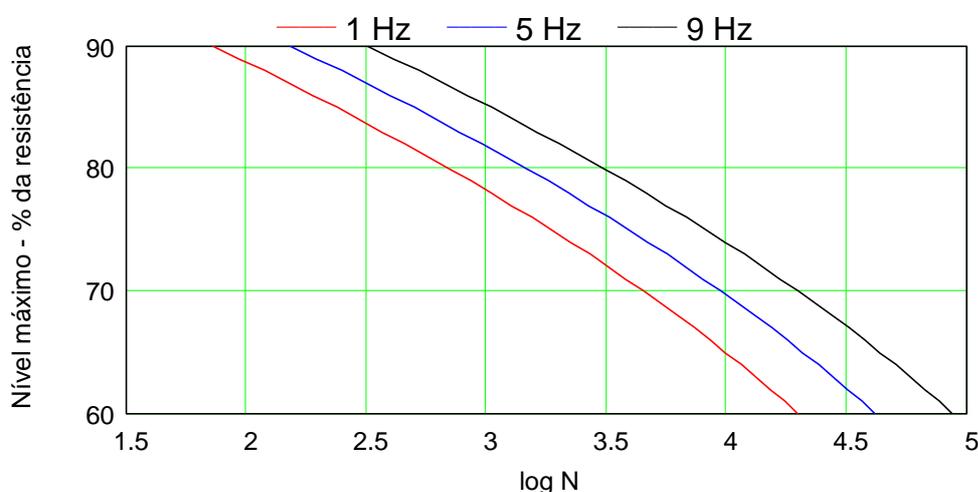


FIGURA 74 – Curvas S-N das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo Cascophen.

5.2.3.4 Emenda dentada: *Eucalyptus grandis* e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona

Na Tabela 33 são apresentados os dados originais dos números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga na tração das emendas dentadas de *Eucalyptus grandis* coladas com o adesivo poliuretano à base de óleo de

mamona. Na Tabela 34 estes dados são apresentados, por combinação de parâmetros e níveis, na forma transformada ($Y = \log N$).

TABELA 33 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (dados originais)

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis Dependentes (N)					
	f	S	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆
1	1	60	32412	16138	20073	25765	46278	9654
2	5	60	67434	50000	20788	63208	46081	44230
3	9	60	70819	108540	117265	39331	97100	62769
4	1	75	6452	6349	3798	3199	6294	4255
5	5	75	12764	7386	9640	5268	5624	8561
6	9	75	26638	21256	18870	15358	38047	8099
7	1	90	72	49	11	56	155	53
8	5	90	234	214	116	212	509	387
9	9	90	295	247	318	159	321	593

Os valores y₁, y₂, y₃, y₄, y₅ e y₆ são as réplicas.

TABELA 34 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (dados transformados)

Ensaio	Variáveis Independentes		Variáveis Dependentes (log N)						
	f	S	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Ȳ
1	1	60	4,51071	4,20785	4,30261	4,41103	4,66537	3,98471	4,34705
2	5	60	4,82888	4,69897	4,31781	4,80077	4,66352	4,64572	4,65928
3	9	60	4,85015	5,03559	5,06917	4,59474	4,98722	4,79775	4,88910
4	1	75	3,80969	3,80271	3,57956	3,50501	3,79893	3,62890	3,68747
5	5	75	4,10599	3,86841	3,98408	3,72165	3,75005	3,93252	3,89378
6	9	75	4,42550	4,32748	4,27577	4,18633	4,58032	3,90843	4,28397
7	1	90	1,85733	1,69020	1,04139	1,74819	2,19033	1,72428	1,70862
8	5	90	2,36922	2,33041	2,06446	2,32634	2,70672	2,58771	2,39748
9	9	90	2,46982	2,39270	2,50243	2,20140	2,50651	2,77305	2,47432

Os valores Y₁, Y₂, Y₃, Y₄, Y₅, Y₆ e Ȳ são as réplicas e a média da variável resposta, respectivamente.

As análises dos valores encontrados nas Tabelas 35 e 36, e análise gráfica da Figura 75, permitem identificar os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações.

TABELA 35 - Efeitos significativos das variáveis e suas interações na resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

Ensaio	Resposta	(1)	(2)	Divisor	Efeitos	Identificação	MS
1	26,0823	83,3726	194,046	54	3,59345	Média	697,296
2	27,9557	71,1913	11,426	36	0,31738	f	3,626
3	29,3346	39,4825	-3,063	108	-0,02836	f²	0,087
4	22,1248	3,2523	-43,890	36	-1,21917	S	53,509
5	23,3627	3,5790	1,342	24	0,05591	fS	0,075
6	25,7038	4,5942	-3,178	72	-0,04413	f²S	0,140
7	10,2517	-0,4945	-19,528	108	-0,18081	S²	3,531
8	14,3849	1,1033	0,688	72	0,00956	fS²	0,007
9	14,8459	-3,6721	-6,373	216	-0,02950	f²S²	0,188

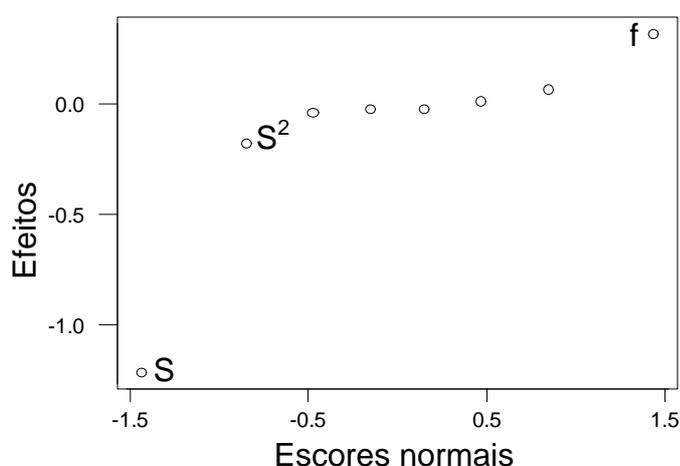


FIGURA 75 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

TABELA 36 – Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona

Ensaio	Lim. Inferior	Efeitos	Lim. Superior	Identificação
1	3,53456	3,59345	3,65234	Média
2	0,25848	0,31738	0,37627	f
3	-0,08726	-0,02836	0,03053	f²
4	-1,27806	-1,21917	-1,16028	S
5	-0,00298	0,05591	0,11480	fS
6	-0,10303	-0,04413	0,01476	f²S
7	-0,23970	-0,18081	-0,12192	S²
8	-0,04933	0,00956	0,06845	fS²
9	-0,08840	-0,02950	0,02939	f²S²

Os resultados apresentados nas Tabelas 35 e 36, e a análise da Figura 75, definem o efeito linear da tensão (S), o efeito linear da frequência (f) e o efeito quadrático da tensão (S²) como os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações, sendo o primeiro o fator preponderante. A

Figura 76 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates para as emendas dentadas de *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

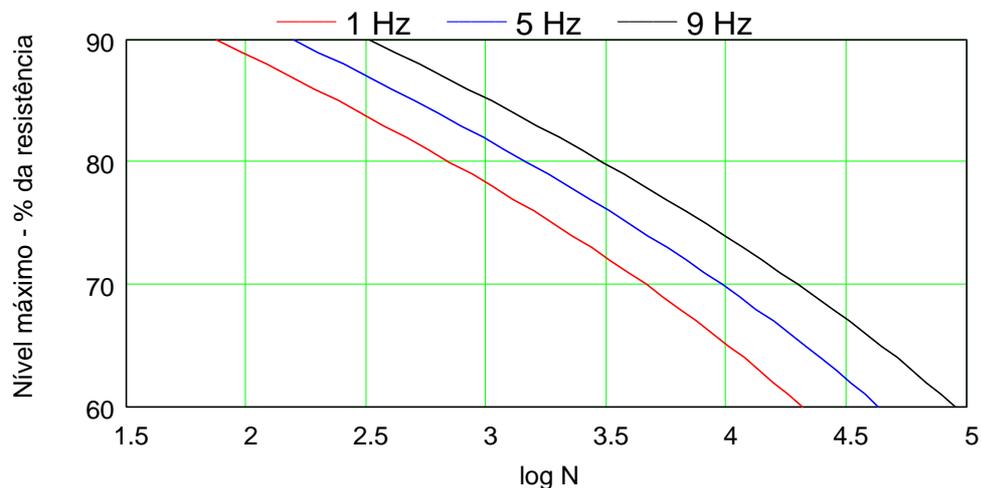


FIGURA 76 - Curvas S-N das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

5.2.3.5 Madeira maciça: *Pinus caribea hondurensis*

Na Tabela 37 são apresentados os dados originais dos números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga na madeira maciça para *Pinus caribea hondurensis*. Na Tabela 38 estes dados são apresentados, por combinação de parâmetros e níveis, na forma transformada ($Y = \log N$).

TABELA 37 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga da madeira maciça para o *Pinus caribea hondurensis* (dados originais)

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis Dependentes (N)					
	f	S	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆
1	1	60	211480	430899	204017	229270	252510	400197
2	5	60	900005	703389	1794615	1149067	1382568	791034
3	9	60	793417	1106942	1814582	1264336	1330109	1016584
4	1	75	93432	118610	178388	66818	72917	87134
5	5	75	360056	124050	309413	163539	253120	219832
6	9	75	150375	241314	454026	264474	297954	373929
7	1	90	91	57	21	139	113	87
8	5	90	187	417	348	617	584	381
9	9	90	103	325	649	619	669	925

Os valores y₁, y₂, y₃, y₄, y₅ e y₆ são as réplicas.

TABELA 38 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga da madeira maciça para o *Pinus caribea hondurensis* (dados transformados)

Ensaio	Variáveis Independentes		Variáveis Dependentes (log N)						
	f	S	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	\bar{Y}
1	1	60	5,32527	5,63438	5,30967	5,36035	5,40228	5,60227	5,43903
2	5	60	5,95425	5,84720	6,25397	6,06035	6,14069	5,89820	6,02577
3	9	60	5,89950	6,04413	6,25878	6,10186	6,12389	6,00714	6,07255
4	1	75	4,97050	5,07412	5,25137	4,82489	4,86283	4,94019	4,98732
5	5	75	5,55637	5,09360	5,49054	5,21362	5,40333	5,34209	5,34992
6	9	75	5,17718	5,38258	5,65708	5,42238	5,47415	5,57279	5,44769
7	1	90	1,95904	1,75587	1,32222	2,14301	2,05308	1,93952	1,86212
8	5	90	2,27184	2,62014	2,54158	2,79029	2,76641	2,58092	2,59520
9	9	90	2,01284	2,51188	2,81224	2,79169	2,82543	2,96614	2,65337

Os valores Y₁, Y₂, Y₃, Y₄, Y₅, Y₆ e \bar{Y} são as réplicas e a média da variável resposta, respectivamente.

As análises dos valores encontrados nas Tabelas 39 e 40, e análise gráfica da Figura 77, permitem identificar os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações.

TABELA 39 - Efeitos significativos das variáveis e suas interações na resistência à fadiga da madeira maciça para o *Pinus caribea hondurensis*.

Ensaio	Resposta	(1)	(2)	Divisor	Efeitos	Identificação	SQ
1	32,6342	105,224	242,598	54	4,49255	Média	1089,88
2	36,1546	94,710	11,311	36	0,31419	f	3,55
3	36,4353	42,664	-8,878	108	-0,08221	f ²	0,73
4	29,9239	3,801	-62,560	36	-1,73778	S	108,72
5	32,0995	2,762	0,946	24	0,03943	fS	0,04
6	32,6862	4,747	-0,810	72	-0,01124	f ² S	0,01
7	11,1727	-3,240	-41,531	108	-0,38455	S ²	15,97
8	15,5712	-1,589	3,024	72	0,04200	fS ²	0,13
9	15,9202	-4,049	-4,111	216	-0,01903	f ² S ²	0,08

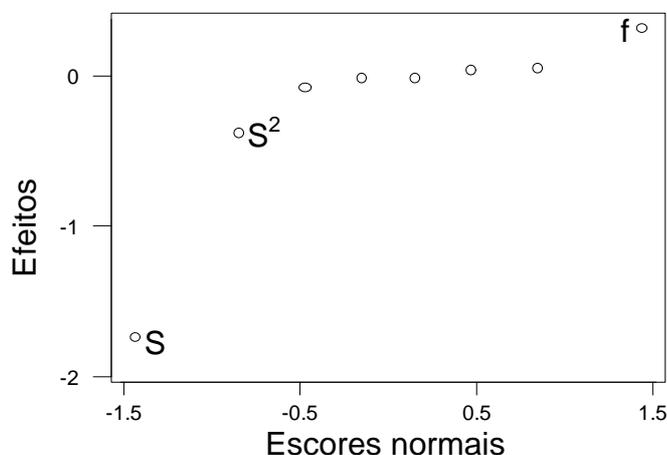


FIGURA 77 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga da madeira maciça para o *Pinus caribea hondurensis*.

TABELA 40 – Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga da madeira maciça para o *Pinus caribea hondurensis*

Ensaio	Lim. Inferior	Efeitos	Lim. Superior	Identificação
1	4,43752	4,49255	4,54759	0
2	0,25916	0,31419	0,36922	f
3	-0,13724	-0,08221	-0,02717	f²
4	-1,79281	-1,73778	-1,68275	S
5	-0,01560	0,03943	0,09447	fS
6	-0,06628	-0,01124	0,04379	f²S
7	-0,43958	-0,38455	-0,32951	S²
8	-0,01303	0,04200	0,09703	fS²
9	-0,07407	-0,01903	0,03600	f²S²

Os resultados apresentados nas Tabelas 39 e 40, e a análise da Figura 77, definem o efeito linear da tensão (S), o efeito linear da frequência (f) e o efeito quadrático da tensão (S²) como os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações, sendo o primeiro o fator preponderante. A Figura 78 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates para a madeira maciça de *Pinus caribea hondurensis*.

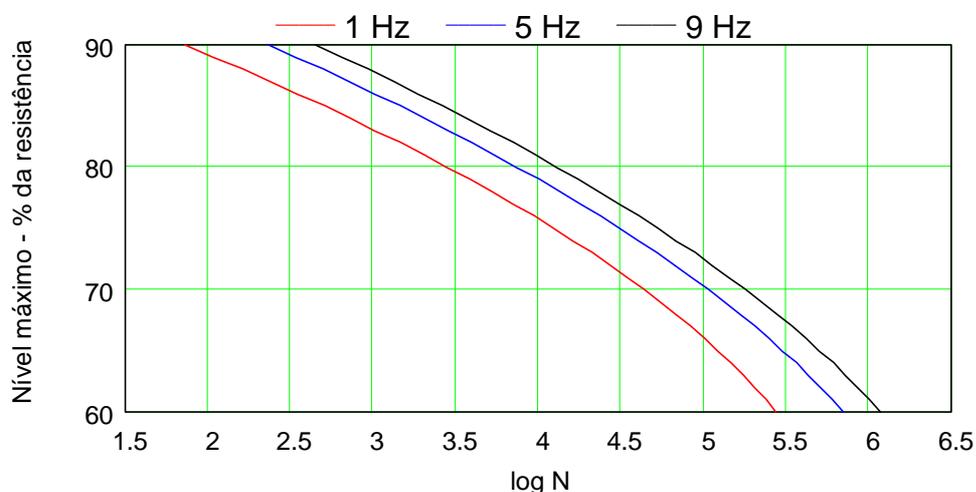


FIGURA 78 - Curvas S-N da madeira maciça para o *Pinus caribea hondurensis*.

5.2.3.6 Madeira maciça: *Eucalyptus grandis*

Na Tabela 41 são apresentados os dados originais dos números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga na madeira maciça para *Eucalyptus grandis*. Na Tabela 42 estes dados são apresentados, por combinação de parâmetros e níveis, na forma transformada ($Y = \log N$).

TABELA 41 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga da madeira maciça para o *Eucalyptus grandis* (dados originais)

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis Dependentes (N)					
	f	S	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆
1	1	60	300060	447727	256633	483367	428444	180865
2	5	60	1601572	902906	1310678	867411	1413229	1887691
3	9	60	963383	1367100	1410236	1145759	1145760	1535709
4	1	75	153472	124896	81872	94734	77639	114332
5	5	75	339606	255226	356979	249317	182182	290385
6	9	75	175454	241199	310731	473653	332578	329510
7	1	90	13	45	204	104	34	134
8	5	90	181	120	236	639	594	897
9	9	90	355	157	430	284	745	1077

Os valores Y₁, Y₂, Y₃, Y₄, Y₅ e Y₆ são as réplicas.

TABELA 42 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga da madeira maciça para o *Eucalyptus grandis* (dados transformados)

Ensaio	Variáveis Independentes		Variáveis Dependentes (log N)						
	f	S	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Ȳ
1	1	60	5,47721	5,65101	5,40931	5,68428	5,63189	5,25735	5,51851
2	5	60	6,20455	5,95564	6,11750	5,93822	6,15021	6,27593	6,10701
3	9	60	5,98380	6,13580	6,14929	6,05909	6,05909	6,18631	6,09556
4	1	75	5,18603	5,09655	4,91314	4,97651	4,89008	5,05817	5,02008
5	5	75	5,53098	5,40692	5,55264	5,39675	5,26051	5,46297	5,43513
6	9	75	5,24416	5,38238	5,49238	5,67546	5,52189	5,51787	5,47236
7	1	90	1,11394	1,65321	2,30963	2,01703	1,53148	2,12710	1,79207
8	5	90	2,25768	2,07918	2,37291	2,80550	2,77379	2,95279	2,54031
9	9	90	2,55023	2,19590	2,63347	2,45332	2,87216	3,03222	2,62288

Os valores Y₁, Y₂, Y₃, Y₄, Y₅, Y₆ e Ȳ são as réplicas e a média da variável resposta, respectivamente.

As análises dos valores encontrados nas Tabelas 43 e 44, e análise gráfica da Figura 79, permitem identificar os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações.

TABELA 43 - Efeitos significativos das variáveis e suas interações na resistência à fadiga da madeira maciça para o *Eucalyptus grandis*.

Ensaio	Resposta	(1)	(2)	Divisor	Efeitos	Identificação	SQ
1	33,1111	106,326	243,623	54	4,51154	Média	1099,12
2	36,6421	95,565	11,161	36	0,31002	f	3,46
3	36,5734	41,732	-9,861	108	-0,09130	f ²	0,90
4	30,1205	3,462	-64,595	36	-1,79430	S	115,90
5	32,6108	2,714	1,523	24	0,06344	fS	0,10
6	32,8341	4,985	-0,394	72	-0,00548	f ² S	0,00
7	10,7524	-3,600	-43,073	108	-0,39882	S ²	17,18
8	15,2419	-2,267	3,020	72	0,04194	fS ²	0,13
9	15,7373	-3,994	-3,060	216	-0,01417	f ² S ²	0,04

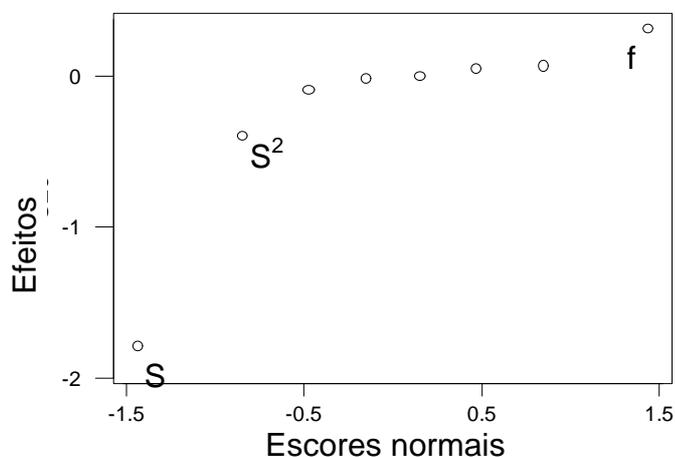


FIGURA 79 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga da madeira maciça para o *Eucalyptus grandis*.

TABELA 44 – Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga da madeira maciça para o *Eucalyptus grandis*

Ensaio	Lim. Inferior	Efeitos	Lim. Superior	Identificação
1	4,44835	4,51154	4,57474	Média
2	0,24683	0,31002	0,37322	f
3	-0,15450	-0,09130	-0,02810	f²
4	-1,85750	-1,79430	-1,73111	S
5	0,00024	0,06344	0,12664	fS
6	-0,06868	-0,00548	0,05772	f²S
7	-0,46202	-0,39882	-0,33562	S²
8	-0,02126	0,04194	0,10514	fS²
9	-0,07736	-0,01417	0,04903	f²S²

Os resultados apresentados nas Tabelas 43 e 44, e a análise da Figura 79, definem o efeito linear da tensão (S), o efeito linear da frequência (f) e o efeito quadrático da tensão (S²) como os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações, sendo o primeiro o fator preponderante. A Figura 80 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates para a madeira maciça de *Eucalyptus grandis*.

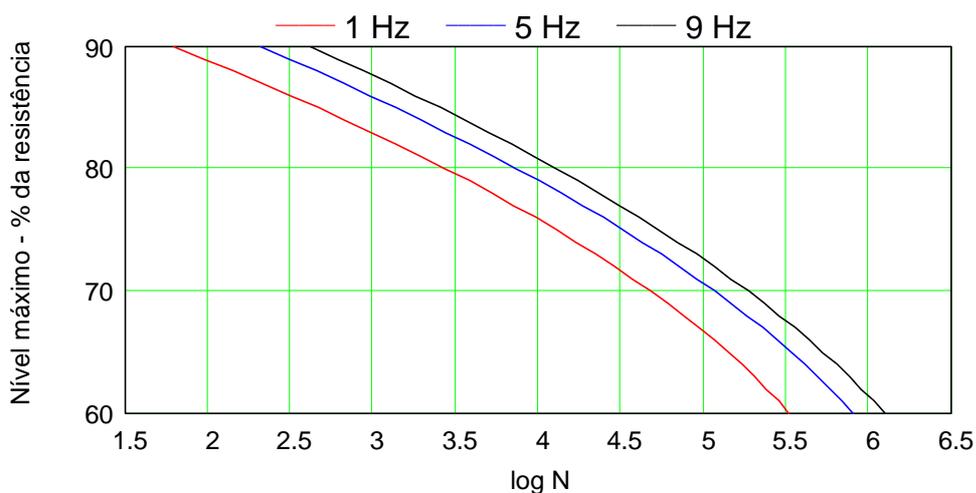


FIGURA 80 - Curvas S-N da madeira maciça para o *Eucalyptus grandis*.

