Carlos Dion de Melo Teles

Estruturas de madeira: proposta de metodologia de inspeção e correlação da velocidade ultra-sônica com o dano por cupins

TELES, Carlos Dion de Melo.

Estruturas de madeira: proposta de metodologia de inspeção e correlação da velocidade ultra-sônica com o dano por cupins. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC, 2002.

132p.; 30cm

Orientadora: Ângela do Valle
Defesa: Abril, 2002

Resumo: As edificações com estruturas de madeira apresentam um grande destaque na arquitetura brasileira, inclusive do ponto de vista histórico. Este trabalho apresenta uma revisão sobre a conservação de carpintarias (estruturas de madeira) e sobre técnicas de ensaios não destrutivos para a avaliação da madeira como estrutura. É proposta uma metodologia de inspeção de carpintarias acompanhada de aplicação a um caso prático. Este trabalho também estudou a variação da velocidade de ultra-som em corpos-de-prova íntegros e após deterioração por cupins em laboratório. A pouca perda de massa causada não alterou significativamente as propriedades mecânicas dos corpos-de-prova, não permitindo a identificação de correlações com o ultra-som.

Palavras chave: estruturas de madeira; inspeção; ultra-som.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em ___ / ___ / _____,

pela comissão examinadora.

Profª Drª Ângela Do Valle – Moderadora

Eng. Dr. Dener Gonçalves Prata – Examinador Externo

Prof. Dr. Carlos Alberto Szücs

Prof. PhD Ivo José Padaratz

Prof. Dr. João de Deus Medeiros

Prof. Dr. Jucilei Cordini – Coordenador do PPGEC

Dedicatória

À maravilhosa família e aos maravilhosos amigos, pelo apoio que sempre dão.

A todas as pessoas que buscam fazer deste um mundo melhor.

Agradecimentos

Agradeço à Adriana Frohlich Mercadante, pelo apoio, paciência e ajuda nos experimentos.

À orientadora Ângela do Valle e aos professores do programa, em especial Carlos Alberto Szücs, Narbal Ataliba Marcellino, Daniel Loriggio, Henriette Lebre La Rovere, Roberto de Oliveira, Jucilei Cordini, Ivo José Padaratz, Felix Diaz Diaz e Luiz Roberto Prudêncio Jr. pelas conversas elucidantes.

A professora Ana Maria Costa Leonardo e Yara C. Blanco, pela abertura para realizar o intercâmbio com nosso laboratório.

A equipe do IPHAN e estagiários, especialmente Lilian Simon, Robson Antônio de Almeida, Ivana Lucy Szcvuck, Isabel Kanan e Gizely Cesconetto, bem como a todos os participantes do projeto URBES, de Laguna. A Suzane Albers, do Intituto de Planejamento Urbano de Florianópolis, pela abertura que sempre mostrou ao projeto.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT, pelo receptivo intercâmbio e pela identificação das madeiras encontradas no estudo de caso. Em especial agradecemos a Sérgio Brazolin, José Geraldo Zenid, Adriana D. C. Costa, Raquel Amaral, Ligia e Maria Beatriz B. Monteiro.

A equipe do LNEC, em particular a Saporiti, Helena Cruz, Lina Nunes, Tania Nobre, José Luis Louro e António Manuel Baptista, pela acolhida e pelo intercâmbio de idéias.

Aos colegas Gustavo Lacerda Dias, Altevir Castro dos Santos, Rodrigo Terezo, Samuel João da Silveira, Jacson Carelli e Roberto Motta Bez pela ajuda e pela franca troca de informações. Ao pessoal do Laboratório de Materiais e ao exemplar técnico Edy Assini pelo apoio.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que, pelo seu programa de financiamento, possibilita a realização de pesquisas e formação.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, que aqui não foram citadas por falta de memória, nunca por falta de gratidão.

Sumário

1 Introdução 1

1.1 Quanto à formação dos restauradores: 2
1.2 Quanto ao aumento das atividades de conservação e restauro: 3
1.3 Delimitação do assunto 3
1.4 Objetivos Gerais 5
1.5 Objetivos Específicos 5

2 Estado da arte de conservação de estruturas de madeira 6

2.1 Agentes de deterioração 7
2.1.1 Deformações de secagem e intemperismo (“*weathering*”) 7
2.1.2 Agentes químicos 7
2.1.3 Fungos 7
2.1.4 Cupins (térmitas) 8
2.1.5 Besouros e Brocas (Coleópteros) 9

2.2 Agindo antes da biodeterioração em uma carpintaria 10
2.2.1 Conhecendo a edificação histórica 10
2.2.2 Pequenas modificações para uma melhor conservação 10
2.2.3 Fazer das inspeções uma rotina 12

2.3 Revisão de ferramentas de inspeção 13
2.3.1 Raios-X 14
2.3.2 Perfuração controlada 14
2.3.3 Propagação de Ondas 16
2.3.4 Emissão acústica por insetos 18

2.3.5 Termografia 18

2.3.6 Buscas com cães 19

2.3.7 Penetração ao impacto 19

2.3.8 Métodos de medição de umidade 20

3 Metodologia de inspeção 22

3.1 Elaboração da revisão 22

3.2 Antes da inspeção 24

3.2.1 Pessoal de inspeção: aptidões e treinamento 24

3.2.2 Equipamento mínimo necessário 25

3.3 Pesquisa preliminar 26

3.4 Inspeção externa 28

3.5 Inspeção de Cômodos 31

3.6 Inspeção geral de uma estrutura 34

3.7 Inspeção detalhada de elementos estruturais 36

3.8 Conclusões Parciais 39

4 Avaliação de resistência residual com ultra-som 40

4.1 Pincípios de ultra-som 40

4.2 Revisão teórica 41

4.3 Fatores que influenciam a propagação de ondas na madeira 45

4.4 Revisão de metodologia 46

4.5 Materiais e métodos 49

4.5.1 Os bioensaios com cupins 50

4.5.2 Adaptações do procedimento experimental original 51

4.5.3 Escolha do equipamento de ultra-som 53

4.5.4 Escolha do acoplante e repetibilidade das medidas 53

4.5.5 Materiais utilizados 56

4.5.6 Ensaio mecânico 56

4.5.7 Ensaios com ultra-som 59

4.6 Resultados 61

4.6.1 Perda de massa, massa e densidade 61

4.6.2 Medidas de ultra-som 65

4.6.3 Tensão de Ruptura e Módulo de Elasticidade 71

4.7 Discussão dos resultados 77

4.7.1 Correlações esperadas 79

5 Discussão, conclusões e recomendações 90

6 Anexos 93

7 Referências bibliográficas 97

8 Bibliografia indicada 101

9 Software utilizado 101

10 Apêndices 103

Lista de figuras

Figura 1: (esquerda) demonstração do equipamento de perfuração controlada “Resistograph” durante visita do autor ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, Lisboa (2001). 15

Figura 2: (direita) diagrama de resitência versus profundidade perfurada gerado pelo equipamento “Resistograph” durante a perfuração. 15

Figura 3: Exemplo de questionário com informações preliminares à inspeção 27

Figura 4: Ilustração usada por Cruz, Machado e Nunes exemplificando regiões externas abrangidas pela inspeção (adaptada de BERRY, 1994). As referências numéricas são explicadas na Tabela 3..... 29

Figura 5: Exemplo de formulário de inspeção externa 30

Figura 6: Exemplo de formulário de inspeção interna. Neste caso foi feito da edificação como um todo mas, se necessário, deve-se detalhar cada cômodo..... 33

Figura 7: Questionário de inspeção geral de estrutura de madeira. 35

Figura 8: Exemplo de carga adicional em uma estrutura, onde tesouras adicionais sustentam um reservatório de água e uma terça deteriorada, passando suas cargas ao frechal e à tesoura principal sul, respectivamente..... 36

Figura 9: Exemplo de formulário de Inspeção Detalhada 38

Figura 10: Sistema imaginário de átomos unidimensional. Na figura superior, no estado de equilíbrio. Na figura inferior, com propagação de onda de densidade. 42

Figura 11: Efeito da diferença de impedância acústica entre dois meios de uma interface na reflexão da energia acústica. 45

Figura 12: Aparato usado por ROSS et al. (1996) para medir a velocidade e atenuação de ondas de choque em espécimes de madeira (adaptado de ROSS et al. 1996) ... 47

Figura 15: variação da velocidade de propagação de ultra-som antes e depois da propagação de trincas de secagem em CPs de pinus. Ensaios piloto. 60
Figura 16: variação da velocidade de propagação de ultra-som antes e depois da propagação de trincas de secagem em CPs de eucalipto. Ensaios piloto. 60
Figura 17: galerias de cupins observadas em corpos-de-prova piloto de pinus, expostos por 30, 45 e 60 dias, respectivamente, da esquerda para a direita. 62
Figura 18: gráfico da distribuição de massa das amostras, onde a linha central representa a mediana da amostra, o retângulo representa 50% da amostra e entre as linhas extremas estão 100% da amostra 63
Figura 19: Histograma da perda de massa da amostra de *Eucalyptus sp.* 64
Figura 20: Histograma da perda de massa da amostra de *Pinus sp.* 64
Figura 21: distribuições de densidades (densid), onde 1 é o momento antes da exposição aos cupins e 2 é o momento após a exposição. A letra “E” indica eucalipto e “P” indica 9E” indica euca5 TD (.....13o)TjETBT143.8.95.P calipto e “P”

Figura 28: Distribuição das velocidades radiais de ultra-som no pinus nos três momentos. O retângulo representa 50% dos valores e a linha em seu interior a mediana. Os limites externos abrangem 100% da amostra. 70
Figura 29: Distribuição das somas das velocidades radiais e tangenciais de ultra-som no pinus nos três momentos. O retângulo representa 50% dos valores e a linha em seu interior a mediana. Os limites externos abrangem 100% da amostra. 70
Figura 30: (esquerda) Gráfico de três corpos-de-prova de eucalipto, representando os comportamentos observados 72
Figura 31: : (direita) Gráfico de três corpos-de-prova de pinus, representando os comportamentos observados 72
Figura 32: fraturas típicas observadas em eucalipto. Da esquerda para direita, inclinada, fendas, catastrófica e esmagamento 73
Figura 33: fraturas típicas observadas em pinus. Da esquerda para direita, inclinada, fendas, flambagem 45º (no canto esquerdo, junto à galeria rompida) e catastrófica. 73
Figura 34: rupturas por flambagem das fibras formando planos de 45º, em corpos-de-prova de outras amostras, reforçando a simetria do aparato utilizado. De cima para baixo as madeiras são: roxinho, pinus e eucalipto. 74
Figura 35: (esquerda) histograma dos valores de tensão de ruptura dos corpos-de-prova de eucalipto. 77
Figura 36: (direita) histograma dos valores de módulo de elasticidade dos corpos-de-prova de eucalipto, para fins comparativos dentro deste estudo. 77
Figura 37: (esquerda) histograma dos valores de tensão de ruptura dos corpos-de-prova de pinus. 77
Figura 38: (direita) histograma dos valores de módulo de elasticidade dos corpos-de-prova de pinus, para fins comparativos dentro deste estudo. 77
Figura 39: (esquerda) correlação entre TR e MOE para os corpos-de-prova de eucalipto. 81
Figura 40: (direita) correlação entre TR e MOE para os corpos-de-prova de pinus. 81
Figura 41: (esquerda) correlação entre TR e MOE para os corpos-de-prova de eucalipto no intervalo de 95% de confiança. 81
Figura 42: (direita) correlação entre TR e MOE para os corpos-de-prova de pinus, no intervalo de 95% de confiança. 81

Figura 43: (esquerda) correlação entre Perda de massa e TR para os corpos-de-prova de eucalipto. 83
Figura 44: (direita) correlação entre Perda de massa e TR para os corpos-de-prova de pinus. 83
Figura 45: (esquerda) correlação entre Perda de massa e MOE para os corpos-de-prova de eucalipto. 83
Figura 46: (direita) correlação entre Perda de massa e MOE para os corpos-de-prova de pinus. 83
Figura 47: (esquerda) correlação entre Perda de massa e Variação da Velocidade Longitudinal entre os momentos 1 e 2, para os corpos-de-prova de eucalipto. 84
Figura 48: : (direita) correlação entre Perda de massa e Variação da Velocidade Longitudinal entre os momentos 1 e 2, para os corpos-de-prova de pinus. 84
Figura 49: (esquerda) correlação entre Perda de massa e Variação da Velocidade Tangencial entre os momentos 1 e 2, para os corpos-de-prova de eucalipto. 84
Figura 50: (direita) correlação entre Perda de massa e Variação da Velocidade Tangencial entre os momentos 1 e 2, para os corpos-de-prova de pinus. 84
Figura 51: (esquerda) correlação entre Perda de massa e Variação da Velocidade Radial entre os momentos 1 e 2, para os corpos-de-prova de eucalipto. 85
Figura 52: (direita) correlação entre Perda de massa e Variação da Velocidade Radial entre os momentos 1 e 2, para os corpos-de-prova de pinus. 85
Figura 53: (esquerda) correlação entre MOE o Quadrado da Velocidade Longitudinal para os corpos-de-prova de eucalipto. 85
Figura 54: (direita) correlação entre MOE o Quadrado da Velocidade Longitudinal para os corpos-de-prova de pinus. .....dauerdaT TD 0.3

Figura 59: (esquerda) correlação entre MOE o Quadrado da soma das Velocidades Tangencial e Radial para os corpos-de-prova de eucalipto. 87
Figura 60: (direita) correlação entre MOE o Quadrado da soma das Velocidades Tangencial e Radial para os corpos-de-prova de pinus. 87
Figura 61: (esquerda) correlação entre MOE o Módulo de Elasticidade Dinâmico para referência na direção L3, para os corpos-de-prova de eucalipto. 87
Figura 62: (direita) correlação entre MOE o Módulo de Elasticidade Dinâmico para referência na direção L3, para os corpos-de-prova de eucalipto. 87

Lista de tabelas

Tabela 1: Equipamentos básicos para inspeção de estruturas de madeira 25
Tabela 2: Informações para pesquisa preliminar. 26
Tabela 3: Informações da inspeção externa a serem relatadas (com algumas referências numéricas encontradas na Figura 4). 28
Tabela 4: Informações mínimas da inspeção de cômodos a serem relatadas. 31
Tabela 5: Inspeção geral de estruturas de madeira. 34
Tabela 6: Observação individual de um membro da estrutura. 37
Tabela 7: Sistema para classificação visual de degradação fúngica e por cupins (adaptado de ROSS et al. 1996) 48
Tabela 8: Análise estatísticas de Ross et al. (1996) 49
Tabela 9: Ensaio exploratório entre equipamentos de ultra-som, mostrando divergência para CPs de comprimento reduzido. 53
Tabela 10: Medidas de tempo de transmissão de ultra-som com e sem acoplante em corpos cúbicos de 3cm de lado. 54
Tabela 11: Ensaio de repetibilidade de medidas de ultra-som, em corpo-de-prova de eucalipto. 55
Tabela 12: Lista de equipamentos utilizados. 56
Tabela 13: Fator de correção da massa para a umidade de referência (momento 3), baseado em corpos-de-prova dedicados a este fim. 63
Tabela 14: Densidade aparente das amostras antes e após a exposição aos cupins 65
Tabela 15: Médias e desvios padrão das velocidades de propagação de ultra-som, em metros por segundo. 66
Tabela 16: Avaliadores das medidas dimensionais dos corpos-de-prova e o comprimento de onda longitudinal encontrado. 71
Tabela 17: Dados representativos das tensões de ruptura para diferentes tipos de fraturas observados. 75
Tabela 18: dados representativos dos valores de TR, MOE e coeficiente de determinação (r^2) do MOE. 76

Lista de Equações

Equação 1: Velocidade de propagação de uma onda unidimensional em um sólido (onde Vp é a velocidade de propagação, M_E é o módulo de elasticidade dinâmico do sólido e ρ a densidade do sólido). 42

Equação 2: Velocidade de propagação de onda (Vp), segundo Graff, onde M_E é o módulo de elasticidade dinâmico do sólido, ρ a densidade do sólido e ν_{LT} é o coeficiente de Poisson) 42

Equação 3: Relação entre a velocidade de propagação de onda V_p, comprimento de onda λ e frequência *f*. 43

Equação 4: Impedância acústica de um material (onde Z é a impedância acústica, ρ é a densidade e V a velocidade de onda). 44

Equação 5: Energia acústica refletida na interface entre meios com impedâncias diferentes (onde R é a energia refletida, Z_2 a impedância do meio 2 e Z_1 a impedância do meio 1). 44

Equação 6: Cálculo da perda de massa, onde m_1 é a massa inicial e m_2 é a massa após a exposição aos cupins, ambas medidas em gramas. 62

Lista de abreviaturas e siglas

CEIS	Centro de Estudos de Insetos Sociais - UNESP
CP	Corpo-de-prova
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
IPT	Instituto Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
IPUF	Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis
LEE	Laboratório de Experimentação de Estruturas
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNESP	Universidade do Estado de São Paulo

Lista de símbolos

∂m	Variação de massa (perda de massa)
∂vL	Variação de velocidade longitudinal
∂vR	Variação de velocidade radial
∂vT	Variação de velocidade tangencial
Etstx	Corpo-de-prova de testemunho de eucalipto número x
Exx	Corpo-de-prova de eucalipto número xx
m	Massa
M_E	Módulo de Elasticidade Dinâmico
m_n	Massa no momento “n”
MOE	Módulo de Elasticidade
MOEdr	Módulo de Elasticidade dinâmico para referência
Momento 1	(coeficiente) momento antes da exposição aos cupins
Momento 2	(coeficiente) momento após a exposição aos cupins
Momento 3	(coeficiente) momento após o processo de lavagem/secagem
Ptstx	Corpo-de-prova de testemunho de pinus número x
Pxx	Corpo-de-prova de pinus número xx
R	Energia acústica refletida
TR	Tensão de ruptura
v(T+R)	Soma das velocidades tangencial e radial
vL_n	Velocidade de ultra-som longitudinal no momento “n” (1, 2 ou 3)
Vp	Velocidade de propagação do ultra-som
vR_n	Velocidade de ultra-som radial no momento “n” (1, 2 ou 3)
vT_n	Velocidade de ultra-som tangencial no momento “n” (1, 2 ou 3)
Z	Inpedância acústica
Z_n	Inpedância acústica no meio “n”
ν_{LT}	Coeficiente de Poisson
ρ	Densidade

Resumo

As edificações com estruturas de madeira apresentam um grande destaque na arquitetura brasileira, inclusive do ponto de vista histórico. A manutenção deste tipo de estrutura é de vital importância e exige medidas preventivas que raramente são seguidas. Este trabalho apresenta uma revisão sobre a conservação de carpintarias (estruturas de madeira) e sobre técnicas de ensaios não destrutivos para a avaliação da madeira como estrutura. Entre as medidas necessárias para a conservação de carpintarias estão as inspeções. Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre este tipo de ação e é proposta uma metodologia de inspeção de carpintarias acompanhada de aplicação a um caso prático.

A avaliação do estado da carpintaria requer, por vezes, o uso de técnicas não destrutivas, evitando a extração de uma porção significativa do material. O ultra-som é um exemplo deste tipo de ensaio e que pode ser empregado para análise de parâmetros mecânicos em peças estruturais de madeira. Entretanto, a aplicação desta técnica a elementos deteriorados por cupins, ainda requer mais investigações. Com o objetivo de colaborar neste sentido, este trabalho analisou a variação da velocidade de ultra-som em corpos-de-prova de *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.* em duas condições: íntegros e após exposição aos cupins da espécie *Coptotermes havilandi*, realizada em cooperação com Departamento de Biologia da UNESP, Campus de Rio Claro-SP. Após a biodeterioração da madeira, mediu-se a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade por meio de compressão paralela. Buscou-se uma correlação entre as medidas de ultra-som e as propriedades do material. Constatou-se que a perda de massa causada pelos cupins após 40 dias de ação, 3% para o *Eucalyptus sp.* e 8% para o *Pinus sp.*, não alterou significativamente as propriedades mecânicas dos corpos-de-prova, não permitindo a identificação de correlações entre estes parâmetros e a velocidade de ultra-som

Palavras chave: estruturas de madeira; inspeção; ultra-som.

Abstract

The use of timber structures in buildings is very important to the Brazilian architecture and cultural heritage. Timber structure demands maintenance but those preventive actions are seldom done. This work presents a review on timber structures maintenance actions, and non-destructive essays (NDE) available to their assessment. The need of regular inspections is among the demanded maintenance actions. A review on timber structure inspection methodology is herein presented with a case study on a cultural heritage building.

