

FADIGA EM EMENDAS DENTADAS EM MADEIRA LAMINADA COLADA

Alcebiades Negrão Macedo - Doutor em Engenharia de Estruturas - EESC-USP

Carlito Calil Junior - Professor Titular do Departamento de Eng. de Estruturas - EESC-USP

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.

1 INTRODUÇÃO

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.

1.1 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.

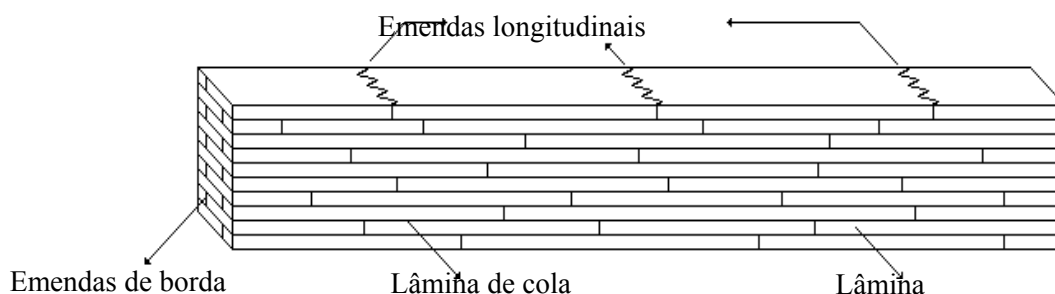


FIGURA 1 - Esquema geral de uma peça de MLC.

- 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.

1.2 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 adequado 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. Na produção dos elementos estruturais de MLC são necessárias lâminas de comprimentos suficientemente grandes, as quais são obtidas a partir de emendas longitudinais em tábuas, sendo as emendas dentadas as mais utilizadas. 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.

As rupturas destes elementos estruturais iniciam freqüentemente nas emendas dentadas da zona crítica de tração, 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. 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 veículos em pontes.

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. A resistência à fadiga da madeira é realmente muito maior do que a resistência à fadiga de materiais cristalinos quando comparada ao limite de resistência do material e 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.

1.3 Objetivos

No caso particular da MLC, como mencionado anteriormente, as rupturas ocorrem com maior freqüência 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 à 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 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 pode afetar de forma considerável os resultados de vida à 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 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 paralelo às fibras;
- 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 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 afetada pelas condições de degradação devido ao efeito da temperatura e umidade, enquanto que as ligações resorcinólicas garantem a solidez no comportamento que é semelhante a sua resistência à fadiga em condições normais de temperatura e umidade;

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 1, 2, 3 e 4, sendo que os corpos-de-prova pertencentes ao mesmo grupo foram retirados ao longo do comprimento das peças, Figura 2.

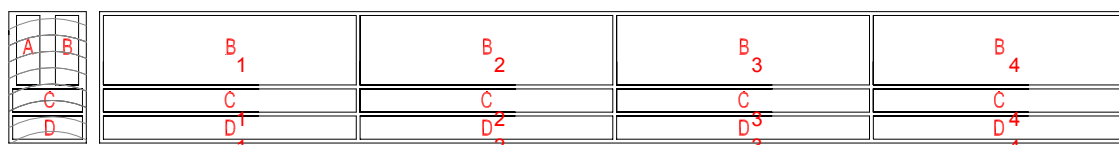


FIGURA 2 - Corpos-de-prova para avaliação da variação da resistência a tração paralela às fibras retirados de peças de 6cm x 12cm.

TABELA 1 - 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 _{t0} (kN/cm ²)	CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{t0} (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 2 - 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 _{t0} (kN/cm ²)	CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{t0} (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 3 - 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 _{t0} (kN/cm ²)	CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{t0} (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 4 - 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 _{t0} (kN/cm ²)	CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{t0} (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 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, Figura 3.

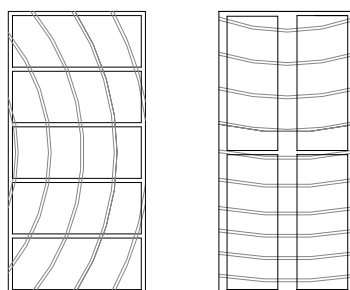


FIGURA 3 – Exemplo de corpos-de-prova gêmeos na seção transversal.

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 4.