5.2.3.7 Comparação entre as resistência à fadiga da madeira maciça para as frequências de 5 Hz e 9 Hz

Os valores apresentados na Tabela 45 mostram que as vidas à fadiga da madeira maciça são aproximadamente iguais para as frequências de 5 Hz e 9 Hz. Esta consideração tem uma tendência a se confirmar para valores estimados através do Algoritmo de Yates, conforme ilustrado nas Figuras 78 e 80.

TABELA 45 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga da madeira maciça para as frequências de 5 Hz e 9 Hz.

Variáveis Independentes		Variáveis Dependentes (log N)	
		<i>Pinus caribea hondurensis</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>
f	S	\bar{Y}	\bar{Y}
5	60	6,02577	6,10701
9	60	6,07255	6,09556
5	75	5,34992	5,43513
9	75	5,44769	5,47236
5	90	2,59520	2,54031
9	90	2,65337	2,62288

Os valores \bar{Y} são as médias da variável resposta.

5.2.4 Estimativa do coeficiente de redução da resistência à fadiga da emenda dentada em relação à madeira maciça

Com base nas análises de regressão envolvendo seis grupos diferentes de dados do número de ciclos correspondentes à resistência a fadiga, conforme apresentados na Tabela 46, e considerando a relação entre as resistências da emenda dentada e da madeira maciça, apresentados na Tabela 17, foi

possível estimar o coeficiente de redução da resistência à fadiga da emenda dentada em relação à resistência à fadiga da madeira maciça, conforme apresentado na Tabela 46.

TABELA 46 – Estimativa do coeficiente redução de resistência à fadiga da emenda dentada em relação à madeira maciça

Grupos de dados	<i>Pinus caribea hondurensis</i>		<i>Eucalyptus grandis</i>	
	Cascophen	Mamona	Cascophen	Mamona
Todos os valores de ensaios	0,633	0,692	0,560	0,584
Todos os valores médios	0,635	0,696	0,562	0,586
Todos os valores para f = 1Hz	0,623	0,689	0,556	0,580
Todos os valores para f = 5Hz	0,620	0,673	0,547	0,596
Todos os valores para f = 9Hz	0,658	0,710	0,585	0,605
Valores característicos	0,685	0,755	0,640	0,653

Os dados utilizados nos cinco primeiros grupos de ensaio da Tabela 46 foram retirados diretamente dos valores apresentados nas Tabelas 22, 26,30, 34, 38 e 42 sendo que o último grupo foi baseado nos valores característicos de cada ensaio.

Os coeficientes apresentados na Tabela 46 mostram uma melhor eficiência das emendas coladas com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona quando comparadas às emendas coladas com o Cascophen.

5.2.5 Variação da rigidez em função do número de ciclos

Quanto à evolução da rigidez das emendas dentadas em função do número de ciclos foi observado que ocorre um pequeno acréscimo de rigidez em relação à rigidez inicial (5% no máximo), seguido de uma fase de estabilização e um posterior decréscimo com ruptura iminente, conforme exemplificado na Tabela 47 e na Figura 81. Esta consideração é válida para todas as emendas dentadas analisadas neste trabalho. Para a madeira maciça foi observado o mesmo comportamento, com a variação de rigidez não ultrapassando os 5% na maioria dos casos.

Tabela 47 – Variação da rigidez em relação à rigidez inicial para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen ($\sigma_{\max} = 75\% f_{t0}$ e $f = 1$ Hz).

N	D51c		E63c		A73c		C83c		C111c		B141c	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	815,6	-	738,2	-	774,4	-	860,6	-	827,9	-	772,5	-
1000	830,5	1,8	736,1	-0,3	823,0	4,	877,1	1,9	835,2	0,9	779,7	0,9
2000	832,7	2,1	724,9	-1,8	808,3	4,4	878,4	2,0	834,2	0,8	782,3	1,3
3000	830,6	1,8	-	-	805,0	3,9	879,1	2,1	834,2	0,8	781,1	1,1
4000	809,8	-0,7	-	-	-	-	886,4	3,0	833,3	0,7	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	889,7	3,4	810,0	-2,1	-	-
6000	-	-	-	-	-	-	874,8	1,6	-	-	-	-

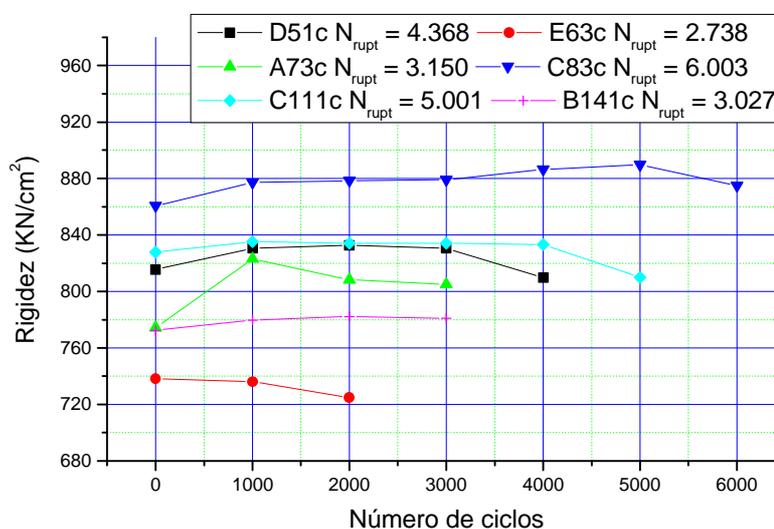


Figura 81 – Variação da rigidez em função do número de ciclos para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen ($\sigma_{\max} = 75\% f_{t0}$ e $f = 1$ Hz).

O acréscimo da rigidez em relação à rigidez inicial, é justificado principalmente pela reorganização na estrutura da madeira enquanto que seu decréscimo pode estar relacionado com estágio crítico de danificação no material. Todos os gráficos e tabelas com os dados da variação de rigidez das emendas dentadas e da madeira maciça em função do número de ciclos são apresentados nos *Anexo B.1, B.2 e B.3* deste estudo.

6 CONCLUSÕES

Após a revisão bibliográfica e a análise dos resultados são apresentadas as principais conclusões do trabalho:

Os efeitos da fluência em MLC são significativamente menores que na madeira maciça, uma vez que os elementos estruturais de MLC são geralmente maiores, produzidos a partir de madeira seca e possuem superfícies de revestimento que dificultam o fluxo de umidade atribuindo-lhes comportamento mais uniforme. Além disso, os adesivos usados em MLC geralmente não sofrem degradação devido ao efeito da temperatura e umidade garantindo a solidez de comportamento das ligações. Estas informações reforçam a idéia de ensaiar as emendas dentadas à fadiga na tração para níveis de freqüência onde as propriedades reológicas da madeira não tem influência (fadiga elástica).

A hipótese encontrada na revisão bibliográfica, em que a vida à fadiga da madeira maciça, é independente da espécie desde que os níveis de tensão sejam definidos em função de sua resistência se confirmou nos resultados apresentados neste estudo. Observou-se ainda que esta consideração também foi válida para as emendas dentadas.

No caso particular da madeira maciça observou-se que as vidas à fadiga na tração para as freqüências de 5 Hz e 9 Hz são aproximadamente iguais, o que é perfeitamente compatível com as informações apresentadas por HANSEN (1991) para a fadiga na compressão, Figura 82.

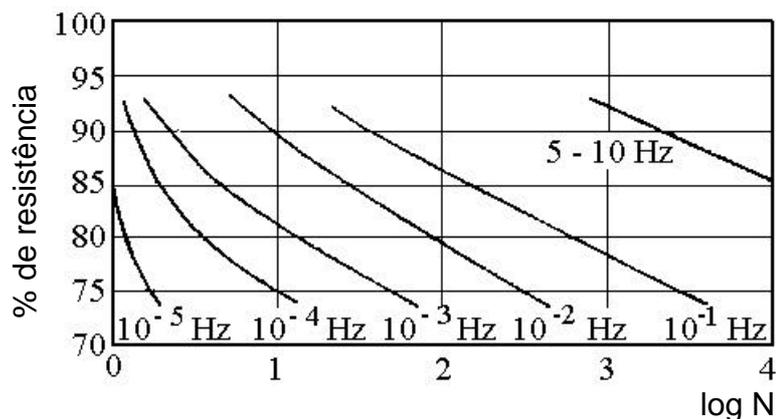


FIGURA 82 - Diagramas S-N para a resistência a fadiga na compressão da madeira em diferentes níveis de frequência.
Fonte: HANSEN (1991).

Observou-se em alguns corpos-de-prova de madeira maciça o surgimento de trincas longitudinais que se propagaram causando a separação das fibras da madeira, sendo que estas trincas não foram necessariamente responsáveis pela ruptura do corpo-de-prova. Nos ensaios de fadiga dos corpos-de-prova com emenda dentada não foi observado o surgimento de trincas.

Os corpos-de-prova gêmeos ou de controles devem ser retirados preferencialmente no sentido longitudinal das peças de madeira. Para que os corpos-de-prova retirados no sentido transversal possam ser considerados gêmeos é necessário que a disposição dos anéis de crescimento na seção permita tal possibilidade (item 3.1). Estes cuidados na retirada dos corpos-de-prova gêmeos podem reduzir de forma significativa a dispersão dos resultados nos ensaios de fadiga em madeira, uma vez que diminui as incertezas referentes às resistências de referência.

O modo de ruptura por fadiga das emendas dentadas foi, na maioria dos casos, semelhante a sua ruptura estática. As rupturas dos corpos-de-prova de *Eucalyptus grandis*, tanto dinâmicos quanto estáticos, ocorreram na sua grande maioria na interface madeira/adesivo enquanto que para os corpos-de-prova de *Pinus caribea hondurensis* as rupturas quase sempre envolveram a madeira. Um fato interessante e que deve ser ressaltado é que nos casos onde ocorreram rupturas na interface madeira/adesivo foi

observado que o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona promoveu um maior arrancamento de madeira que o adesivo Cascophen.

Apesar das variações de rigidez observadas no item 5.2.5, considera-se que não houve variação significativa da rigidez em função do número de ciclos nem para as emendas dentadas e nem para a madeira maciça, uma vez que estas variações são muito pequenas (inferiores a 5% na grande maioria dos casos). Estes resultados confirmam o caráter extremamente frágil das rupturas e reforçam a hipótese de que para o intervalo de frequência adotado neste estudo, não há influência das propriedades reológicas da madeira nos resultados dos ensaios, podendo ser tratado como um caso de fadiga elástica.

Foram observados pequenos acréscimos de temperatura nos ensaios dinâmicos com frequência de 9 Hz (da ordem de 1°C a 3°C), porém de acordo com dados disponíveis na literatura estas elevações de temperaturas não são capazes de causar variações significativas de umidade e resistência na madeira. Esta consideração pode ser confirmada pelos resultados dos ensaios dinâmicos na madeira maciça, onde foram observadas vidas à fadiga aproximadamente iguais para as frequências de 5 Hz e 10 Hz para os ensaios preliminares e de 5 Hz e 9 Hz para os ensaios programados.

De uma forma geral, observou-se que as emendas dentadas e a madeira maciça apresentam um comportamento similar quando submetidos a ensaios de fadiga. O efeito linear do nível de tensão (S) é o fator preponderante na redução da vida à fadiga tanto da emenda dentada quanto da madeira maciça, porém foi comprovado estatisticamente que o efeito quadrático do nível de tensão (S^2) também contribui significativamente nesta redução da vida à fadiga e que o efeito linear da frequência (f) tem efeito significativo no acréscimo da vida à fadiga dos corpos-de-prova com e sem emendas dentadas.

O adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, quando comparado ao adesivo Cascophen, mostrou-se adequado para aplicação em MLC tanto do

ponto de vista de resistência quanto do ponto de vista de resistência à fadiga.

Apesar de notada uma superioridade significativa dos coeficientes de redução de resistência à fadiga das emendas dentadas coladas com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona em relação aos coeficientes das emendas dentadas coladas com o adesivo Cascophen, sugere-se como coeficiente de redução para a resistência à fadiga da emenda dentada em relação à madeira maciça, para geometria adotada neste estudo e 12% de teor de umidade, a seguinte estimava:

TABELA 48 - Coeficiente de redução da resistência à fadiga da emenda dentada em relação a madeira maciça

Valores	Espécie	
	<i>Pinus caribea hondurensis</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>
Médios	0,630	0,560
Característicos	0,680	0,640

Como metodologia de ensaio para as emendas dentadas e para a madeira maciça à fadiga na tração sugere-se:

- trabalhar com os com os níveis de freqüência no intervalo de 1 Hz a 10Hz, o que favorece a análise de fadiga elástica e é compatível com o fator tempo disponível para os ensaios;
- com a forma de retirada dos corpos-de-prova gêmeos no sentido paralelo às fibras da madeira ou no sentido transversal caso a distribuição dos anéis crescimento na seção permita;

Recomendações para outras pesquisas:

- avaliar a resistência à fadiga na tração para emendas dentadas com outras geometrias e outras espécies de madeira;
- avaliar a resistência à fadiga das emendas dentadas para outras condições de umidade;
- verificar o efeito do tratamento preservativo na resistência à fadiga das emendas dentadas;
- avaliar o efeito da temperatura na resistência à fadiga para níveis de freqüência superiores a 10 Hz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AICHER, S.; KLÖCK, W. (1991). ***Finger joint analysis and optimization by elastic, non linear and fracture mechanics finite element computations***. Proceedings of the International Timber Engineering Conference, London, 3.67-3.76.
- ANDRIAMINTOSA, L. (1992). ***Comportement Mecanosorptif de Bois Massive et de Bois Lamelle-Colle en Dimensions Structurales***. All – Division 5 Conference, Forest Products, Nancy, France, Better Wood Products through Science, Vol. 1, Aug.
- ANSELL, M. P. (1995). ***Fatigue design for timber and wood-based materials***. Timber Engineering STEP2 lecture E22, Design Details and Structural System.
- _____.; HANCOCK, M.; BONFIELD, P.W. (1991). ***Wood composites – the optimum fatigue resistant material for commercial wind turbine blades***. Proceedings of the International Timber Engineering Conference, London, 4.194-4.202.
- ARAÚJO, L. C. R. (1992). ***Caracterização química e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos***. São Carlos, Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- ASCE. (1957). ***Duration of load and fatigue in wood structures.***
Progress Report of Sub-committee on Timber Structure of the Structural Division, Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 83, N^o ST 5, Proc. Pap. 1631, pp (1361-1)-(1361-12), mar.
- ASTM E 1150 (1987). ***Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue.***
American Society for Testing Materials, May.
- ASTM E 739 (1991). ***Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (e-N) Fatigue Data.***
American Society for Testing Materials, Jun.
- AYINA, O.; ASSIGA, I.; ENGUENE; G; MORLIER, P. (1996). ***Creep of Wood Under Sustained Torsion and Constant Humidity.*** New Orleans, Louisiana, USA, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, Vol 4, pp 4.259-4.264, Oct.
- BACH, L. (1967). ***Static fatigue of wood under constant strain.*** Forintek Canada Corp., Department of Forestry and Rural Development, sep.
- BAO, Z.; ECKELMAN, C. A. (1995). ***Fatigue life and design stresses for wood composites used in furniture.*** Forest Products Journal, 45 (7/8), 59-63, jul/aug.
- BENGSTSSON, C.; KLIGER, R.; JOHANSSON; (1996). ***Creep in Spruce Timber Influence of Radial Position and Growth Site.*** New Orleans, Louisiana, USA, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, Vol 4, pp 4.251-4.258, Oct.
- BOHANNAN, B.; KANVINK, K. (1969). ***Fatigue strength of finger joints.*** Mad., Wis., FPL-FS-USDA, (Res. Pap. FPL 114), sep.

- BOLLER, K. H. (1969). ***Fatigue Fundamentals for Composite Materials: Testing and Design***. ASTM, STP 460, pp 217-235.
- BOND, I. P.; ANSELL, M. P. (1998). ***Fatigue properties of jointed wood composites: Part I Statistical analysis, fatigue master curves and constant life diagrams***. Journal of Materials Science, 33, pp 2751-2762, jun.
- BONFIELD, P. W.; ANSELL, M. P. (1991). ***Fatigue properties of wood in tension, compression and shear***. Journal of Materials Science, 26, pp 4.765-4.773.
- BOX, E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. STUART. (1978). ***Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building***. John Wiley & Sons, Inc.
- BRANTLEY, L.; FRIDLEY, K.. (1996). ***Resistance of Wood Members and Connections to Dynamic Loading***. New Orleans, Louisiana, USA, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, Vol 3, pp 3.106-3.113, Oct.
- BUI, Q. D.; MILNER, H. R.; WILLIAMS, J. M. (1996). ***Fibre Reinforced Finger Joints***. New Orleans, Louisiana, USA, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, Vol 1, pp 1.427-1.432, Oct.
- CALLISTER JR., WILLIAM D. (1994). ***Materials Science and Engineering: An Introduction***. 3^a Ed., John Wiley & Sons, Inc.
- CHOU, P. C.; MILLER, H. (1981). ***Maximum Likelihood Estimation of Two-Segment Weibul Distribution for Fatigue Life***. Statistical Analysis of Fatigue Data, ASTM STP 744, R. E. Little and J. C. Ekvall editors., pp 114-128.

- CLORIUS, C. O.; PEDERSEN, M. U. (1996). ***Fatigue Damage In Wood: An Investigation of Frequency Influence on Fatigue Development in Wood.*** Denmark, M.Sc Thesis - Technical University of Denmark - Institute of Structural Engineering and Materials, feb.
- CRUZ, H. (1996). ***Behavior of Structural Timber Joints Under Cyclic Loading – Predictive Modeling Based on Embedment Properties.*** New Orleans, Louisiana, USA, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, Vol 3, pp 3.114-3.121, Oct.
- DAVIS, H. E.; TROXELL, G. F.; HAUCK, G. F. W (1982). ***Testing of Engineering and Materials.*** 3^a ed., cap. 4, McGraw-Hill, Int. Book Company.
- DINWOODIE, J. M. (1981). ***Timber its nature and behaviour.*** Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA.
- DOLAN, J. D. (1994). ***Behaviour of Timber Structure Under Seismic Actions: Timber structure in seismic regions - State of-art Report.*** Rilem Technical Committees, Commissions Techniques de La Rilem, 27, 157-184.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (1993). ***Basis of Design and Actions on Structures (CEN - ENV 1991-1).*** Bruxelles, october.
- _____. (1997). ***Design of Timber Structures – Part 2 : Bridges (CEN – ENV 1995-2).*** July.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY (1960a). ***Effect of Ten Repetitions of Stress on the Bending and Compressive Strengths of Sitka spruce and Douglas-fir .*** Madison, Wisconsin, FPL-FS-USDA, Report N^o 1320.

- _____. (1960b). ***The Fatigue Behavior of Wood and Plywood Subjected to Repeated and Reversed Bending: The Fatigue Behavior of Douglas-fir and Sitka spruce subjected to Stresses Superimposed on Steady Stress.*** Madison, Wisc., FPL-FS-USDA, Report N^o 1327-A.
- FOURNELY, E.; VERGNE, A. (1991). ***Dynamic behaviour of Spruce in high stress level tests in compression parallel to grain.*** International Timber Engineering Conference London, pp 2.127-2.135.
- FREAS, A. D. (1959). ***Effect of repeated loading and Salt-Water Immersion on: Flexural properties of Laminated White Oak.*** FPL, USDA, 4p.
- FRIDLEY, K. J.; SOLTIS, L. A. (1991). ***Environmental effects on the load-duration behaviour of structural lumber.*** International Timber Engineering Conference London, pp 4.181-4.187.
- GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, J. P. (1985). ***Secagem racional de madeira.*** São Paulo, Nobel.
- GERHARDS, C. C.; PELLERIN, R. F. (1984). ***Effect of shock loading from series testing on tensile strength of lumber and connector system.*** Forest Products Journal, 34(1): 38-43, jan.
- GROOM, L. H.; LEICHTI, R. J. (1994). ***Effect of adhesive stiffness and thickness on stress distributions in structural finger joints.*** J. Adhesion, Vol. 44, pp 69-83.
- HANSEN, L. P. (1991). ***Experimental Investigation of Fatigue Properties of Laminated Wood Beams.*** Proceedings of the International Timber Engineering Conference London, pp 4.220-4.222, sep.

- HELLMEISTER, J. C. (1973). ***Sobre a determinação das características físicas da madeira***. São Carlos, Tese - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- HENRIQUES DE JESUS, J. M. (2000). ***Estudo do Adesivo Poliuretano à Base de Mamona em Madeira Laminada Colada***. São Carlos, Tese de Doutorado – Área de Interunidades, Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, set.
- _____.; CALIL JR, C. C.; CHIERICE (1998). ***Adesivo poliuretano à base de mamona: Alternativa para o uso em MLC***. VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (VI EBRAMEM), Florianópolis-SC, 22 a 24 de julho, Vol 1, pp 337-343.
- HERNANDEZ, R. (1998). ***Analysis of strain in finger-jointed lumber***. 5th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, Vol. 1, 17-20 aug.
- HOFFMEYER, P.; DAVIDSON, R.W. (1989). ***Mechano-sorptive creep mechanism of wood in compression and bending***. Wood Science and Technology, 23, 215-227.
- KARACABELY, E.; SOLTIS, L. A. (1991). ***State-of-the-art report on duration of load research for lumber in North America***. Proceedings of the International Timber Engineering Conference London, pp 4.141-4.2155, sep.
- KOCAÂNDA, S. (1978). ***Fatigue Failure of Metals***. ISBN 9028600, 367 p.
- KOMMERS, W. J. (1955). ***Effect of 5.000 cycles of repeated bending stress on 5-ply Sitka spruce plywood***. Madison, Wisconsin, USDA-FS-FPL, Aug.