The security assessment of a timber structure may demand the use of NDE in order to have data with little sample drawing. Ultrasonic is one kind of END that can be employed to assess the mechanical properties of structural members. Yet, the use of ultrasonic technique still requires further studies in order to assess timber partially degraded by termites. Considering this need, the present work has studied the ultrasonic velocity in *Pinus sp.* and *Eucalyptus sp.* samples in two conditions: free of defects and after the degradation by *Coptotermes havilandi* termites. The wood exposition to termites was done in co-operation with UNESP Biology Department, at the Rio Claro campus.

1 Introdução

Ao longo dos séculos a humanidade tem encontrado na madeira um precioso recurso para construção de seus bens, incluindo imóveis. FERRANTI (1996) nos mostra que várias espécies de madeira possuem características de resistência/peso comparáveis a materiais compostos e algumas ligas metálicas. Mesmo com a crescente preocupação com a exploração das matas, seu uso racional traz aspectos ecológicos positivos nas edificações, com um balanço global de energia mais favorável do que no uso do concreto ou aço (TRUSTY, W. B.; MEIL, J. K., 1999) (WILLAMSON,T.; et al., 2001).

As estruturas de madeira desempenham um importante papel nas construções do Brasil e do mundo. As estruturas de cobertura, que frequentemente empregam madeira, são responsáveis pela boa conservação das edificações, protegendo-as da umidade. Especialmente em edificações históricas, esta proteção é fundamental, pois se estende aos objetos contidos, afrescos, estuques e outras características relevantes. PONTES e MANSO (1994) relatam um estudo realizado sobre as obras de revitalização de 124 edifícios em Lisboa onde a estrutura/cobertura representa somente 11,92% (11,22% de desvio padrão) da obra. Um grande benefício por um baixo custo, que poderia ainda ser diminuído com a prática de inspeções regulares durante sua vida útil. Assim sendo, em restauros emergenciais, aonde o orçamento não permite um trabalho completo, o conjunto estrutura+cobertura deve ser priorizado, com o intuito de resguard

ela é prejudicial quando a madeira está sendo usada para suprir necessidades humanas. Busca-se portanto evitar a biodeterioração da madeira em serviço.

A prática de inspeções periódicas é uma ferramenta indispensável para a conservação de estruturas, possibilitando que medidas reparatórias sejam tomadas em tempo. Uma inspeção cuidadosa é também um vital estudo preliminar para qualquer obra de restauro de edificação ou de adequação a novos usos ou padrões. No caso das obras em madeira, a inspeção envolverá conhecimentos tanto de Biologia quanto de Engenharia. Para

Segundo o artigo: “nossa experiência tem demonstrado que os arquitetos, principais clientes de cursos de formação para conservadores dos bens imóveis, em geral, são refratários aos conhecimentos da tecnologia.” (página 90). Fica assim uma lacuna que precisa ser preenchida por profissionais que tenham em sua formação uma ênfase maior nos aspectos técnicos do trabalho, conhecendo ainda os preceitos necessários para trabalhar com o patrimônio histórico.

Dado que é uma atividade multidisciplinar por excelência, recomendam OLIVEIRA e SANTIAGO (1994) que os estudos devem acontecer através de pós-graduação, possibilitando que o trabalho multidisciplinar cubra as lacunas existentes entre as formações profissionais. Assim enfatizam a necessidade dos estudos e pesquisas ocorrerem com participação das universidades. Também recomendam um treinamento prático, concomitante à formação teórica.

1.2 Quanto ao aumento das atividades de conservação e restauro:

As leis de incentivo fiscal permitiram uma descentralização de algumas atividades ligadas à cultura, antes quase exclusivamente desempenhadas pelo governo. A conservação de edifícios históricos é uma destas atividades de preservação da cultura brasileira em que a inciativa privada pode incentivar e abater parte de seus custos do imposto de renda, desde que seguidos os preceitos da lei. Recentemente o montante do custo passível de renúncia fiscal subiu, podendo chegar a se abater a integridade dos custos de um projeto cultural. Além da renúncia fiscal, os recursos do Fundo Nacional de Cultura também podem ser investidos na atividade de conservação do patrimônio arquitetônico.

Não cabe aqui fazer uma revisão da legislação aplicável ao assunto, mas simplesmente apontar o crescimento deste mercado, já carente de profissionais especializados.

1.3 Delimitação do assunto

Foi citada anteriormente a importância da madeira nas construções brasileira. Sendo o principal emprego de estruturas de madeira nas edificações, optou-se por nelas concentrar o foco deste estudo. Entre as edificações, as de valor histórico são as que mais justificam o empenho de profissionais especializados, pois seu valor vai além do

imobiliário e material, todavia os tópicos aqui abordados podem ser aplicados nas edificações como um todo, com poucas adaptações.

Ainda dentro do trabalho de conservação existem várias etapas que podem ser abordadas, como a inspeção das estruturas, o levantamento dos quadros patológicos, recursos para simulação e cálculo das estruturas e soluções para reforço de estruturas em serviço. Conhecendo a importância do lema da conservação “conhecer para preservar”, considera-se que o trabalho de inspeção é a primeira etapa deste tipo de trabalho e uma condição importante para que qualquer outra etapa seja executada com êxito. Desta forma, optou-se por concentrar os esforços no campo da inspeção das carpintarias (nome usado aqui para se referir às estruturas de madeira).

Como para a obtenção de respostas adequadas é necessário primeiro conhecer as perguntas adequadas, fez-se a opção de estudar a metodologia de inspeção. Desta forma procurou-se sistematizar a busca pelas informações que serão necessárias para o trabalho do engenheiro calculista, entre outros profissionais que estarão envolvidos com a conservação.

Todavia, uma vez com as pergunta adequadas, o profissional que buscar obter dados de engenharia em relação a uma estrutura de madeira encontrará uma dificuldade quanto às ferramentas disponíveis. As ferramentas tradicionais de inspeção, visual e percussão, possuem como condição necessária o conhecimento adquirido pelo inspetor com a prática. Já as ferramentas de ensaios não destrutivos, que serão abordadas adiante, têm sido aplicadas de forma mais freqüente em madeira sã, até o presente momento. Assim, seu emprego requer maior investigação quando se trata de avaliar o estado da seção e a resistência de uma madeira parcialmente deteriorada, considerada ainda um testemunho histórico, para a qual se deverá calcular a necessidade de reforço e de que tipo.

Os estudos de ensaios não destrutivos em madeira deteriorada abordam quase que exclusivamente a deterioração por fungos, talvez por ser uma forma de deterioração comum a quase todos os locais do planeta. Os cupins todavia respondem por uma parcela importante da deterioração de estruturas, especialmente em um país com as características climáticas do Brasil. As estruturas de madeira podem suportar os ataques de cupins durante anos, ainda cumprindo sua função. Uma vez controlados os cupins, uma estrutura poderá continuar desempenhando sua função mesmo tendo sido

parcialmente degradada, desde que se possa obter dados confiáveis para uso nos cálculos estruturais e revitalização.

Baseado nesta necessidade de aprimoramento de ferramentas de inspeção, o presente estudo procurou desenvolver um procedimento que permitisse avaliar o uso do ultra-som na avaliação de madeiras parcialmente degradadas por cupins.

1.4 Objetivos Gerais

- Contribuir para a preservação do patrimônio histórico arquitetônico através do desenvolvimento de técnicas e métodos para melhor conservação de suas estruturas de madeira, pois a madeira é um material durável, desde que bem conservada;

- Identificar as metodologias e ferramentas de inspeção de carpintarias de edificações, para a obtenção dos parâmetros físicos e mecânicos da estrutura, dados necessários para o trabalho de engenharia envolvido na sua conservação e segurança;

1.5 Obje

2 Estado da arte de conservação de estruturas de madeira

AVAT et al. (1996) estimam que entre 300 e 400 milhões de Francos Franceses são gastos a cada ano devido à biodeterioração da madeira. FREAS et al. (1982) alertam que “o equivalente a um bilhão (de US$) de produtos de madeira são perdidos a cada ano devido às más práticas construtivas e falta de manutenção”. Infelizmente não dispõe-se de estatísticas brasileiras disponíveis.

Além de preservar florestas, prolongar a vida útil de estruturas históricas é imprescindível para preservar o patrimônio histórico. As estruturas são um testemunho em si e frequentemente protegem outras características importantes como estuques, móveis e outros objetos. Edificações bem preservadas também refletem em suas vizinhanças, mantendo o valor econômico e histórico, evitando que uma decadência obrigue a sociedade a aplicar seus recursos em uma expansão urbana desnecessária.

Vários autores (AVAT et al. 1996, FREAS et al. 1982, LEPAGE et al. 1986 e KROPF 1996) dão importantes orientações sobre a concepção construtiva visando prevenir a biodeterioração. Detalhes como a especificação de madeira naturalmente resistente ou tratada, barreiras físicas ou químicas (LEWIS 1996, RÉVUE du Bois 1995), barreiras contra a umidade do solo (KROPF 1996, SMULSKI 1993, WEAVER e MATERO 1993), detalhamento de projeto para evitar acumulação de água (KROPF, 1996), para citar alguns.

Estas medidas preventivas são importantes e devem ser seguidas sempre que possível. Muitos destes detalhes já faziam parte das práticas tradicionais de construção, como a ventilação de porões (LEMOS, 1999) por gateiras, mas muitas técnicas não foram incorporadas em edificações históricas e as mudanças podem ser impossíveis quando já erigidas ou então causar modificação drástica na identidade original. A preservação sob pressão de madeira *in locus*, por exemplo, é impraticável. Mas existem ações que podem ser tomadas para conservar estruturas de madeira em edificações históricas. Em sua maior parte estas medidas lidam com o controle de umidade, uso de barreiras contra os agentes de biodeterioração, tratamentos químicos e inspeções periódicas.

Porém, antes de aprofundar na questão de ações preventivas, é interessante fazer uma breve revisão sobre os agentes de deterioração contra os quais se procura prevenção.

2.1 Agentes de deterioração

Para que se entenda melhor as medidas que são propostas em seguida, as causas mais comuns de deterioração serão brevemente relatadas. Nem todos os agentes de deterioração serão encontrados em todos os lugares. Por exemplo, os cupins de madeira seca são uma forte ameaça no Brasil, mas menos importante na Europa.

2.1.1 Deformações de secagem e intemperismo (“*weathering*”)

Quando o nível de umidade cresce, a madeira sofrerá um “inchamento”, especialmente

necessárias para o desenvolvimento de fungos (baseado em WEAVER e MATERO, 1993):

- fonte de infestação – esporos de fungos são encontrados em virtualmente qualquer lugar;
- fonte de alimento (madeira não tóxica);
- umidade na madeira superior a 20% (SMULSKI, 1993), 25% (WEAVER e MATERO, 1993) ou até 30% (LEPAGE et al. 1986), dependendo da fonte de informação. A maior parte das madeiras, em uma umidade relativa do ar inferior a 90% terão uma umidade inferior a 20% (CRUZ, MACHADO e NUNES, 1994);
- fonte de oxigênio;
- temperatura adequada, de 25 a 32ºC normalmente. Geralmente os fungos morrerão quando expostos a mais de 65ºC, mas ficarão apenas dormentes em temperaturas congelantes.

Considerando edificações, será muito difícil controlar a fonte de oxigênio, eliminar as fontes de infestação ou controlar as temperaturas. Opções de controle disponíveis serão primeiro o controle da umidade e, quando não for possível, eliminar a fonte de alimento envenenando a madeira que não seja naturalmente resistente.

2.1.4 Cupins (térmitas)

Existem muitas espécies de insetos, cujas colônias respondem por um terço de todo o dinheiro gasto com controle de pragas nos EUA, segundo SMULSKI (1993b). Existem dois principais grupos de cupins: cupins subterrâneos e cupins de madeira seca.

Cupins Subterrâneos

São responsáveis por grandes estragos na Europa e nos EUA, assim como em várias cidades brasileiras. Estes insetos vivem em ninhos independentes da madeira atacada, no entorno ou mesmo dentro, em locais não frequentados da edificação em questão. Um ninho pode buscar comida em um raio de 30 metros, sempre escondidos da luz, pelo subsolo, por vazios na estrutura, rachaduras, tubulações, acabamentos ou em pequenos dutos por eles construídos com terra e celulose digerida. Estes cupins são especialmente atraídos por celulose úmida, tendo preferência por madeira alterada por fungos, mas podem atacar madeiras com umidade tão baixa como 8%.

O envenenamento da madeira atacada em si não elimina o ninho destes cupins. Sua colônia procurará outras fontes de alimento e poderá retornar quando o efeito residual do biocida cessar. Os cupins subterrâneos causam um impacto mais rápido e maior do que os cupins de madeira seca. Quando se observa durante a primavera nuvens dos indivíduos alados destes cupins, fenômeno chamado de revoada, dentro da edificação, pode ser um sinal de infestação.

Cupins de Madeira Seca

Estas espécies de cupins vivem em colônias menores do que os cupins subterrâneos, formando ninhos dentro das peças de madeira, sem outra fonte de água qualquer. Apesar de ter um impacto mais lento do que cupins subterrâneos na estrutura, os indivíduos podem transitar por todas as peças de madeira adjacentes, o que dificulta achar seu ninho. Segundo se observou, os cupins de madeira seca são aparentemente a fonte mais comum de biodeterioração em madeira na cidade de Florianópolis (Estado de Santa Catarina), juntamente com fungos.

A infestação da madeira ocorre também por seus indivíduos alados, depois do que estes insetos são raramente vistos. O vôo de reprodução (revoada) ocorre em noite de verão, freqüentemente depois de uma chuva ou dia úmido. Este é um forte indício de infestação quando ocorre no interior de edifícios fechados. Outro indicativo é a presença

espécies se nutrem somente de madeira do alburno ou de madeira “verde” (nova, úmida) enquanto outras podem se alimentar mesmo de cerne ou madeira seca.

Depois do último estágio, quando as larvas metamorfoseiam-se em um inseto perfeito, um furo de saída será feito. Algumas vezes este será o único vestígio de ataque, quando a larva já tiver causado o estrago. Este inseto perfeito poderá re-infestar a madeira, entretanto se for uma espécie de madeira “verde” ele não re-infestará a madeira se esta já estiver seca.

2.2 Agindo antes da biodeterioração em uma carpintaria

Tendo feito esta breve revisão sobre os agentes de deterioração da madeira, voltar-se-á novamente a atenção sobre as formas de prevenção.

2.2.1 Conhecendo a edificação histórica

O axioma “Conhecer, Restaurar e Preservar” é frequentemente aplicado ao patrimônio histórico com sucesso. O diagnóstico deve ser sempre o primeiro passo para a preservação, especialmente considerando que os trabalhos de limpeza ou restauração podem encobrir importantes indícios de deterioração.

A questão da inspeção de carpintarias será abordada detalhadamente mais adiante. O inventário detalhado da edificação chamará a atenção para áreas que necessitam de reparo imediato ou adequações para atender às normas. Estas medidas imediatas não devem ofuscar a importância de se estabelecer um programa de conservação eficaz, incluindo inspeções de rotina.

2.2.2 Pequenas modificações para uma melhor conservação

Idealmente um objeto histórico deve ser mantido em seu estado mais original. Todas as modificações devem seguir as regras do patrimônio histórico, como a “reversibilidade” da intervenção e a busca por métodos menos nocivos. No Brasil, estas regras são propostas pelo IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional.

Algumas pequenas modificações podem ser propostas de modo a mudar pouco o valor histórico e função original em troca de uma melhor preservação. Estas modificações

procurarão diminuir os níveis de umidade, criar acessos para inspeção e criar barreiras para os agentes de biodeterioração.

Algumas modificações poderão ser:

- uso de tinta, verniz ou outro tratamento superficial que protegerá a madeira de umidade eventual e criará uma barreira física ou química para dificultar a ação de biodeterioradores;
- tratamento químico de madeiras em contato permanente com a água ou fontes de umidade para diminuir o risco de deterioração;
- obstrução com material elástico de frestas, conduítes e outras aberturas que possam ser usadas por cupins subterrâneos como um caminho abrigado para chegar do solo à madeira;
- instalação de barreiras físicas que forçarão os cupins subterrâneos a contornar, dificultando o acesso e facilitando a identificação de um eventual ataque;
- se houver histórico de cupins subterrâneos ou brocas marinhas na vizinhança, prover barreiras físicas ou químicas;
- criar ou desobstruir aberturas de ventilação em sótãos, porões e áreas fechadas para diminuir a umidade do ambiente;
- prover janelas de inspeção ou passagens para locais inacessíveis;
- melhorar sistemas de calhas para evitar vazamentos ou entupimentos;
- em climas frios tomar providências para evitar gelo na cobertura ou condensação;
- modificar engastes de madeira na alvenaria, incluindo barreiras de umidade (folhas de flandres ou papel betuminoso, por exemplo), e permitir circulação de ar;
- cobrir o solo exposto dentro da edificação para minimizar a migração de umidade. O solo é a maior fonte de umidade em edificações (SMULSKI, 1997);
- cuidar para que outras fontes de umidade como secadora de roupas, locais de banho e cozinha tenham exaustores diretamente para o exterior;
- localizar e eliminar depósitos de sobras de madeira, identificando os biodeterioradores quando houver.

Toda mudança ou reparo deve ser documentada com descrição (antes e depois), localização e recomendações para monitoramento, ajustes ou manutenção.

2.2.3 Fazer das inspeções uma rotina

Depois de um inventário, da avaliação e recuperação da estrutura de madeira, um programa de conservação deve ser delineado para garantir a observação permanente da estrutura e o cronograma anual de inspeção e de tarefas de conservação. Sabendo que estas tarefas consomem recursos, uma pessoa com poder administrativo deve ser responsável, tendo um orçamento já previsto, como sugere Tuomi (Freas et al., 1982).

Tão importante como definir claramente as responsabilidades pelas inspeções será prover um treinamento adequado para o pessoal envolvido. Tópicos sobre o treinamento mínimo compreenderão um entendimento da madeira como material construtivo e conhecimento dos agentes de biodeterioração e seus indícios de identificação. Dependendo da complexidade da edificação pode ser interessante treinar alguns usuários para que possam fazer observações críticas constantes, relatando defeitos como goteiras assim que comecem.

O cronograma de manutenção e inspeções pode parecer com um cronograma de manutenção contido em manuais de automóveis, com tarefas associadas a determinados eventos ou em um determinado tempo. Pode-se dividir as tarefas em três tipos, como proposto por Tuomi (Freas et al.): diárias, programadas e eventuais.

As inspeções diárias não são formais. Os próprios usuários do edifício, uma vez sensibilizados pelo treinamento, serão responsáveis por relatar para o responsável as anormalidades encontradas, desencadeando ações corretivas. Vazamentos, goteiras, deteriorações deverão ser sanados.

Considerando as ações programadas de manutenção e inspeção, as diferentes partes da edificação serão cuidadas em diferentes épocas do ano. Telhados e calhas deverão ser inspecionados e reparados antes e depois da estação das chuvas (primavera e outono, normalmente). Porões, sótãos e espaços fechados devem ser inspecionados quando o calor, a umidade ou a condensação for maior (normalmente verão ou inverno). A aplicação de tintas e acabamentos deve ser feita em tempo quente e seco, de acordo com as instruções do fabricante. Inspeções e reapertos de juntas devem ser realizadas na estação seca.

Juntamente com qualquer técnica de END, encoraja-se o uso das técnicas tradicionais de inspeção visual, com percussão de martelo e com estilete (quebra-gelo). O uso conjunto de técnicas de inspeção aumentará a segurança do diagnóstico.

2.3.1 Raios-X

Raios-x são feixes de fótons de alta energia que têm a capacidade de passar através de materiais, dependendo de sua densidade. Da mesma forma que uma placa de chumbo obstruirá mais a passagem de raios-x do que uma placa de alumínio de igual espessura, a madeira sã oferecerá maior resistência do que a madeira degradada ou do que os vazios deixados por insetos. A medida da intensidade de raio-x que atravessa um corpo pode ser feita por sensores especiais ou pela sensibilização de um filme fotográfico colocado do lado oposto em relação à fonte de raios.

Percebe-se aqui uma primeira limitação desta técnica: a necessidade de acessar o elemento estrutural pelos dois lados. A portabilidade do equipamento e a nocividade dos raios-x à saúde são outras limitações.

Como vantagem, esta técnica permite um diagnóstico quantitativo, podendo ter seus dados relacionados com a densidade da madeira. Apesar de sua limitação de uso em campo, foi a técnica usada em laboratório com sucesso por BUCUR et al. (1997) para descrever a cinética da degradação de madeira por fungos.