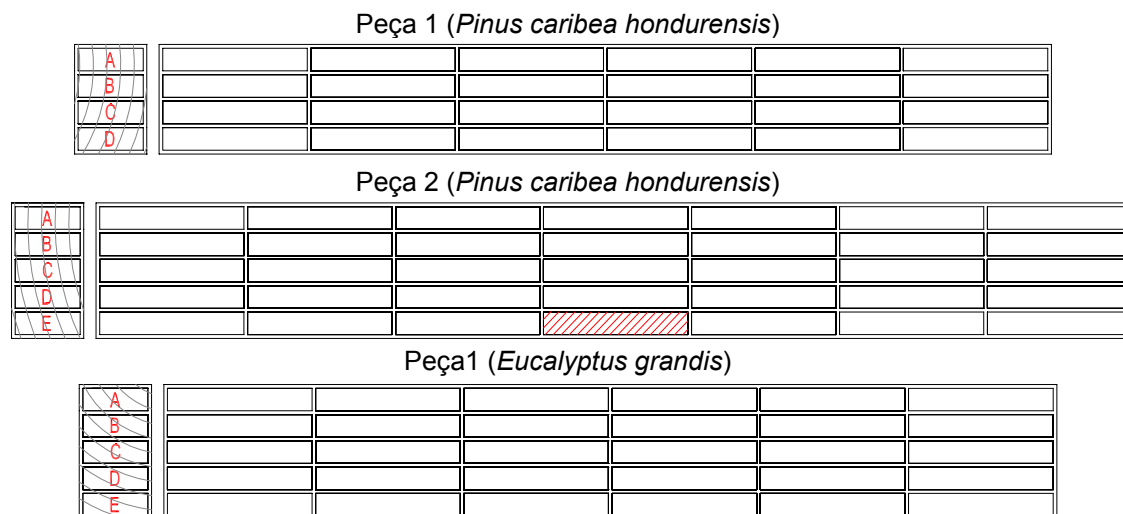


FIGURA 4 – Disposição de retirada das amostras dos ensaios preliminares.

A identificação de cada corpo-de-prova foi realizada obedecendo a seguinte seqüência: posição na seção transversal (Figura 4), número da peça e posição no comprimento da peça. Por exemplo, para a amostra hachureada na peça 2 de *Pinus caribea hondurensis* da Figura 4, 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 5 - Controles estáticos de *Pinus caribea hondurensis*.

Madeira maciça				Emenda dentada (Cascophen)				
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{t0} (kN/cm ²)	CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	Modo de ruptura
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 6 - Controles estáticos de *Eucalyptus grandis*

Madeira maciça				Emenda dentada (Cascophen)				
CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{t0} (kN/cm ²)	CP	P _{rupt} (kN)	A (cm ²)	f _{gt0} (kN/cm ²)	Modo de ruptura
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 interface
E13	20,63	3,514	5,87	E14	16,72	3,40	4,92	RE: 100% na interface mad/ades

TABELA 7 – Ensaios cíclicos *Pinus caribea hondurensis* f = 10 Hz

Madeira maciça				Emenda dentada (Cascophen)				
CP	σ_{\max}^1 (% f_{t0})	σ_{\min} (% σ_{\max})	N (ciclos)	CP	σ_{\max} (% f_{qt0})	σ_{\min} (% σ_{\max})	N (ciclos)	Modo de ruptura
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

TABELA 8 – Ensaios cíclicos *Pinus caribea hondurensis* f = 5 Hz

Madeira maciça				Emenda dentada (Cascophen)				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	σ_{\min} (% σ_{\max})	N (ciclos)	CP	σ_{\max} (% f_{qt0})	σ_{\min} (% σ_{\max})	N (ciclos)	Modo de ruptura
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 9 – Ensaios cíclicos *Pinus caribea hondurensis* f = 1 Hz

Madeira maciça				Emenda dentada (Cascophen)				
CP	σ_{\max} (% f_{t0})	σ_{\min} (% σ_{\max})	N (ciclos)	CP	σ_{\max} (% f_{qt0})	σ_{\min} (% σ_{\max})	N (ciclos)	Modo de ruptura
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 10 – Ensaios cíclicos *Eucalyptus grandis* f = 10 Hz

Madeira maciça	Emenda dentada (Cascophen)
----------------	----------------------------

¹ 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.

CP	σ_{\max} (% f_{t0})	σ_{\min} (% σ_{\max})	N (ciclos)	CP	σ_{\max} (% f_{t0})	σ_{\min} (% σ_{\max})	N (ciclos)	Modo de ruptura
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.

O modo ruptura por fadiga na tração das emendas dentadas se deu de forma semelhante a sua ruptura estática. De uma forma geral, 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 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 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 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 MACÊDO² (1996) e adotados pela NBR 7190/97. A Figura 5 representa o procedimento utilizado para a obtenção de peças coladas destinadas a usinagem dos corpos-de-prova com emendas dentadas.

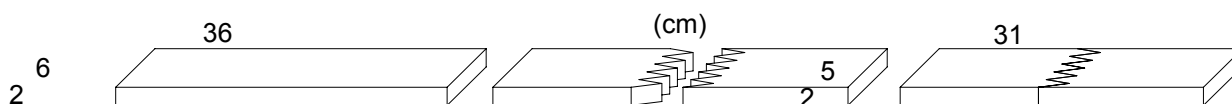


FIGURA 5 – Peças de madeira com emendas dentadas.

A geometria da emenda foi a correspondente ao comprimento de 20 mm da DIN 68140, Figura 6a, que é a utilizada pelo parque produtor no país. As dimensões dos corpos-de-prova usados nos ensaios estão representadas na Figura 6b.