- LEWIS, W. C. (1960). **Design Considerations for Fatigue in Timber Structures**. Journal of the Structural Division, ASCE, N^o ST 5, pp 221-229, may.
- _____. (1951). **Fatigue of Wood and Glued Joints Used in Laminated Construction**. Mad., Wisc., FPL-FS-USDA, pp 221-229.
- _____. (1962). **Fatigue resistance of quarter-scale bridge stringers in flexure and shear**. Mad., Wisc., FPL-FS-USDA, Report N^o 2236, sep.
- LITTLE, R. E. (1981). **Review of Statistical Analyses of Fatigue Life Data Using One-Sided Lower Statistical Tolerance Limits**. Statistical Analysis of Fatigue Data, ASTM STP 744, R. E. Little and J. C. Ekvall editors., pp 3-22.
- _____.; JEBE, E. H. (1975). **Manual on Statistical Planning and Analysis for Fatigue Experiments**. American Society for Testing and Materials, ASTM STP 588, 1975.
- LIU, J. Y.; ROSS, J. R. (1996). **Time-dependent mechanical strength of wood structural members**. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of ASME, Vol 118, 375-378.
- _____.; SCHAFFER, E. L. (1991). **Time-dependent mechanical strength of wood structural members**. Proceedings of the International Timber Engineering Conference London, pp 4.164-4.171, sep.
- LOGSDON, N. B. (1995). **Variação da tensão resistente ao cisalhamento paralelo às fibras de uma peça de dimensões comerciais de Amescla, *Trattinickia burserifolia* (Mart.) Wild**. V Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (V EBRAMEM), Belo Horizonte - MG, 19 a 21 de julho, pp 235-244.

- MACÊDO, A. N. (1996). ***Estudo de Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada (MLC): Avaliação de Método de Ensaio.*** São Carlos, Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, set.
- MADAYAG, A. F. (1969). ***Metal Fatigue: Theory and Design.*** John Wiley & Sons, Inc., New York.
- MADSEN, B. (1992). ***Structural behaviour of timber.*** 1^a Ed., Timber Engineering Ltd., North Vancouver, British Columbia-Canada, 451 pgs.
- MASON, R. L.; GUNST, R. F.; HESS, J. L. (1989). ***Statistical Design and Analysis of Experiments with Applications to Engineering and Science.*** John Wiley & Sons, inc., New York.
- MILNER, H. R.; YEOH, E. (1991). ***Finite element analysis of glued timber finger joints.*** Journal of Structural Engineering, Vol. 117, No. 3, pp 755-766, mar.
- MINER, M. A; SANTA MONICA, C. (1945). ***Cumulative Damage in Fatigue.*** Journal of Applied Mechanics, pp A159-A164.
- MIYAKAWA, H. (1985). ***Impact Bending Fatigue of Wood.*** Laboratory of Wood Technology, Department of Pratical Life Studies, japan.
- MONTGOMERY, J. S. (1991). ***Diseño y Análisis de Experimentos.*** Editora Panamericana S. A., México.
- NORMA BRASILEIRA NBR-7190 (1997). ***Projeto de Estruturas de Madeira.*** Associação Brasileira de Normas Técnicas, mar.

- NIELSEN, L. F. (1984). ***Power law creep as related to relaxation, elasticity, damping, rheological spectra and creep recovery - with special reference to wood.*** Proceedings Meeting of IUFRO S5.02, Xalapa, Mexico.
- _____. (1990). ***Lifetime and Fatigue of Wood and other Building Materials.*** IUFRO Timber Engineering Group Conference, Saint John, New Brunswick, Fredericton, N. B, Canada, Jul – Ago.
- _____. (1992). ***The Theory of Wood as a Cracked Visco-elastic Material.*** Structural Behaviour of Timber, MADSEN (1992), Appendix A.
- NORRIS, C. B (1962). ***Strength of orthotropic materials subjected to combined stress.*** Madison, Wisconsin, FPL-FS-USDA, No. 1816, may.
- OEHLERS, D. J.; GHOSH, A.; WAHAB, M. (1995). ***Residual Strength Approach to Fatigue Design and Analysis.*** Journal of Structural Engineering, sep.
- PARIS, P. (1963). ***A critical analysis of crack propagations laws.*** Journal of Basic Engineering, pp 528-534.
- PELLICANE, P. J. (1994). ***Finite element analysis of finger-joints in lumber with dissimilar laminate stiffness.*** Forest Products Journal, Vol. 44 (3), 17-22, mar.
- _____.; GUTKOWSKI, R. M.; JAUSLIN, C. (1995). ***Comparison of optically and mechanically measured deformations in finger-jointed wood tension specimen.*** Journal of Testing and Evaluation, Vol. 23, No. 2, pp 136-140, mar.
- PEREZ GALAZ, V. A. (1979). ***Manual de madera laminada.*** Departamento de Construcciones en Madera, Instituto Forestal, Chile.

- POPOVIC, Z.; ZAKIC, B.; SOSKIC, B. (1996). **Creep Fator Determination for Physical Nonlinearity in 2nd Order Theory**. New Orleans, Lousiana, USA, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, Vol 4, pp 4.265-4.272, Oct.
- PROKOFIEV, A. S.; KABANOV, V. A.; MASALOV, A. V. (1991). **Servicieability of Glued Laminated Timber Under the Cyclic Loading**. Proceedings of the International Timber Engineering Conference London, pp 4.220-4.222, sep.
- PUSKÁR, A.; GOLOVIN, S. O. (1985). **Fatigue in Materials: Cumulative Damage Process**. Materials Science Monographs, 24, Elsevier.
- RANTA-MAUNUS, A. (1991). **The effect of naturally changing humidity on the creep of timber structures**. Proceedings of the International Timber Engineering Conference London, pp 4.172-4.179, sep.
- _____; GOWDAS, S.; KORSTMAA, M. (1996). **Creep of Timber During 4 year in Natural Enviroment**. New Orleans, Lousiana, USA, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, Vol 4, pp 4.273-4.278, Oct.
- RARADA, M; KOMATSU, K.; KARUBE, M. (1996). **Static and Dynamic Loading Test of Glulam Lattice Floor**. New Orleans, Lousiana, USA, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, Vol 3, pp 3.241-3.248, Oct.
- RASSO STTER, M (1963). **Investigations on the Fatigue of Laminated Wood Beams**. Intitut aus dem für Holzforschung und Holztechnik der Universität München.

- RODRIGUES JUNIOR, M. S. (1995). ***Efeitos da repetição de carregamentos na rigidez e resistência de ligações mecânicas com pinos das estruturas de madeira.*** São Paulo, Exame de Qualificação (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, out.
- _____. (1997). ***Uniões Mecânicas com Pinos de Elementos Estruturais em Madeira Sujeita a Carregamentos Repetidos.*** São Paulo, Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, 150p.
- SELBO, M.L.; KNAUSS, A. C.; WORTH, H. E. (1965). ***Glued Laminated Timber Bridges show good performance after as much as two decades service.*** Mad., Wisc., FS, FPL, USDA, jun.
- SERRANO, E.; GUSTAFSSON, P. J.; LARSEN, H J. (1996). ***Lamination Effect and Finger Joints Analysed by Fracture Mechanics.*** New Orleans, Lousiana, USA, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, Vol 4, pp 4.295-4.302, Oct.
- SPINDEL, J. E.; HAIBACH, E. (1981). ***Some Considerations in the Statistical Determination of the Shape of S-N Curves.*** Statistical Analysis of Fatigue Data, ASTM STP 744, R. E. Little and J. C. Ekvall editors., pp 89-113.
- SRPCIC, J. (1991). ***The long-term tests of Glued Laminated Beams.*** Proceedings of the International Timber Engineering Conference London, pp 4.231-4.238, sep.
- SRPCIC, S. (1996). ***Strain in Long-Term Loaded Curved Glulam Beams.*** New Orleans, Lousiana, USA, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, Vol 1, pp 1.275-1.282, Oct.

- STRIKLER, M. D. (1980). ***Finger-jointed dimensional lumber – past, present, and future.*** Forest Products Journal, 30 (9), 51-60, sep.
- TAKAC, S. (1991). ***Experimental contribution to the findings of rheological wood properties.*** Proceedings of the International Timber Engineering Conference London, pp 4.223-4.230, sep.
- TSAI, K. T.; ANSELL, M. P. (1990). ***The fatigue properties of wood in flexure.*** Journal of Materials Science, 25, pp 865-878.
- TAYLOR, G. D.; WEST, D. J.; HILSON, B. O. (1991). ***Creep of Glued Laminated Timber under conditions of varying humidity.*** Proceedings of the International Timber Engineering Conference London, pp 4.211-4.219, sep.
- TORATTI, T. (1991). ***Creep of different size wood members in varying environment humidity.*** Proceedings of the International Timber Engineering Conference London, pp 4.239-4.246, sep.
- YANG, L.; FATEMI, A. (1998). ***Cumulative Fatigue Damage Mechanics and Quantifying Parameters: A Literature Review.*** Journal of Testing and Evaluation, pp 89-100.
- YOUNG, L.; EKVALL, J. C. (1981). ***Reliability of Fatigue Testing.*** Statistical Analysis of Fatigue Data, ASTM STP 744, R. E. Little and J. C. Ekvall editors., pp 55-74.

ANEXO A: - Ensaios programados

A.1: Resultados dos ensaios de resistência à tração nos corpos-de-prova de controle com emendas dentadas (resistência de referência): Cascophen RS-216-M e Adesivo Poliuretano à base de resina de mamona

**ENSAIOS PROGRAMADOS: CONTROLES ESTÁTICOS DAS EMENDAS
DENTADAS - CASCOPHEN-RS-216-M**

1 *Pinus caribea hondurensis*

TABELA 1 – Emendas dentadas controles estáticos de *Pinus caribea hondurensis*

CP	Resistência			Modo de ruptura - RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda
	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	
A52c	15,000	3,846	3,900	RE: 20% na madeira e 80% na interface mad/ades
B52c	14,451	3,329	4,340	RE: 100% na madeira
C52c	8,751	2,917	3,000	MFE: 85% RE: 15% na interface mad/ades
D52c	11,710	3,527	3,320	MFE: 15% RE: 85% na interface mad/ades
A62c	10,960	3,582	3,060	RE: 100% na madeira
C62c	10,120	3,490	2,900	MFE: 95% RE: 5% na interface mad/ades
E62c	9,000	3,071	2,931	RE: 100% na madeira
F62c	11,936	3,563	3,350	RE: 100% na madeira
A72c	10,853	3,072	3,533	MFE: 100%
B72c	13,810	3,840	3,596	RE: 100% na madeira
C72c	13,406	3,182	4,213	RE: 100% na madeira
D72c	8,650	2,561	3,378	RE: 100% na madeira

TABELA 1 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura				
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
A82c	10,763	2,843	3,786	RE: 100% na madeira				
B82c	12,127	3,100	3,912	RE: 100% na madeira				
C82c	12,710	3,282	3,873	RE: 85% na madeira e 25% na interface mad/ades				
A92c	12,425	2,821	4,341	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades				
C92c	15,633	3,274	4,775	RE: 100% na madeira				
D92c	9,580	2,940	3,259	MFE: 100%				
A102c	13,906	3,240	4,292	RE: 100% na madeira				
C102c	13,289	3,568	3,724	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades				
D102c	11,053	2,953	3,742	MFE: 100%				
A112c	9,394	3,296	2,850	RE: 10% na madeira e 90% na interface mad/ades				
B112c	11,214	2,871	3,906	RE: 80% na madeira e 20% na interface mad/ades				
C112c	9,737	3,504	2,779	RE: 100% na madeira				
B122c	17,360	3,165	5,485	RE: 100% na madeira				

TABELA 1 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura				
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
C122c	17,684	3,251	5,440	RE: 100% na madeira				
D122c	21,156	3,349	6,317	RE: 100% na madeira				
E122c	21,669	3,324	6,519	RE: 100% na madeira				
A132c	15,289	2,794	5,473	RE: 80% na madeira e 20% na interface mad/ades				
B132c	15,842	2,968	5,337	RE: 100% na madeira				
C132c	18,605	3,550	5,240	RE: 85% na madeira e 15% na interface mad/ades				
D132c	19,502	3,741	5,213	RE: 100% na madeira				
A142c	10,921	3,761	2,904	RE: 100% na madeira				
B142c	11,763	3,572	3,293	RE: 100% na madeira				
C142c	10,263	3,454	2,971	RE: 100% na madeira				
E142c	12,499	3,255	3,840	RE: 100% na madeira				

2 *Eucalyptus grandis*

TABELA 2 – Emendas dentadas controles estáticos de *Eucalyptus grandis*

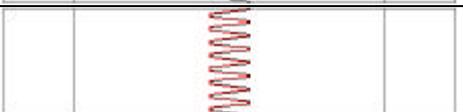
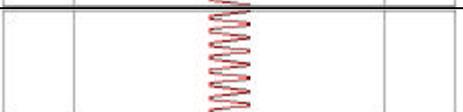
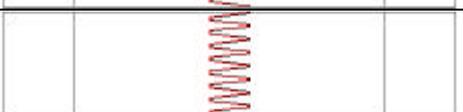
CP	Resistência			Modo de ruptura	
	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda	
A22c	28,120	3,468	8,108	MFE:60% RE: 40% na interface mad/ades	
B22c	20,582	2,781	7,401	RE: 100% na interface mad/ades	
C22c	23,180	3,356	6,908	RE: 100% na interface mad/ades	
A32c	18,480	2,892	6,390	MFE: 20% RE: 80% na interface mad/ades	
B32c	19,372	3,071	6,308	MFE: 80% RE: 20% na interface mad/ades	
C32c	22,850	3,586	6,372	RE: 100% na interface mad/ades	
D32c	23,170	3,670	6,313	RE: 100% na interface mad/ades	
F32c	16,830	2,880	5,844	RE: 100% na interface mad/ades	
G32c	19,310	3,080	6,269	RE: 100% na interface mad/ades	
A42c	19,130	2,934	6,520	RE: 100% na interface mad/ades	
C42c	20,439	3,287	6,218	RE: 100% na interface mad/ades	
D42c	22,105	3,444	6,418	RE: 100% na interface mad/ades	
E42c	22,746	3,794	5,995	RE: 100% na interface mad/ades	

TABELA 2 – Continuação

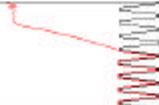
Resistência				Modo de ruptura				
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
A52c	26,049	3,732	6,980	RE: 100% na interface mad/ades				
B52c	18,851	2,980	6,326	RE: 100% na interface mad/ades				
D52c	17,50	2,960	5,912	RE: 100% na interface mad/ades				
A62c	20,781	2,973	6,990	RE: 100% na interface mad/ades				
B62c	21,542	3,428	6,284	RE: 100% na interface mad/ades				
C62c	22,624	3,540	6,391	RE: 100% na interface mad/ades				
A72c	21,552	3,618	5,957	RE: 100% na interface mad/ades				
C72c	14,210	3,585	3,964	MFE: 40% RE: 60% na interface mad/ades				
E72c	11,131	3,433	3,242	MFE: 10% RE: 60% na madeira e 30% na interface mad/ades				
A82c	23,451	2,938	7,982	RE: 100% na interface mad/ades				
B82c	24,168	3,368	7,189	RE: 100% na interface mad/ades				
D82c	17,615	2,510	7,018	RE: 100% na interface mad/ades				
A92c	21,300	3,615	5,892	RE: 100% na interface mad/ades				

TABELA 2 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura				
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
B92c	18,633	3,504	5,318	RE: 100% na interface mad/ades				
C92c	12,236	3,432	3,565	RE: 100% na interface mad/ades				
A102c	10,633	2,739	3,882	MFE: 80% RE: 5% na madeira e 15% na interface mad/ades				
C102c	14,025	3,674	3,817	RE: 100% na interface mad/ades				
D102c	15,526	3,364	4,615	RE: 100% na interface mad/ades				
E102c	13,707	2,879	4,761	RE: 100% na interface mad/ades				
A112c	9,895	3,412	2,900	RE: 100% na madeira				
B112c	9,052	3,259	2,778	RE: 100% na madeira				
C112c	11,189	3,546	3,155	RE: 100% na interface mad/ades				
D112c	17,789	3,684	4,829	RE: 100% na interface mad/ades				
E112c	21,052	3,254	6,469	RE: 100% na interface mad/ades				

ENSAIOS PROGRAMADOS: CONTROLES ESTÁTICOS DAS EMENDAS DENTADAS - ADESIVO POLIURETANO À BASE DE ÓLEO DE MAMONA

1 *Pinus caribea hondurensis*

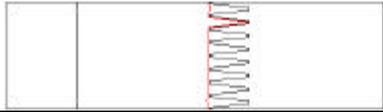
TABELA 3 – Emendas dentadas controles estáticos de *Pinus caribea hondurensis*

CP	Resistência			Modo de ruptura - RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda
	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	
A52m	9,798	3,119	3,138	RE: 100% na madeira
C52m	7,025	3,222	2,180	RE: 100% na madeira
D52m	6,473	3,206	2,019	MFE: 100%
E52m	7,654	3,417	2,240	RE: 100% na madeira
A62m	6,00	3,112	1,928	MFE: 55% RE: 45% na madeira
C62m	9,963	3,113	3,104	RE: 100% na madeira
D62m	6,406	3,340	1,918	RE: 100% na madeira
E62m	7,694	3,631	2,119	RE: 100% na madeira
A72m	12,789	3,274	3,906	RE: 100% na madeira
B72m	13,421	3,333	4,027	MFE: 100%
C72m	15,158	3,365	4,505	RE: 100% na madeira
E72m	16,154	3,744	4,315	RE: 100% na madeira

TABELA 3 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura				
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
A82m	11,526	3,581	3,219	RE: 100% na madeira				
C82m	12,474	3,000	4,158	RE: 100% na madeira				
D82m	13,895	2,914	4,768	RE: 100% na madeira				
E82m	15,943	3,464	4,600	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades				
A92m	12,000	3,507	3,422	RE: 100% na madeira				
B92m	16,210	3,393	4,777	RE: 100% na madeira				
C92m	15,737	3,312	4,752	MFE: 75% RE: 25% na madeira				
E92m	13,150	3,358	3,916	RE: 100% na madeira				
A102m	18,105	3,768	4,805	RE: 85% na madeira e 15% na interface mad/ades				
B102m	18,526	3,624	5,112	RE: 100% na madeira				
D102m	15,157	3,431	4,418	RE: 100% na madeira				
E102m	14,928	3,108	4,803	RE: 100% na madeira				
A112m	14,684	3,308	4,439	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades				

TABELA 3 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura	
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda	
B112m	16,105	3,714	4,336	RE: 90% na madeira e 10% na interface mad/ades	
C112m	15,530	3,511	4,437	RE: 90% na madeira e 10% na interface mad/ades	
D112m	15,578	3,450	4,515	MFE: 100% na madeira	
A122m	22,947	3,479	6,956	RE: 85% na madeira e 15% na interface mad/ades	
B122m	21,157	3,292	6,427	RE: 90% na madeira e 10% na interface mad/ades	
C122m	15,00	3,450	4,348	RE: 75% na madeira e 25% na interface mad/ades	
D122m	23,684	3,404	6,958	RE: 85% na madeira e 15% na interface mad/ades	
A132m	19,894	3,349	5,940	RE: 85% na madeira e 15% na interface mad/ades	
B132m	18,789	3,502	5,365	RE: 80% na madeira e 20% na interface mad/ades	
C132m	20,210	3,639	5,554	RE: 85% na madeira e 15% na interface mad/ades	
D132m	16,105	3,475	4,635	RE: 100% na madeira	

2 *Eucalyptus grandis*

TABELA 4 – Emendas dentadas controles estáticos de *Eucalyptus grandis*

Resistência				Modo de ruptura				
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
A32m	27,368	3,062	8,938	RE: 100% na interface mad/ades				
C32m	16,210	3,407	4,756	RE: 100% na madeira				
D32m	15,593	3,250	4,798	RE: 100% na interface mad/ades				
E32m	16,482	3,573	4,613	RE: 55% na madeira e 45% na interface mad/ades				
B42m	25,194	3,508	7,182	RE: 100% na interface mad/ades				
C42m	20,421	3,409	5,990	RE: 100% na interface mad/ades				
D42m	23,158	3,603	6,427	RE: 100% na interface mad/ades				
E42m	22,137	3,493	6,051	RE: 100% na interface mad/ades				
B52m	18,736	3,550	5,278	MFE: 5% RE: 95% na interface mad/ades				
C52m	19,789	3,404	5,813	RE: 100% na interface mad/ades				
D52m	23,368	3,880	6,023	RE: 100% na interface mad/ades				
E52m	20,572	3,435	5,989	RE: 100% na interface mad/ades				
A72m	29,260	3,658	7,999	RE: 100% na interface mad/ades				

TABELA 4 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura				
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
C72m	14,316	3,533	4,052	MFE: 55% RE: 45% na interface mad/ades				
D72m	12,125	3,198	3,791	RE: 100% na interface mad/ades				
E72m	14,459	3,739	3,867	RE: 100% na interface mad/ades				
A92m	9,263	2,613	3,545	RE: 100% na madeira				
B92m	10,939	3,091	3,539	RE: 100% na interface mad/ades				
C92m	12,000	3,233	3,712	RE: 100% na madeira				
D92m	17,526	3,628	4,831	MFE: 75% RE: 75% na interface mad/ades				
B102m	25,263	3,365	7,508	RE: 100% na interface mad/ades				
C102m	29,684	3,300	8,995	RE: 100% na interface mad/ades				
D102m	24,000	3,654	6,568	RE: 100% na interface mad/ades				
E102m	22,464	3,465	6,483	RE: 100% na interface mad/ades				
A112m	20,052	3,507	5,718	RE: 25% na madeira e 75% interface mad/ades				
B112m	15,947	3,410	4,667	RE: 5% na madeira e 95% interface mad/ades				