Além de permitir a geração de um mapa de densidade das seções atravessadas pelos raios-x, seu uso conjunto com métodos de tomografia permite gerar imagens em três dimensões. A resolução da imagem dependerá do aparelho e do software utilizado. LINDGREN et al. (1992) descrevem um experimento onde anéis de crescimento de 0,6mm de largura puderam ser observados. Sobre aplicações em campo, somente são citadas em postes e árvores por ROSS e PELLERIN (1994).

2.3.2 Perfuração controlada

Para perfurar qualquer material é necessário usar alguma energia. Para perfurar madeira sã é necessário mais energia do que para perfurar madeira degradada por fungos. Quase nenhuma energia é necessária para transpassar um vazio deixado por um inseto dentro

da madeira. A energia necessária para perfurar uma madeira será proporcional à sua densidade (SEABY, ano não disponível), podendo portanto gerar resultados quantitativos.

Observando estes princípios, foram desenvolvidos equipamentos que registram a resistência à perfuração em relação à profundidade perfurada. O furo pode ter diâmetro de 1,7 a 3mm, dependendo do fabricante do equipamento, e a perfuração pode alcançar até um metro. Este ensaio ainda é considerado não destrutivo pois não afeta o uso futuro de um elemento estrutural. O gráfico da perfuração pode ser analisado em campo, através de uma pequena impressora ou computador de mão, e podem ser gravados para análise posterior em computador pessoal. Os dois fabricantes que se tem conhecimento são Frank Rinn (frankrinn@compuserve.com) e Sibert Technology (NDT@sibtec.com).

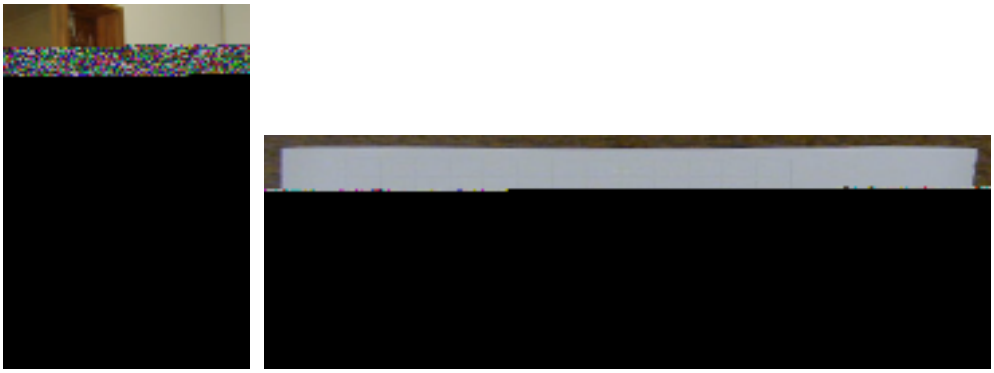


Figura 1: (esquerda) demonstração do equipamento de perfuração controlada "Resistograph" durante visita do autor ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, Lisboa (2001).

Figura 2: (direita) diagrama de resitência versus profundidade perfurada gerado pelo equipamento "Resistograph" durante a perfuração.

As principais limitações deste método descritas por DEMAUS (1993) são: a necessidade de ter um espaço de cerca de 85cm perpendicular à peça analisada para posicionar o equipamento; a possibilidade de desvio da sonda perfuratriz quando perfurando em ângulo diferente de 90º com a superfície; a importância de se usar as duas mãos na operação; a fadiga causada por inspeções constantes em posição acima da

cabeça. Também é apontado por BONAMINI (1995) a natureza local desta técnica, onde um cilindro de no máximo 3mm de diâmetro é analisado, cujo resultado não é automaticamente expansível para todo o elemento estrutural. Estas limitações foram verificadas na prática durante visita do autor ao LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (2001), sendo, ainda, assim uma interessante ferramenta de inspeção.

2.3.3 Propagação de Ondas

A velocidade de propagação de ondas, sejam de choque, som ou ultra-som, dependerão da elasticidade do material. Como a madeira degradada por fungos é menos rígida do que a madeira sã, uma onda levará mais tempo para atravessá-la. Sabendo que a onda terá que contornar vazios, como os deixados por insetos, ela levará mais tempo para sair de uma superfície e chegar à outra. Assim, uma baixa velocidade de transmissão poderá indicar defeitos (mais detalhes sobre os fundamentos teóricos desta técnica serão abordados no item 4.2).

Uma outra propriedade que pode ser medida é atenuação da onda propagada no material. Uma madeira degradada por fungos absorve mais energia da onda do que a madeira sã, por exemplo. Na prática, têm-se empregado mais os valores de velocidade de propagação do som como parâmetro para determinar propriedades da madeira, por ser mais fácil de medir. Todavia, estudos com a atenuação podem fornecer mais detalhes sobre o defeito encontrado (HALABE, 1999).

Até recentemente, a maior parte das pesquisas realizadas com este tipo de ensaio envolvia madeira sã, visando seu controle de qualidade. Sua aplicação em estruturas em

realizaram ensaios em laboratório para permitir que o uso de valores de velocidade transversais às fibras sejam usados para mapear a deterioração por fungos em um membro estrutural de madeira de angiosperma. Este mapa usa como referência os valores obtidos em uma peça sã e considera que uma perda maior que 30% de velocidade deverá levar à manutenção e provável substituição. Já LIÑÁN e HITA (1995), estudando madeira de gimnosperma (pinus silvestre) consideram que uma perda de velocidade de 10% em relação a madeira sã (localizada no terço central da viga, longe da alvenaria) já seria um indicativo de perda de resistência e requeriria uma atuação naquela zona. Também foi apresentado um método para estimar o módulo de elasticidade e resistência da viga, baseado em leituras cruzadas longitudinais de velocidade de propagação, uma vez que as pontas das vigas se encontravam engastadas na alvenaria. O terceiro trabalho, realizado em um navio antigo da Marinha dos EUA, ROSS, SOLTIS e OTTON (1998) compararam os valores das madeiras da nave com valores de madeira da mesma espécie obtidos em laboratório. Não foi estabelecido um limite fixo aceitável, mas somente considerada uma “variação sensível” na velocidade de propagação como indício de deterioração

Os ensaios por propagação de ondas mostram-se efetivos e práticos. Entretanto, mais trabalhos terão que ser desenvolvidos para que se possa determinar com segurança a resistência residual de peças atacadas por insetos e fungos. Um estudo indicativo deste potencial foi realizado por DE GROOT, ROSS e NELSON (1998), analisando com ondas de choque corpos-de-prova degradados por fungos e cupins quando enterrados no solo.

2.3.4 Emissão acústica por insetos

AVAT et al. (1996) anunciam que um aparelho para detecção da emissão acústica de insetos xilófagos deverá ser lançado no mercado nos próximos anos. Em outro trabalho, LEMASTER, BEALL e LEWIS (1997) descrevem que foi possível detectar cupins (térmitas) de madeira úmida a uma distância de 2,2m. Todavia os cupins subterrâneos provaram emitir menos sons com sua atividade, sendo mais difícil de detectar.

O método, ainda em desenvolvimento, consiste em usar um sistema de sensores para capturar as freqüências emitidas pelos insetos e projetado para eliminar os outros sons do ambiente. O sistema descrito por Lemaster, Beall e Lewis necessita um contato direto com a madeira a ser examinada. Desta forma, acabamentos, como estuques ou placas de fechamento, são barreiras para o emprego da técnica.

2.3.5 Termografia

Quando o ar no entorno de uma peça de madeira esfria ou esquenta, a temperatura da peça irá variar com o tempo até atingir uma nova temperatura do ar (estado de equilíbrio). A temperatura da superfície da peça dependerá da diferença entre a

a ajuda de um aquecedor de 1500w de potência, empregado para causar mudanças de temperatura na peça durante alguns minutos.

Apesar da limitação atual, que necessita o uso de um aquecedor para auxiliar a detecção de defeitos internos, a técnica mostra-se promissora por permitir a visualização qualitativa de grandes partes da estrutura em pouco tempo. Supõe-se poder ser útil para localizar ninhos de cupins de madeira seca, permitindo um tratamento químico localizado. DEMAUS (2001) sugere o uso de termografia para localizar estruturas de madeira inseridas em paredes, como em construções de enxaimel ou encobertas por acabamentos.

2.3.6 Buscas com cães

Apesar da existência de poucas pesquisas sobre a busca de cupins usando cães, este serviço tem sido oferecido na Califórnia (EUA) desde 1970 segundo LEWIS, FOUCHE e LEMASTER (1997). Os autores realizaram testes sobre a detecção de cupins em blocos de madeira artificialmente preparados e verificaram que os cães, da raça *beagle*, conseguiram identificar corretamente 81% dos blocos. Entretanto a quantidade de falsos-positivo foi alta (28%). Os cães conseguiram identificar quase perfeitamente blocos onde a densidade de cupins era grande (50 indivíduos em blocos de 115mm vs 87mm vs 37mm).

DEMAUS (2001) também cita o uso de cães para a localização de podridão *dry rot*. Acredita-se que mais pesquisas serão necessárias para que se chegue a alguma conclusão sobre e eficiência do método.

2.3.7 Penetração ao impacto

No ensaio proposto por GUBANA e GIURIANI (1993) e GUBANA e RONCA (1996), que pode ser visto como uma evolução do teste de penetração dinâmica de solos, um martelo automático, de uso comum em concreto, é empregado para encravar uma barra de 3mm de diâmetro com uma ponta acoplada. É medido o número de batidas necessárias para cada centímetro que a barra penetra. A ponta da barra possui um diâmetro ligeiramente maior do que a barra, o que evita que um atrito entre a madeira e

a barra altere os resultados à medida que a penetração avança. A barra pode ser retirada após o ensaio, ficando somente o furo com a ponta embutida como marca do ensaio.

Ainda nos mesmos trabalhos, o método foi calibrado usando corpos-de-prova da mesma espécie de madeira usada na edificação histórica estudada, incluindo madeira sã e degradada por fungos. Os ensaios foram correlacionados com os ensaios mecânicos à flexão a três pontos. Na inspeção da edificação histórica, foram classificadas peças segundo três classes: boa, localmente degradada e degradada.

Embora haja correlação entre os resultados deste ensaio e os resultados de ensaios de flexão, a avaliação da propriedade mecânica da madeira sã a partir do número de impactos ainda pode trazer variações significativas. Espera-se que esta correlação seja aprimorada no futuro, para que sua aplicação torne-se praticável.

Também baseado neste princípio e já disponível comercialmente, a ferramenta Pilodyn usa um pino que impulsionado por uma mola penetra a superfície da madeira, permitindo correlacionar a profundidade da penetração à densidade da madeira (TOGNI, 1995; PILODYN, 2001) e indicando se há podridão superficial. Entretanto, segundo TOGNI (1995) há de se usar cautela dado a natureza empírica dos resultados e o caráter local e superficial dos dados obtidos.

2.3.8 Métodos de medição de umidade

Métodos de medição de umidade estão disponíveis comercialmente e são de grande valia na inspeção de estruturas. Existem dois tipos de aparelhos de inspeção: resistivos e indutivos. O primeiro método baseia-se na resistência elétrica da madeira, que varia com o teor de umidade nela contida. Para medir a resistência elétrica é necessário inserir na madeira duas agulhas e gerar um campo elétrico no material entre elas. Já no segundo método, nenhuma sonda precisa ser inserida na madeira. Um campo magnético

do tipo de acabamento ou preservativo utilizado na madeira. Deve-se consultar o fabricante quanto aos detalhes de operação.

Sendo a baixa umidade uma condição essencial para a boa conservação de madeira, um sistema baseado em sensores de umidade é proposto por SINGH (2001) para o monitoramento constante em locais inacessíveis ou estratégicos, como nos apoios da estrutura de cobertura, alvenaria, lindeis, próximo às calhas ou por trás de acabamentos decorativos. A leitura dos sensores poderá ser manual ou operada por computador, que poderá avisar se o limite de umidade é excedido.

3 Metodologia de inspeção

Embora já se tenha abordado os objetivos do presente trabalho, abre-se este parêntese para reforçar que serão descritas duas frentes complementares: o desenvolvimento e experimentação de uma metodologia para inspeção de estruturas de madeira e; a exploração do ensaio não destrutivo com ultra-som como forma de avaliação das propriedades mecânicas residuais de madeira degradada por cupins. Embora ambos os tópicos procurem gerar a informação necessária para um trabalho de engenharia em estruturas de madeira em serviço, duas abordagens serão descritas separadamente, com conclusões parciais e uma conclusão conjunta ao final do trabalho.

Segundo o DICIONÁRIO Universal da Língua Portuguesa (2001), “metodologia” vem do grego “méthodos”, e é definida, entre outras, como: “subdivisão da lógica que estuda os métodos técnicos e científicos; arte de dirigir o espírito na investigação da verdade(…)”. É importante salientar que além de facilitar uma investigação mais completa sobre os problemas das estruturas de madeira, a metodologia também poderá ser uma ferramenta útil para o treinamento de inspetores neste campo. Assim, se propiciará que o pessoal diretamente ligado à conservação de uma edificação seja capacitado para inspecionar periodicamente suas carpintarias com eficácia.

Visando tornar a leitura mais fluente, a metodologia de inspeção proposta será apresentada juntamente com exemplos práticos de sua aplicação. Os exemplos práticos foram realizados em parceria com o IPHAN-SC (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, em Santa Catarina), no edifício que no passado abrigou o primeiro colégio ginasial de Laguna, SC, e que após seu restauro passará a abrigar a Biblioteca Municipal. Os exemplos aqui indicados não visam descrever a edificação em si, mas apenas ilustrar a metodologia.

3.1 Elaboração da revisão

No Brasil, a importância atribuída à conservação de edificações históricas tem aumentado nas últimas décadas. As leis de incentivo fiscal à cultura possibilitaram nos últimos anos que importantes peças do patrimônio histórico recebessem a atenção

adequada. Dentro deste contexto, KLEIN et al. (1999) propuseram uma metodologia para “levantamento do existente” que deve preceder a recuperação de obras históricas, abrangendo os seguintes tópicos da edificação:

- levantamento dimensional;
- identificação do tipo de construção;
- identificação do sistema estrutural;
- identificação do tipo de fundação;
- tipo de materiais empregados;
- levantamento dos quadros patológicos com documentação fotográfica;
- coleta de amostras e ensaios de campo;
- levantamentos complementares;
- análise do sistema alvenaria- reboco- pintura;

Acredita-se que justamente por ter uma intenção mais abrangente, a aplicação desta metodologia não geraria informações específicas sobre as estruturas de madeira. Desta forma, não seria possível conceber um plano detalhado de restauro da estrutura de madeira, especialmente se tratando de edificações históricas, onde se busca perder o mínimo possível do material original da edificação. Também se acredita que mais informações seriam necessárias para a elaboração de um plano de controle de xilófagos na edificação.

Apesar de haver no mundo um grande número de publicações tratando de ferramentas de inspeção de madeira, especialmente os métodos não destrutivos, não se encontram muitas publicações que tratem de forma direta a metodologia de inspeção de estruturas de madeira. Não foi possível o acesso a alguns trabalhos listados recentemente talvez abrangessem o assunto, mas não puderam ser incluídas nesta revisão e são aqui citadas para permitir referências em trabalhos futuros (LARSEN e MARSTEIN, 2000; CHARLES e CHARLES, 1995; RIDOUT, 2000; ROBSON 1999). Para elaborar este trabalho foram compiladas e revisadas as obras do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (LEPAGE et al., 1986), do Centre Technique du Bois et de l’Ameublement (AVAT et al., 1996), da American Society of Civil Engineers (FREAS et al., 1982), de WEAVER e MATERO (1993) e CRUZ, MACHADO e NUNES (2000). Procurando organizar uma metodologia de inspeção de carpintarias, as

informações obtidas nestas obras e a partir da experiência dos autores serão apresentadas reunidas sob a forma de blocos de interesse comum em cada etapa da inspeção.

3.2 Antes da inspeção

3.2.1 Pessoal de inspeção: aptidões e treinamento

As pessoas candidatas a realizar uma inspeção deverão ter como aptidões: olhar detalhista e curioso, não ser apressada para não pular etapas e realizá-las sempre com o cuidado necessário. A boa forma física e disposição serão também importantes, uma vez que a inspeção normalmente ocorrerá em espaços de difícil acesso e a permanência em posições pouco cômodas. Alergia a pó poderá ser contornada, mas será uma dificuldade extra.

Antes de iniciar o trabalho, recomenda-se um treinamento que sensibilize o inspetor para as exigências do patrimônio histórico, se for o caso. Deve-se adquirir conhecimento sobre a madeira, sua relação com a umidade e diferenças entre o cerne e o alburno da árvore. Também é importante um conhecimento prévio sobre os biodegradadores da madeira, seus ciclos de vida e indícios, bem como sobre o funcionamento de diferentes tipos de estrutura (apoios, restrições) e a evolução dos conceitos estruturais ao longo do tempo. Esta informação é encontrada de forma completa em várias publicações, mas é chamada a atenção para a apresentação completa e bem ilustrada oferecida por LEPAGE et al. (1986) e para a forma sucinta apresentada por AVAT et al. (1996). Este último traz preciosos diagramas para identificação de insetos larvais (holometábolos) e fungos da região francesa, apresentados sob forma prática para uso, devendo entretanto ser adaptados para outras regiões.

No que tange a segurança, será importante conhecer os riscos das fezes de certos pássaros e morcegos para as vias respiratórias, noções de eletricidade e prática de segurança em altura.

3.2.2 Equipamento mínimo necessário

Alguns equipamentos básicos e de custo relativo baixo serão preciosos em qualquer inspeção, mesmo quando se tem o apoio de métodos de ensaios não destrutivos. A lista da Tabela 1 foi incrementada de AVAT et al. (1996) e pode ser considerada mínima. Devido aos espaços restritos em que muitas vezes se trabalhará, será importante providenciar uma sacola ou pochette que permita transportá-los com agilidade. O peso será sempre um fator importante na escolha do equipamento.

Tabela 1: Equipamentos básicos para inspeção de estruturas de madeira

· bloco de notas e caneta	· lanterna com pilhas extras
· martelo e um formão para retirada	

3.3 Pesquisa preliminar

Antes do trabalho de campo é importante obter as informações mínimas contidas na tabela abaixo, compilada da fontes citadas na página 23:

Tabela 2: Informações para pesquisa preliminar.

· a idade da edificação	· histórico de construção
· sistemas estruturais e o tipo de fundação	· histórico de ocupações e usos
· levantamento dimensional (plantas)	· soluções construtivas empregadas
· questionar o histórico de xilófagos e revoadas de cupins na edificação e seus vizinhos	· questionar a existência de paredes duplas, que podem dissimular a umidade e o caminho de cupins de solo
· histórico de manutenções, reformas e reparos	· verificar se houver chamadas de incêndio para a edificação

No levantamento dimensional é interessante constar os sistemas de água, esgoto e drenagem, além de outros dutos, como os elétricos, quando houver risco da presença de cupins de solo. Se não for possível localizar estas plantas, poderá ser necessário prever a realização deste levantamento dimensional para presumir os caminhos de deslocamento destes cupins. Na Figura 3 se encontra um exemplo de questionário:

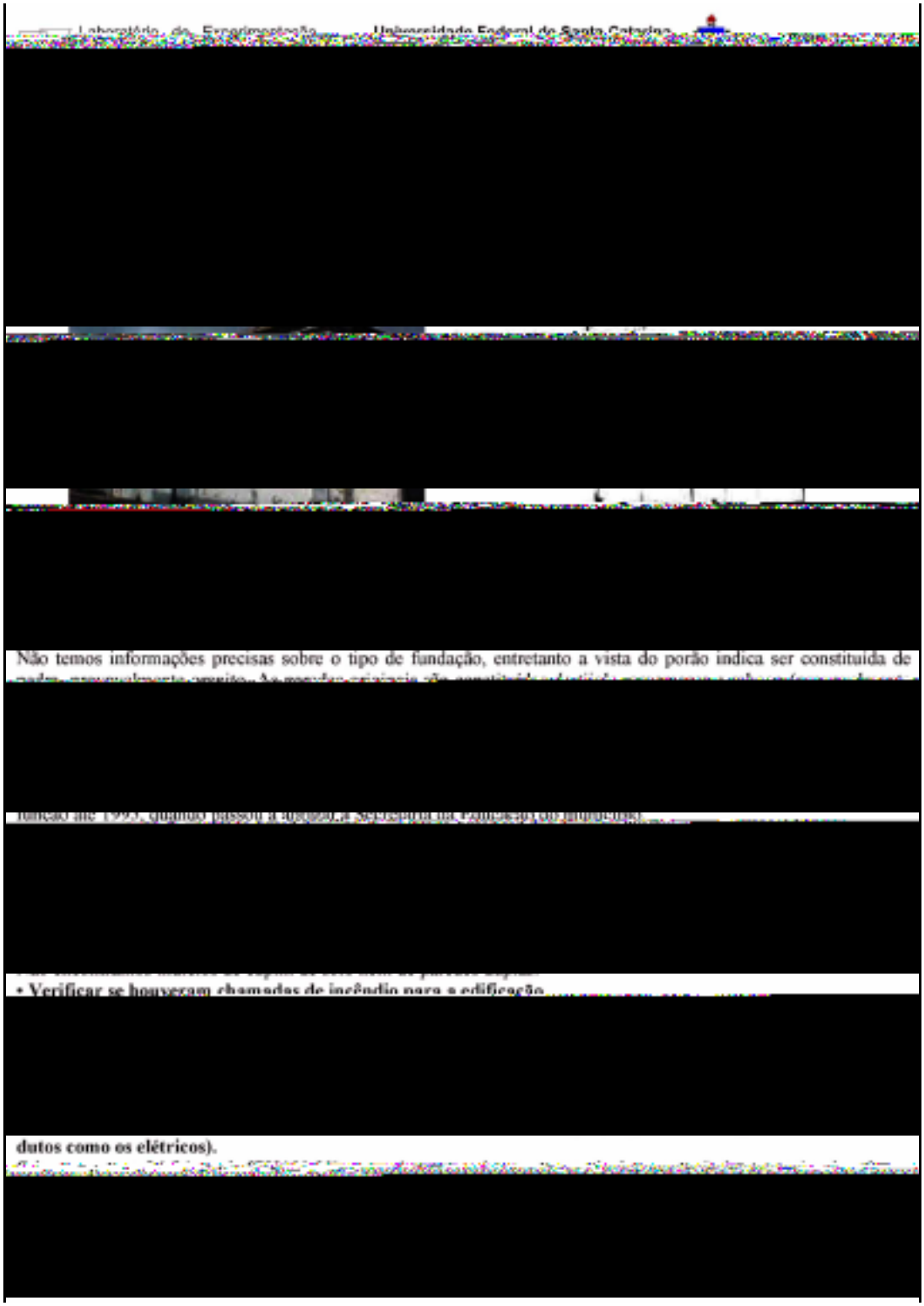


Figura 3: Exemplo de questionário com informações preliminares à inspeção

Para obter estas informações pode-se recorrer aos arquivos históricos, ao proprietário, à prefeitura e mesmo ao próprio edifício e seus ocupantes. Entretanto, como lembra FREAS (1982), os documentos referentes a uma edificação têm uma incrível vocação para se perder, especialmente quando há mudança de proprietário.