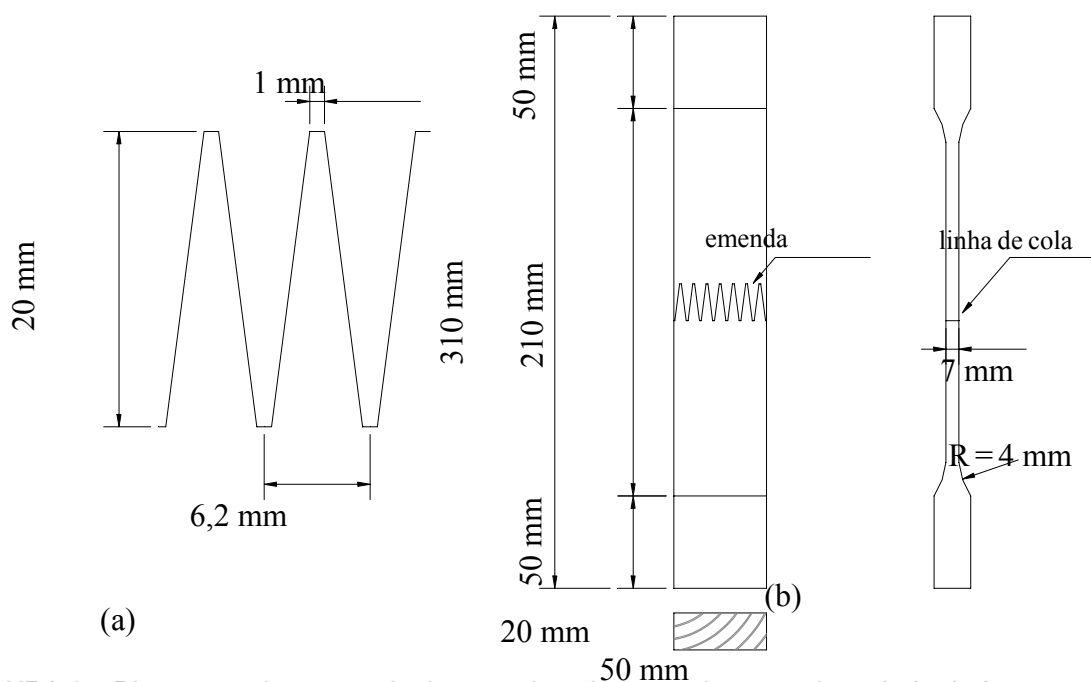


FIGURA 6 – Dimensões da geometria da emenda e do corpo-de-prova de resistência à tração nas emendas dentadas.

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

² 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.

NBR 7190/97. As intensidades das pressões de colagem das emendas usando o adesivo Cascophen foram de 0,80 kN/cm² para o *Pinus caribea hondurensis* e 1,00 kN/cm² para o *Eucalyptus grandis*, MACÊDO (1996). Para o adesivo poliuretano estas pressões foram, conforme recomendações de HENRIQUES DE JESUS (2000), de 0,9 kN/cm² para o *Pinus caribea hondurensis* e 1,0 kN/cm² 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 para definição dos níveis de tensão. De acordo com a 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 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 7 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 7 – Forma de retirada dos corpos-de-prova das peças de madeira.

De cada peça de madeira foi retirada pelo menos uma seqüência de corpos-de-prova de madeira maciça, retirada aleatoriamente ao longo da seção.

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 quanto para os corpos-de-prova de madeira maciça seguiram, as recomendações da NBR 7190/97 e MACÊDO (1996). Os resultados destes ensaios serviram, principalmente, para estabelecer a resistência de referência e os níveis de tensão para os ensaios de fadiga.

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 de carregamento cíclico utilizadas 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. Os níveis de tensão, máximos para 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. 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 colados com o adesivo poliuretano.

4.3.2.2 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 11. A finalidade do procedimento acima é avaliar a variação da rigidez do material em função do número de ciclos.

TABELA 11 - Número de ciclos para a verificação da rigidez

σ_{\max} (% f_{10})	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

Em cada nível de tensão foram realizados um total de seis ensaios (Figura 8). 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 exemplares destinados aos níveis tensão mais altos só fossem ensaiados após a seqüência de ensaio estar completa para o níveis inferiores de tensão.

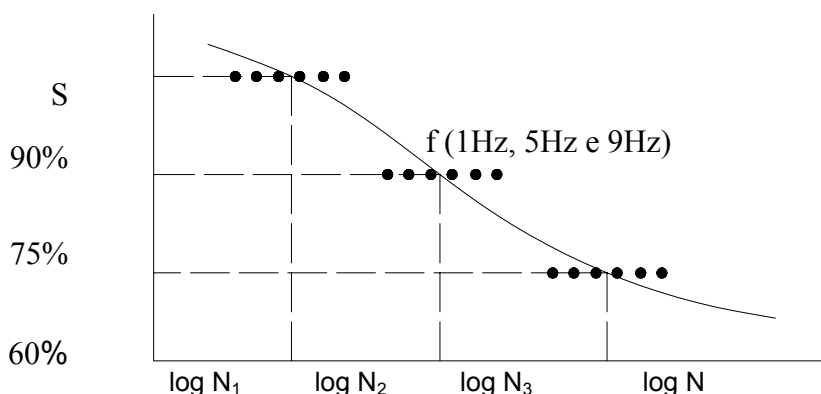


FIGURA 8 – Número de repetições em cada nível de tensão.

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 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). 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^{2n} ", MASON et al (1989) e MONTGOMERY (1991).

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 Ensaios 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). Depois de determinados o valor médio e o desvio padrão para cada grupo de resultados, os valores característicos dos dados foram calculados segundo a NBR 7190/97 item 6.4.7. Os resultados são apresentados na Tabela 12, onde os valores entre parênteses representam a relação entre as resistências

das emendas dentadas e 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 12 – 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

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.

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

5.2.2 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*³. 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.