TABELA 4 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura	
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda	
C112m	21,150	3,599	5,877	RE: 75% na madeira e 25 % na interface mad/ades	
D112m	18,631	3,734	4,990	RE: 95% na madeira e 5% interface mad/ades	
A122m	21,368	3,174	6,732	RE: 100% na interface mad/ades	
B122m	24,421	3,594	7,073	RE: 100% na interface mad/ades	
C122m	25,973	3,824	6,792	RE: 100% na interface mad/ades	
D122m	28,000	3,336	8,393	MFE: 5% RE: 95% na interface mad/ades	
A132m	28,921	3,873	7,467	RE: 100% na madeira	
B132m	23,210	3,657	6,347	RE: 100% na madeira	
C132m	23,026	3,399	6,774	RE: 100% na interface mad/ades	
D132m	25,237	3,808	6,627	RE: 100% na interface mad/ades	

A.2: Resultados dos ensaios de resistência à tração nos corpos-de-prova de controle de madeira maciça (resistência de referência)

ENSAIOS PROGRAMADOS: CONTROLES ESTÁTICOS MACIÇOS

TABELA 1 – Resistência de referência para a madeira maciça

<i>Pinus caribea hondurensis</i>				<i>Eucalyptus grandis</i>			
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{t0} (kN/cm ²)	CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{t0} (kN/cm ²)
E52c	15,914	3,777	4,213	D22c	32,568	3,715	8,767
B62c	13,157	3,687	3,569	E22c	29,153	3,496	8,339
D62c	13,684	3,701	3,697	E32c	26,840	3,527	7,610
E72c	13,212	3,203	4,125	B42c	31,632	3,884	8,144
D82c	14,362	3,039	4,726	C52c	25,562	2,946	8,677
E82c	17,205	3,430	5,016	E52c	23,730	2,799	8,478
B92c	13,026	3,681	3,717	D62c	26,956	3,559	7,574
E92c	14,172	3,630	3,904	E62c	26,105	3,334	7,830
B102c	10,474	3,360	3,117	B72c	15,730	3,209	4,902
E102c	11,532	3,376	3,416	D72c	11,892	2,943	4,041
D112c	19,500	3,994	4,882	C82c	35,789	3,719	9,623
E112c	17,623	3,612	4,879	E82c	37,762	3,650	10,346
A122c	27,761	2,985	7,290	D92c	21,552	3,124	6,899
F122c	18,659	2,759	6,763	E92c	21,948	3,096	7,089
E132c	23,947	3,373	7,100	B102c	32,890	4,023	8,175
D142c	21,157	3,609	5,862	F112c	24,355	3,256	7,480
B52m	16,421	3,172	5,177	B32m	34,315	3,587	9,566
B62m	13,031	3,475	3,750	F32m	21,159	3,136	6,747
F62m	12,880	3,246	3,968	A42m	41,447	3,805	10,893
D72m	13,684	3,000	4,561	A52m	32,684	3,675	8,894
B82m	16,842	3,196	5,270	B72m	25,815	3,418	7,553
D92m	10,755	2,976	3,614	E92m	22,251	3,324	6,694
C102m	14,816	3,079	4,812	A102m	26,918	2,978	9,039
E112m	17,123	3,506	4,884	E112m	19,904	3,308	6,017
E122m	25,942	3,714	6,985	F112m	25,344	3,294	7,694
F122m	24,602	3,508	7,013	E122m	33,174	3,600	9,215
E132m	25,206	3,496	7,210	E132m	29,613	3,645	8,125

A.3: Resultados dos ensaios cíclicos nos corpos-de-prova com emendas dentadas: Cascophen RS-216-M e o Adesivo Poliuretano à base de resina de mamona

RESISTÊNCIA À FADIGA DAS EMENDAS DENTADAS

1 *Pinus caribea hondurensis* - f = 1 Hz e R = 0,1

TABELA 1 – *Pinus caribea hondurensis*, Cascophen RS-216-M

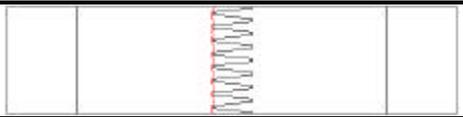
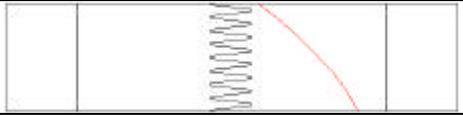
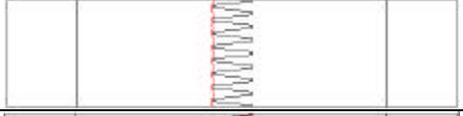
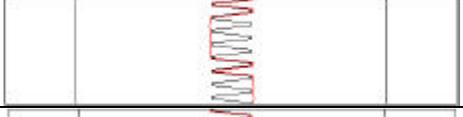
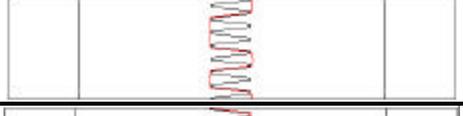
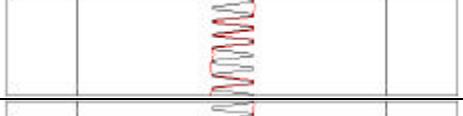
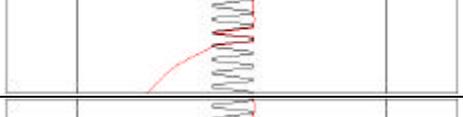
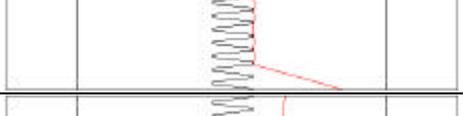
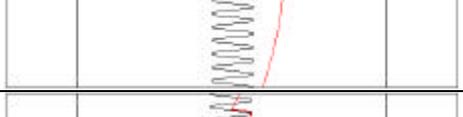
Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
C53c	90	3,000	85	RE: 100% na madeira				
A71c	90	3,533	34	MFE: 100%				
C81c	90	3,873	48	RE: 100% na madeira				
D93c	90	3,259	110	RE: 100% na madeira				
B111c	90	3,906	25	RE: 60% na madeira e 40% na interface mad/ades				
A131c	90	5,473	75	RE: 50% na madeira e 50% na interface mad/ades				
D51c	75	3,320	4.368	MFE: 50% RE: 10% na madeira e 40% na interface mad/ades				
E63c	75	2,931	2.738	RE: 55% na madeira e 45% na interface mad/ades				
A73c	75	3,533	3.150	MFE: 40% RE: 40% na madeira e 20% na interface mad/ades				
C83c	75	3,873	6.003	MFE: 40% RE: 75% na madeira				
C111c	75	3,329	5.001	MFE: 100%				
B141c	75	3,293	3.027	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades				

TABELA 1 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura					
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda					
C63c	60	2,900	20.007	RE: 100% na madeira					
D71c	60	3,378	25.001	RE: 100% na madeira					
C103c	60	3,724	8.232	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades					
A111c	60	2,850	32.240	MFE: 40% RE: 40% na madeira e 20% na interface mad/ades					
D131c	60	5,213	21.424	RE: 100% na madeira					
A143c	60	3,840	25.254	RE: 55% na madeira e 45% na interface mad/ades					

TABELA 2 – *Pinus caribea hondurensis*, Adesivo Poliuretano à Base de Mamona

Resistência				Modo de ruptura					
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda					
C73m	90	4,505	58	RE: 100% na madeira					
A61m	90	1,928	38	RE: 100% na madeira					
D83m	90	4,768	19	RE: 100% na interface mad/ades					
E91m	90	3,916	78	RE: 100% na madeira					
A121m	90	6,956	90	RE: 80% na madeira e 20% na interface mad/ades					
B133m	90	5,365	81	RE: 70% na madeira e 30% na interface mad/ades					

TABELA 2 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura	
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda	
A53m	75	3,138	3.459	MFE: 95% RE: 5% na interface mad/ades	
A71m	75	3,906	7.229	RE: 100% na madeira	
A91m	75	3,422	6.337	RE: 100% na madeira	
E101m	75	4,803	4.237	RE: 90% na madeira e 10% na interface mad/ades	
D123m	75	6,958	5.445	MFE: 35% RE: 50% na madeira e 15% na interface mad/ades	
C133m	75	5,554	2.513	RE: 30% na madeira e 70% na interface mad/ades	
C61m	60	3,104	33.526	RE: 100% na madeira	
C71m	60	4,505	18.865	RE: 100% na madeira	
D81m	60	4,768	18.370	RE: 100% na madeira	
B101m	60	5,112	32.824	RE: 100% na madeira	
B113m	60	4,336	28.210	RE: 100% na interface mad/ades	
A123m	60	6,956	20.269	MFE: 10% RE: 60% na madeira e 30% na interface mad/ades	

2 *Pinus caribea hondurensis* - f = 5 Hz e R = 0,1

TABELA 3 – *Pinus caribea hondurensis*, Cascophen RS-216-M

Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
D53c	90	3,320	272	RE: 100% na madeira				
C73c	90	4,213	145	MFE: 100%				
B83c	90	3,912	98	RE: 100% na madeira				
A93c	90	4,341	138	RE: 100% na madeira				
A101c	90	4,292	202	RE: 100% na madeira				
C133c	90	5,240	542	RE: 80% na madeira e 20% na interface mad/ades				
B53c	75	4,340	14.019	RE: 100% na madeira				
C71c	75	4,213	12.315	RE: 100% na madeira				
A103c	75	4,292	10.692	RE: 100% na madeira				
B123c	75	5,485	3.374	RE: 70% na madeira e 30% na interface mad/ades				
D133c	75	5,213	6.667	RE: 45% na madeira e 55% na interface mad/ades				
C141c	75	2,971	7.655	RE: 100% na madeira				

TABELA 3 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
C61c	60	2,900	50.144	RE: 100% na madeira				
D73c	60	3,378	27.771	RE: 100% na madeira				
D103c	60	3,742	30.155	RE: 100% na madeira				
C113c	60	2,779	60.000	RE: 100% na madeira				
B133c	60	5,337	50.018	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades				
C143c	60	2,971	50.178	RE: 100% na madeira				

TABELA 4 – *Pinus caribea hondurensis*, Adesivo Poliuretano à Base de Mamona

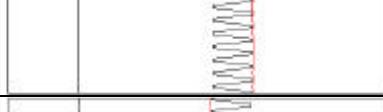
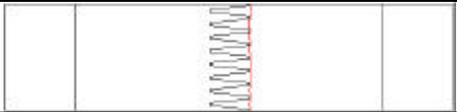
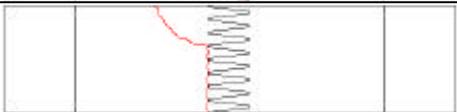
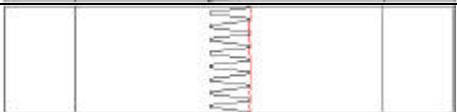
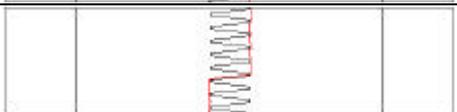
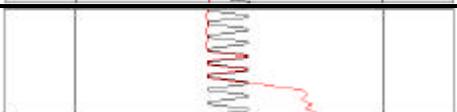
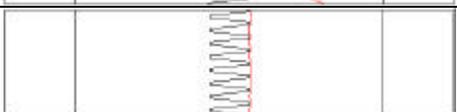
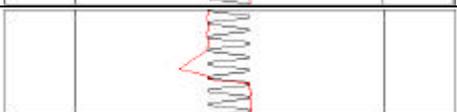
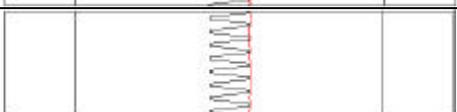
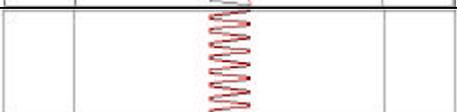
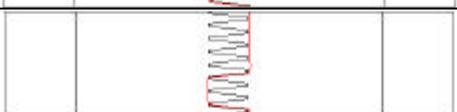
Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
D61m	90	1,918	256	RE: 100% na madeira				
E73m	90	4,315	201	RE: 100% na madeira				
A83m	90	3,219	96	RE: 100% na madeira				
C91m	90	4,752	276	MFE: 60% RE: 40% na madeira				
D111m	90	4,513	544	RE: 100% na madeira				
B131m	90	5,365	139	RE: 90% na madeira e 10% na inter face mad/ades				

TABELA 4 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
D63m	75	1,918	10.095	RE: 100% na madeira				
B73m	75	4,027	3.295	MFE: 95% RE: 5% na interface mad/ades				
A93m	75	3,422	13.724	MFE: 30% RE: 70% na madeira				
E103m	75	4,805	9.144	RE: 100% na madeira				
B121m	75	6,427	9.127	RE: 50% na madeira e 50% na interface mad/ades				
A131m	75	5,940	4.138	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades				
A51m	60	3,138	40.011	MFE: 30% RE: 40% na madeira e 30% na interface mad/ades				
E61m	60	2,119	48.331	RE: 100% na madeira				
E83m	60	4,600	45.326	MFE: 20% RE: 75% na madeira e 5% na interface mad/ades				
B103m	60	5,112	72.388	RE: 100% na madeira				
C111m	60	4,437	38.887	RE: 100% na interface mad/ades				
B123m	60	6,427	31.605	RE: 85% na madeira e 15% na interface mad/ades				

3 *Pinus caribea hondurensis* - f = 9 Hz e R = 0,1

TABELA 5 – *Pinus caribea hondurensis*, Cascophen RS-216-M

Resistência				Modo de ruptura					
CP	σ_{max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda					
C51c	90	3,000	364	RE: 40% na madeira e 60% na interface mad/ades					
B71c	90	3,596	301	MFE:95% RE: 5% na interface mad/ades					
B81c	90	3,912	92	RE: 80% na madeira e 20% na interface mad/ades					
C93c	90	4,775	473	RE: 100% na madeira					
A113c	90	2,850	121	RE: 100% na madeira					
E141c	90	3,840	279	RE: 100% na madeira					
A51c	75	3,900	26.214	RE: 100% na interface mad/ades					
B51c	75	4,340	47.513	RE: 100% na madeira					
C101c	75	3,724	25.374	MFE: 20% RE: 60% na madeira e 20% na interface mad/ades					
C121c	75	5,440	35.325	RE: 100% na madeira					
C131c	75	5,240	15.180	MFE: 50% RE: 50% na madeira					
B143c	75	3,293	7.027	RE: 100% na madeira					

TABELA 5 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
A63c	60	3,060	80.000	RE: 100% na madeira				
B73c	60	3,596	60.348	RE: 100% na interface mad/ades				
A83c	60	3,786	67.514	MFE: 70% RE: 30% na interface mad/ades				
B113c	60	3,906	120.062	RE: 100% na madeira				
C123c	60	5,440	78.108	RE: 50% na madeira e 50% na interface mad/ades				
A141c	60	3,840	105.919	RE: 80% na madeira e 20% na interface mad/ades				

TABELA 6 – *Pinus caribea hondurensis*, Adesivo Poliuretano à Base de Mamona

Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
C51m	90	2,180	193	RE: 100% na madeira				
B71m	90	4,027	157	RE: 100% na madeira				
C81m	90	4,158	328	RE: 100% na interface mad/ades				
E93m	90	3,916	260	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades				
D113m	90	4,513	509	RE: 100% na madeira				
C131m	90	5,554	286	RE: 100% na interface mad/ades				

TABELA 6 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura	
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda	
D51m	75	2,019	24.629	MFE: 50% RE: 50% na madeira	
C63m	75	3,104	20.084	RE: 100% na madeira	
B91m	75	4,777	33.358	RE: 100% na madeira	
D101m	75	4,418	22.472	RE: 100% na inter- face mad/ades	
C121m	75	4,348	18.430	RE: 70% na madeira e 30% na interface mad/ades	
A133m	75	5,940	15.161	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades	
A73m	60	3,906	105.933	MFE: 95% RE: 5% na madeira	
A63m	60	1,928	89.235	RE: 100% na madeira	
E81m	60	4,600	37.879	MFE: 90% RE: 10% na interface mad/ades	
A101m	60	4,805	104.860	MFE: 85% RE: 15% na inter- face mad/ades	
B111m	60	4,336	34.625	RE: 100% na interface mad/ades	
D121m	60	6,958	122.984	RE: 55% na madeira e 45% na interface mad/ades	

4 *Eucalyptus grandis* - $f = 1$ Hz e $R = 0,1$ TABELA 7 – *Eucalyptus grandis*, Cascophen RS-216-M

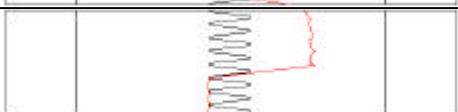
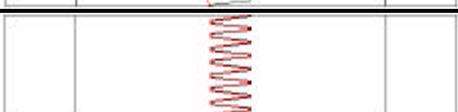
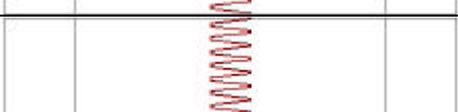
Resistência				Modo de ruptura			
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda			
A21c	90	8,108	69	RE: 100% na interface mad/ades			
G33c	90	6,269	31	RE: 100% na interface mad/ades			
A43c	90	6,520	108	RE: 100% na interface mad/ades			
B61c	90	6,284	67	RE: 100% na interface mad/ades			
A73c	90	5,957	49	MFE: 5% RE: 95% na interface mad/ades			
C111c	90	3,155	40	MFE: 55% RE: 40% na madeira e 5% na interface mad/ades			
A33c	75	6,390	6.007	RE: 100% na interface mad/ades			
D41c	75	6,418	2.924	MFE: 5% RE: 95% na interface mad/ades			
A51c	75	6,980	6.014	RE: 100% na interface mad/ades			
D81c	75	7,018	2.075	RE: 100% na interface mad/ades			
A93c	75	5,892	4.321	RE: 100% na interface mad/ades			
C103	75	3,817	5.378	RE: 100% na interface mad/ades			

TABELA 7 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
A31c	60	6,390	30.000	RE: 100% na interface mad/ades				
C61c	60	6,391	26.052	RE: 100% na interface mad/ades				
A71c	60	5,957	16.135	RE: 100% na interface mad/ades				
E103c	60	4,761	36.250	MFE: 5% RE: 10% na madeira e 85% na interface mad/ades				
B113c	60	2,778	25.161	RE: 100% na madeira				
E113c	60	6,469	16.019	MFE: 15% RE: 85% na interface mad/ades				

TABELA 8 – *Eucalyptus grandis*, Adesivo Poliuretano à Base de Mamona

Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
E33m	90	4,613	72	RE: 100% na interface mad/ades				
D43m	90	6,427	49	MFE: 20% RE: 80% na interface mad/ades				
E73m	90	3,867	11	RE: 100% na interface mad/ades				
A93m	90	3,545	56	RE: 100% na madeira				
D121m	90	8,393	155	RE: 25% na madeira e 75% na interface mad/ades				
C113m	90	5,877	53	RE: 100% na interface mad/ades				

TABELA 8 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura	
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda	
D41m	75	6,427	6.452	MFE: 10% RE: 10% na madeira e 80% na interface mad/ades	
C51m	75	5,813	6.349	RE: 100% na interface mad/ades	
C91m	75	3,712	3.798	MFE: 100%	
B101m	75	7,508	3.199	RE: 100% na interface mad/ades	
B111m	75	4,667	6.294	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades	
B131m	75	6,347	4.255	RE: 100% na madeira	
D53m	60	6,023	32.412	RE: 100% na interface mad/ades	
A31m	60	8,938	16.138	RE: 100% na interface mad/ades	
C73m	60	4,052	27.073	MFE: 10% RE: 20% na madeira 70% na interface mad/ades	
D101m	60	6,568	25.765	RE: 100% na interface mad/ades	
A111m	60	5,718	46.278	RE: 100% na interface mad/ades	
D133m	60	6,627	9.654	RE: 100% na interface mad/ades	

5 *Eucalyptus grandis* - f = 5 Hz e R = 0,1

TABELA 9 – *Eucalyptus grandis*, Cascophen RS-216-M

Resistência				Modo de ruptura			
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda			
G31c	90	6,269	325	RE: 100% na interface mad/ades			
B31c	90	6,308	264	RE: 100% na interface mad/ades			
C41c	90	6,218	139	RE: 100% na interface mad/ades			
C63c	90	6,391	216	RE: 100% na interface mad/ades			
C91c	90	3,565	413	RE: 100% na madeira			
E111c	90	6,469	335	RE: 100% na interface mad/ades			
B33c	75	6,308	9.205	RE: 100% na interface mad/ades			
C43c	75	6,218	4.138	RE: 100% na interface mad/ades			
B51c	75	6,326	13.371	RE: 100% na interface mad/ades			
B81c	75	7,189	6.027	RE: 100% na interface mad/ades			
B93c	75	5,892	10.327	RE: 100% na interface mad/ades			
D101c	75	4,615	9.535	RE: 100% na interface mad/ades			

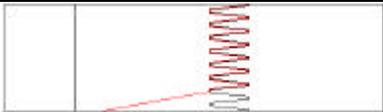
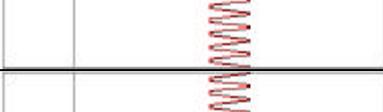
TABELA 9 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
C31c	60	6,372	50.073	RE: 100% na interface mad/ades				
C71c	60	3,242	35.106	RE: 100% na interface mad/ades				
D83c	60	7,018	26.022	RE: 100% na interface mad/ades				
D103c	60	4,615	66.561	RE: 100% na interface mad/ades				
D113c	60	4,829	21.410	MFE: 55% RE: 45% na interface mad/ades				
A113c	60	2,900	47.202	MFE: 75% RE: 20% na interface mad/ades				