3.4 Inspeção externa

Antes de começar os trabalhos no interior da edificação, deve-se levantar informações importantes em seu exterior, se possível já munidos da planta da edificação, fotografia ou pelo menos de um croqui. Recomenda-se sempre usar os pontos cardeais como referência nas anotações e ligar estas às fotografias que porventura sejam registradas. Na tabela seguinte, compilada das fontes citadas na página 23, são apresentadas algumas informações a serem verificadas e relatadas em um formulário especialmente criado (Figura 5). A Figura 4 ilustra alguns pontos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Informações da inspeção externa a serem relatadas (com algumas referências numéricas encontradas na Figura 4).

- Examinar fachadas:
  - estado do acabamento (10)
  - identificar materiais e técnicas
  - manchas de umidade ou bexigas na pintura (8), fendas (9).

Figura 4: Ilustração usada por Cruz, Machado e Nunes exemplificando regiões externas abrangidas pela inspeção (adaptada de BERRY, 1994). As referências numéricas são explicadas na Tabela 3.

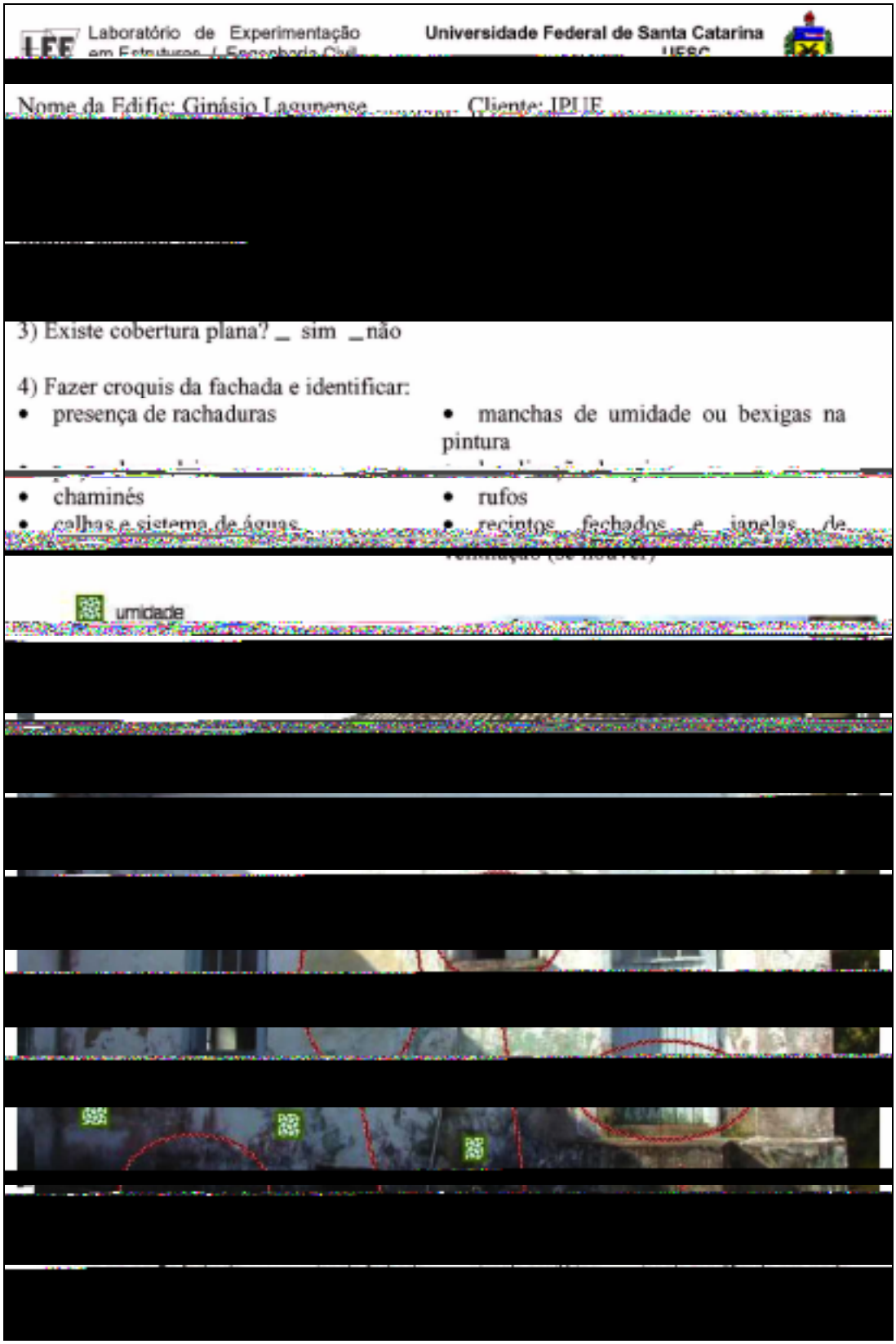


Figura 5: Exemplo de formulário de inspeção externa

3.5 Inspeção de Cômodos

Ao iniciar a inspeção interna deve-se ter em mente os defeitos encontrados externamente para seguir suas conseqüências no interior.

Mesmo quando um cômodo não contém peças de madeira, ele pode ser o local de passagem de cupins de solo, conter indícios de outros insetos ou ser a fonte de umidade que causará danos em outro local. Portanto, é recomendada a inspeção de todos os cômodos da edificação, começando no subsolo e subindo, nos quais se procurará responder às questões da tabela abaixo (exemplo na Figura 6). Poderá ser elaborado um formulário por cômodo, incluindo espaço de anotações e croqui.

Tabela 4: Informações mínimas da inspeção de cômodos a serem relatadas.

- Existem fontes de umidade (solo exposto, caldeira, chuveiro, fogão, lavadoras)?
- verificar madeiras próximas
- verificar se há ventilação adequada para o exterior
- Existem manchas causadas por umidade ou calhas, rufos e outros pontos prováveis?
- verificar madeiras próximas
- Verificar se há inclinação ou deformação no assoalho ou rachaduras nas paredes.
- Há ventilação adequada no cômodo?
- Existem caixas de passagem de dutos?
- verificar se há passagem de cupins de solo.
- Há depósito de produtos químicos ou produtos de limpeza concentrados?
- verificar se há oxidação em conectores
- Existe madeira engastada na alvenaria (vigotes, lintel, etc.) ou em contato com o solo?
- verificar sua umidade e estado quanto a fungos e insetos
- verificar se há umidade ascendente na alvenaria
- Examinar a parte posterior de guarnições de portas, janelas, rodapés e mobiliário fixo por ataque de fungos ou cupins.
- Existem fontes de calor (caldeiras, fornos, *boilers*, lâmpadas) próximas à madeira?
- verificar carbonização na madeira
- Conferir todos os locais onde o alburno da madeira possa ter sido empregado
- Verificar todas as juntas, fissuras e as superfícies toscas, pois são os locais mais favoráveis para a postura de ovos dos insetos. Se possível, passar uma folha de papel nas juntas, para verificar a existência de dejetos.
- Examinar todo local onde a madeira possa sofrer abrasão.
- Procurar sinais de espaço não ventilado, como entrepisos, caixões perdidos, vigas fechadas

ou entre o solo e o soalho.

- verificar se há ventilação adequada (a existência de janelas de ventilação ou telas não garante que estejam desobstruídas).
- Procurar fissuras entre a madeira e a alvenaria em construções de enxaimel
- Verificar o desempenho de qualquer borracha ou plástico selante, pois podem falhar e permitir a entrada de água
- Verificar junções a meia-esquadria no exterior, pois estas estão sujeitas a abrir e fechar com variações de umidade.
- Inspecionar cuidadosamente peças expostas às intempéries ou umidade, especialmente as superfícies horizontais, as frestas horizontais, aberturas nas juntas e conectores em superfícies horizontais (podem servir de entrada para água, causando podridão interna).
- Verificar a presença e instalação de isolamentos
- Relatar todos os locais onde não foi possível inspecionar.

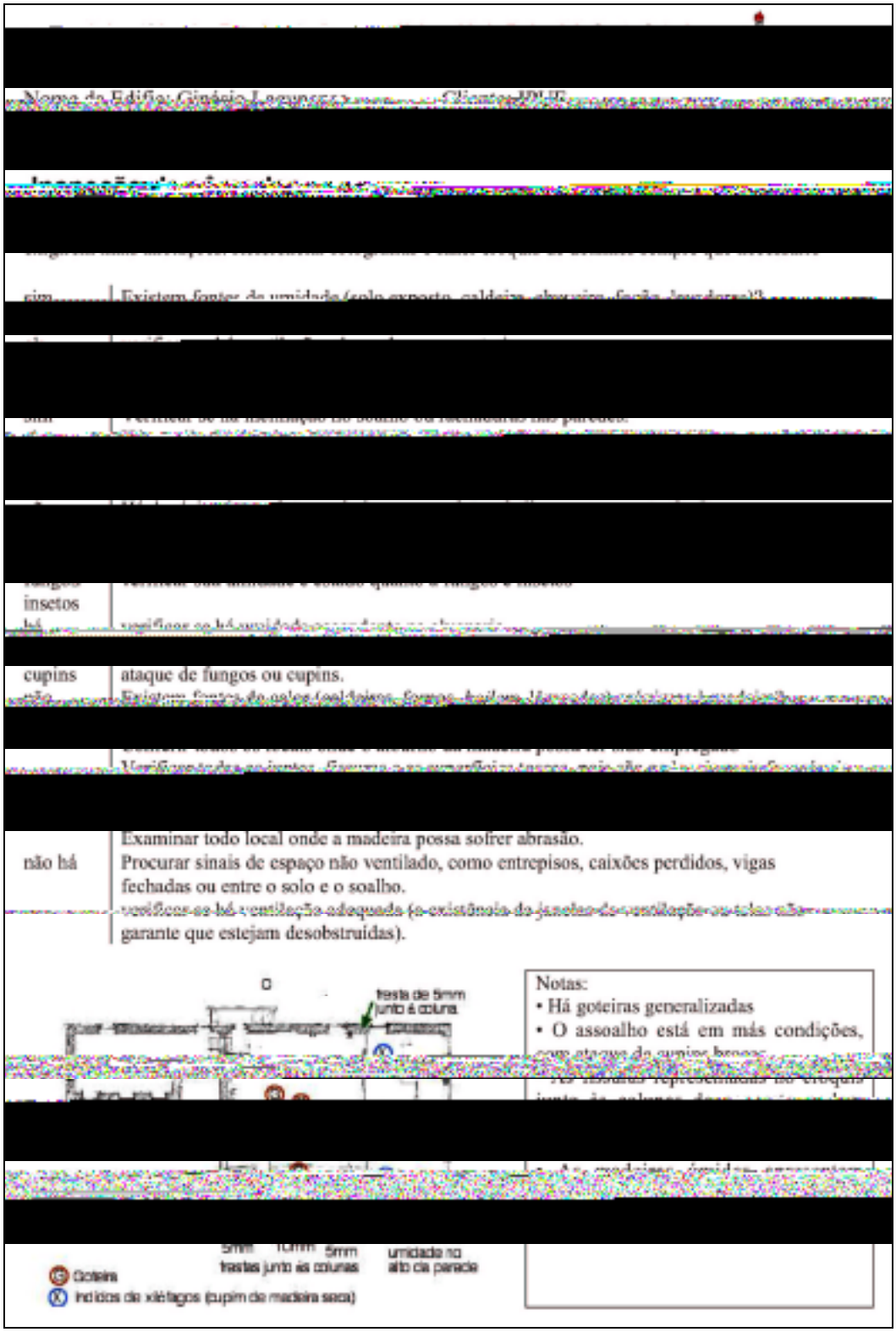


Figura 6: Exemplo de formulário de inspeção interna. Neste caso foi feito da edificação como um todo mas, se necessário, deve-se detalhar cada cômodo.

3.6 Inspeção geral de uma estrutura

A inspeção geral de uma estrutura, incluindo estrutura de assoalhos, deve servir para avaliar seu estado e planejar medidas de conservação ou adequação ao uso. Para realizar um projeto de restauro, é necessário que cada membro seja analisado na sequência do trabalho.

Na inspeção geral são buscados indícios genéricos de biodeterioradores e também os relacionados na tabela que segue, que deverão ser acompanhados de croquis e

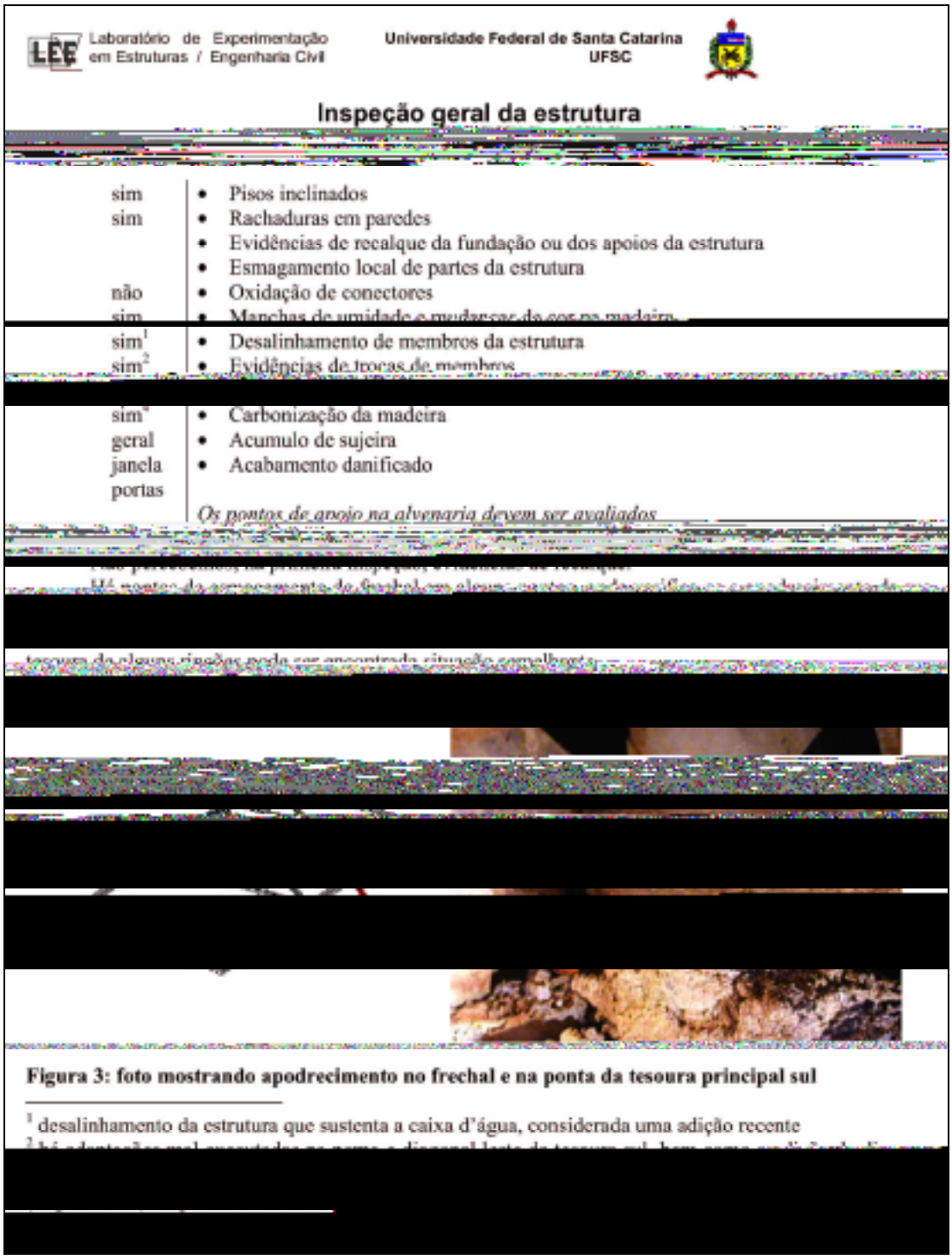


Figura 7: Questionário de inspeção geral de estrutura de madeira.

Figura 8: Exemplo de carga adicional em uma estrutura, onde tesouras adicionais sustentam um reservatório de água e uma terça deteriorada, passando suas cargas ao frechal e à tesoura principal sul, respectivamente.

3.7 Inspeção detalhada de elementos estruturais

Para a realização de um projeto correto de reparação, restauro ou novo uso de uma estrutura, deve-se observar cada membro conforme a tabela abaixo. É importante ter em mente que os resultados desta pesquisa servirão ao cálculo estrutural e ao planejamento de controle biológico. Cada membro deve ter caracterizada sua madeira e ter detalhada as suas seções transversais detalhadas (integrais e as reduzidas por encaixe ou deterioração). Na seqüência, é apresentado o exemplo de questionário de inspeção de uma peça do estudo de caso (Figura 9 – nota: a identificação da madeira neste caso foi realizada no IPT, mas pode ser realizada em qualquer laboratório qualificado).

Tabela 6: Observação individual de um membro da estrutura.

- Cada membro deverá ter sua capacidade avaliada:
  - anotar dimensões
  - detalhar seções transversais integrais e remanescentes (reduzidas por degradação ou por confecção de encaixe da estrutura).
  - qualidade da madeira (carimbos de qualidade ou determinação da espécie de madeira)
- Existem fissuras de secagem?
  - dimensões (incluindo profundidade)
  - anotar orientação
- Existem furos e cortes que possam ter sido realizados após um tratamento preservativo superficial?
- Caso seja madeira laminada-colada, as linhas de cola estão em bom estado?
- Há ponto de engaste do membro com a alvenaria ou eminência de molhamento (calhas, goteiras, etc.)?
  - anotar sinais de biodeterioração (fungos e insetos)
- Caso esteja a peça exposta às intempéries, verificar cuidadosamente e relatar o estado da superfície horizontal superior, frestas horizontais, juntas e conectores em superfícies horizontais, que poderão servir de entrada para água favorecendo o apodrecimento interno.
- No que tange as junções, deve-se relatar se houver folgas nos conectores ou nas junções, que pode corresponder a secagem das peças ou a falhas na construção, projeto ou degradação.
- Os conectores devem ser inspecionados em busca de corrosão, especialmente quando expostos à umidade excessiva, produtos químicos, quando do uso de certas madeiras, quando tiver aplicação de retardantes de chama ou preservativos solúveis em água.