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

Na Tabela 13 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 14 estes dados são apresentados, por combinação de parâmetros e níveis, na forma transformada ($Y = \log N$).

TABELA 13 – 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.

TABELA 14 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen (dados transformados)

³ 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.

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	4,30118	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 Ȳ são as réplicas e a média da variável resposta, respectivamente.

As análises dos valores encontrados nas Tabelas 15 e 16, e a análise gráfica da Figura 9, permitem identificar os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações.

TABELA 15 - 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	83,167 4	192,71 0	54	3,56870	Média	687,72 2
2	27,8010	71,112 6	11,946	36	0,33182	f	3,964
3	29,5102	38,429 6	-2,499	108	-0,02314	f²	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	f²S	0,096
7	10,4565	- 0,2354	- 20,628	108	-0,19100	S²	3,940
8	13,7664	0,6059	-1,679	72	-0,02331	fS²	0,039
9	14,2067	- 2,8695	-4,317	216	-0,01998	f²S²	0,086

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

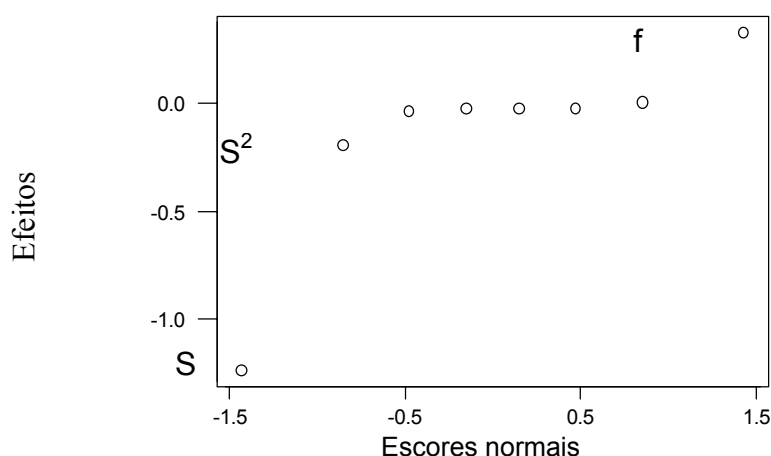


FIGURA 9 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

TABELA 16 – 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	f²
4	-1,30177	-1,24272	-1,18367	S
5	-0,05504	0,00401	0,06306	fS
6	-0,09564	-0,03659	0,02247	f²S
7	-0,25005	-0,19100	-0,13195	S²
8	-0,08237	-0,02331	0,03574	fS²
9	-0,07904	-0,01998	0,03907	f²S²

Os resultados apresentados nas Tabelas 15 e 16, e a análise da Figura 9, definem o efeito da tensão (S), o efeito 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 10 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates.

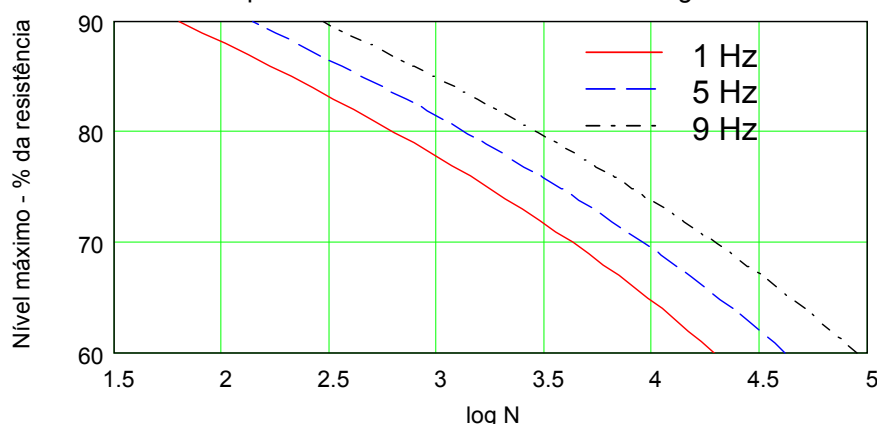


FIGURA 10 – Curvas S-N das emendas dentadas para o *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen.

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

Na Tabela 17 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. Na Tabela 18 estes dados são apresentados, por combinação de parâmetros e níveis, na forma transformada ($Y = \log N$).

TABELA 17 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para *Pinus caribea hondurensis* e adesivo poliuretano (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 18 – 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	Ȳ
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 Ȳ são as réplicas e a média da variável resposta, respectivamente.

As análises dos valores encontrados nas Tabelas 19 e 20, e análise gráfica da Figura 11, permitem identificar os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações.

TABELA 19 - Efeitos significativos das variáveis e suas interações na resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo poliuretano.

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

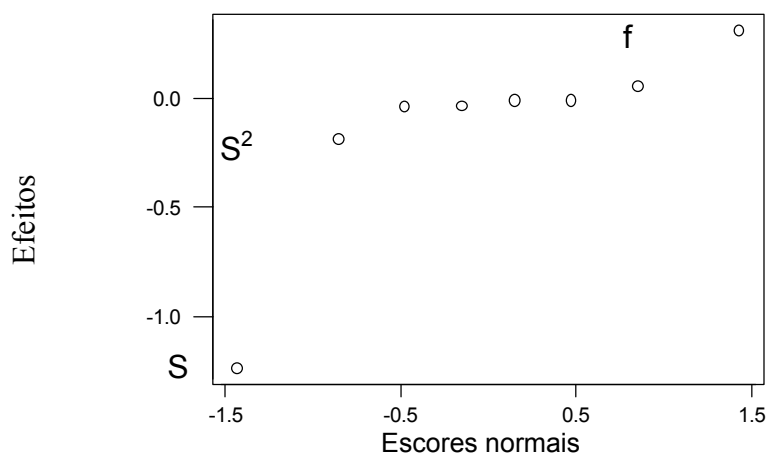


FIGURA 11 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

TABELA 20 – Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo poliuretano.