TABELA 10 – *Eucalyptus grandis*, Adesivo Poliuretano à Base de Mamona

Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
B51m	90	5,278	234	RE: 100% na interface mad/ades				
E41m	90	6,051	214	MFE: 10% RE: 90% na interface mad/ades				
A73m	90	7,999	116	RE: 100% na interface mad/ades				
A91m	90	3,545	212	MFE: 20% RE: 80% na madeira				
A121m	90	6,732	509	RE: 100% na interface mad/ades				
B133m	90	6,347	387	RE: 100% na interface mad/ades				

TABELA 10 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura	
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda	
C53m	75	5,813	12.764	MFE: 15% RE: 85% na interface mad/ades	
D31m	75	4,798	7.386	RE: 100% na interface mad/ades	
B93m	75	3,539	9.640	MFE: 100%	
C101m	75	8,995	5.268	RE: 100% na interface mad/ades	
D111m	75	4,990	5.624	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades	
C131m	75	6,774	8.561	RE: 100% na interface mad/ades	
C31m	60	4,756	67.434	RE: 100% na interface mad/ades	
B43m	60	7,182	50.000	RE: 100% na interface mad/ades	
D71m	60	3,791	20.788	RE: 100% na interface mad/ades	
E101m	60	6,483	63.208	RE: 100% na interface mad/ades	
C111m	60	5,877	46.081	MFE: 50% RE: 50% na interface mad/ades	
A131m	60	7,467	44.230	MFE: 5% RE: 95% na interface mad/ades	

6 *Eucalyptus grandis* - $f = 9$ Hz e $R = 0,1$ TABELA 11 – *Eucalyptus grandis*, Cascophen RS-216-M

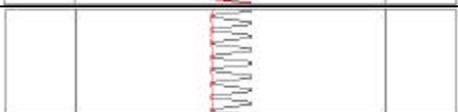
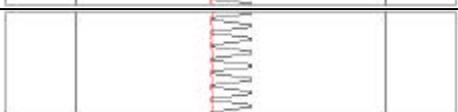
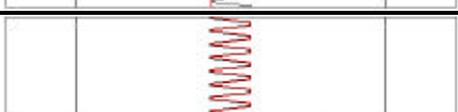
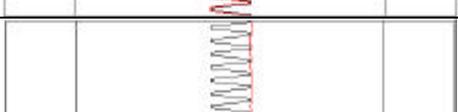
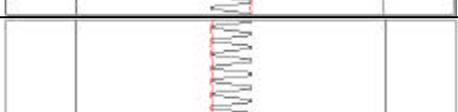
Resistência				Modo de ruptura			
CP	σ_{max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda			
B23c	90	7,401	627	RE: 100% na interface mad/ades			
F31c	90	5,844	155	RE: 100% na interface mad/ades			
D43c	90	6,418	198	RE: 100% na interface mad/ades			
A61c	90	6,990	400	RE: 100% na interface mad/ades			
E73c	90	3,242	130	RE: 100% na madeira			
B113	90	2,778	203	RE: 100% na madeira			
C21c	75	6,549	25.796	MFE: 5% RE: 95% na interface mad/ades			
D51c	75	5,912	51.125	RE: 100% na interface mad/ades			
A81c	75	7,982	30.239	RE: 100% na interface mad/ades			
B91c	75	5,318	10.556	RE: 100% na interface mad/ades			
C93c	75	3,565	17.613	RE: 100% na madeira			
C101c	75	3,817	31.451	MFE: 48% RE: 52% na interface mad/ades			

TABELA 11 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
D33c	60	6,313	80.135	RE: 100% na interface mad/ades				
B63c	60	6,284	40.166	RE: 100% na interface mad/ades				
C73c	60	3,964	70.910	RE: 100% na madeira				
A101c	60	3,882	101.142	MFE: 60% RE: 40% na interface mad/ades				
D111c	60	4,829	104.429	MFE: 20% RE: 30% na madeira e 50% na interface mad/ades				
A111c	60	2,900	95.920	RE: 40% na madeira e 60% na interface mad/ades				

TABELA 12-*Eucalyptus grandis*, Adesivo Poliuretano à Base de Mamona

Resistência				Modo de ruptura				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda				
D33m	90	4,798	295	RE: 100% na interface mad/ades				
E43m	90	6,051	247	RE: 100% na interface mad/ades				
C71m	90	4,052	318	RE: 100% na interface mad/ades				
C93m	90	3,712	159	RE: 90% na madeira e 10% na interface mad/ades				
D123m	90	8,393	321	RE: 100% na interface mad/ades				
A123m	90	6,732	593	RE: 100% na interface mad/ades				

TABELA 12 – Continuação

Resistência				Modo de ruptura	
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{gt0} (kN)	N (ciclos)	- RE: região da emenda - MFE: madeira fora da região da emenda	
C33m	75	4,756	26.638	RE: 100% na interface mad/ades	
E53m	75	5,989	21.256	MFE: 25% RE: 75% na interface mad/ades	
B91m	75	3,539	18.870	MFE: 10% RE: 90% na madeira	
C103m	75	8,995	15.358	RE: 100% na interface mad/ades	
D113m	75	4,990	38.047	RE: 75% na madeira e 25% na interface mad/ades	
D131m	75	6,627	8.099	RE: 100% na interface mad/ades	
B41m	60	7,182	70.819	RE: 100% na interface mad/ades	
B53m	60	5,278	108.540	MFE: 20% RE: 80% na interface mad/ades	
A71m	60	7,999	117.265	RE: 100% na interface mad/ades	
D103m	60	6,586	39.331	RE: 100% na interface mad/ades	
B113m	60	4,667	97.100	RE: 95% na madeira e 5% na interface mad/ades	
C121m	60	6,792	62.769	MFE: 10% RE: 60% na madeira e 30% na interface mad/ades	

A.4: Resultados dos ensaios cíclicos nos corpos-de-prova de madeira maciça

RESISTÊNCIA À FADIGA DA MADEIRA MACIÇA

TABELA 1 – Resistência à fadiga da madeira maciça, 1 Hz.

<i>Pinus caribea hondurensis</i>				<i>Eucalyptus grandis</i>			
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{t0} (kN)	N (ciclos)	CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{t0} (kN)	N (ciclos)
B63c	90	3,569	91	D21c	90	8,767	13
B101c	90	3,117	57	E53c	90	8,478	45
D71m	90	4,561	21	E61c	90	7,830	204
E123m	90	6,985	139	D71c	90	4,041	104
B27	90	6,880	113	E91m	90	6,694	34
E21	90	6,750	87	E131m	90	8,125	134
E71c	75	4,125	93.432	E31c	75	7,610	153.472
A123c	75	7,290	118.610	D61c	75	7,574	124.896
E133c	75	7,100	178.388	C83c	75	9,623	81.872
B61m	75	3,750	66.818	A51m	75	8,894	94.734
A23	75	6,860	72.917	E111m	75	6,017	77.639
B25	75	6,880	87.134	A103m	75	9,039	114.332
D113c	60	4,902	211.480	E51c	60	8,478	300.060
A123c	60	7,290	430.899	E63c	60	7,830	447.727
D73m	60	4,561	204.017	D73c	60	4,041	256.633
D93m	60	3,614	229.270	B101c	60	8,175	483.367
D21	60	6,750	252.510	F33m	60	6,747	428.444
B21	60	6,880	400.197	A41m	60	10,893	180.865

TABELA 2 – Resistência à fadiga da madeira maciça, 5 Hz.

<i>Pinus caribea hondurensis</i>				<i>Eucalyptus grandis</i>			
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{t0} (kN)	N (ciclos)	CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{t0} (kN)	N (ciclos)
D61c	90	3,697	187	D23c	90	8,767	181
B91c	90	3,717	417	B73c	90	4,902	120
C101m	90	4,812	348	E81c	90	10,346	236
E121m	90	6,985	617	F111c	90	7,480	639
C15	90	5,400	584	E93m	90	7,089	594
D27	90	6,750	381	E133m	90	8,125	897
D63c	75	3,697	360.056	B41c	75	8,144	339.606
E131c	75	7,100	124.050	C81c	75	9,623	255.226
D143c	75	5,862	309.413	E91c	75	7,089	356.979
C103m	75	4,812	163.539	B31m	75	9,566	249.317
C13	75	5,400	253.120	B71m	75	7,553	182.182
E23	75	6,750	219.832	E123m	75	9,215	290.385
B103c	60	3,117	900.005	C53c	60	8,677	1.601.572
F121c	60	6,763	703.389	D63c	60	7,574	902.906
B53m	60	5,177	1.794.615	D91c	60	6,899	1.310.678
E111m	60	4,884	1.149.067	F113c	60	7,694	867.411
D16	60	4,710	1.382.568	A43m	60	10,893	1.413.229
C25	60	6,680	791.034	F31m	60	6,747	1.887.691

TABELA 3 – Resistência à fadiga da madeira maciça, 9 Hz.

<i>Pinus caribea hondurensis</i>				<i>Eucalyptus grandis</i>			
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{t0} (kN)	N (ciclos)	CP	σ_{\max} (% f_{t0})	f_{t0} (kN)	N (ciclos)
B61c	90	3,569	103	E33c	90	7,610	355
B93c	90	3,717	325	E83c	90	10,346	157
E113m	90	4,884	649	A53m	90	8,894	430
E133m	90	7,210	619	E113m	90	6,017	284
A16	90	5,350	669	B12	90	10,05	745
E27	90	6,75	925	D16	90	5,610	1.077
D81c	75	4,726	150.375	B43c	75	8,144	175.454
D111c	75	4,882	241.314	C51c	75	8,677	241.199
D141c	75	5,862	454.026	D93c	75	6,899	310.731
E131m	75	7,210	264.474	B73m	75	7,553	473.653
A12	75	5,350	297.954	A101m	75	9,039	332.578
D13	75	4,710	373.929	E15	75	5,870	329.510
E73c	60	4,125	793.417	B71c	60	4,902	963.383
F123c	60	6,763	1.106.942	B103c	60	8,175	1.367.100
B51m	60	5,177	1.814.582	B33m	60	9,566	1.410.236
F61m	60	3,968	1.264.336	E121m	60	9,215	1.145.759
D91m	60	3,614	1.330.109	D11	60	5,610	1.145.760
A25	60	6,860	1.016.584	E16	60	5,870	1.535.709

***ANEXO B: Gráficos da variação de rigidez em
função do número de ciclos***

***B.1: Variação da rigidez dos corpos-de-prova
com emendas dentadas em função do
número de ciclos: Cascophen RS-216-M***

EVOLUÇÃO DA RIGIDEZ NAS EMENDAS DENTADAS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS - CASCOPHEN RS-216-M

1) $S_{max} = 75\% f_{t0}$

a) 1Hz

TABELA 1 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 1Hz.

N	D51c		E63c		A73c		C83c		C111c		B141c	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	815,6	-	738,2	-	774,4	-	860,6	-	827,9	-	772,5	-
1000	830,5	1,8	736,1	-0,3	823,0	4,	877,1	1,9	835,2	0,9	779,7	0,9
2000	832,7	2,1	724,9	-1,8	808,3	4,4	878,4	2,0	834,2	0,8	782,3	1,3
3000	830,6	1,8	-	-	805,0	3,9	879,1	2,1	834,2	0,8	781,1	1,1
4000	809,8	-0,7	-	-	-	-	886,4	3,0	833,3	0,7	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	889,7	3,4	810,0	-2,1	-	-
6000	-	-	-	-	-	-	874,8	1,6	-	-	-	-

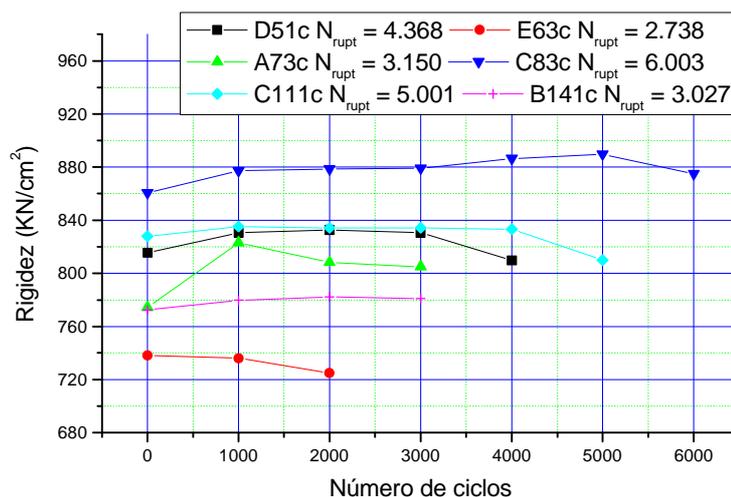


Figura 1 – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 1Hz.

TABELA 2 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 75% e 1Hz.

N	A33c		D41c		A51c		D81c		A93c		C103c	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	1475,3	-	1400,1	-	1654,5	-	1901,4	-	1463,1	-	1603,4	-
1000	1445,0	-2,0	1460,5	4,3	1717,3	3,8	1930,2	1,5	1473,4	0,7	1639,3	2,2
2000	1443,6	-2,1	1421,3	1,5	1706,2	3,1	1928,7	1,4	1468,5	0,4	1648,2	2,8
3000	1444,3	-2,1	-	-	1695,7	2,9	-	-	1468,4	0,4	1648,5	2,8
4000	1443,6	-2,1	-	-	1656,5	2,8	-	-	1464,2	0,1	1657,6	3,4
5000	1443,6	-2,1	-	-	1655,3	2,9	-	-	-	-	1637,7	2,1
6000	1428,2	-3,2	-	-	1646,2	-0,5	-	-	-	-	-	-

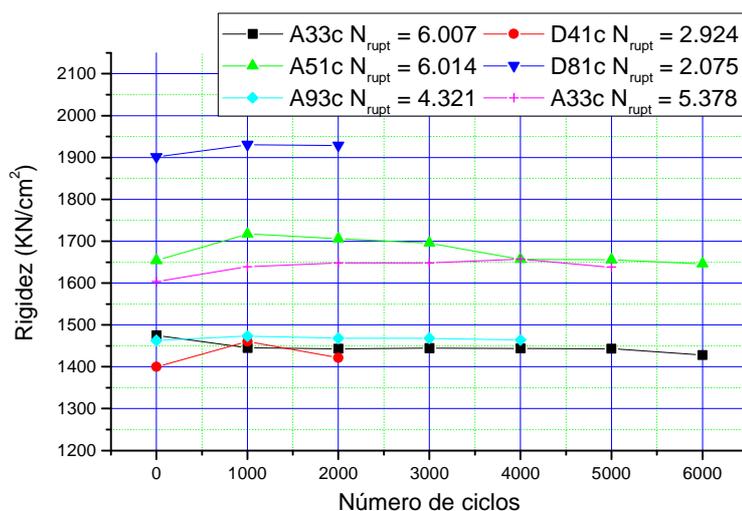


Figura 2 – *Eucalyptus grandis* 75% e 1 Hz.

b) 5 Hz

TABELA 3 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 5Hz.

N	B53c		C71c		A103c		B123c		D133c		B141c	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	907,0	-	731,4	-	783,3	-	1386,3	-	1291,1	-	886,4	-
2000	918,2	1,2	724,7	-0,9	822,4	5,0	1415,6	2,1	1310,1	1,5	896,3	1,1
4000	918,4	1,3	707,6	-3,2	817,0	4,3	-	-	1304,4	1,0	919,9	3,7
6000	915,0	0,9	730,4	-0,1	823,6	5,1	-	-	1302,1	0,8	917,1	3,5
8000	912,4	0,6	733,6	0,3	828,4	5,7	-	-	-	-	-	-
10000	912,8	0,6	730,6	0,1	816,5	4,2	-	-	-	-	-	-
12000	882,7	-2,6	717,3	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-
14000	818,6	-9,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

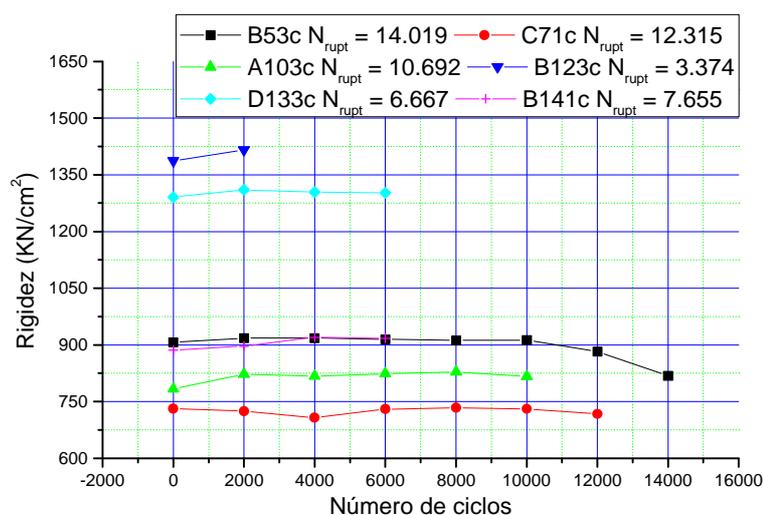


Figura 3 – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 5Hz.

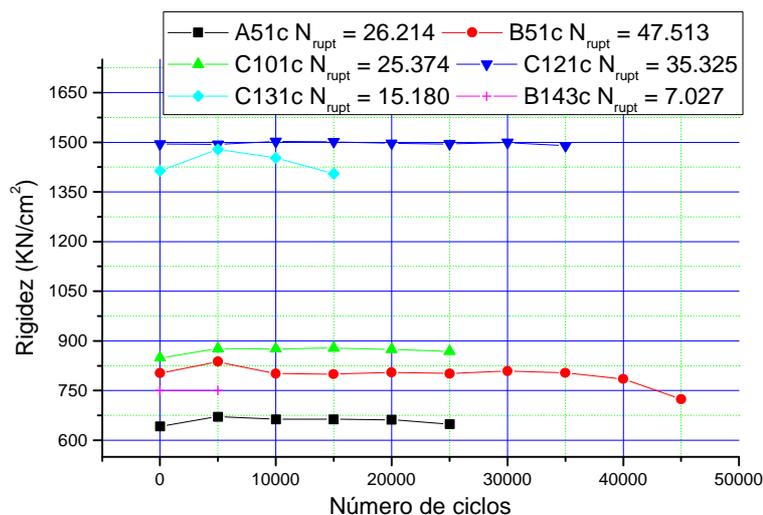


Figura 5 – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 9 Hz.

TABELA 6 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 75% e 9Hz.

N	C21c		D51c		A81c		B91c		C93c		C101c	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	1284,5	-	1471,0	-	1649,3	-	1455,5	-	1256,2	-	1488,2	-
5000	1337,2	4,1	1489,0	1,2	1679,4	1,8	1464,8	0,6	1271,5	1,2	1530,5	2,8
10000	1334,9	3,9	1504,5	2,3	1667,3	1,1	1440,4	1,0	1262,7	0,5	1530,9	2,8
15000	1337,2	4,1	1506,6	2,4	1667,4	1,1	-	-	1250,3	-0,5	1541,0	3,5
20000	1335,8	4,0	1500,6	2,0	1659,8	0,6	-	-	-	-	1541,1	3,6
25000	1278,0	-0,5	1504,5	2,3	1655,0	0,3	-	-	-	-	1532,9	3,0
30000	-	-	1496,8	1,7	1649,8	0,0	-	-	-	-	1488,7	0,0
35000	-	-	1496,0	1,7	-	-	-	-	-	-	-	-
40000	-	-	1495,9	1,7	-	-	-	-	-	-	-	-
45000	-	-	1468,2	-0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
50000	-	-	1457,3	-0,9	-	-	-	-	-	-	-	-

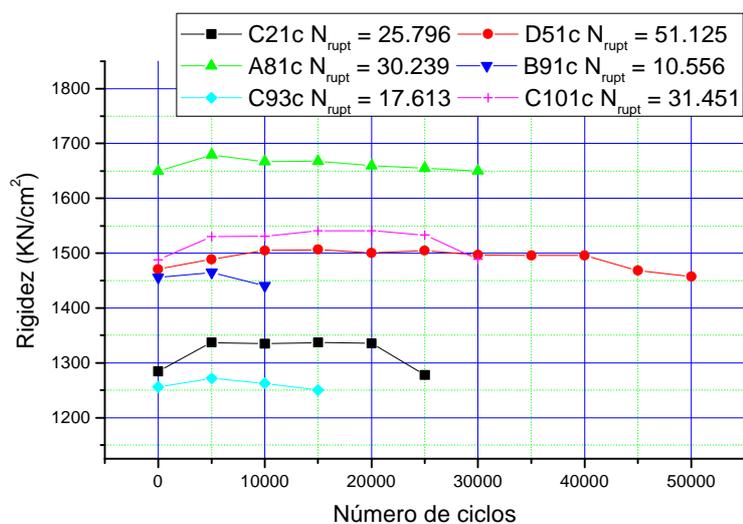


Figura 6 – *Eucalyptus grandis* 75% e 9 Hz.

2) $S_{max} = 60\% f_{t0}$

a) 1Hz

TABELA 7 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 1Hz.