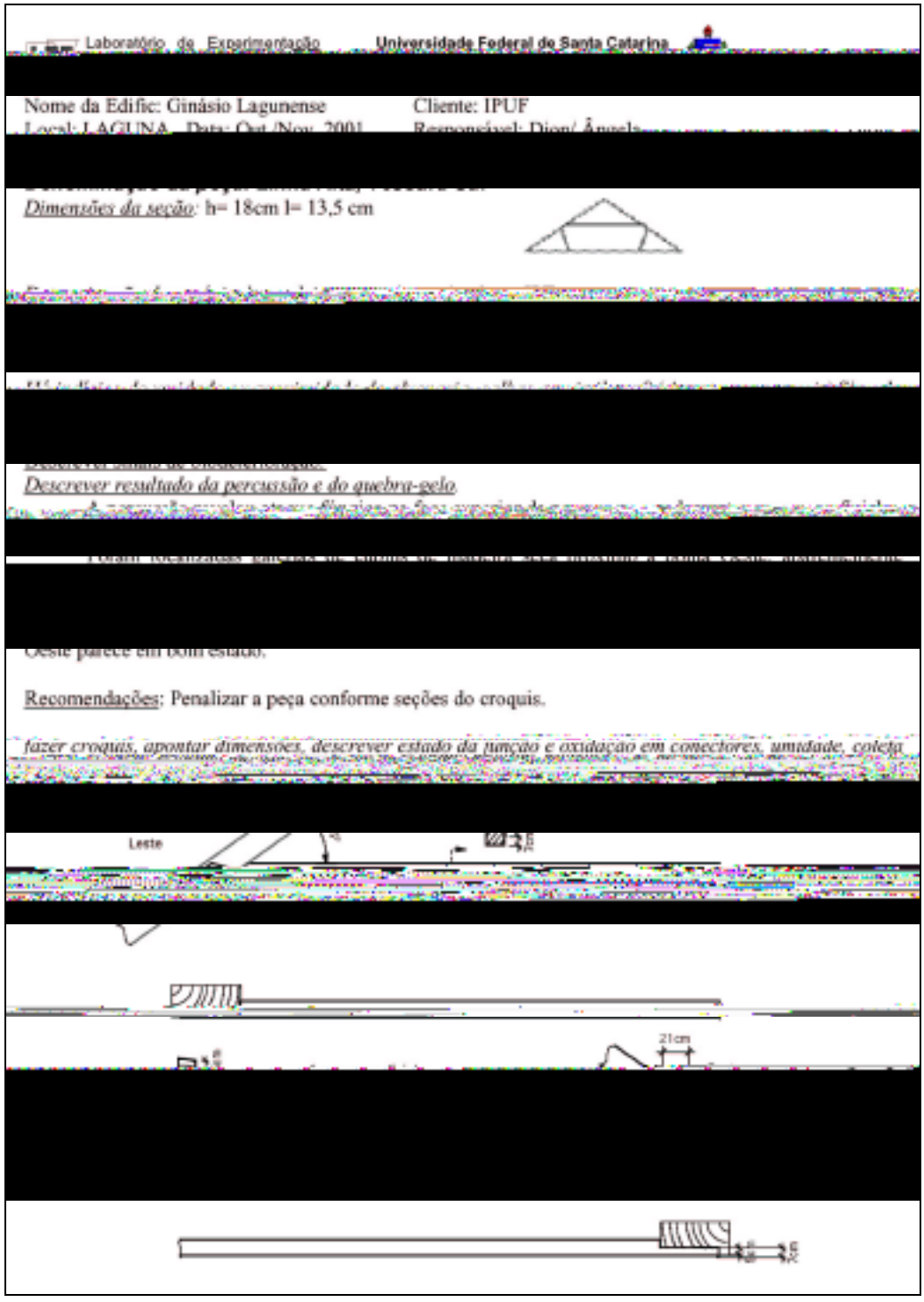


Figura 9: Exemplo de formulário de Inspeção Detalhada

3.8 Conclusões Parciais

No estudo apresentado, onde tópicos relevantes foram organizados na ordem de seu uso em campo, foram encontrados elementos para a elaboração dos formulários específicos para a coleta de dados na edificação conhecida como Ginásio Lagunense (primeira escola ginasial de Laguna). Os formulários foram adaptados ao estudo em questão, atrelados às necessidades do projeto de conservação. A inclusão prévia de desenhos de planta baixa e mesmo fotografias nos questionários, quando foi possível, facilitou muito o trabalho de campo. Também foi prático o uso de caneta com quatro cores em campo, para a organização das notas e dos croquis.

Entre as deficiências encontradas nos formulários de campo estão a ausência de campo para anotação do nome do inspetor e sobretudo a data da inspeção; na inspeção preliminar deve-se anotar que tipo de equipamento será necessário para o acesso à estrutura nas inspeções seguintes; antes de retornar a campo, os formulários das etapas seguintes devem ser adaptados o máximo possível à edificação, o que implica em um trabalho preliminar de levantamento de plantas, esquemas da estrutura mesmo sem as quotas definitivas; deve-se preparar igualmente um relatório de cargas da estrutura, onde se incluirá as dimensões da estrutura secundária (ripas e caibros - normalmente não inspecionados em detalhe) bem como a pesagem de exemplares de telhas ou outras estimativas de carga; mais ênfase pode ser dada ao detalhamento das seções reduzidas das peças, de forma a nunca deixar sem resposta este dado fundamental ao cálculo.

Esta metodologia de inspeção forneceu subsídios adequados para os relatórios de análise estrutural (estabilidade, substituições e reforços). Até o presente não foi realizado um projeto de remediação dos agentes deterioradores nem a elaboração de um plano de conservação da estrutura por profissionais da área, o que nos impede incluir aqui críticas sobre como estes trabalhos se beneficiam dos dados coletados.

4 Avaliação de resistência residual com ultra-som

Passa-se a abordar aqui a segunda frente complementar deste trabalho: a exploração do ensaio não destrutivo com ultra-som como forma de avaliação das propriedades mecânicas residuais de madeira degradada por cupins. Esta abordagem será feita separadamente, havendo uma conclusão conjunta ao final do trabalho (Capítulo 5).

Dentre os ensaios não-destrutivos (END) aplicáveis para madeira, os ensaios com ultra-som encontram-se entre os mais desenvolvidos, tendo inclusive atingido o conhecimento crítico para o lançamento de equipamentos específicos para madeira no mercado. O ultra-som é portanto um dos ensaios com melhor documentação e com um grande potencial de desenvolvimento. Seu emprego e a maioria dos estudos até presente se dão na avaliação da madeira sã, havendo todavia potencial para o estudo de madeira degradada.

Alguns estudos pioneiros do seu emprego para madeira degradada tratam da degradação fúngica. Embora os fungos estejam presentes na degradação de carpintarias brasileira, há também necessidade do estudo da avaliação da degradação por cupins, biodeterioradores frequentemente presentes no Brasil mas ausentes de outras regiões do Globo. Uma vez que o presente estudo aborda formas de conhecer o estado de estruturas em serviço, torna-se interessante explorar o potencial desta ferramenta de inspeção para a avaliação de membros estruturais parcialmente degradados por cupins, mas ainda passíveis de serem empregados.

4.1 Pincípios de ultra-som

Vibrações mecânicas podem ser propagadas em meios sólidos, líquidos e gasosos. São chamadas de som quando estas vibrações mecânicas se dão no ar, entre 10 e 20.000 Hz. Nesta faixa de freqüência a vibração é audível. Acima de 20.000Hz, as vibrações são chamadas de ultra-som (ou ultrassom).

Segundo o CENTER FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION, da Iowa State University (2001), os primeiros passos na pesquisa de ensaios não-destrutivos usando ultra-som foram inspirados no desenvolvimento dos sonares, que detectavam corpos sólidos na água. Em 1931 Mulhauser obteve uma patente para o uso de ondas ultra-

sônicas, aplicadas por um transdutor[1] e recebida por outro, para detectar defeitos em sólidos.

Os estudos de ensaios não destrutivos com a velocidade de transmissão do ultra-som são baseados nos princípios de que:

- os sólidos são bons propagadores de ondas sonoras;
- as ondas sonoras são refletidas quando há mudança abrupta de meio, como entre o sólido e o ar – caso das fissuras – ou como entre fases de diferentes materiais – caso de inclusões, por exemplo.

4.2 Revisão teórica

Boas revisões sobre a utilização da propagação do som em END podem ser encontradas nos artigos de GOIA e SALES (2000), com mais detalhes em HALABE e FRANKLIN (1999) ou de maneira bastante didática no sítio de Internet do CENTER FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION, da Iowa State University (2001). Faz-se aqui um breve panorama.

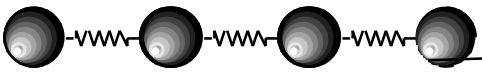
A acústica pode ser considerada, sob o aspecto a seguir, como o estudo de pequenas deformações em um determinado meio onde se propaga a onda relacionadas ao tempo. Os meios sólidos são compostos por átomos, que vibram em torno de uma posição de equilíbrio. Quando as partículas são deslocadas de suas posições de equilíbrio, as forças inter-atômicas, combinadas com a inércia atômica, levam a movimentos oscilatórios do meio. Estes movimentos podem ocorrer na direção da propagação do som (onda logitudinal) ou perpendicular à esta propagação (onda transversal).

Em uma análise simplificada para uma dimensão, é possível imaginar os átomos de um material para apenas uma dimensão apenas como compostos de massas ligadas entre si por molas. A velocidade de propagação de uma onda em tal meio está relacionada com

---

[1] aparato que transforma uma forma de energia em outra forma. Neste caso, transforma um pulso de energia elétrica em vibração mecânica e vice-versa, podendo ser usado para gerar ou detectar vibrações.

a constante elástica destas molas imaginárias (componente do Módulo de Elasticidade) e da massa destes átomos (componente da densidade).



permitir a análise em parcelas de pequenas dimensões do espécime. De fato, quanto maior for a frequência, mais estreito será o feixe de ultra-som propagado. Entretanto, entra em jogo outra propriedade do material: a atenuação. A atenuação é a perda de energia por uma onda decorrente da histerese da resiliência micro-estrutural de um material, e também pela difração/refração da onda. A atenuação no material é proporcional ao quadrado da freqüência, limitando assim o uso de grandes freqüências.

Os materiais de muitas fases, como a madeira ou o concreto, já apresentam

Teor de umidade da madeira:

A velocidade de propagação de ultra-som é influenciada de duas maneiras pela variação deste parâmetro, pois o aumento da umidade aumenta a densidade da madeira ao mesmo tempo que reduz seu módulo de elasticidade. Esta relação se dá em dois estágios: em umidades baixas, em que a água está ligada às paredes celulósicas da madeira (normalmente inferior a 18%, dependendo da espécie) e em umidades mais elevadas, quando há água livre presente dentro da madeira. Quando a umidade da madeira varia de zero a 40%, a velocidade pode variar cerca de 20% (GOIA e SALES, 2000).

Direção de propagação da onda:

Assim como a madeira possui módulos de elasticidade diferentes para cada direção em relação à orientação das fibras, a velocidade de propagação do ultra-som também se altera conforme a direção da propagação. Na direção longitudinal às fibras encontram-se as maiores velocidades de propagação, pois nela as ondas encontram a estrutura contínua do material. A segunda maior velocidade será na direção radial, pois nela haverá a estrutura contínua dos raios. A menor velocidade de propagação será sempre a tangencial, onde as ondas viajam através de diferentes fases.

Densidade da madeira:

Da mesma forma que há uma relação direta entre a densidade da madeira e suas propriedades mecânicas, constata-se uma relação direta entre a densidade e a velocidade de propagação de ultra-som. Esta explicação encontra fundamento teórico na Equação 1 e na Equação 2.

Temperatura da madeira

Segundo GOIA e SALES (2000) a velocidade ultra-sônica aumenta linearmente com a diminuição da temperatura, considerando a faixa da temperatura ambiente.

4.4 Revisão de metodologia

Conforme visto, BEALL (1996) aponta a avaliação de madeira sob degradação como uma frente promissora dentro dos ensaios não-destrutivos. Realmente, em revisão

bibliográfica poucos artigos foram encontrados que tratassem da avaliação de madeira em degradação. Dentre as avaliações estudadas, que abrangem degradação por fungos ou por cupins, somente dois artigos foram encontrados que abordassem a degradação por cupins (DEGROOT, ROSS e NELSON, 1998; ROSS et al., 1996).

Todavia, a abordagem era concomitante com o ataque fúngico, pois era realizada em ambiente natural. Nela, grupos de corpos-de-prova (CP) de 2,5cm vs 3,8cm vs 50,8cm foram enterrados em campo no sul do Mississippi (EUA) até aproximadamente metade do comprimento. Os CPs foram retirados em períodos de 2, 4, 6, 9 e 15 meses conforme o grupo e tiveram sua umidade estabilizada em 10% antes da determinação de suas propriedades de velocidade e atenuação de onda de choque, perda de massa e análise visual. As medidas de onda de choque foram realizadas com o aparato descrito na figura abaixo e puderam ser feitas mesmo enquanto os CPs ainda encontravam-se enterrados.

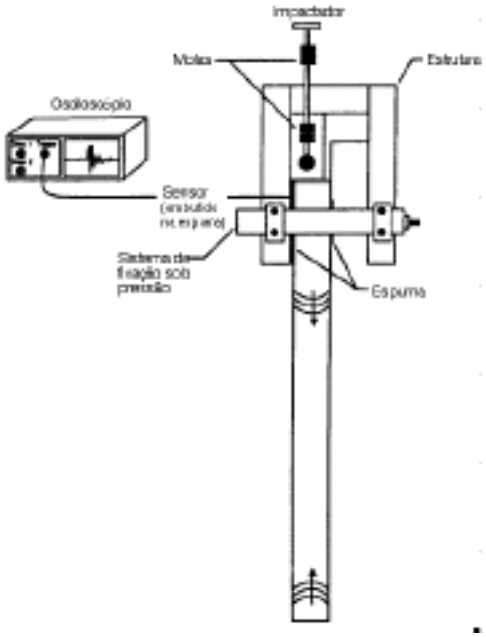


Figura 12: Aparato usado por ROSS et al. (1996) para medir a velocidade e atenuação de ondas de choque em espécimes de madeira (adaptado de ROSS et al. 1996)

A análise visual foi feita segundo a norma D1758 (ASTM 1989), tendo classificações independentes para o ataque fúngico e de cupins, conforme a Tabela 7:

Tabela 7: Sistema para classificação visual de degradação fúngica e por cupins (adaptado de ROSS et al. 1996)

Condição do corpo-de-prova	Classificação	
	Degradação fúngica	Degradação por cupins
Sem degradação	1	A
Traços de degradação: até 10% da seção transversal afetada.	2	B
Degradação moderada: 10 a 50% da seção transversal afetada.	3	C
Degradação severa: não se quebra facilmente, mas tem mais de 50% da seção transversal afetada.	4	D
Falha: facilmente quebrado em campo no ato da inspeção	5	E

Apesar da ocorrência concomitante das duas formas de degradação impedir que os autores obtivessem resultados mais conclusivos, a combinação das duas formas na análise visual obteve uma correlação com a tensão de ruptura à compressão paralela às fibras dos corpos-de-prova.

No que se refere aos resultados de velocidade, tempo e decaimento do sinal de onda de choque, obtiveram-se as relações:

Tabela 8: Análise estatísticas de Ross et al. (1996)

Parâmetro de onda	Coeficiente de determinação (r^2)		
	Massa final	% perda de massa	Tensão de ruptura
Tempo de propagação	0,14	0,30	0,38
Velocidade	0,13	0,28	0,37
Inclinação (decaimento)	0,22	0,31	0,27
Regressão múltipla, velocidade e inclinação	0,32	0,54	0,58

Como conclusão, os autores observam que as análises, tanto da velocidade como da atenuação no sentido longitudinal às fibras, mostraram potencial para monitoramento da biodegradação da madeira. Pode-se observar que os valores dos coeficientes de determinação r^2 obtidos na correlações não foram altos, sendo aqui considerados somente indícios de uma correlação.

4.5 Materiais e métodos

O ensaio foi concebido com o objetivo de explorar o ultra-som como ferramenta para monitorar a degradação das propriedades mecânicas da madeira por cupins, desenvolvendo um procedimento experimental para este tipo de pesquisa. Corpos-de-prova de madeira sã, isentos de defeitos, seriam confeccionados conforme a Norma NBR 7190:1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997) e uma vez tendo sua condição de umidade inicial estabilizada, teriam suas massas e propriedades de propagação de ultra-som determinadas. Estes corpos-de-prova seriam expostos a cupins de maneira controlada de forma a provocar vários estados de degradação, teriam sua umidade novamente estabilizada e teriam sua massa e propriedades de ultra-som medidas. Estes CPs seriam então ensaiados em compressão longitudinal, conforme a norma NBR 7190:97 (ABNT , 1997) em vigor.

4.5.1 Os bioensaios com cupins

Para poder criar uma situação de exposição controlada dos corpos-de-prova aos cupins sem entretanto exceder a área de competência da Engenharia, foram procurados laboratórios de pesquisa que já trabalhassem no estudo destes insetos, nominalmente o IPT (Instituto Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e a UNESP (Universidade do Estado de São Paulo). Estando melhor preparado para conduzir estes ensaios e tendo recebido a ideia com entusiasmo, o laboratório da prof. Ana Maria Costa Leonardo, no campus da UNESP de Rio Claro – SP, foi escolhido e assim foi estabelecida uma parceria com o LEE-UFSC.

Como já havia experiências de uso de madeira de *Pinus sp.* (vulgo pinus) e *Eucalyptus sp.* (vulgo eucalipto) para a alimentação das colônias de cupins naquele laboratório, optou-se por usar estas duas espécies de madeira nos presentes ensaios. Desta forma, procurou-se representar uma madeira com anéis de crescimento explícitos, ginosperma, o pinus; e outra com anéis de crescimento menos pronunciados, angiosperma, o eucalipto. A espécie de cupim empregada foi a *Coptotermes havilandi*, praga que causa grande dano em um tempo relativamente reduzido, responsável por grandes danos econômicos no estado de São Paulo.

Os bioensaios descritos a seguir foram idealizados e executados pelo Centro de Estudos de Insetos Sociais (CEIS) da UNESP, coordenados pela prof. Ana Maria Costa Leonardo: quarenta e sete recipientes plásticos com base redonda de 28cm^2 e 47 recipientes com base quadrada de 36cm^2, ambos de 400cm^3 de volume, foram preenchidos com areia esterilizada umedecida a 10%. Em cada recipiente foram adicionados cerca de 550 operários (1,60g) e 10 soldados de *C. havilandi*, todos provenientes de uma mesma colônia. Em cada recipiente foi colocado um bloco de *Pinus sp.* ou um bloco de *Eucalyptus sp.* ambos medindo 3cm vs 3cm vs 3cm, que foram previamente umedecidos em água destilada, para compensar a baixa umidade decorrente da estufa. Após um período de 40 dias os bioensaios foram desmontados e os cupins sobreviventes avaliados, não sendo possível ampliar o tempo de ensaio devido à mortalidade dos indivíduos. Os blocos foram limpos e submetidos à estufa novamente para avaliação dos pesos secos finais.

Os resultados do bioensaio utilizado neste estudo foram também utilizados pelo laboratório da UNESP para pesquisa sobre as condições de condicionamento dos cupins.