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 19 e 20, e a análise da Figura 11, 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 12 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates.

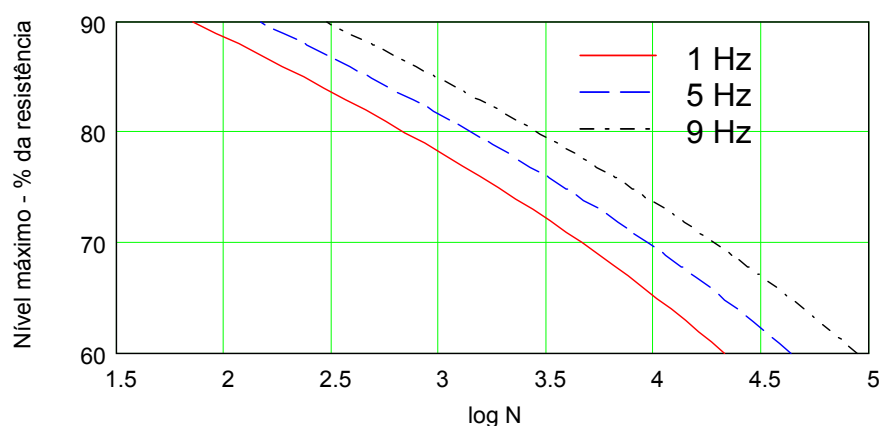


FIGURA 12 – Curvas S-N das emendas dentadas para o *Pinus Caribea hondurensis* e o adesivo poliuretano.

5.2.2.3 Emenda dentada: *Eucalyptus grandis* 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 *Eucalyptus grandis* 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 *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 22 – 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	Ȳ
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 Ȳ são as réplicas e a média da variável resposta, respectivamente.

As análises dos valores encontrados nas Tabelas 23 e 24, e análise gráfica da Figura 13, 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 *Eucalyptus grandis* e o adesivo Cascophen.

Ensaio	Resposta	(1)	(2)	Divisor	Efeitos	Identificação	SQ
1	26,2654	83,117 6	194,01 4	54	3,59286	Média	697,06 6
2	27,4881	71,555 1	11,585	36	0,32181	f	3,728
3	29,3640	39,341 7	-2,547	108	-0,02358	f²	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	f²S	0,343
7	10,4820	0,6532	-20,651	108	-0,19121	S²	3,949
8	14,5520	1,1140	-2,397	72	-0,03329	fS²	0,080
9	14,3078	-4,3142	-5,889	216	-0,02726	f²S²	0,161

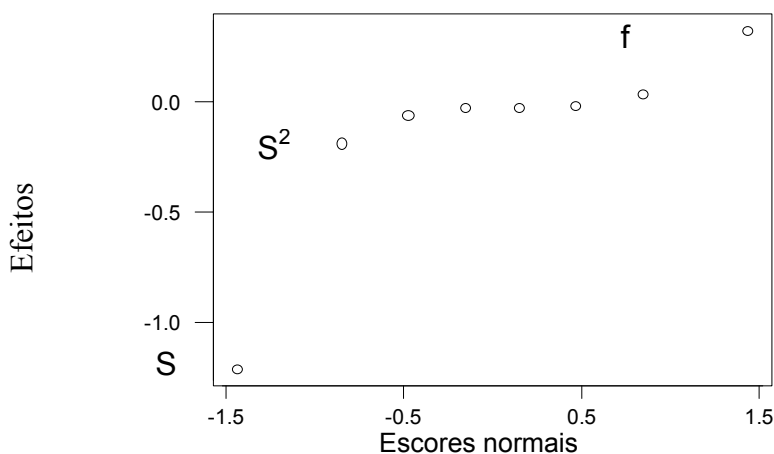


FIGURA 13 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo Cascophen.

TABELA 24 – 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	f²
4	-1,26771	-1,21600	-1,16428	S
5	-0,02142	0,03030	0,08201	fS
6	-0,12071	-0,06899	-0,01727	f²S
7	-0,24293	-0,19121	-0,13950	S²
8	-0,08501	-0,03329	0,01843	fS²
9	-0,07898	-0,02726	0,02445	f²S²

Os resultados apresentados nas Tabelas 23 e 24, e a análise da Figura 13, 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 14 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates.