N	C63c		D71c		C103c		A111c		D131c		A143c	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	642,2	-	660,2	-	891,6	-	852,0	-	1147,6	-	824,6	-
5000	642,1	0,0	662,2	0,3	943,7	5,8	870,8	2,2	1238,3	1,4	860,2	4,3
10000	644,1	0,3	678,6	2,8	-	-	858,6	0,8	1248,6	2,2	856,0	3,7
15000	655,4	2,0	680,6	3,1	-	-	878,3	3,1	1235,3	1,4	853,3	3,5
20000	629,7	-1,9	687,2	4,1	-	-	880,1	3,3	1237,4	1,3	854,6	3,6
25000	-	-	656,5	-0,5	-	-	893,5	4,9	-	-	833,0	1,0
30000	-	-	-	-	-	-	845,8	-0,7	-	-	-	-

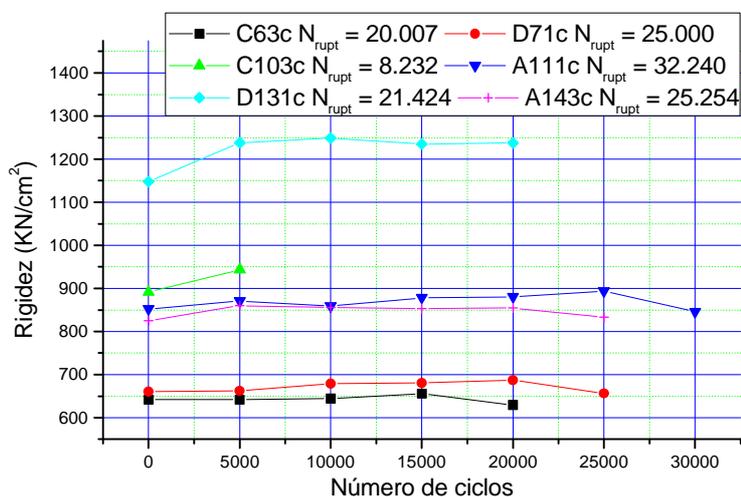


Figura 7 – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 1 Hz.

TABELA 8 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 60% e 1Hz.

N	A31c		C61c		A71c		E103c		B113c		E113c	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	1432,6	-	1539,0	-	1650,3	-	1371,3	-	1245,4	-	1816,1	-
5000	1455,8	1,6	1607,0	4,4	1671,4	1,3	1400,3	2,6	1305,2	4,8	1839,5	1,3
10000	1431,1	-0,1	1601,8	4,0	1705,8	3,4	1410,4	2,8	1302,7	4,6	1845,9	1,6
15000	1430,4	-0,1	1596,0	3,7	1703,1	3,2	1407,9	2,7	1302,5	4,6	1837,0	1,1
20000	1430,6	-0,1	1581,4	2,7	-	-	1407,7	2,6	1281,4	2,9	-	-
25000	1410,7	-0,1	1478,9	-3,9	-	-	1406,4	2,5	1281,4	2,9	-	-
30000	-	-	-	-	-	-	1404,1	2,4	-	-	-	-
35000	-	-	-	-	-	-	1388,5	1,2	-	-	-	-

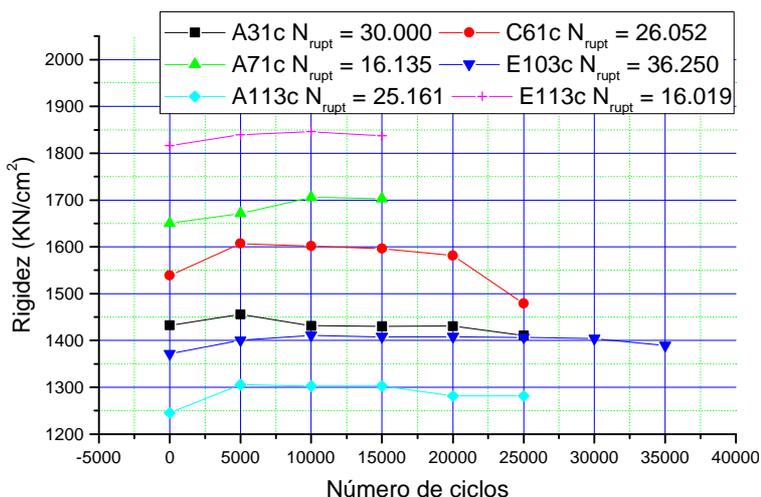


Figura 8 – *Eucalyptus grandis* 60% e 1 Hz.

b) 5 Hz

TABELA 9 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 5Hz.

N	C61c		D73c		D103c		C113c		B133c		C143c	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	648,5	-	643,7	-	737,2	-	885,5	-	1325,2	-	592,3	-
10000	665,0	2,5	645,9	0,3	765,6	3,8	901,0	1,7	1342,4	1,3	602,6	1,7
20000	664,2	2,4	653,5	1,5	756,9	2,7	903,5	2,0	1339,5	1,1	607,1	2,5
30000	664,2	2,4	-	-	757,3	2,7	921,8	4,1	1361,0	2,7	608,8	2,8
40000	664,2	2,4	-	-	-	-	922,1	1,6	1353,3	2,1	604,9	2,1
50000	663,8	2,3	-	-	-	-	925,7	4,5	1319,4	-0,4	589,9	-0,4
60000	-	-	-	-	-	-	879,1	-0,7	-	-	-	-

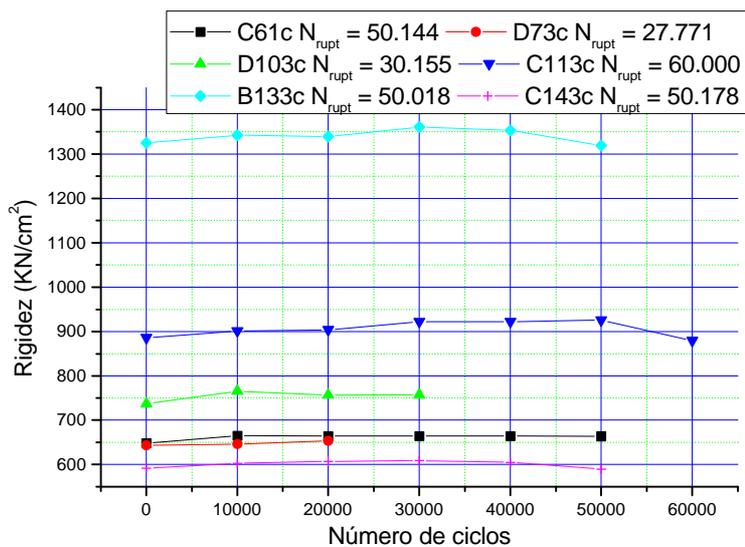
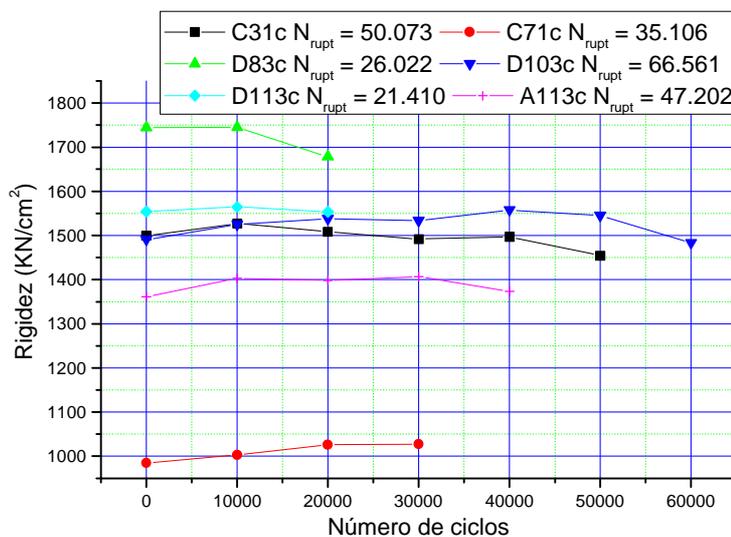


Figura 9 – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 5 Hz.

TABELA 10 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 60% e 5Hz.

N	C31c		C71c		D83c		D103c		D113c		A113c	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	1499,1	-	984,7	-	1744,3	-	1490,5	-	1554,5	-	1361,1	-
10000	1527,1	1,9	1003,4	1,9	1745,0	0,0	1524,9	2,3	1564,9	0,7	1402,8	3,1
20000	1508,8	0,6	1026,3	4,2	1678,2	3,8	1538,3	3,2	1553,6	0,0	1398,2	2,7
30000	1491,8	-0,5	1027,3	4,3	-	-	1533,7	2,9	-	-	1407,2	3,4
40000	1497,1	-0,1	-	-	-	-	1557,5	4,5	-	-	1373,6	0,9
50000	1454,4	-2,-	-	-	-	-	1544,9	3,6	-	-	-	-
60000	-	-	-	-	-	-	1483,0	-0,5	-	-	-	-

Figura 10 – *Eucalyptus grandis* 60% e 5 Hz.

c) 9 Hz

TABELA 11 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 9Hz.

N	A63c		B73c		A83c		B113c		C123c		A141c	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	633,9	-	854,3	-	747,8	-	925,5	-	1442,6	-	883,6	-
20000	674,2	6,4	877,5	2,7	768,0	2,7	945,1	2,1	1498,3	3,9	887,3	0,4
40000	661,0	4,3	867,3	1,5	748,9	2,0	959,5	3,7	1499,0	3,9	895,7	1,4
60000	662,3	4,5	871,3	2,0	737,6	-1,4	973,5	5,2	1475,4	2,3	889,4	0,6
80000	669,7	5,6	-	-	-	-	957,1	3,3	-	-	888,4	0,5
100000	-	-	-	-	-	-	969,4	4,7	-	-	885,4	0,2
120000	-	-	-	-	-	-	914,2	-0,1	-	-	-	-

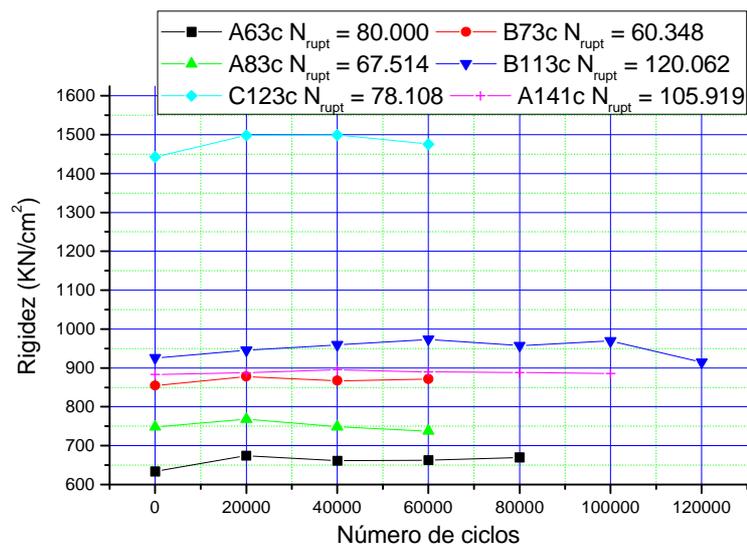


Figura 11 – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 9 Hz.

TABELA 12 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 60% e 9Hz.

N	D33c		B63c		C73c		A101c		D111c		A111c	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	1604,5	-	1546,4	-	1267,3	-	1407,0	-	1460,4	-	1391,4	-
20000	1635,7	1,9	1600,1	3,5	1268,5	0,1	1410,4	0,2	1492,3	2,2	1419,9	2,0
40000	1636,6	2,0	1573,4	1,7	1282,9	1,0	1414,5	0,5	1490,5	2,1	1416,1	1,8
60000	1634,9	1,9	-	-	1263,5	-0,3	1416,8	0,7	1493,4	2,3	1411,0	1,4
80000	1611,6	0,4	-	-	-	-	1411,9	0,3	1488,4	1,9	1394,4	0,2
100000	-	-	-	-	-	-	1374,8	-2,3	1460,4	0,0	-	-

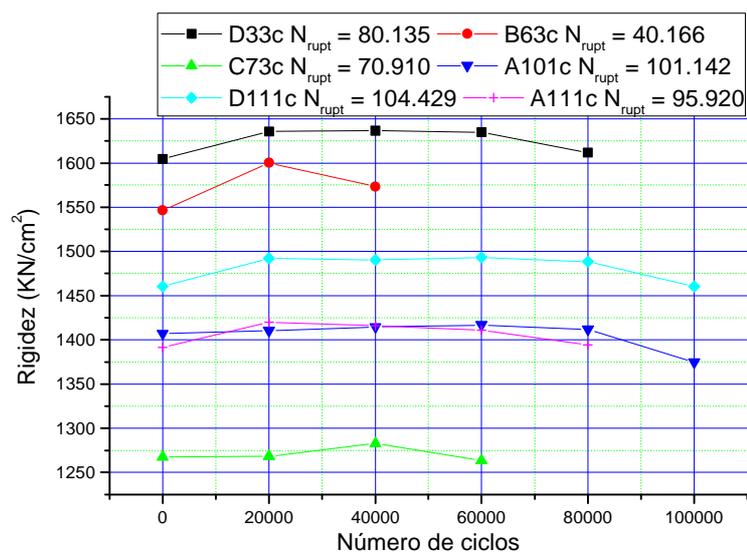


Figura 12 – *Eucalyptus grandis* 60% e 9 Hz.

B.2: Variação da rigidez dos corpos-de-prova com emendas dentadas em função do número de ciclos: Adesivo Poliuretano à base de resina de mamona

EVOLUÇÃO DA RIGIDEZ NAS EMENDAS DENTADAS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS – ADESIVO POLIURETANO À BASE DE ÓLEO DE MAMONA

1) $S_{max} = 75\% f_{t0}$

a) 1Hz

TABELA 1 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 1Hz.

N	A53m		A71m		A91m		E101m		D123m		C133m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	865,3	-	842,4	-	928,1	-	739,6	-	1150,0	-	991,0	-
1000	885,9	2,4	842,2	0,0	939,9	1,3	745,2	0,8	1187,2	3,2	990,4	0,0
2000	885,1	2,3	851,8	1,1	939,5	1,2	744,8	0,7	1187,2	3,2	981,2	-1,0
3000	885,1	2,3	850,7	1,0	944,8	1,8	750,0	1,4	1196,3	4,0	-	-
4000	-	-	843,6	0,1	939,5	1,2	732,3	-1,0	1196,2	4,0	-	-
5000	-	-	839,9	-0,3	938,7	1,1	-	-	1163,8	1,2	-	-
6000	-	-	836,7	-0,7	925,4	-0,3	-	-	-	-	-	-
7000	-	-	835,5	-0,8	-	-	-	-	-	-	-	-

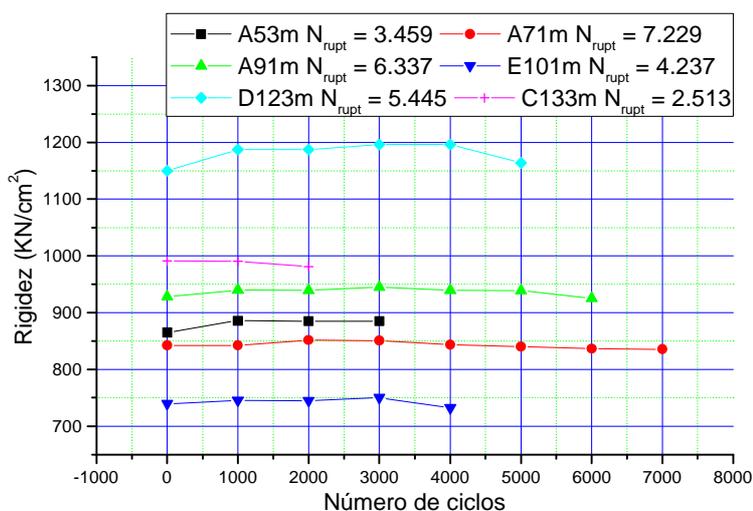


Figura 1 – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 1Hz.

TABELA 2 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 75% e 1Hz.

N	D41m		C51m		C91m		B101m		B111m		B131m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	1584,6	-	1524,2	-	1257,9	-	1602,4	-	1467,9	-	1397,6	-
1000	1657,1	4,6	1540,8	1,1	1297,0	3,1	1624,9	1,4	1505,8	2,6	1407,9	0,7
2000	1668,4	5,3	1541,7	1,1	1276,7	1,5	1628,3	1,6	1505,2	2,5	1411,1	1,0
3000	1667,2	5,2	1541,7	1,1	1297,0	3,1	1621,6	1,2	1501,3	2,3	1411,7	1,0
4000	1668,4	5,3	1541,0	1,1	-	-	-	-	1497,4	2,0	1398,8	0,0
5000	1664,4	5,0	1540,8	1,1	-	-	-	-	1493,1	1,7	-	-
6000	1663,2	4,9	1519,6	-0,3	-	-	-	-	1490,1	1,5	-	-

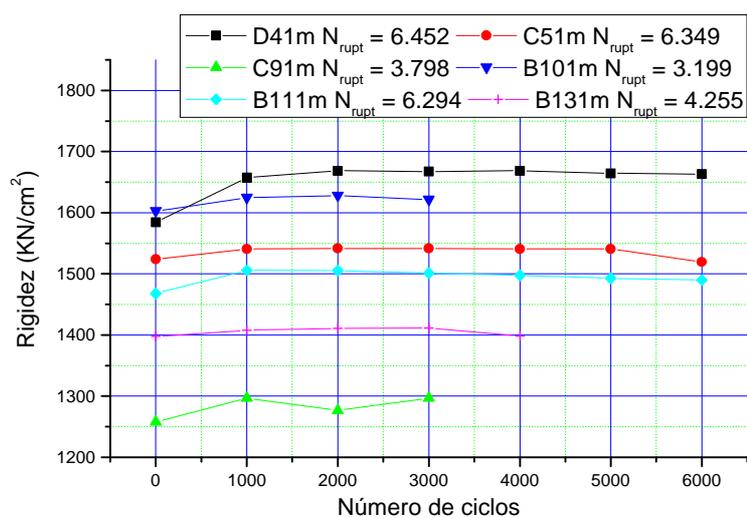


Figura 2 – *Eucalyptus grandis* 75% e 1 Hz.

b) 5 Hz

TABELA 3 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 5Hz.

N	D63m		B73m		A93m		E103m		B121m		A131m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	649,5	-	792,3	-	1031,4	-	778,3	-	1105,9	-	1335,2	-
2000	662,3	2,0	791,0	0,0	1061,4	2,9	777,9	-0,7	1096,3	-0,9	1308,5	2,0
4000	663,5	2,1	-	-	1061,4	2,9	778,1	0,0	1097,4	-0,8	1257,5	-5,8
6000	668,2	2,9	-	-	1060,4	2,8	777,4	-0,1	1096,3	-0,9	-	-
8000	666,8	2,7	-	-	1062,3	3,0	764,2	-1,8	1089,5	-1,5	-	-
10000	658,0	1,3	-	-	1061,4	2,9	-	-	-	-	-	-
12000	-	-	-	-	1054,2	2,2	-	-	-	-	-	-

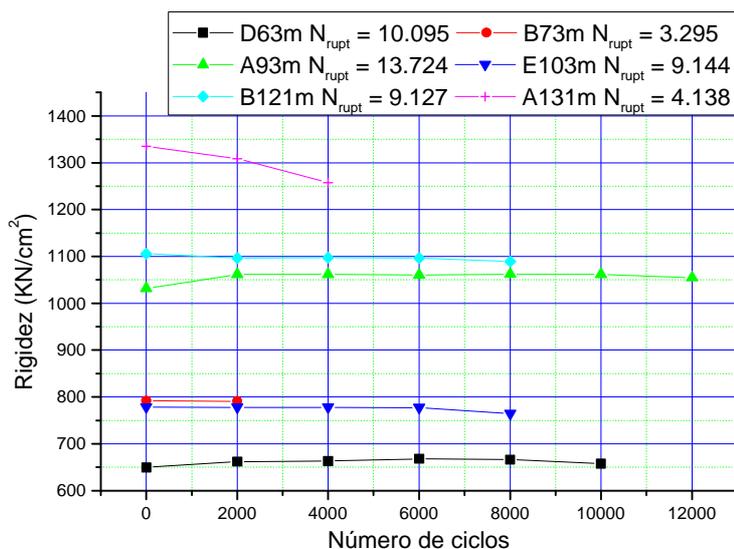
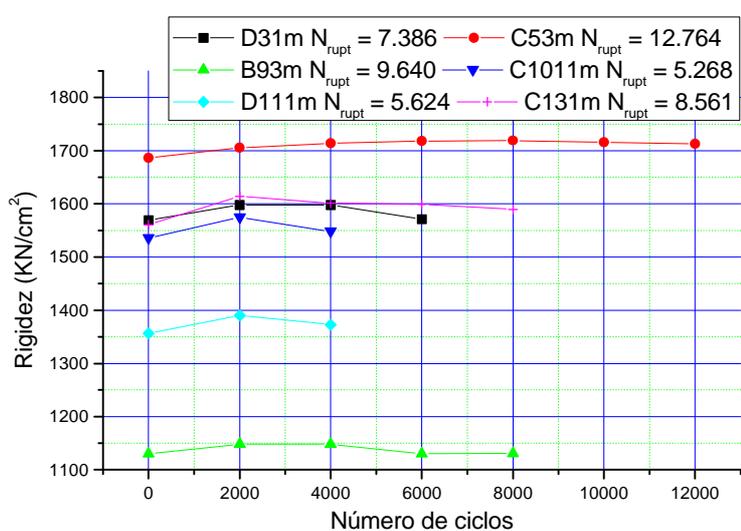


Figura 3 – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 5 Hz.

TABELA 4 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 75% e 5Hz.

N	D31m		C53m		B93m		C101m		D111m		C131m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	1569,2	-	1686,1	-	1130,1	-	1535,6	-	1356,8	-	1560,6	-
2000	1598,0	1,8	1705,4	1,1	1147,9	1,6	1574,7	2,5	1390,4	2,5	1614,3	3,4
4000	1598,0	1,8	1713,8	1,6	1147,9	1,6	1548,1	0,8	1373,0	1,2	1601,1	2,6
6000	1571,1	0,1	1718,1	1,9	1130,1	0,0	-	-	-	-	1599,0	2,5
8000	-	-	1719,0	1,9	1131,0	0,1	-	-	-	-	1589,5	1,8
10000	-	-	1715,5	1,7	-	-	-	-	-	-	-	-
12000	-	-	1712,7	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura 4 – *Eucalyptus grandis* 75% e 5 Hz.

c) 9 Hz

TABELA 5 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 9Hz.