4.5.2 Adaptações do procedimento experimental original

Devido a limites impostos, algumas adaptações tiveram lugar no plano original:

- não havia um osciloscópio disponível para acoplar ao equipamento de ultra-som, logo optou-se por realizar somente medidas de tempo de propagação de ultra-som;
- os corpos-de-prova da norma NBR7190:97 (ABNT, 1997) para compressão longitudinal às fibras (de 5cm vs 5cm vs 15cm) são demasiadamente grandes e demandariam um longo período de exposição às colônias de cupins em laboratório. Optou-se assim por corpos-de-prova menores;
- sendo igualmente indisponível uma câmara com controle ambiental, optou-se por controlar somente a temperatura de secagem (considerando que a umidade varia pouco próximo ao mar);
- devido ao tamanho reduzido dos corpos-de-prova (3cm vs 3cm vs 3cm), foi necessário medir sua deformação indiretamente, sob aplicação de carga, com extensômetros localizados entre as travessas da máquina universal de ensaios;
- apesar de ser mais comum na Ilha de Santa Catarina os cupins de madeira seca,

Desta forma, o procedimento utilizado foi:

- foram preparados no Laboratório de Experimentação de Estruturas (LEE) corpos-de-prova cúbicos de 3 cm de lado à partir da madeira disponível, isentos de defeitos e contendo o maior número de anéis de crescimento possível (cerca de sete), empregando as espécies *Pinus sp.* (47 CPs) e *Eucalyptus sp.* (57 CPs);
- os corpos-de-prova foram secos em estufa a 75 ±1ºC, até que sua massa variasse menos do que 0,5% em um intervalo de 6 horas entre medidas;
- as velocidades de propagação do ultra-som nas direções longitudinal, tangencial e radial, realizando sempre duas medidas para cada, alternando o lado do transdutor transmissor com o transdutor receptor. As medidas foram realizadas em grupos de dez corpos-de-prova da mesma espécie, alternando entre este e o próximo passo;
- cada grupo de dez corpos-de-prova foi lavado sob a água com escova de dentes macia para eliminar o acoplante;
- os corpos-de-prova foram novamente secos em estufa a 75 ±1ºC;
- embalados um a um e identificados na embalagem (no papel, uma vez que se evita adicionar qualquer substância aos CPs, pois podem influenciar o comportamento dos cupins). Os CPs foram então enviados para a UNESP de Rio Claro;
- após a exposição aos cupins (descrita no Capítulo 4.5.1, pg.56), os corpos-de-prova foram enviados ao LEE-UFSC, onde foram novamente limpos (para eliminar os cupins e seus dejetos) e secos em estufa a 75 ±1ºC;
- novas medidas de ultra-som em cada uma das três direções foram realizadas nos CPs, novamente em grupos de dez;
- novamente lavados para eliminar o acoplante sob água com escova macia;
- novamente secos em estufa a 75±1ºC;
- como se notou que a operação de lavagem seguida de secagem em estufa provocou trincas em alguns corpos-de-prova, suas velocidades de ultra-som foram novamente medidas, eliminando o acoplante desta vez com toalhas de papel, sem água;
- novamente secos em estufa a 75±1ºC até ter sua massa estabilizada a 0,5% entre medidas com 6h de intervalo;
- ensaio de compressão longitudinal às fibras, com medidas de carga e deslocamento, à velocidade de 10MPa/min, conforme descrito no Capítulo 4.5.6.

4.5.3 Escolha do equipamento de ultra-som

Tem-se disponível no Laboratório de Experimentação de Estruturas dois equipamentos de ultra-som: Sylvatest (com sonda de 30kHz) e Pundit 6 (com sondas de 54 e 200 kHz). Uma vez que, para corpos do tamanho escolhido, o comprimento de onda expresso pela equação 3 já seria limiar usando-se a sonda de 200kHz, optou-se pelo uso do Pundit 6, mesmo sendo o equipamento Sylvatest nativamente desenvolvido para aplicações em madeira. Com efeito, testes preliminares mostraram uma leitura de velocidade coerente entre o Sylvatest e o Pundit para corpos de grandes dimensões, porém divergindo para corpos de menores dimensões.

Tabela 9: Ensaio exploratório entre equipamentos de ultra-som, mostrando divergência para CPs de comprimento reduzido.

Dimensões (CP *Pinus sp.*)	t (µs) Pundit	t (µs) Sylvatest
L=100,0 cm, seção10,2 x 11cm		

provavelmente causaria influência. Procurou-se desenvolver um acoplante a base de gel, por ser composto principalmente de água.

Foi realizado um teste simples, fazendo medidas em corpos-de-prova semelhantes aos que seriam usados com e sem acoplante. Neste estudo preliminar, usou-se gel fixador de cabelos comum como acoplante (base de ácido poliacrílico), para testar a efetividade do meio gel. Os resultados mostraram um aumento sensível no tempo de transmissão quando não se usa acoplante, como apresentado na tabela abaixo, que mostra duas medidas consecutivas para cada situação. Também foi perceptível o aumento da estabilidade dos dados quando se usa acoplante, obtendo-se medidas quase idênticas entre as duas medidas realizadas.

Tabela 10: Medidas de tempo de transmissão de ultra-som com e sem acoplante em corpos cúbicos de 3cm de lado.

		sem acoplante		gel fixador comum	
Eucalipto	Longitudinal	6,5	6,5	5,6	5,6
	Radial	16,6	18,4	14,0	14,1
	Tangencial	21,5	21,1	19,5	19,5
Pinus	Longitudinal	10,7	11,0	5,4	5,3
	Radial	18,1	18,2	13,0	13,0
	Tangencial	24,8	24,6	15,1	15,2

Em uma pesquisa junto a uma farmácia de manipulação, localizaram-se três possibilidades: ácido poliacrílico (nome comercial Carbopol 940), celulose modificada (nome comercial Natrosol) e agar (derivado de algas, também de base carbono). Não havendo tempo disponível para ensaiar cada uma das hipóteses, optou-se conjuntamente com a prof. Ana Maria Costa Leonardo pelo uso do gel de Natrosol, sendo especialmente encomendado sem conservantes à farmácia para as primeiras medições. A fórmula completa da preparação (incluindo conservante, usada depois da exposição aos cupins) é:

1,5%	Natrosol
8,33%	Dipropilenoglicol
1,0%	Solução germall 50%
0,16%	Edta
0,16%	Nipogim
0,08%	Nipozol
q.s.p.	Água destilada

Procurando verificar alguma possível influência do gel, foi realizado pelo laboratório da UNESP um teste onde amostras de papel com e sem gel de Natrosol foram expostas simultaneamente a cupins. Estes se alimentaram primeiro do papel puro, somente depois procurando o papel com gel. Conclui-se assim que embora não impeça o ataque por cupins, o gel acoplante ainda influencia seu comportamento.

Para explorar a repetibilidade das medidas pelo procedimento, foram realizadas medições consecutivas em um corpo-de-prova de eucalipto, usando o acoplante escolhido acima. As direções ensaiadas foram longitudinal (L), tangencial (T) e radial (R), apresentadas abaixo com suas médias e desvios padrões, considerados aceitáveis.

Tabela 11: Ensaio de repetibilidade de medidas de ultra-som, em corpo-de-prova de eucalipto**.**

	Velocidade nas direções (µs)								
Leitura	vL	vL'	vT	vT'	vR	vR'	vL média	vT média	vR média
1	5.60	5.60	19.80	19.90	13.70	13.70	5.60	19.85	13.70
2	5.60	5.60	20.30	20.20	13.80	13.80	5.60	20.25	13.80
3	5.60	5.60	19.70	20.10	13.70	13.70	5.60	19.90	13.70
4	5.60	5.60	19.80	19.70	13.60	13.70	5.60	19.75	13.65
5	5.60	5.60	19.80	19.90	13.60	13.60	5.60	19.85	13.60
						Desvio Padrão	0.00	0.19	0.07
						Coef. Var. (%)	0.0%	1.0%	0.5%

4.5.5 Materiais utilizados

Os corpos-de-prova foram confeccionados no LEE com madeira de *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.*, à partir de peças disponíveis no local. O gel acoplante utilizado está conforme o descrito acima.

Os equipamentos utilizados foram:

Tabela 12: Lista de equipamentos utilizados.

Equipamento	Nº Patrimônio (NP) ou Nº de Série (NS)
Balança, marca Marte, 0,001mg	NP 206459
Ultra-som CNS Puntit modelo 6	NS 990264445
Paquímetro 0,01mm Starrett	NS 07586
Aquisição de dados: HP75000 VXI (E1300A)	NP 213341
- multímetro interno HPE 1326A	
- placa multiplexadora HPE 1345A	
- placa de contatos HPE 1347A	
- Microcomputador PC IBM pentium	NP 185567
Máquina universal de ensaios Mohr & Federhaff 20tf	
Extensômetros elétricos Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd. SPD-50C , $100x10^{-6}$ mm	NP 206898 NP 206897
Relógio comparador analógico Mitutoyo Nº3058F, 0,01mm	NP 206431
Célula de carga Kratos modelo CCI02, 200kN	NP 205297
Módulo de leitura de célula de carga, Kratos modelo IK-1C	NP 209424

4.5.6 Ensaio mecânico

O ensaio mecânico foi montado conforme a Figura 13, onde dois extensômetros elétricos e um mecânico, todos com curso de 50mm, foram posicionados entre as duas travessas da máquina universal de ensaios, cuja travessa inferior suportava a célula de carga e a rótula.

Foram obtidas as curvas de aferição para traduzir os dados de Volts em distância através do deslocamento a travessa ainda sem carga, provocando mudanças simultâneas nos extensômetros elétricos e no relógio comparador de referência. Entre os pontos lidos no deslocamento foi feito uma regressão linear. Os extensômetros usados dispõem de sensibilidade de $100x10^{-6}$ mm que, considerando a deformação medida nos 30mm do corpo de prova, dão uma exatidão de 3,3 µm/m, quando o recomendado pela norma NBR7190:97 (item B.8.4, pag. 51) é de 50 µm/m.

De maneira similar foi feita a curva de aferição da célula de carga, tendo como referência o mostrador da própria máquina de ensaios universal. A célula de carga usou o módulo de leitura IK-1C como fonte de força eletromotriz, sendo a saída analógica deste módulo acoplada ao sistema de aquisição de dados. Como o zero de referência do módulo de leitura IK-1C variava na ordem de ± 0,5kN, este era re-ajustado entre os ensaios.

Para o ensaio mecânico, os corpos-de-prova eram retirados da caixa hermética aonde foram deixados esfriar em grupos de três a cinco. Suas dimensões foram medidas com paquímetro, duas medidas para cada eixo, e foram ensaiados logo após verificar que o aparato estava todo centrado, que a rótula permitia o contato total do corpo-de-prova com a travessa superior e que a célula de carga estava zerada.

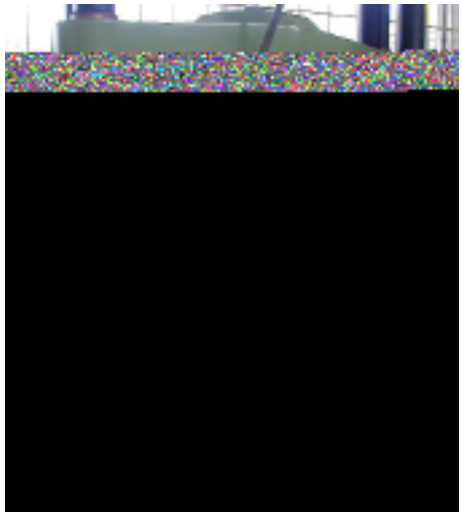
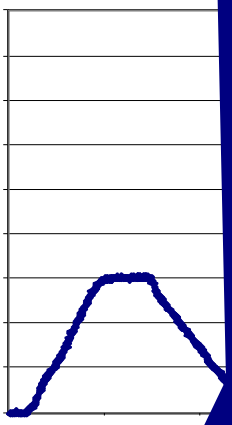


Figura 13: Aparato de ensaio mecânico. Centrado sob a travessa inferior, o cilindro preto e prateado é a célula de carga. Sobre esta, uma pequena rótula e o corpo-de-prova. De forma prismática, à esquerda e à direita da célula de carga, estão os extensômetros elétricos. À esquerda da célula de carga, o extensômetro analógico para referência.

A cada ensaio foi realizado um procedimento de acomodação do equipamento, consistindo de uma rampa de 10kN/min, um patamar a 30kN para os corpos-de-prova de pinus e 35kN para os de eucalipto, descendo a carga à mesma taxa mantendo novo patamar a 3kN para os corpos-de-prova de pinus e 3,5kN para os de eucalipto. Os patamares superiores de acomodação utilizados foram propositadamente escolhidos em cargas inferiores à 50% da tensão de ruptura, esperando uma grande variabilidade deste como consequência do ataque biológico. Esta hipótese entretanto não se verificou.



um incremento praticamente em todas as medidas (ver Figura 15 e Figura 16), repetiram-se as medidas de ultra-som para todos os CPs, eliminando o gel acoplante após as medidas com toalhas de papel no lugar da lavagem. Os CPs foram então novamente retornados à estufa.

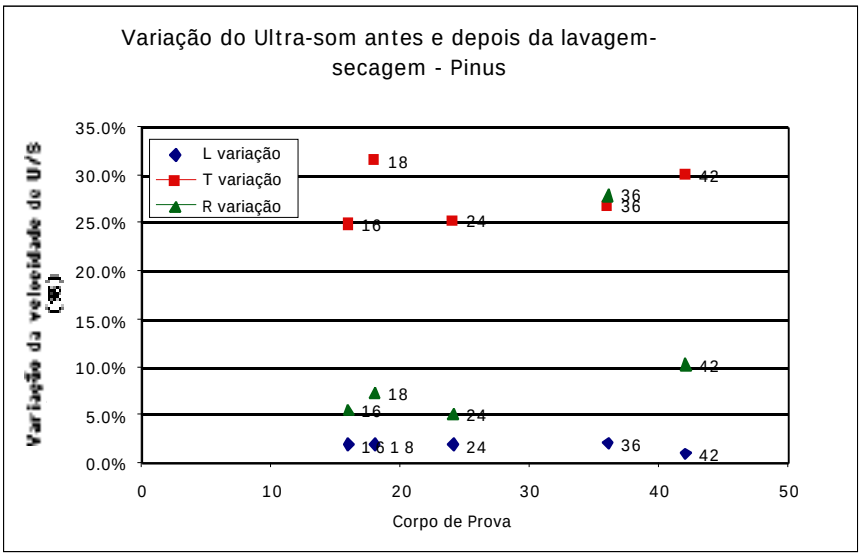


Figura 15: variação da velocidade de propagação de ultra-som antes e depois da propagação de trincas de secagem em CPs de pinus. Ensaios piloto.

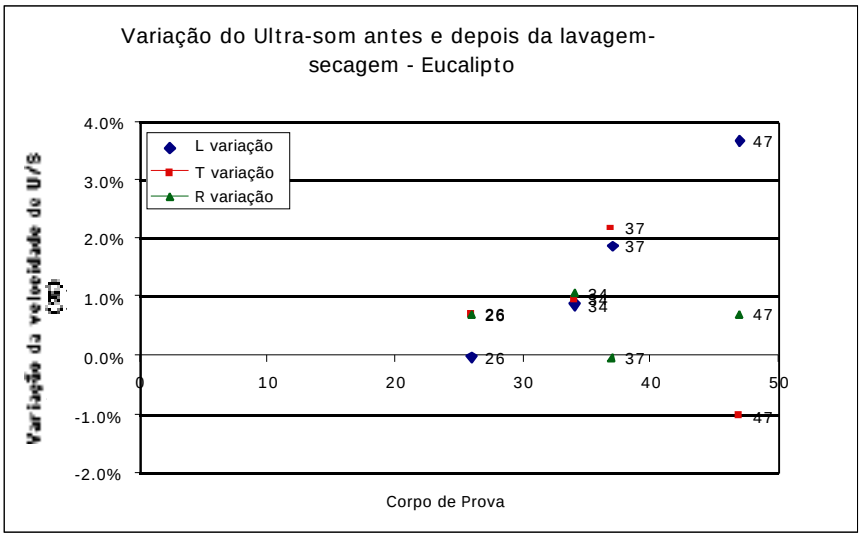


Figura 16: variação da velocidade de propagação de ultra-som antes e depois da propagação de trincas de secagem em CPs de eucalipto. Ensaios piloto.

Como forma de verificar ainda a influência do acoplante no ataque dos cupins, os corpos-de-prova P01, P02 (de pinus), E01 e E02 (de eucalipto) não receberam acoplante na medida de ultra-som antes da exposição aos cupins. Estes valores de ultra-som não foram considerados junto com os demais nas análises, servindo de testemunho.

4.6 Resultados

Neste item estão apresentados os resultados de ensaios de variação de massa, velocidade de ultra-som e características mecânicas em relação ao estado inicial da madeira e após a deterioração por cupins durante 40 dias.

Na apresentação dos resultados serão usados coeficientes representando três momentos do experimento:

X_1- medidas tomadas antes de exposição aos cupins

X_2- medidas tomadas depois da exposição aos cupins

X_3- medidas tomadas após a percepção das trincas de secagem, portanto antes dos ensaios mecânicos.

4.6.1 Perda de massa, massa e densidade

Como decorrência da ação dos cupins, constata-se visualmente que nos corpos-de-prova de pinus as galerias penetram preferencialmente pelas camadas de primavera/ verão da madeira e continuam nessas camadas, que são macias e ricas em nutrientes. Tanto para o pinus como para o eucalipto, as galerias foram em sua maioria longitudinais às fibras, contudo, no pinus, as galerias estão alargadas também na direção tangencial, acompanhando o anel primavera/ verão. No eucalipto a maior parte do desgaste foi feito junto à superfície, poucos corpos-de-prova apresentaram galerias internas. Pode-se ver na Figura 17 corpos-de-prova piloto de pinus, que foram cortados em seções transversais às fibras, onde se pode observar a geometria típica das galerias dos cupins. Não há imagem semelhante de corpos-de-prova de eucalipto, infelizmente.

Figura 17: galerias de cupins observadas em corpos-de-prova piloto de pinus, expostos por 30, 45 e 60 dias, respectivamente, da esquerda para a direita.

A massa de cada um dos corpos-de-prova foi medida em balança eletrônica com precisão de 0,001g. As medidas de perda de massa foram realizadas sempre após a estabilização da medida em ±0,5% (com 6h de intervalo). A medida da perda de massa, relativa às medidas de massa realizadas antes e depois da exposição aos cupins, foi obtida pela seguinte fórmula, que tem como referência a massa inicial:

$$\text{Perda de massa (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \qquad \text{(Eq.6)}$$

Equação 6: Cálculo da perda de massa, onde m_1 é a massa inicial e m_2 é a massa após a exposição aos cupins, ambas medidas em gramas.

Cabe entretanto frisar que as medidas de massa foram corrigidas para o mesmo nível de umidade (o momento 3, quando ocorreram os ensaios mecânicos), tendo como referência corpos-de-prova destinados para este fim, que foram pesados a cada momento do experimento e depois secos a 105ºC até que estabilizassem também a ±0,5% entre duas medidas consecutivas com 6 horas de intervalo.

Tabela 13: Fator de correção da massa para a umidade de referência (momento 3), baseado em corpos-de-prova dedicados a este fim.

		U_1%	U_3%	Variação U%	Correção (m_1*x=m_2)
Eucalipto	CP umidade 1	0.8%	1.1%	70.1%	1.0033
	CP umidade 2	0.8%	1.0%	76.3%	1.0024
	CP umidade 3	1.1%	1.3%	82.3%	1.0023
	CP umidade 4	0.9%	1.1%	82.7%	1.0019
	CP umidade 5		1.0%		
	média	0.9%	1.1%	77.8%	1.0025
Pinus	CP umidade 1	0.2%	0.4%	45.5%	1.0024
	CP umidade 2	0.3%	0.5%	62.2%	1.0020
	CP umidade 3	0.2%	0.6%	42.0%	1.0033
	CP umidade 4	0.2%	0.4%	41.4%	1.0023
	Média	0.4%	0.7%	47.8%	1.0025

Os resultados das massas das amostras podem ser representados pelo seguintes gráficos de distribuição.

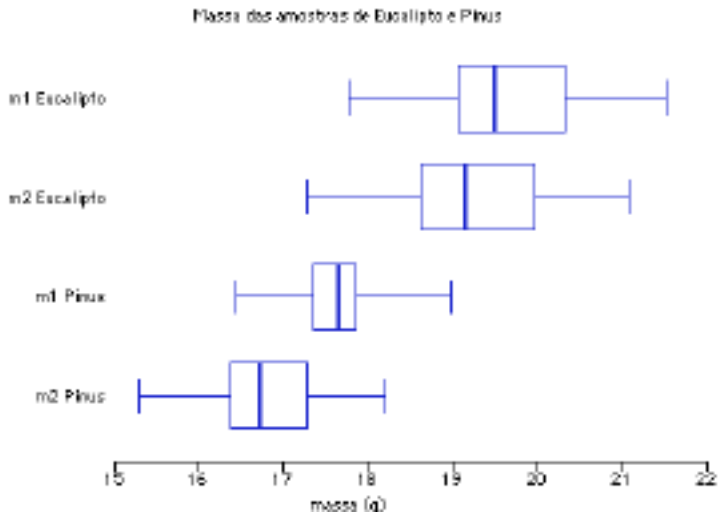


Figura 18: gráfico da distribuição de massa das amostras, onde a linha central representa a mediana da amostra, o retângulo representa 50% da amostra e entre as linhas extremas estão 100% da amostra

A distribuição de perdas de massa pode ser observada nos histogramas a seguir. Há todavia, casos questionáveis de variação positiva de massa, que podem representar

algum vício experimental e são desconsiderados se utilizado um intervalo de confiança de 95%.