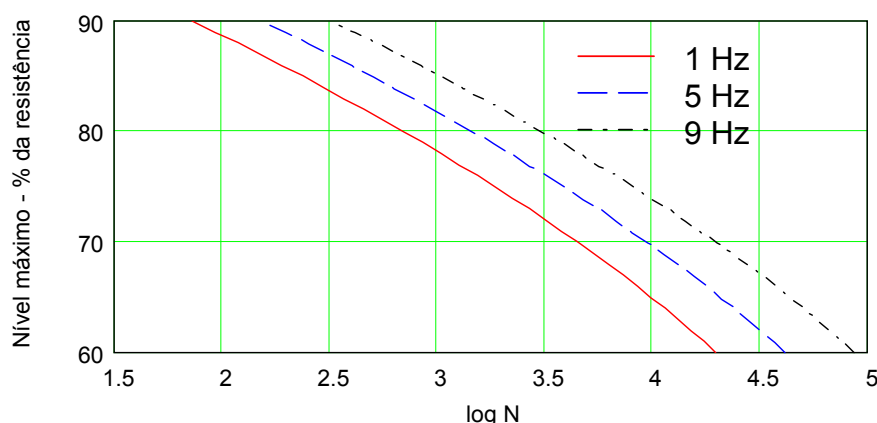


FIGURA 14 – Curvas S-N das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo Cascophen.

5.2.2.4 Emenda dentada: *Eucalyptus grandis* 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 *Eucalyptus grandis* coladas com o adesivo poliuretano. 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 *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano (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 26 – Números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga das emendas dentadas para *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano (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	4,51071	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 \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 15, 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 *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano.

Ensaio	Resposta	(1)	(2)	Divisor	Efeitos	Identificação	MS
1	26,0823	83,372 6	194,04 6	54	3,59345	Média	697,296
2	27,9557	71,191 3	11,426	36	0,31738	f	3,626
3	29,3346	39,482 5	-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

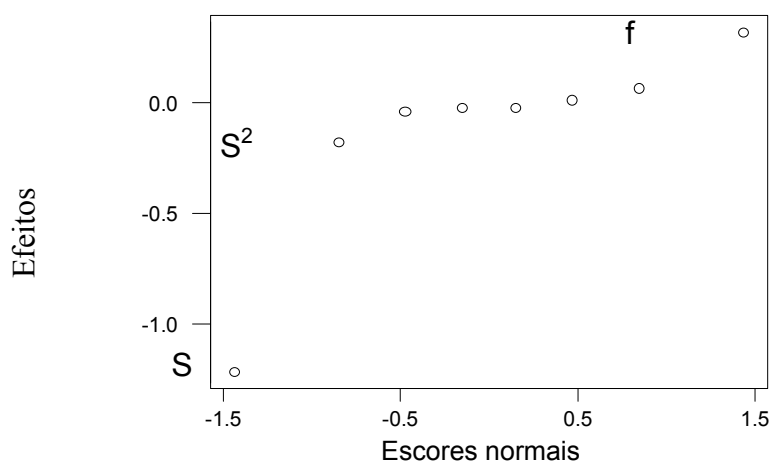


FIGURA 15 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano.

TABELA 28 – Intervalo de confiança a 95% da resistência à fadiga das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano

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 27 e 28, e a análise da Figura 15, 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 16 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates.

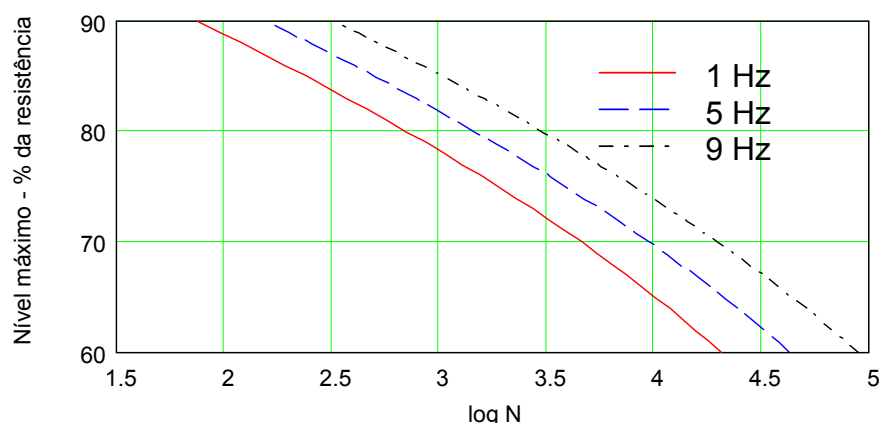


FIGURA 16 - Curvas S-N das emendas dentadas para o *Eucalyptus grandis* e o adesivo poliuretano.

5.2.2.5 Madeira maciça: *Pinus caribea hondurensis*

Na Tabela 29 são apresentados os dados originais dos números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga na madeira maciça para *Pinus caribea hondurensis*. 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 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 30 – 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	Ȳ
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 Ȳ 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 17, permitem identificar os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações.