N	D51m		C63m		B91m		D101m		C121m		A133m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	646,0	-	607,8	-	991,8	-	742,1	-	1217,3	-	1063,2	-
5000	654,1	1,2	616,7	1,4	1002,5	1,1	748,8	0,9	1235,3	1,5	1063,0	0,0
10000	653,2	1,1	617,2	1,5	1001,2	0,9	749,2	1,0	1234,5	1,4	1061,9	-0,1
15000	652,2	1,0	616,7	1,4	1001,8	1,0	748,8	0,9	1218,0	0,1	1054,9	-0,7
20000	633,9	-1,9	614,6	1,1	1001,2	0,9	728,9	-1,8	-	-	-	-
25000	-	-	-	-	1002,5	1,1	-	-	-	-	-	-
30000	-	-	-	-	988,3	-0,3	-	-	-	-	-	-

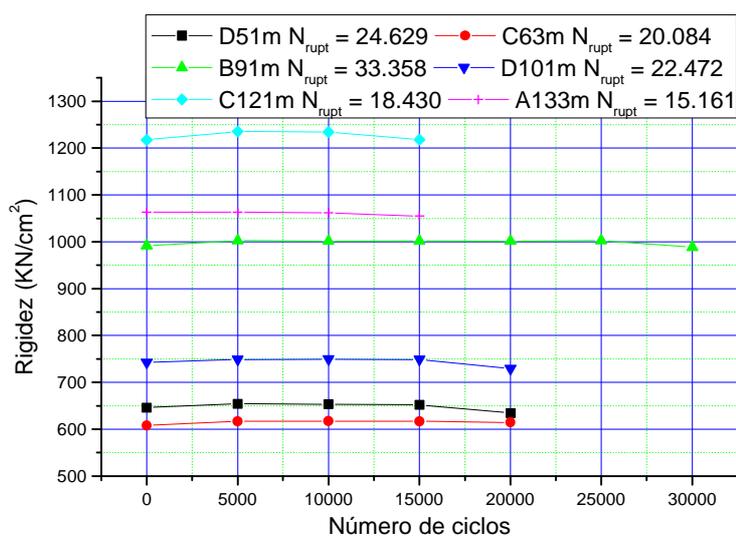


Figura 5 – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 9 Hz.

TABELA 6 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 75% e 9Hz.

N	C33m		E53m		B91m		C103m		D113m		D131m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	1380,8	-	1549,4	-	1175,0	-	1737,1	-	1401,5	-	1589,6	-
5000	1396,1	1,1	1586,8	2,4	1230,3	4,7	1782,3	2,6	1485,0	6,0	1570,4	-1,2
10000	1414,2	2,4	1588,4	2,5	1225,1	4,2	1790,9	3,1	1465,2	4,5	-	-
15000	1406,5	1,9	1587,2	2,4	1225,1	4,2	1757,3	1,2	1465,2	4,6	-	-
20000	1396,1	1,1	1569,5	1,3	-	-	-	-	1466,0	4,6	-	-
25000	1391,4	0,0	-	-	-	-	-	-	1466,2	4,6	-	-
30000	-	-	-	-	-	-	-	-	1462,0	4,3	-	-
35000	-	-	-	-	-	-	-	-	1461,2	4,3	-	-

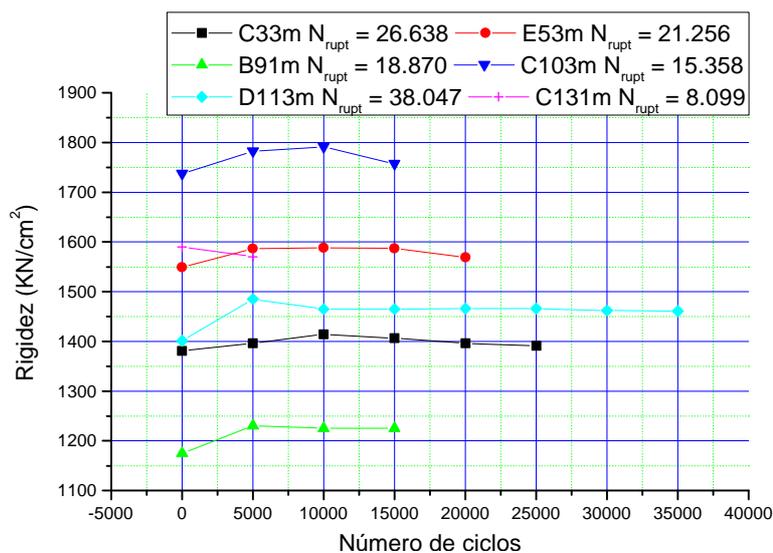


Figura 6 – *Eucalyptus grandis* 75% e 9 Hz.

2) $S_{max} = 60\% f_{t0}$

a) 1Hz

TABELA 7 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 1Hz.

N	C61m		C71m		D81m		B101m		B113m		A123m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	672,4	-	660,7	-	682,6	-	898,5	-	844,1	-	1216,2	-
5000	685,5	1,9	674,8	2,1	717,5	5,1	923,0	2,7	875,6	3,7	1245,3	2,4
10000	681,2	1,3	678,6	2,7	717,5	5,1	938,4	4,4	875,6	3,7	1245,3	2,4
15000	693,2	3,1	678,6	2,7	692,7	1,5	936,5	4,4	884,2	4,7	1243,7	2,4
20000	684,7	1,8	-	-	-	-	937,1	4,2	877,0	3,9	1215,2	-0,1
25000	686,3	2,1	-	-	-	-	937,9	4,3	870,9	3,2	-	-
30000	671,1	-0,2	-	-	-	-	923,3	2,7	-	-	-	-

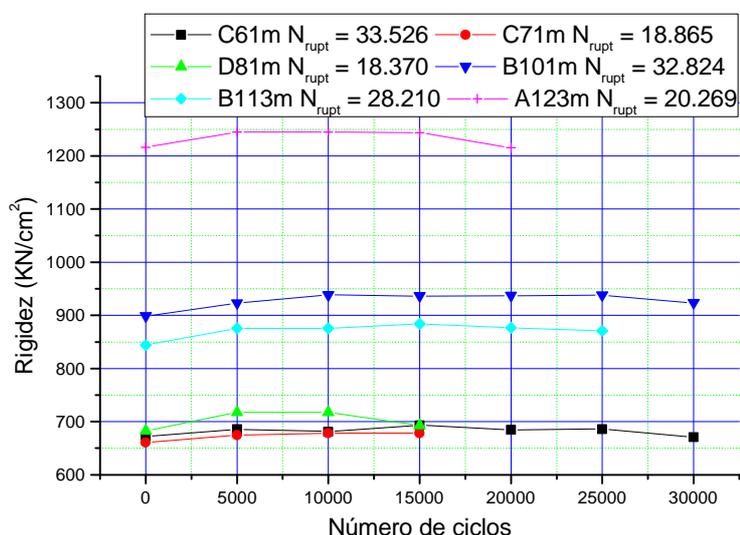


Figura 7 – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 1 Hz.

TABELA 8 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 60% e 1Hz.

N	A31m		D53m		C73m		D101m		A111m		D133m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	1704,4	-	1579,6	-	1212,1	-	1419,1	-	1515,9	-	1587,2	-
5000	1749,8	2,6	1598,3	1,2	1263,5	4,3	1445,7	1,9	1516,6	0,0	1619,8	2,0
10000	1742,2	2,2	1598,6	1,2	1256,9	3,7	1445,7	1,9	1554,0	2,5	-	-
15000	1678,7	-1,5	1597,9	1,2	1255,9	3,6	1432,0	0,9	1554,7	2,6	-	-
20000	-	-	1597,2	1,1	1222,5	0,8	1403,6	-1,1	1554,7	2,6	-	-
25000	-	-	1597,2	1,1	1221,5	0,8	1176,3	-17,1	1554,0	2,5	-	-
30000	-	-	1590,7	0,7	-	-	-	-	1554,3	2,5	-	-
35000	-	-	-	-	-	-	-	-	1554,0	2,5	-	-
40000	-	-	-	-	-	-	-	-	1535,1	1,3	-	-
45000	-	-	-	-	-	-	-	-	1534,4	1,2	-	-

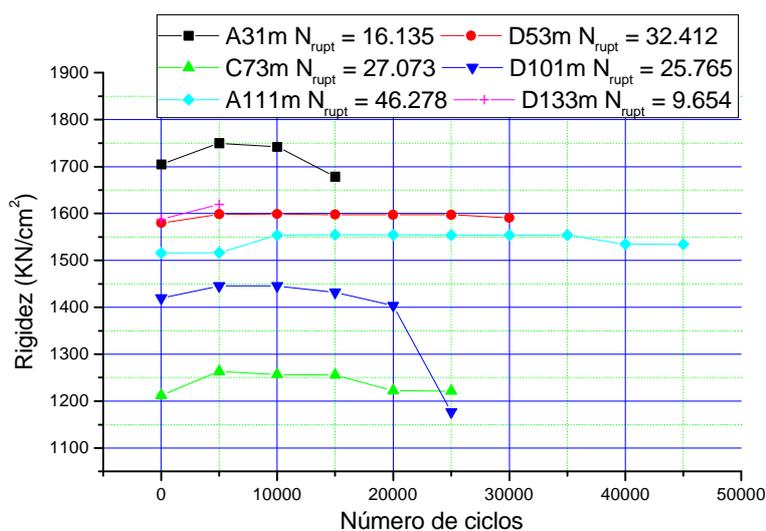


Figura 8 – *Eucalyptus grandis* 60% e 1 Hz.

b) 5 Hz

TABELA 9 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 5Hz.

N	A51m		E61m		E83m		B103m		C111m		B123m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	947,3	-	776,8	-	741,7	-	821,1	-	958,4	-	1278,5	-
10000	947,3	0,0	788,2	1,4	744,8	0,4	847,1	3,2	977,5	2,0	1313,8	2,8
20000	960,9	1,4	788,2	1,4	746,9	0,7	853,1	3,9	986,8	3,0	1315,1	2,9
30000	960,0	1,3	785,8	1,1	744,3	0,3	858,7	4,6	957,8	-0,1	1284,4	0,5
40000	940,1	-0,7	776,3	-0,7	713,3	-3,8	859,6	4,7	-	-	-	-
50000	-	-	-	-	-	-	859,2	4,6	-	-	-	-
60000	-	-	-	-	-	-	859,2	4,6	-	-	-	-
70000	-	-	-	-	-	-	845,1	2,9	-	-	-	-

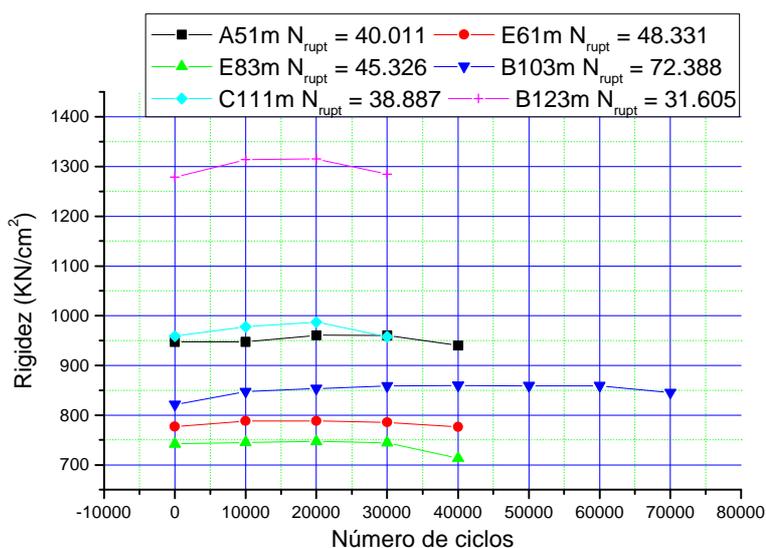
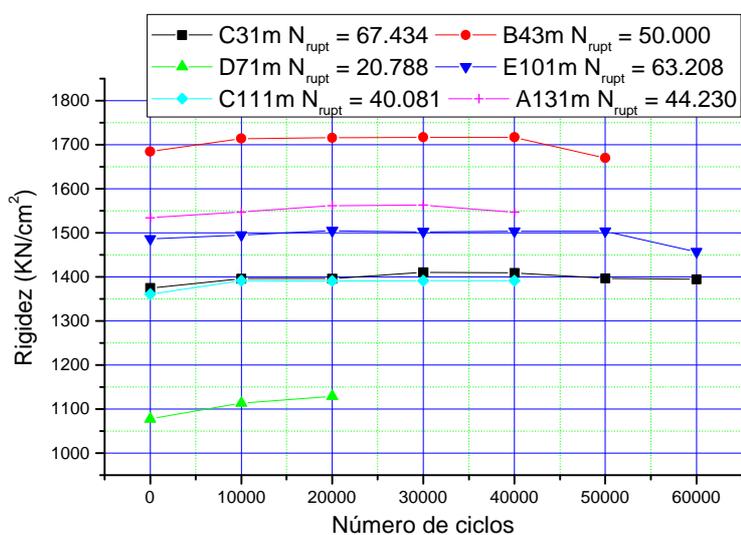


Figura 9 – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 5 Hz.

TABELA 10 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 60% e 5Hz.

N	C31m		B43m		D71m		E101m		C111m		A131m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	1374,5	-	1684,1	-	1077,8	-	1485,8	-	1360,7	-	1533,9	-
10000	1395,8	1,6	1713,4	1,7	1113,4	3,3	1494,9	0,8	1391,2	2,2	1547,3	0,9
20000	1395,8	1,6	1715,4	1,9	1129,2	4,8	1504,4	1,3	1390,6	2,2	1562,0	1,8
30000	1410,6	2,6	1716,7	1,9	-	-	1502,1	1,1	1391,2	2,2	1562,9	1,9
40000	1409,0	2,5	1716,7	1,9	-	-	1503,4	1,2	1391,2	2,2	1546,7	0,8
50000	1396,6	1,6	1670,1	-0,8	-	-	1503,6	1,2	-	-	-	-
60000	1395,1	1,5	-	-	-	-	1456,7	-2,0	-	-	-	-

Figura 10 – *Eucalyptus grandis* 60% e 5 Hz.

c) 9 Hz

TABELA 11 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 9Hz.

N	A63m		A73m		E81m		A101m		B111m		D121m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	657,5	-	542,1	-	675,9	-	867,0	-	930,0	-	812,3	-
20000	685,5	4,3	558,7	3,1	674,8	-0,2	866,4	-0,1	897,6	-3,5	832,0	2,4
40000	685,5	4,3	560,4	3,4	-	-	867,5	0,1	-	-	838,5	3,2
60000	689,9	4,9	564,3	4,1	-	-	866,4	-0,1	-	-	840,1	3,4
80000	685,5	4,3	559,5	3,2	-	-	865,1	-0,2	-	-	835,1	2,8
100000	-	-	547,8	1,1	-	-	867,0	0,0	-	-	834,5	2,7
120000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	822,5	1,3

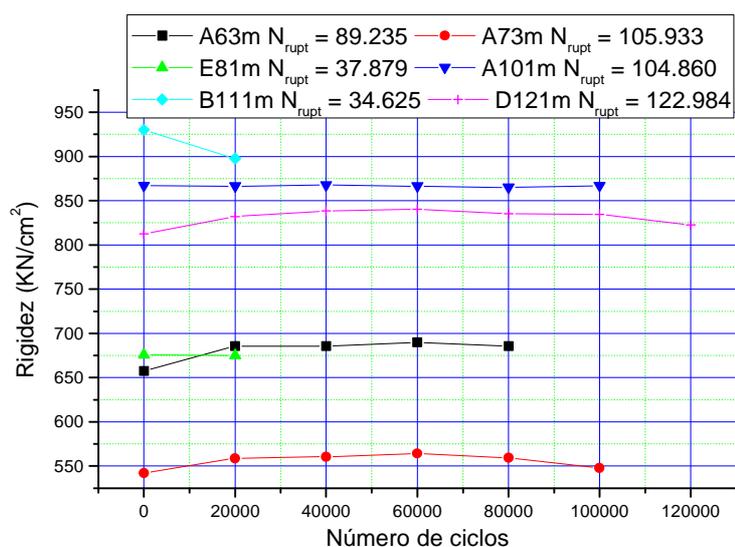


Figura 11 – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 9 Hz.

TABELA 12 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 60% e 9Hz.

N	B41m		B53m		A71m		D103m		B113m		C121m	
	Rig kN/cm ²	Var %										
0	1629,7	-	1471,8	-	1614,2	-	1250,0	-	1477,0	-	1556,6	-
20000	1661,0	1,8	1510,1	2,6	1631,6	1,1	1256,9	0,5	1475,3	-0,1	1557,3	0,0
40000	1661,2	1,9	1511,4	2,7	1631,0	1,1	-	-	1491,4	1,0	1558,0	0,1
60000	1661,9	2,0	1510,8	2,6	1631,6	1,1	-	-	1474,4	-0,2	1550,2	-0,4
80000	-	-	1510,1	2,6	1630,4	1,0	-	-	1414,6	-4,2	-	-
100000	-	-	1473,8	1,3	1631,6	1,1	-	-	-	-	-	-

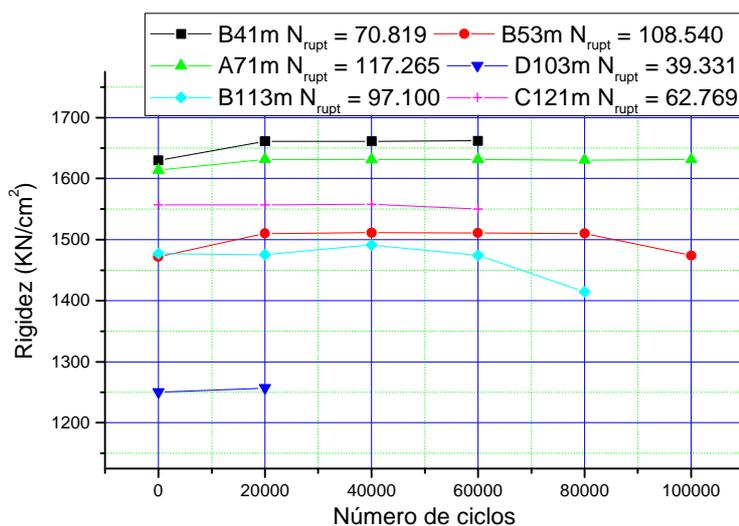


Figura 12 – *Eucalyptus grandis* 60% e 9 Hz.

B.3: Variação da rigidez dos corpos-de-prova de madeira maciça em função do número de ciclos

EVOLUÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA MACIÇA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS

1) $S_{max} = 75\% f_{t0}$

a) 1Hz

TABELA 1 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 1Hz.

N	E71c		A123c		E133c	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	1290,8	-	669,7	-	1306,5	-
20000	1339,0	3,7	697,1	4,1	1324,4	1,4
40000	1341,7	3,9	696,9	4,1	1334,6	2,2
60000	1343,2	4,1	697,2	4,1	1336,4	2,3
80000	1341,6	3,9	668,4	-0,2	1336,4	2,3
100000	1338,2	3,9	-	-	1336,9	2,3
120000	-	-	-	-	1337,6	2,4
140000	-	-	-	-	1333,9	2,1
160000	-	-	-	-	1325,3	1,4

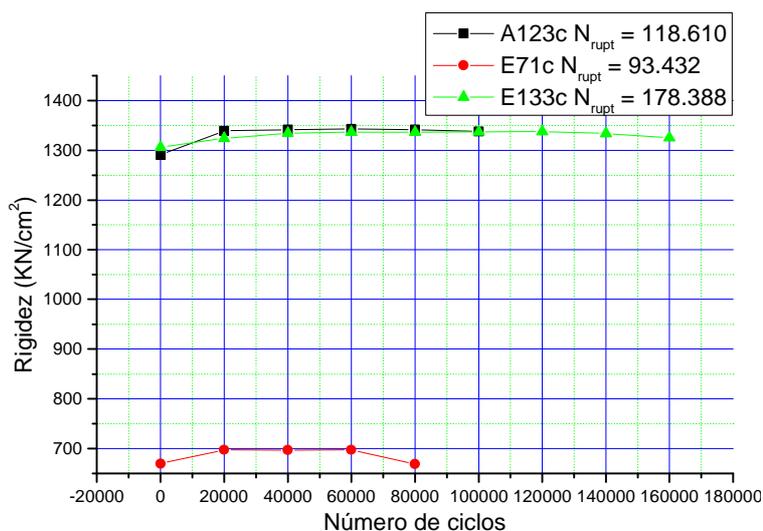
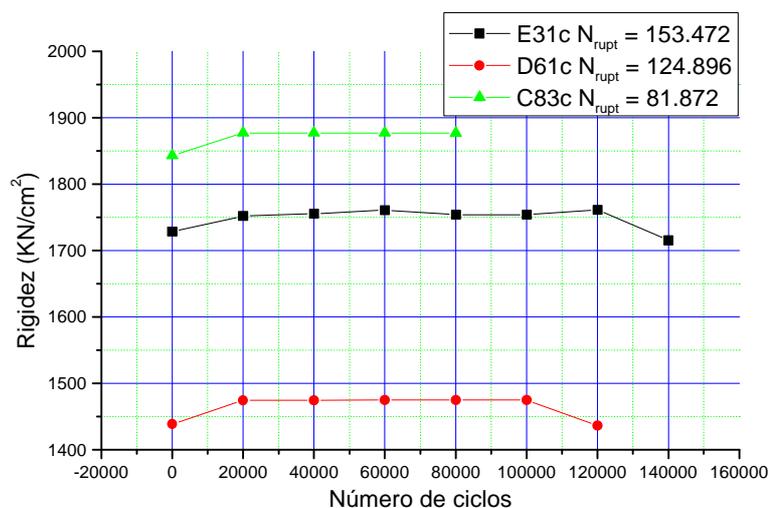


Figura 1 – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 1Hz.

TABELA 2 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 75% e 1Hz.