Figura 19: Histograma da perda de massa da amostra de *Eucalyptus sp.*

Figura 20: Histograma da perda de massa da amostra de *Pinus sp.*

Como ilustração, é apresentada a seguir as densidades dos corpos-de-prova envolvidos, que são a razão da massa pelo volume aparente calculado à partir das médias geométricas dos lados do corpo-de-prova. No gráfico a seguir, a linha central representa a mediana da amostra, o retângulo representa 50% da amostra e entre as linhas extremas estão 100% da amostra. Deve-se notar que a amostra de pinus apresenta uma elevada

densidade em relação ao encontrado no Brasil. Este fato se deve à escolha de uma madeira com mais do que cinco anéis de crescimento na reduzida seção imposta, como dita o item B.6.3 da norma NBR7190:1997 (ABNT, 1997).

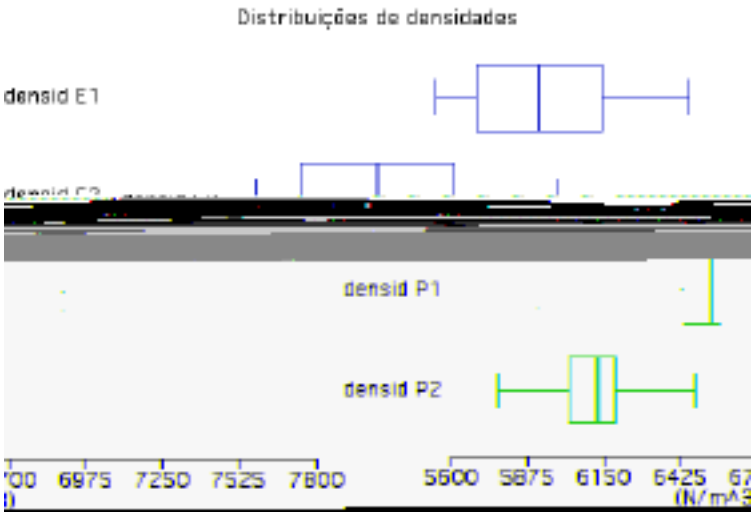


Figura 21: distribuições de densidades (densid), onde 1 é o momento antes da exposição aos cupins e 2 é o momento após a exposição. A letra "E" indica eucalipto e "P" indica pinus.

Tabela 14: Densidade aparente das amostras antes e após a exposição aos cupins.

Antes da exposição	eucalipto	Pinus	Após a exposição	Eucalipto	Pinus
Média (N/m³)	7140	6489	Média (N/m³)	6591	6141
Desv. Padrão	245	156	Desv. Padrão	303	161
Coef. Var. (%)	3.4%	2.4%	Coef. Var. (%)	4.6%	2.6%
Número de CPs	57	47	Número de CPs	56	47

4.6.2 Medidas de ultra-som

Seguindo ainda a apresentação dos resultados nos três momentos referidos no início deste capítulo sobre as medições dos ensaios, passa-se a descrever as medidas de velocidade de ultra-som obtidas em cada uma das direções (radial, tangencial e longitudinal). Dado o uso de madeira de reflorestamento com pequeno diâmetro, é interessante perceber que nem sempre é possível obter corpos-de-prova com direções

tangenciais e radiais bem definidas. Desta forma, procurando ter uma medida representativa das velocidades transversais, é apresentada também a soma das velocidades tangencial e radial. Busca-se assim uma aproximação a uma situação onde o pulso de ultra-som atravessaria uma seção mista, metade radial, metade tangencial.

Nesta abordagem das velocidades tangencial e radial, também se somam as probabilidades do pulso de ultra-som encontrar em seu caminho o defeito no plano em que seria melhor "visualizado". Afinal, considerando que os defeitos causados por cupins são normalmente longitudinais às fibras, se o defeito estiver "de perfil" na direção tangencial, estará "de frente" na direção radial, e vice versa. A soma das velocidades, desta forma, tem maior chance de se relacionar com os defeitos causados pelos cupins.

Todas as velocidades estão apresentadas em metros por segundo e foram obtidas dividindo a dimensão percorrida no corpo de prova (obtida através da média de duas medidas executadas com paquímetro), pelo tempo de propagação do pulso ultra-sônico, medido com o aparelho Pundit.

Na tabela abaixo pode-se encontrar as médias e desvios-padrão das medidas de velocidade de ultra-som.

Tabela 15: Médias e desvios padrão das velocidades de propagação de ultra-som, em metros por segundo.

(m/s)	vL_1	vL_2	VL_3	vT_1	vT_2	vT_3	vR_1	vR_2	vR_3	$vT+R_1$	$vT+R_2$	$vT+R_3$
Eucalip.												
média	5649	5837	5825	1552	1616	1606	2025	2126	2113	3577	3743	3719
d. padrão	137	140	151	138	129	128	115	124	122	82	47	54
Núm. CPs	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
Pinus												

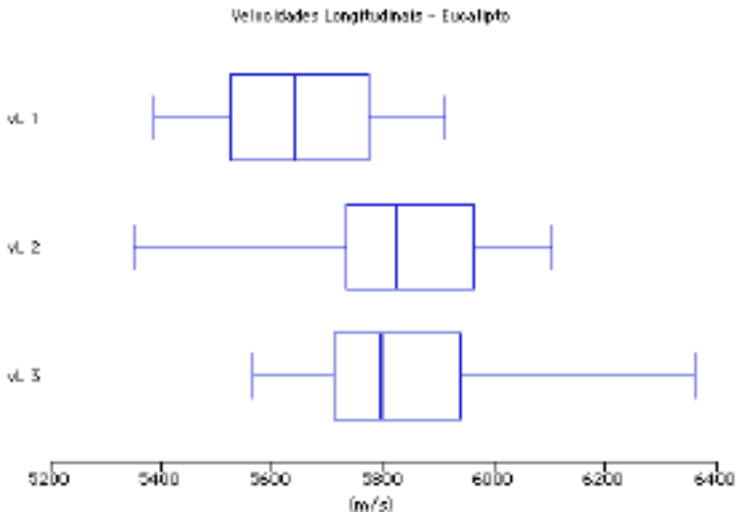


Figura 22: Distribuição das velocidades longitudinais de ultra-som no eucalipto nos três momentos. O retângulo representa 50% dos valores e a linha em seu interior a mediana. Os limites externos abrangem 100% da amostra.

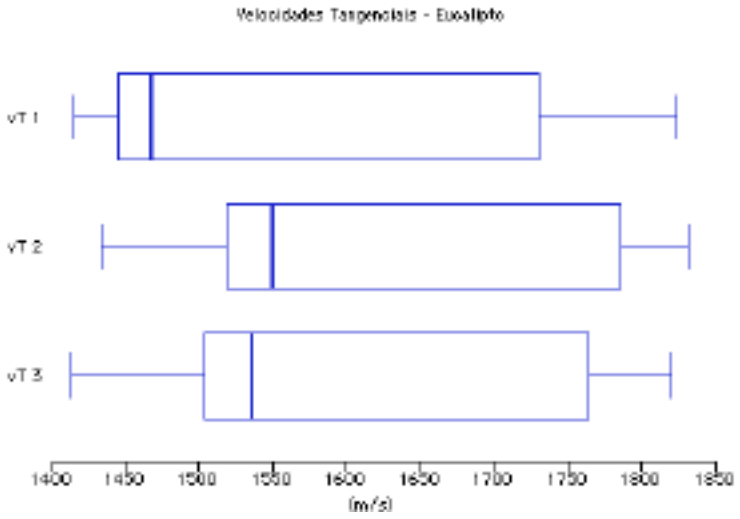


Figura 23: Distribuição das velocidades tangenciais de ultra-som no eucalipto nos três momentos. O retângulo representa 50% dos valores e a linha em seu interior a mediana. Os limites externos abrangem 100% da amostra.

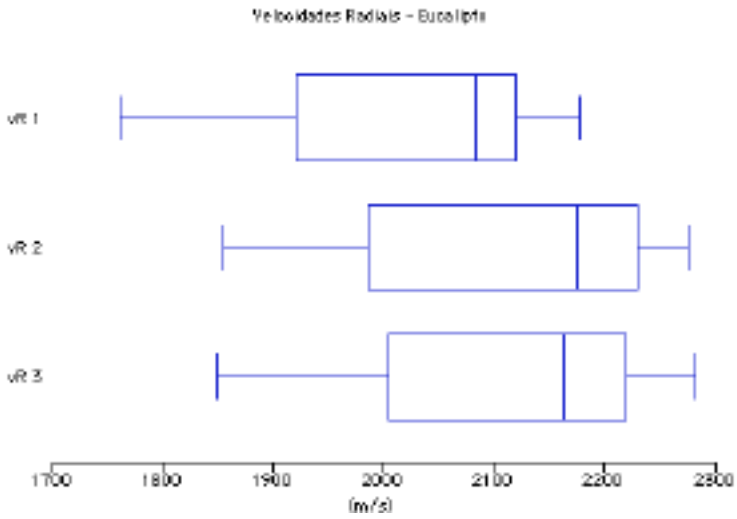


Figura 24: Distribuição das velocidades radiais de ultra-som no eucalipto nos três momentos. O retângulo representa 50% dos valores e a linha em seu interior a mediana. Os limites externos abrangem 100% da amostra.

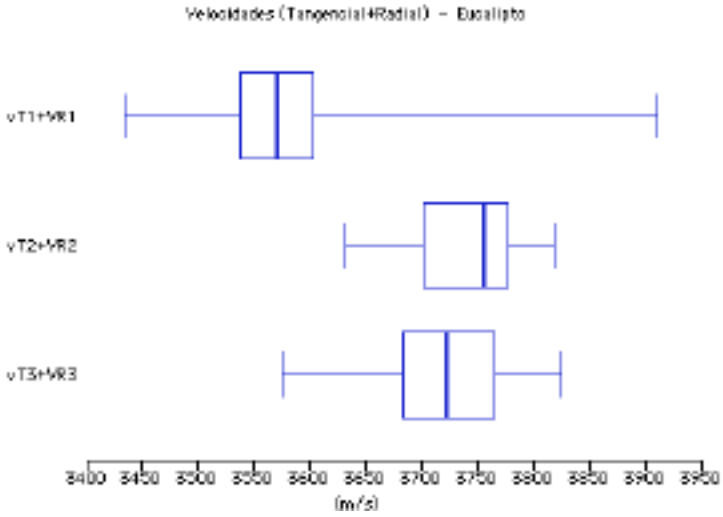


Figura 25: Distribuição das somas das velocidades radiais e tangenciais de ultra-som no eucalipto nos três momentos. O retângulo representa 50% dos valores e a linha em seu interior a mediana. Os limites externos abrangem 100% da amostra.

Na representação gráfica feita, pode-se esperar que quando o traço que limita a ocorrência de 100% da amostra é demasiado grande, na verdade inclui valores espúrios aqui ainda mantidos.

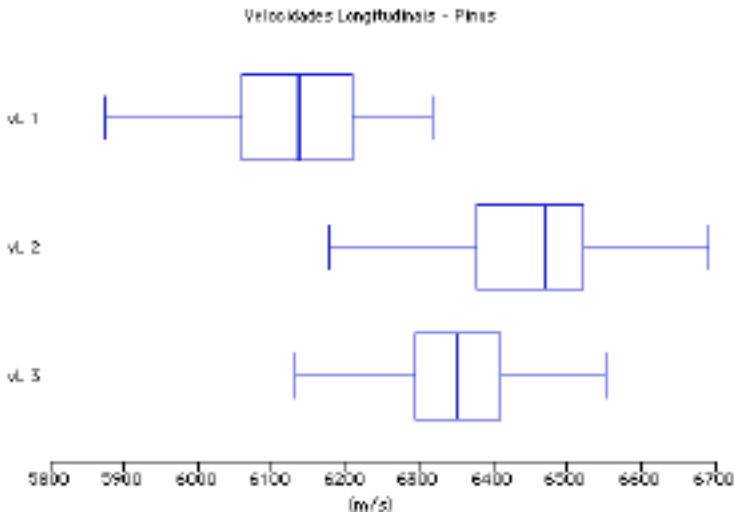


Figura 26: Distribuição das velocidades longitudinais de ultra-som no pinus nos três momentos. O retângulo representa 50% dos valores e a linha em seu interior a mediana. Os limites externos abrangem 100% da amostra.

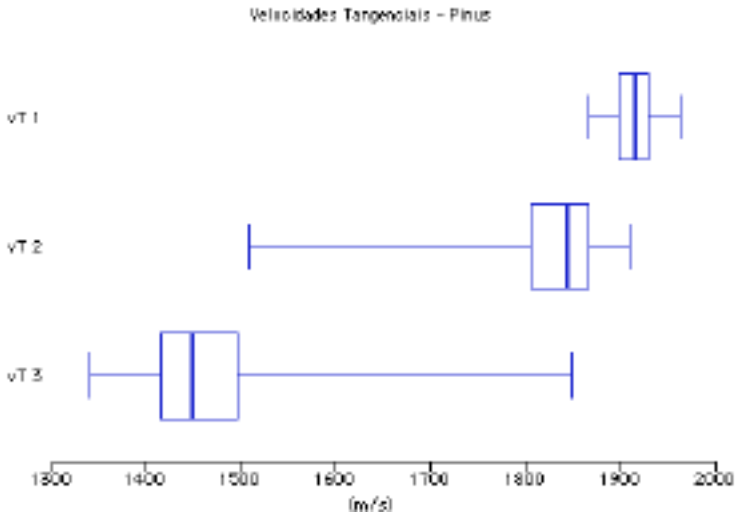


Figura 27: Distribuição das velocidades tangenciais de ultra-som no pinus nos três momentos. O retângulo representa 50% dos valores e a linha em seu interior a mediana. Os limites externos abrangem 100% da amostra.

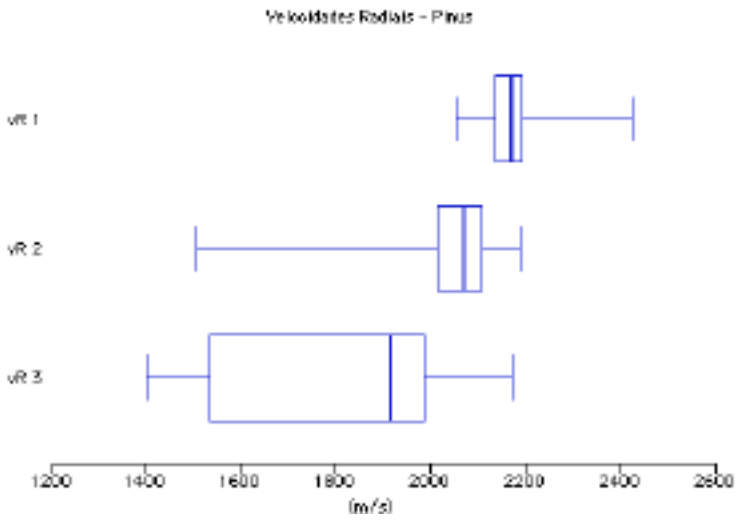


Figura 28: Distribuição das velocidades radiais de ultra-som no pinus nos três

nas outras direções. Apresenta-se juntamente os valores dimensionais dos corpos-de-prova.

Tabela 16: Avaliadores das medidas dimensionais dos corpos-de-prova e o comprimento de onda longitudinal encontrado.

	L 1 (m)	T 1 (m)	R 1 (m)	λL 1(m)	L 3 (m)	T 3 (m)	R 3 (m)	λL 3(m)
Eucalipto								
Média	0.0315	0.0288	0.0296	0.0283	0.0305	0.0287	0.0292	0.0286
d.padrão	0.0005	0.0005	0.0003	0.0007	0.0059	0.0055	0.0056	0.0040
Núm. CPs	57	57	57	55	55	55	55	56
Pinus								
Média	0.0321	0.0292	0.0285	0.0307	0.0323	0.0293	0.0284	0.0317
d.padrão	0.0008	0.0002	0.0005	0.0005	0.0008	0.0002	0.0002	0.0005
Núm. CPs	47	47	47					

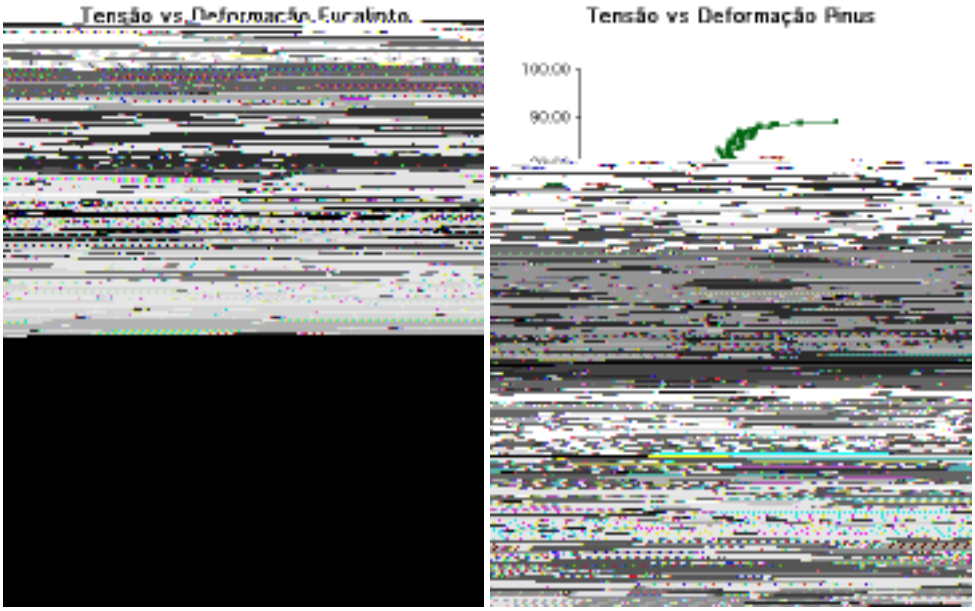


Figura 30: (esquerda) Gráfico de três corpos-de-prova de eucalipto, representando os comportamentos observados

Figura 31: : (direita) Gráfico de três corpos-de-prova de pinus, representando os comportamentos observados

Pode-se perceber, pelos gráficos acima, que a ruptura dos corpos-de-prova de pinus foram mais abruptas, enquanto os corpos-de-prova de eucalipto apresentaram uma deformação maior no último estágio. O tipo de fratura observada foi frequentemente diferente da esperada flambagem das fibras em um plano de 45º em relação à direção da carga, que normalmente se observa para a madeira. Os tipos de fratura observados podem ser descritos sob as seguinte denominações:

- catastrófica: quando o rompimento se deu repentinamente, associado ao despedaçamento do corpo-de-prova;

- fendas: quando o rompimento se deu pela abertura de fendas longitudinais às fibras, normalmente relacionadas com galerias de cupins

- flambagem a 45º: forma típica de fratura em madeira, formando um plano de 45º em relação à direção da carga, porém aqui foi frequentemente relacionada com galerias de cupins;

- inclinada: quando a forma do corpo-de-prova passa de um paralelogramo reto (cubo) a um paralelogramo oblíquo, causando um cisalhamento entre os anéis de crescimento ou no plano radial-longitudinal;
- esmagamento: o corpo-de-prova sofre um achatamento acompanhado de um desfibrilamento localizado no topo, perdendo a capacidade de carga;
- não caracterizado: quando o ensaio foi interrompido à perda de capacidade de carga sem que houvesse caracterização da fratura.

Nas figuras abaixo estão representados os tipos de fraturas mais frequentes:

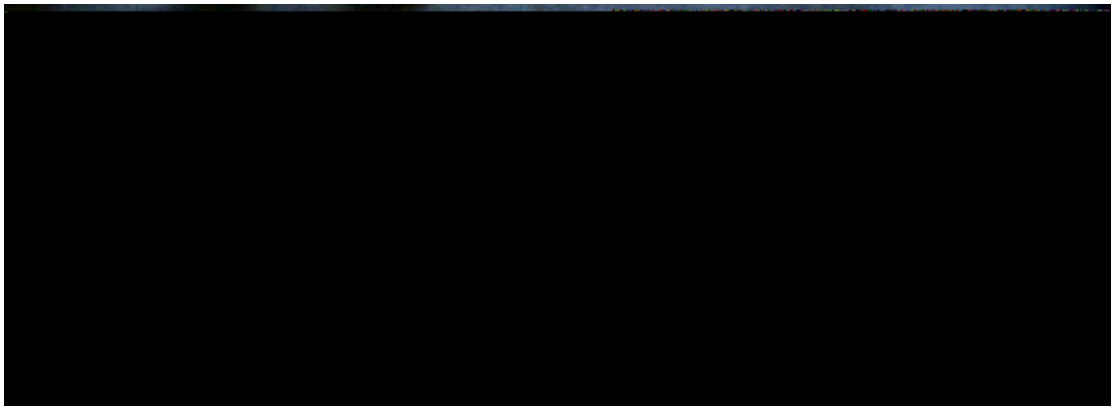


Figura 32: fraturas típicas observadas em eucalipto. Da esquerda para direita, inclinada, fendas, catastrófica e esmagamento

Figura 33: fraturas típicas observadas em pinus. Da esquerda para direita, inclinada, fendas, flambagem 45º (no canto esquerdo, junto à galeria rompida) e catastrófica.