TABELA 31 - Efeitos significativos das variáveis e suas interações na resistência à fadiga 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	f²	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	f²S	0,01
7	11,1727	-3,240	-41,531	108	-0,38455	S²	15,97
8	15,5712	-1,589	3,024	72	0,04200	fS²	0,13
9	15,9202	-4,049	-4,111	216	-0,01903	f²S²	0,08

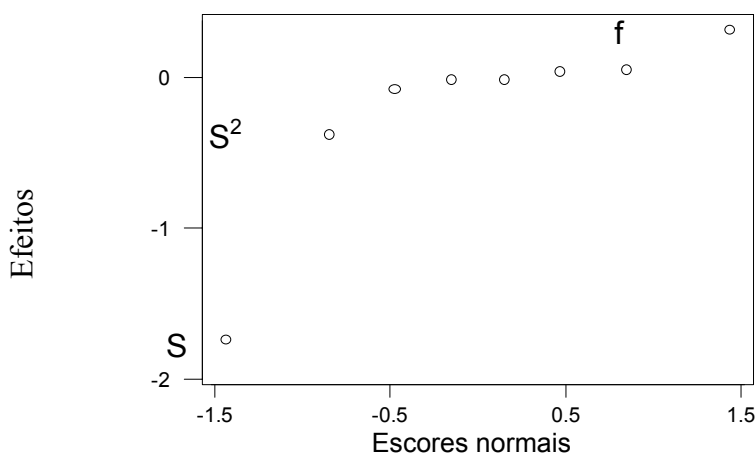


FIGURA 17 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga da madeira maciça para o *Pinus caribea hondurensis*.

TABELA 32 – 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 31 e 32, e a análise da Figura 17, 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 18 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates.

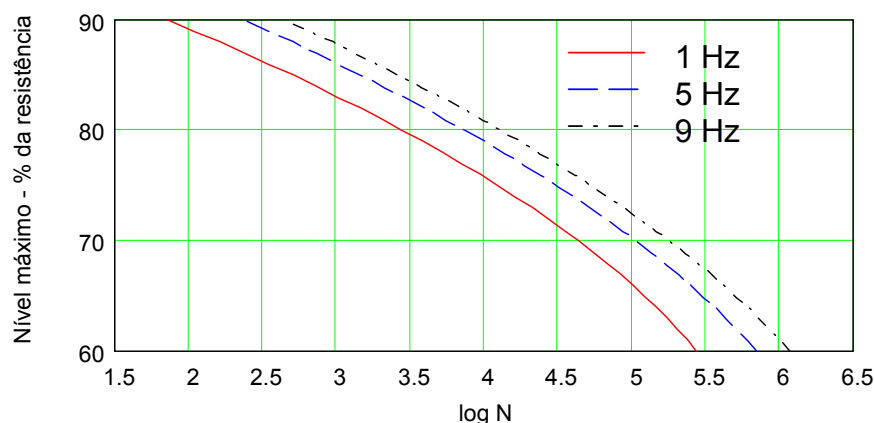


FIGURA 18 - Curvas S-N da madeira maciça para o *Pinus caribea hondurensis*.

5.2.2.6 Madeira maciça: *Eucalyptus grandis*

Na Tabela 33 são apresentados os dados originais dos números de ciclos correspondentes às resistências à fadiga na madeira maciça para *Eucalyptus grandis*. 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 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 34 – 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 35 e 36, e análise gráfica da Figura 19, permitem identificar os efeitos mais significativos das variáveis e suas interações.

TABELA 35 - 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	f²	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	f²S	0,00
7	10,7524	-3,600	-43,073	108	-0,39882	S²	17,18
8	15,2419	-2,267	3,020	72	0,04194	fS²	0,13
9	15,7373	-3,994	-3,060	216	-0,01417	f²S²	0,04

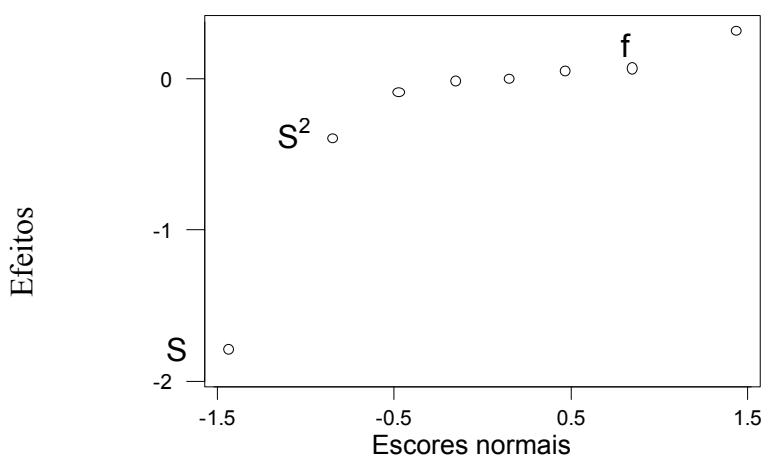


FIGURA 19 – Efeitos x Escores normais da resistência à fadiga da madeira maciça para o *Eucalyptus grandis*.

TABELA 36 – 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 35 e 36, e a análise da Figura 19, 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 20 representa as curvas S-N obtidas a partir dos resultados experimentais estimados através do Algoritmo de Yates.