N	E31c		D61c		C83c	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	1728,5	-	1438,4	-	1842,8	-
20000	1752,0	1,3	1474,3	2,5	1877,1	1,9
40000	1755,5	1,6	1474,3	2,5	1877,0	1,9
60000	1760,9	1,9	1474,9	2,5	1877,2	1,9
80000	1753,8	1,5	1474,8	2,5	1876,6	1,8
100000	1753,8	1,5	1474,8	2,5	-	-
120000	1761,2	1,9	1436,1	-0,2	-	-
140000	1715,5	-0,7	-	-	-	-

Figura 2 – *Eucalyptus grandis* 75% e 1 Hz.

b) 5 Hz

TABELA 3 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 5Hz.

N	D63c		E131c		D143c	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	1099,4	-	1130,5	-	662,3	-
40000	1166,1	6,1	1157,8	2,4	699,5	5,6
80000	1180,7	7,4	1148,9	1,6	699,5	5,6
120000	1180,7	7,4	938,1	-17,0	699,5	5,6
160000	1180,8	7,4	-	-	699,9	5,7
200000	1180,8	7,3	-	-	699,8	5,7
240000	1179,3	7,3	-	-	699,0	5,5
280000	1179,3	7,3	-	-	666,3	0,6
320000	1179,2	7,3	-	-	-	-
360000	1177,0	7,1	-	-	-	-

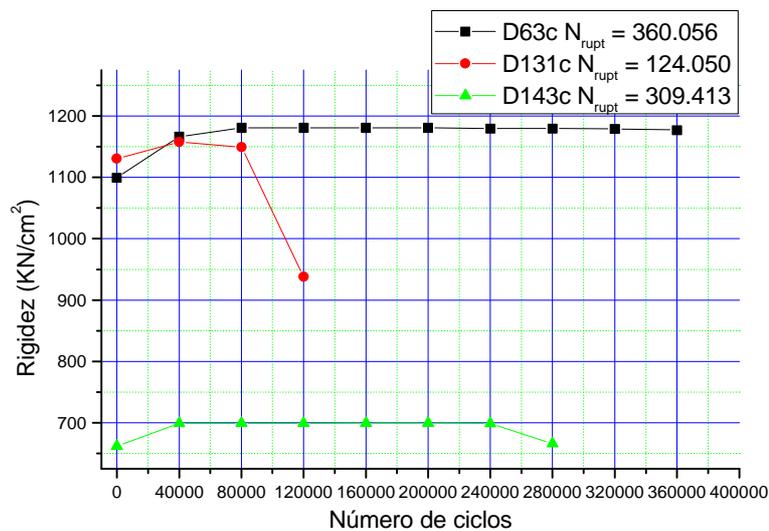
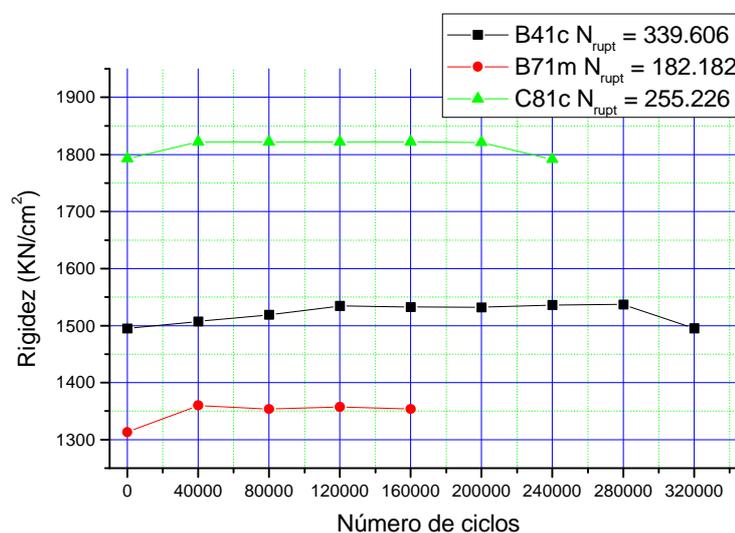
Figura 3 – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 5 Hz.

TABELA 4 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 75% e 5Hz.

N	B41c		B71m		C81c	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	1494,8	-	1313,6	-	1792,6	-
40000	1507,3	0,8	1360,2	3,5	1821,8	1,6
80000	1519,2	1,6	1353,6	3,0	1821,8	1,6
120000	1534,5	2,7	1357,6	3,3	1821,8	1,6
160000	1532,6	2,5	1353,6	3,0	1821,8	1,6
200000	1532,1	2,5	-	-	1821,2	1,6
240000	1536,1	2,8	-	-	1791,3	-0,1
280000	1536,9	2,8	-	-	-	-
320000	1495,1	0,0	-	-	-	-

Figura 4 – *Eucalyptus grandis* 75% e 5 Hz.

c) 9 Hz

TABELA 5 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 9Hz.

N	D81c		D111c		D141c	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	821,1	-	946,5	-	1175,8	-
50000	830,1	1,1	1004,3	6,1	1245,2	5,9
100000	830,2	1,1	1004,3	6,1	1259,5	7,1
150000	825,0	0,5	1004,3	6,1	1259,5	7,1
200000	-	-	989,2	4,5	1258,7	7,0
250000	-	-	-	-	1258,7	7,0
300000	-	-	-	-	1257,9	7,0
350000	-	-	-	-	1258,7	7,0
400000	-	-	-	-	1257,1	6,9
450000	-	-	-	-	1247,1	6,1

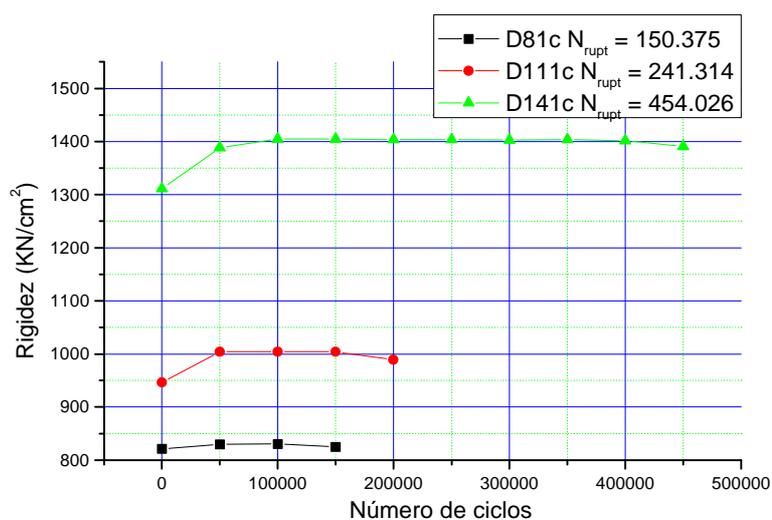


Figura 5 – *Pinus caribea hondurensis* 75% e 9 Hz.

TABELA 6 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 75% e 9Hz.

N	B43c		C51c		D93c	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	1456,4	-	1575,1	-	1321,0	-
50000	1469,8	0,9	1634,1	3,7	1348,9	2,1
100000	1470,3	0,9	1634,7	3,8	1344,9	1,8
150000	1370,9	-6,0	1634,6	3,8	1344,3	1,8
200000	-	-	1593,4	1,2	1342,7	1,6
250000	-	-	-	-	1344,3	1,6
300000	-	-	-	-	1348,0	2,0

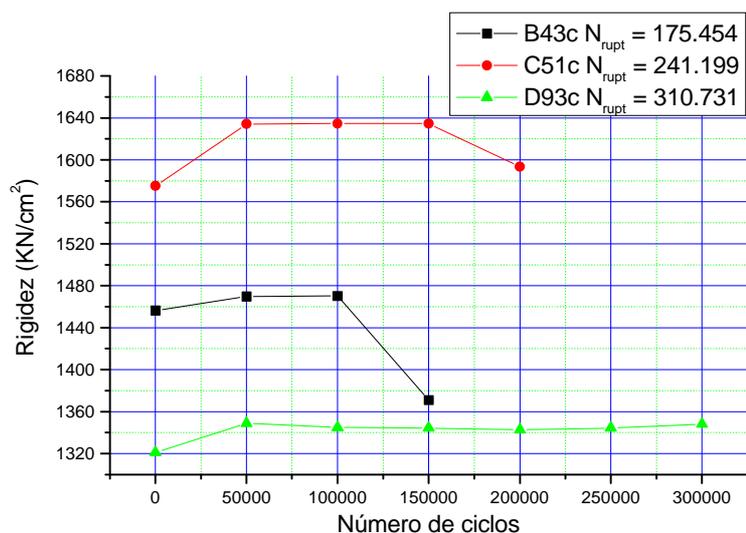


Figura 6 – *Eucalyptus grandis* 75% e 9 Hz.

2) $S_{max} = 60\% f_{t0}$

a) 1Hz

TABELA 7 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 1Hz.

N	D113c		A121c		D73m	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	905,8	-	1217,4	-	655,2	-
50000	927,7	2,4	1260,0	3,5	664,3	1,4
100000	927,1	2,4	1261,1	3,6	664,4	1,4
150000	934,7	3,2	1262,9	3,7	664,5	1,4
200000	927,1	2,4	1264,2	3,8	614,7	-6,2
250000	-	-	1264,4	3,9	-	-
300000	-	-	1263,3	3,8	-	-
350000	-	-	1236,9	1,6	-	-
400000	-	-	1225,6	0,1	-	-

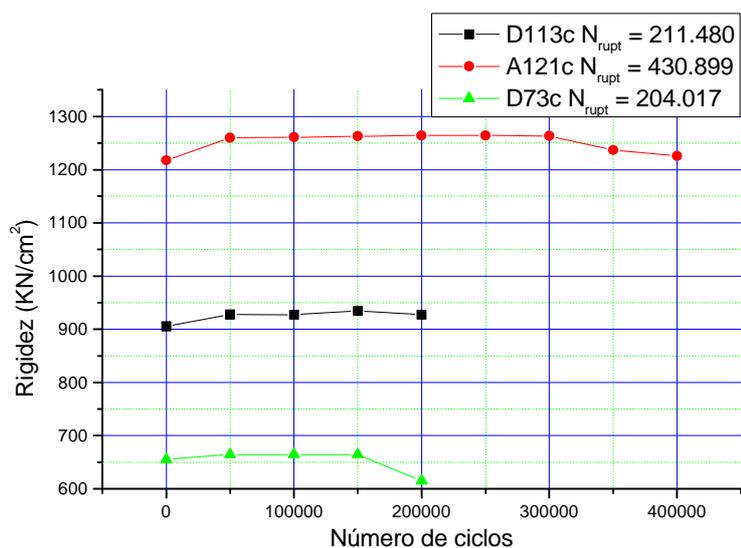


Figura 7 – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 1 Hz.

TABELA 8 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 60% e 1Hz.

N	E51c		D73c		B101c	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	1550,1	-	1198,6	-	1537,7	-
50000	1574,3	1,6	1221,4	1,9	1579,2	2,7
100000	1577,4	1,7	1221,0	1,9	1578,1	2,6
150000	1575,5	1,6	1221,0	1,9	1579,2	2,7
200000	1576,0	1,7	1221,1	1,9	1578,1	2,6
250000	1575,9	1,7	1202,1	0	1579,7	2,7
300000	1528,6	-1,4	-	-	1578,3	2,6
350000	-	-	-	-	1579,2	2,7
400000	-	-	-	-	1577,0	2,5
450000	-	-	-	-	1550,4	1,0

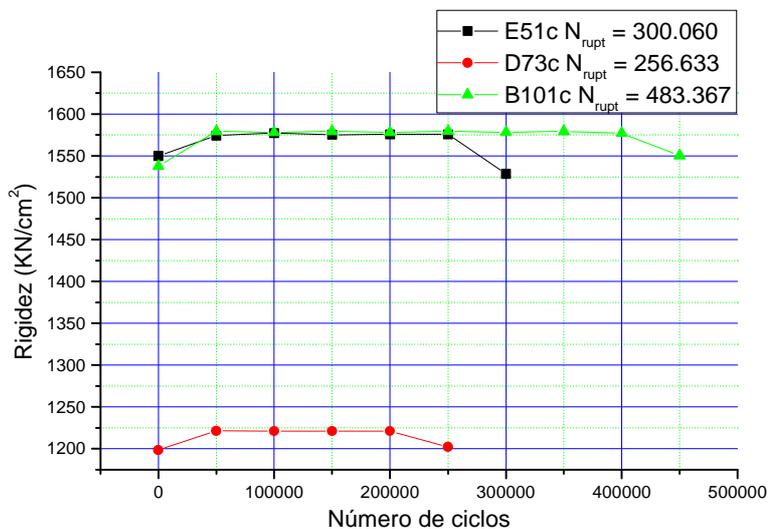


Figura 8 – *Eucalyptus grandis* 60% e 1 Hz.

b) 5 Hz

TABELA 9 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 5Hz.

N	B103c		F121c		B53m	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	741,8	-	852,7	4,2	681,7	-
100000	746,5	0,6	888,4	4,2	716,9	5,2
200000	757,7	2,1	888,6	4,2	716,7	5,1
300000	760,8	2,6	888,6	4,2	716,4	5,1
400000	764,4	3,0	888,6	4,2	716,4	5,1
500000	764,9	3,1	888,6	4,2	716,7	5,1
600000	764,1	3,0	888,6	4,2	716,7	5,1
700000	764,5	3,0	868,4	1,8	716,8	5,1
800000	764,1	3,0	-	-	716,4	5,1
900000	761,9	2,7	-	-	716,4	5,1
1000000	-	-	-	-	716,5	5,1
1100000	-	-	-	-	716,5	5,1
1200000	-	-	-	-	716,8	5,1
1300000	-	-	-	-	716,8	5,1
1400000	-	-	-	-	716,4	5,1
1500000	-	-	-	-	716,4	5,1
1600000	-	-	-	-	690,2	1,2

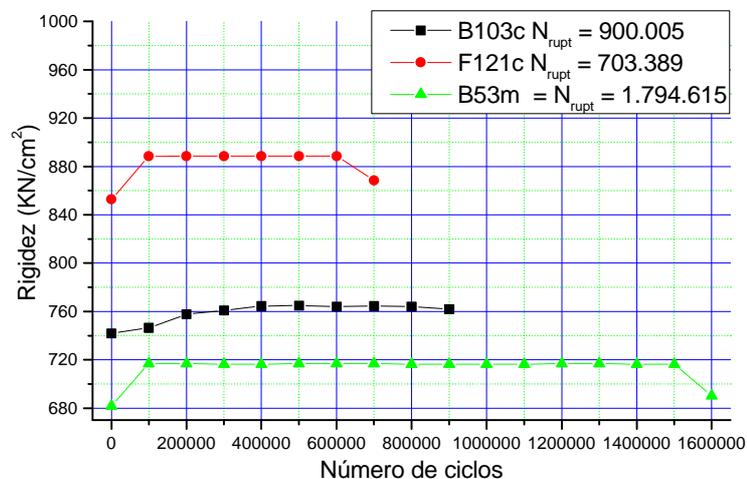


Figura 9 – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 5 Hz.

TABELA 10 – Variação da rigidez – *Eucalyptus grandis* 60% e 5Hz.

N	C53c		D63c		D91c	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	1616,4	-	1468,0	-	1234,3	-
100000	1747,9	8,1	1485,5	1,1	1261,2	2,2
200000	1748,4	8,2	1483,6	1,1	1261,2	2,2
300000	1756,8	8,7	1486,9	1,3	1261,2	2,2
400000	1752,5	8,4	1478,5	0,7	1261,2	2,2
500000	1745,4	8,0	1481,6	0,9	1261,2	2,2
600000	1748,4	8,2	1484,4	1,1	1261,2	2,2
700000	1748,1	8,2	1485,0	1,1	1261,3	2,2
800000	1748,4	8,2	1485,8	1,2	1261,2	2,2
900000	1745,4	8,0	1448,7	-1,3	1261,2	2,2
1000000	1745,8	8,0	-	-	1261,2	2,2
1100000	1745,8	8,0	-	-	1261,2	2,2
1200000	1745,8	8,0	-	-	1261,2	2,2
1300000	1745,8	8,0	-	-	1228,6	2,2
1400000	1745,8	8,0	-	-	-	2,2
1500000	1745,8	8,0	-	-	-	2,2
1600000	1726,7	5,5	-	-	-	-0,5

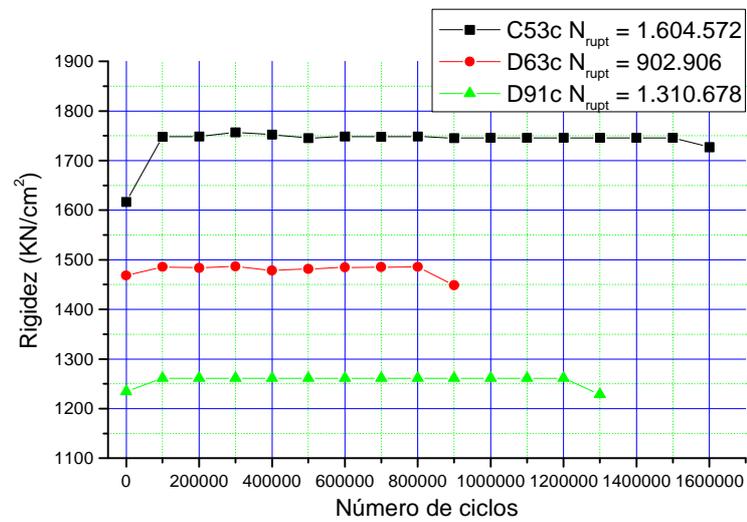


Figura 10 – *Eucalyptus grandis* 60% e 5 Hz.

c) 9 Hz

TABELA 11 – Variação da rigidez – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 9Hz.

N	E73c		F123c		B51m	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	667,0	-	1355,5	-	1071,2	-
150000	674,9	1,2	1426,0	5,2	1084,4	1,2
300000	674,7	1,2	1422,9	5,0	1084,4	1,2
450000	674,7	1,2	1412,7	4,2	1093,5	2,1
600000	675,1	1,2	1412,9	4,2	1093,5	2,1
750000	662,6	-0,7	1412,8	4,2	1093,5	2,1
900000	-	-	1411,3	4,1	1094,3	2,2
1050000	-	-	1357,3	-	1094,3	2,2
1200000	-	-	-	-	1094,3	2,2
1350000	-	-	-	-	1094,2	2,2
1500000	-	-	-	-	1094,2	2,2
1650000	-	-	-	-	1088,8	1,6
1800000	-	-	-	-	1085,2	1,3

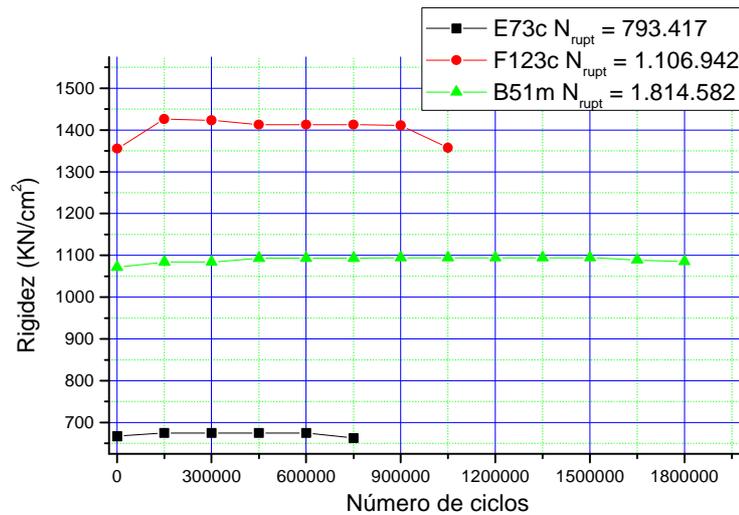


Figura 11 – *Pinus caribea hondurensis* 60% e 9 Hz.

TABELA 12 – Variação da rigidez– *Eucalyptus grandis* 60% e 9Hz.

N	B71c		B103c		E121m	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %
0	1228,4	-	1475,5	-	1518,9	-
150000	1258,4	2,4	1507,0	2,1	1541,5	1,5
300000	1284,8	4,6	1506,6	2,1	1542,1	1,5
450000	1279,7	4,2	1501,9	1,8	1545,2	1,7
600000	1284,1	4,5	1501,9	1,8	1545,2	1,7
750000	1254,9	2,1	1501,2	1,7	1546,3	1,8
900000	1255,6	2,2	1501,8	1,8	1545,8	1,8
1050000	-	-	1501,2	1,7	1520,3	0,9
1200000	-	-	1501,8	1,8	-	-
1350000	-	-	1455,5	-1,4	-	-

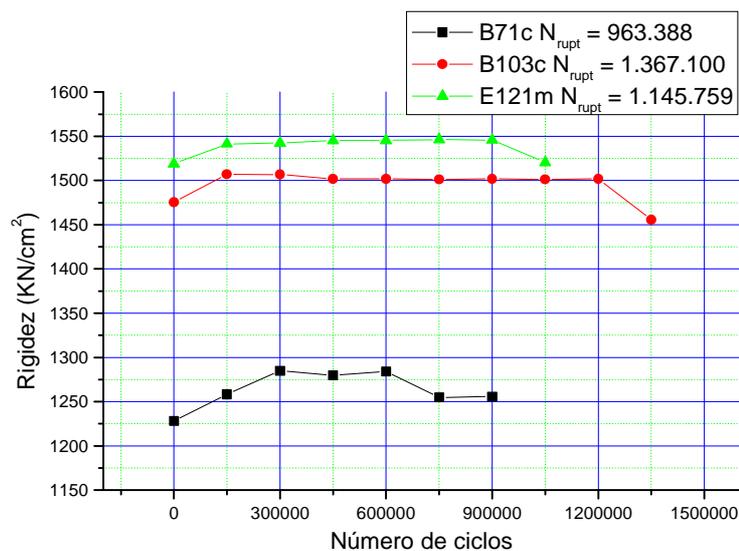


Figura 12 – *Eucalyptus grandis* 60% e 9 Hz.