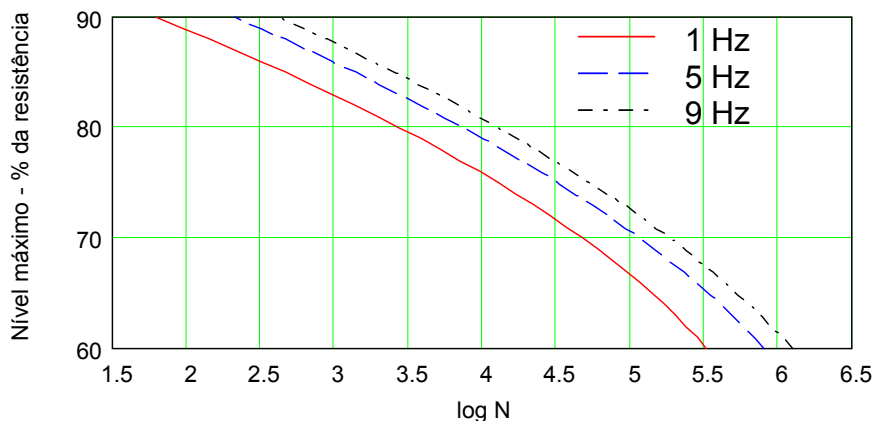


FIGURA 20 - Curvas S-N da madeira maciça para o *Eucalyptus grandis*.

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

Os valores apresentados na Tabela 37 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 18 e 20.

TABELA 37 – 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)	
		Pinus caribea hondurensis	Eucalyptus grandis
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.

5.2.3 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, Tabela 38, e considerando a relação entre as resistências da emenda dentada e da madeira maciça, apresentados na Tabela 12, foi determinado o coeficiente de redução da resistência à fadiga da emenda em relação à resistência à fadiga da madeira maciça, conforme apresentado na Tabela 38.

TABELA 38 – 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 $f = 1\text{Hz}$	0,623	0,689	0,556	0,580
Todos os valores para $f = 5\text{Hz}$	0,620	0,673	0,547	0,596
Todos os valores para $f = 9\text{Hz}$	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 38 foram retirados diretamente dos valores apresentados nas Tabelas 14, 18,22, 26, 30 e 34 sendo que o último grupo foi baseado nos valores característicos de cada ensaio. Os coeficientes apresentados na Tabela 38 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.

5.2.4 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 39 e na Figura 21. 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. 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.

Tabela 39 – Variação da rigidez em relação à rigidez inicial para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen ($\sigma_{\max} = 75\% f_{t0}$ e $f = 1\text{ Hz}$).

N	D51c		E63c		A73c		C83c		C111c		B141c	
	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	Rig kN/cm ²	Var %	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	-	-	-	-

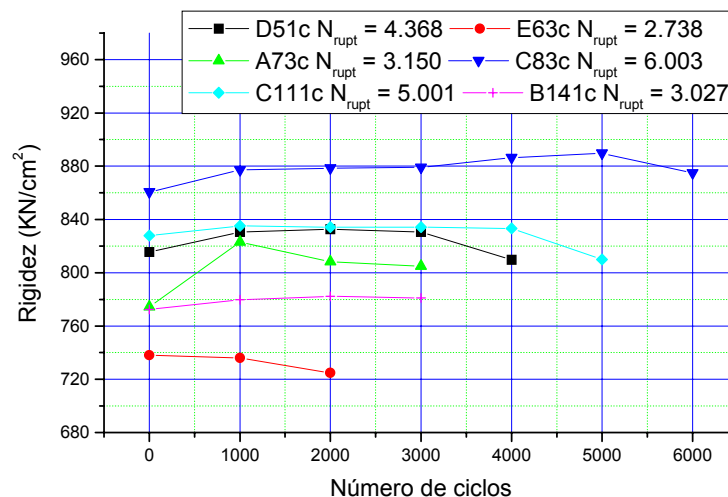


Figura 21 – Variação da rigidez em função do número de ciclos para o *Pinus caribea hondurensis* e o adesivo Cascophen ($\sigma_{max} = 75\% f_{t0}$ e $f = 1$ Hz).

6 CONCLUSÕES

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 frequência onde as propriedades reológicas da madeira não tem influência.

A hipótese encontrada na literatura, 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 frequências de 5 Hz e 9 Hz são aproximadamente iguais, o que é compatível com as informações apresentadas por HANSEN (1991) para a fadiga na compressão, Figura 82.

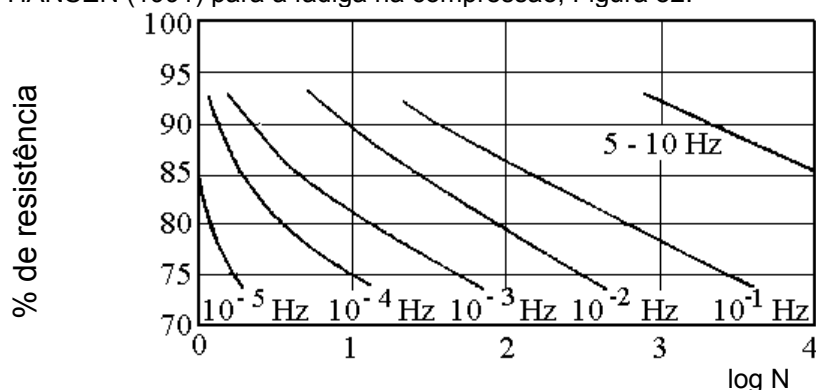


FIGURA 22 - Diagramas S-N para a resistência a fadiga na compressão da madeira em diferentes níveis de frequência.

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, 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.

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, 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 da superioridade significativa dos coeficientes de redução de resistência à fadiga das emendas dentadas coladas com o adesivo poliuretano 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 40 - 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 níveis de frequência 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- MACÊDO, A. N. (2000). ***Fadiga em Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada.*** São Carlos, Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, jun.
- 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.
- 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.

[Voltar para o início](#)