Por se temer que as formas atípicas de fratura , especialmente a inclinada, fossem causadas por uma assimetria no aparato de ensaio, realizaram-se ensaios-piloto com corpos-de-prova de madeiras de outras espécies ou lote, em umidade de equilíbrio com o ambiente, observando-se entretanto o comportamento típico na fratura destes, conforme ilustra a figura abaixo:

Figura 34: rupturas por flambagem das fibras formando planos de 45º, em corpos-de-prova de outras amostras, reforçando a simetria do aparato utilizado. De cima para baixo as madeiras são: roxinho, pinus e eucalipto.

Tabela 17: Dados representativos das tensões de ruptura para diferentes tipos de fraturas observados.

motivo destes coeficientes de determinação (r^2) estarem baixos pode ser atribuído ao aparato utilizar extensômetros entre as travessas da máquina de ensaios, captando as vibrações próprias da máquina hidráulica de ensaios .

Cabe lembrar que os módulos de elasticidade apresentados têm embutido em si o módulo de elasticidade do próprio aparato, uma vez que os extensômetros foram montados entre a travessa superior e inferior da máquina de ensaios, abrangendo a célula de carga, a rótula e o corpo-de-prova. Foi realizado um ensaio somente com a célula de carga e a rótula, onde se constatou uma relação da carga 58.652 vezes maior do que o deslocamento (com r^2 =0,92). Não se aprofundará nesta relação uma vez que os módulos de elasticidade apresentados aqui são somente para efeito de comparação entre eles.

Tabela 18: dados representativos dos valores de TR, MOE e coeficiente de determinação (r^2) do MOE.

	TR (MPa)	MOE (MPa)	r^2
Eucalipto			
Média	43,96	4169,30	0,67
Desv. Padrão	4,7	566,3	0,11
Coef. Var.(%)	10,7	13,6	
Pinus			
Média	47,56	4791,90	0,73
Desv. Padrão	5,0	692,5	0,08
Coef. Var.(%)	10,5	14,4	

Os coeficientes de variação encontrados tanto para as tensões de ruptura como para os módulos de elasticidade possuem valor máximo de 14,4%, que sendo abaixo de 18% ainda são valores usuais para propriedades de compressão paralela às fibras, conforme o item F.7, anexo F da NBR 7190:97 (ABNT, 1997).

Os dados pode também ser representados pelos histogramas à seguir.

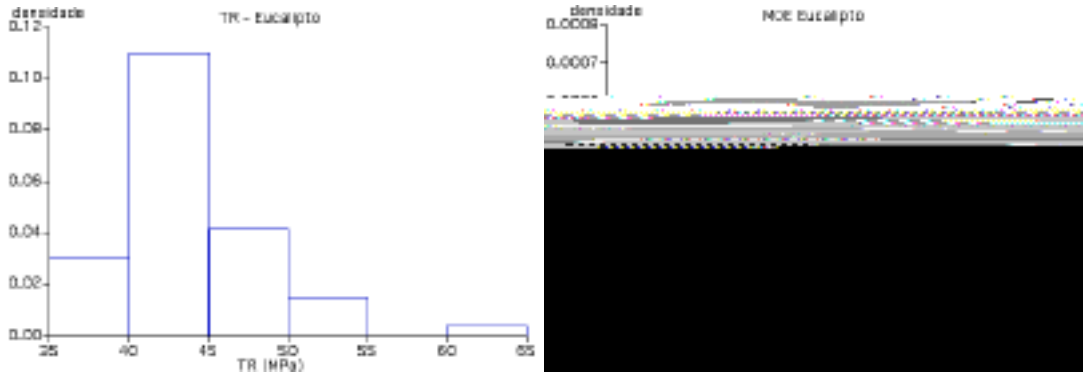


Figura 35: (esquerda) histograma dos valores de tensão de ruptura dos corpos-de-prova de eucalipto.

Figura 36: (direita) histograma dos valores de módulo de elasticidade dos corpos-de-prova de eucalipto, para fins comparativos dentro deste estudo.

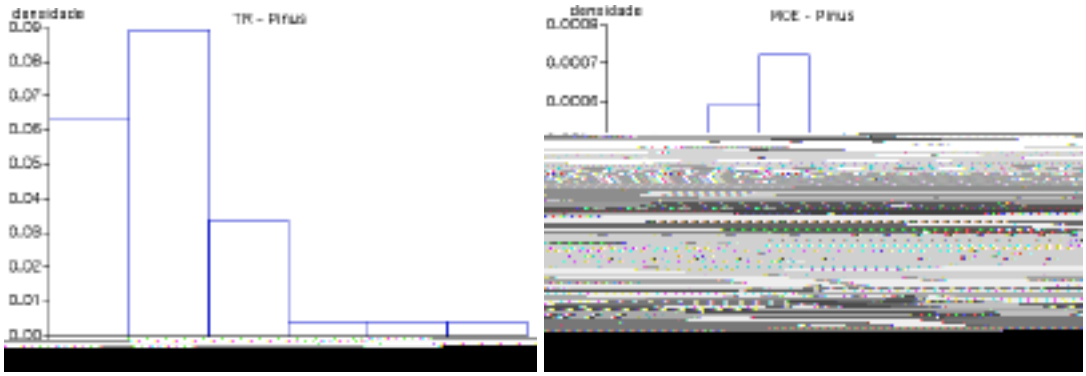


Figura 37: (esquerda) histograma dos valores de tensão de ruptura dos corpos-de-prova de pinus.

Figura 38: (direita) histograma dos valores de módulo de elasticidade dos corpos-de-prova de pinus, para fins comparativos dentro deste estudo.

4.7 Discussão dos resultados

O teste “t” de Student permite verificar se há diferença significativa entre duas amostras com média, desvio padrão e tamanho conhecidos. A verificação por este teste entre as médias das massas iniciais e finais, bem como as densidades finais e iniciais dentro das

amostras de cada madeira indicam que houve variação significativa com menos de 5% de chance de engano. Desta forma, conclui-se que apesar do pouco espectro de perdas de massa obtido a exposição aos cupins foi eficaz, que produziu variações negativas nas velocidades de propagação de ultra-som nas direções radial e tangencial dos corpos-de-prova de pinus.

Verificou-se um incremento das velocidades após a degradação por cupins no caso do eucalipto (página 67 e 68) e da velocidade longitudinal do pinus (página 69). Este incremento pode ser explicado pelo aumento da temperatura ambiente entre outubro, quando se realizaram as primeiras leituras, e janeiro, após o bioensaio. Este fato contribui para ressaltar a sensibilidade do decréscimo do ultra-som nas direções tangencial e radial em CPs de pinus (páginas 69e 70).

Também pelo teste “t” de Student pode-se verificar se a influência das trincas de secagem que se formaram entre as medidas de ultra-som do momento 2 (antes das trincas) e as do momento 3 (após as trincas) nos valores médios de velocidade de propagação. Para o eucalipto não é possível afirmar com menos de 5% de chance de engano, que as médias de velocidade do momento 2 difiram significativamente das médias do momento 3, em qualquer direção de propagação. Já para os corpos-de-prova de pinus, pode-se afirmar, com menos de 5% chance de engano, que as médias de velocidade sofreram alteração significativa entre os momentos 2 e 3.

Pode-se propor quatro explicações para o efeito maior das trincas no pinus do que no eucalipto. A primeira explicação é ser consequência de uma lavagem mais esmerada para a retirada do gel acoplante, o que realmente aconteceu em decorrência da maior quantidade de reentrâncias das galerias de cupins nos corpos-de-prova de pinus. A segunda explicação é ser em decorrência de uma maior absorção de umidade pela madeira, uma vez que havia uma maior superfície de contato proporcionada pelas galerias de cupins, em maior quantidade no pinus do que no eucalipto. A terceira explicação baseia-se na maior porosidade do pinus, devido aos seus vasos, permitindo uma absorção mais rápida de água. A quarta explicação leva em consideração a diferença de madeira entre as camadas outono-inverno e primavera-verão, que é muito mais acentuada no pinus.

De toda forma encontra-se a necessidade de comparar os dados de perda de massa com as velocidades de ultra-som no momento 2, quando esta ainda não havia sido influenciada pelas trincas, mas somente pelas galerias. Já as propriedades mecânicas devem ser comparadas com as velocidades de propagação no momento 3, uma vez que as próprias trincas podem contribuir para diminuir a resistência mecânica e a rigidez do corpo-de-prova.

As tensões de ruptura encontrados, quando comparados com os valores tipicamente encontrados na literatura, podem parecer demasiadamente elevados para os CPs de pinus. Este fato é atribuído à baixa umidade dos CPs (0,7%) e a sua elevada densidade (6489 N/m^3).

Sobre as fraturas observadas, não se pode afirmar que haja diferença significativa entre os valores médios de TR para cada tipo de fratura (Tabela 17), seja para o pinus ou para o eucalipto. Como estes tipos de fratura também se verificaram nos corpos de testemunho, não se pode atribuir este comportamento ao ataque dos cupins, os efeitos das medidas de ultra-som, ao acoplante ou às fissuras de secagem. Desta forma, atribui-se tal comportamento à umidade dos corpos-de-prova, demasiadamente baixa (1,1% para o eucalipto e 0,7% para o pinus, inclusive para os testemunhos). Esta suposição encontra respaldo no fato de outros corpos-de-prova de pinus e eucalipto, bem como de roxinho, todos em umidade de equilíbrio com o ambiente, apresentaram fraturas típicas para madeira, como visto anteriormente.

Para corpos-de-prova do pinus, percebeu-se com freqüência que, quando havia flambagem de fibras, estas estavam relacionadas com a presença de galerias de cupins, dando indícios de que estas galerias podem desempenhar um papel concentrador de tensões.

4.7.1 Correlações esperadas

Partindo da teoria explanada acima e de conceitos gerais do comportamento das madeiras, são esperadas correlações entre os seguintes dados para este tipo de ensaio:

- MOE e TR : por ser uma relação comumente encontrada nas madeiras;
- Perda de massa e TR: uma vez que o corpo-de-prova perde material ele tem sua seção transversal reduzida. Mesmo que não haja alterações no material em si, a redução de seção transversal seria “lida” como redução da tensão de ruptura;
- Perda de massa e MOE: esta relação teria como origem alterações no próprio material pelos cupins, a presença de galerias oblíquas em relação as fibras, causando tensão que não seriam puramente de compressão paralela às fibras, ou pela perda de travamento em regiões atravessadas por galerias;
- Perda de massa e a Variação das velocidades de ultra-som (entre os momentos 1 e 2): o aumento da presença de vazios relacionado com a perda de massa seria a causa do atraso de um pulso de ultra-som entre sua emissão e recepção.
- Quadrado da velocidade de ultra-som no momento 3 e MOE: conforme foi visto anteriormente há uma correlação teórica entre o módulo de elasticidade dinâmico e o quadrado da velocidade, conforme a equação de Graff (Equação 1).
- MOE e MOEdr3 (Módulo de Elasticidade dinâmico de referência no momento 3): Conforme o exposto na equação de Graff, há uma correlação esperada do módulo de elasticidade dinâmico do material e o quadrado da velocidade de propagação do ultra-som vezes a densidade do material. Apesar de não termos conhecimento dos módulos de Poisson dos corpos-de-prova, é esperado que estes não tenham grande variação entre os corpos-de-prova de uma mesma espécie de madeira. Desta forma, consideramos o termo influenciado pelos módulos de Poisson como constante e igual a 1. Mesmo não tendo valores definitivos do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd), pode-se verificar se há correlação entre estes e as velocidades de propagação.

Para investigar a ocorrência destas correlações esperadas, serão apresentados gráficos de distribuição de pontos para as medidas em questão, abrangendo a totalidade dos pontos (um intervalo de confiança de 100%). Frequentemente o coeficiente de determinação diminui quando determinado para os dados do intervalo de 95% de confiança. De maneira similar a inclinação da reta muda quando deixa de ser influenciada pelos valores espúrios, localizados fora do intervalo de 95% de confiança.

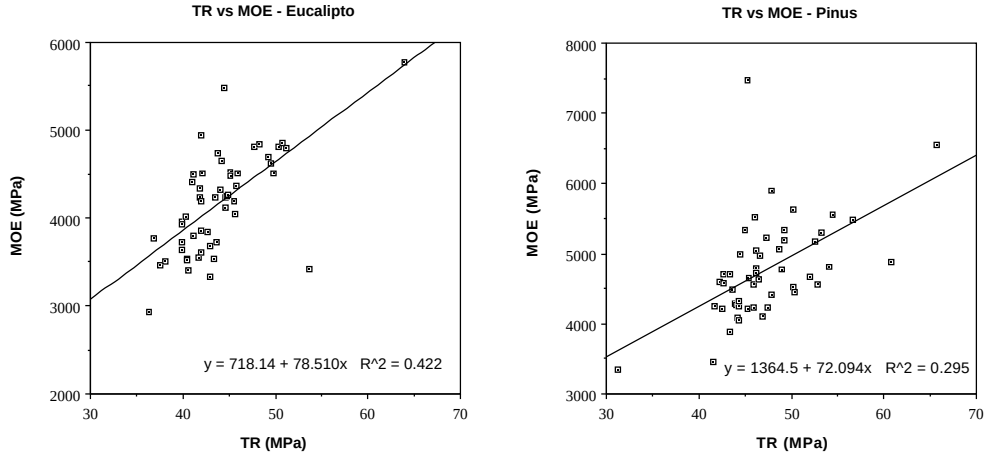


Figura 39: (esquerda) correlação entre TR e MOE para os CPs de eucalipto.
Figura 40: (direita) correlação entre TR e MOE para os CPs de pinus.

Nas figuras acima pode-se perceber que o grupo de pontos mostra uma tendência positiva, mesmo se ignorados os pontos mais distantes. Supõe-se assim uma relação

Nos gráficos que se seguem analisa-se a relação entre a perda de massa e a tensão de ruptura (TR) (Figura 43 e Figura 44), entre a perda de massa e o módulo de elasticidade (MOE) (Figura 45 e Figura 46), entre a perda de massa e a velocidade longitudinal de transmissão de ultra-som (vL) (Figura 47 e Figura 48), entre a perda de massa e a velocidade tangencial de transmissão de ultra-som (vT) (Figura 49 e Figura 50), entre perda de massa e a velocidade radial de transmissão de ultra-som (vR) (Figura 51 e Figura 52), entre o MOE e vL^2 (Figura 53 e Figura 54), entre o MOE e vT^2 (Figura 55 e Figura 56), entre MOE e vR^2 (Figura 57 e Figura 58) , entre o MOE e o quadrado da soma de vT e vR (Figura 59 e Figura 60) e entre o MOE e o módulo de elasticidade dinâmico para referência (MOEdr) calculado pela Equação 2, considerando o termo que envolve o módulo de Poisson como igual a 1 (Figura 61 e Figura 62). Percebe-se nestes gráficos que a nuvem de pontos representada não demostra uma tendência de um dado em relação a outro, dispondo-se como um disco ou paralelamente a um dos eixos. Como caso geral observa-se que, se ignorados os pontos mais distantes da média, a nuvem de

caso -se q59Ecidadeura 52), entre o M2.iEa2)rTD 0 vT

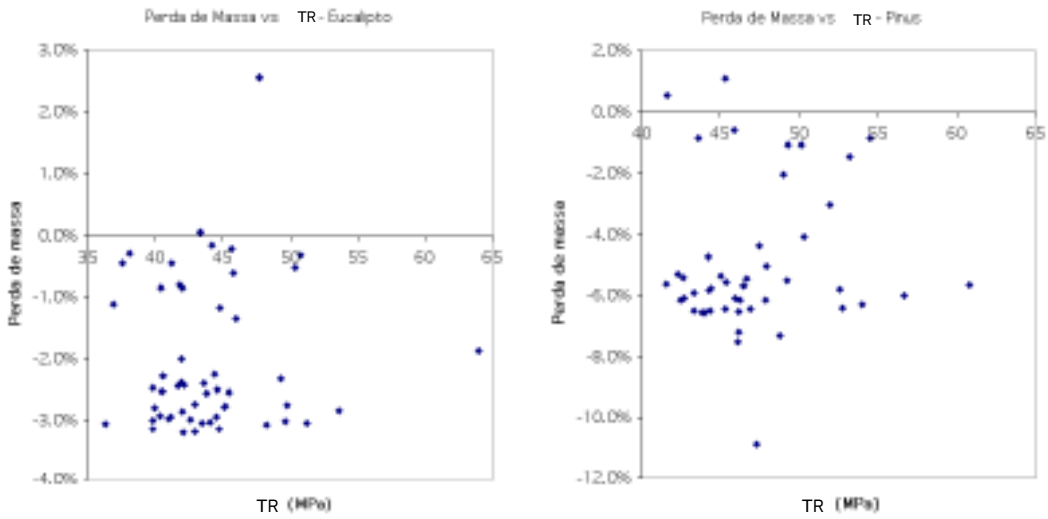


Figura 43: (esquerda) correlação entre Perda de massa e TR para os corpos-de-prova de eucalipto.

Figura 44: (direita) correlação entre Perda de massa e TR para os corpos-de-prova de pinus.

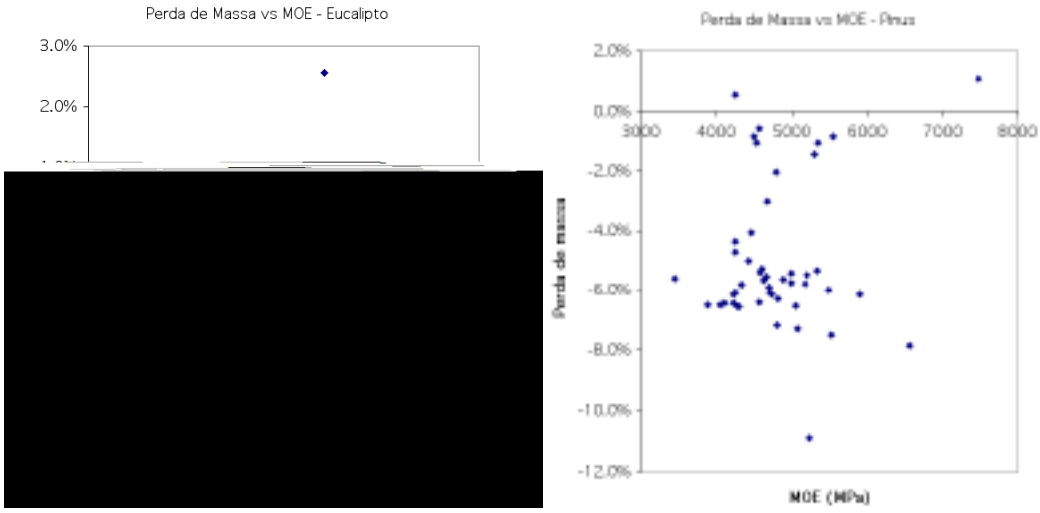


Figura 45: (esquerda) correlação entre Perda de massa e MOE para os corpos-de-prova de eucalipto.

Figura 46: (direita) correlação entre Perda de massa e MOE para os corpos-de-prova de pinus.

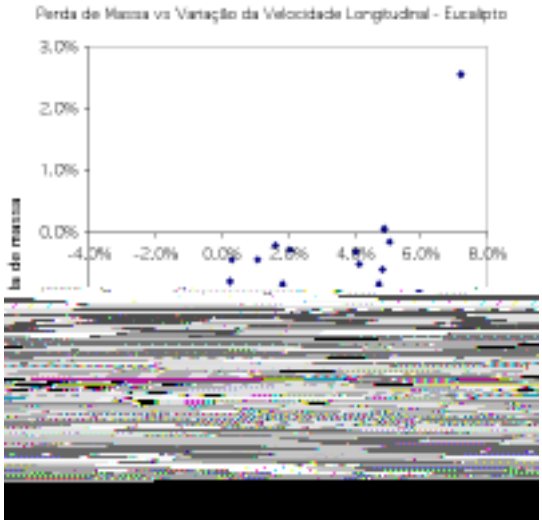


Figura 47: (esquerda) correlação entre Perda de massa e Variação da Velocidade Longitudinal entre os momentos 1 e 2, para os corpos-de-prova de eucalipto.

Figura 48: : (direita) correlação entre Perda de massa e Variação da Velocidade Longitudinal entre os momentos 1 e 2, para os corpos-de-prova de pinus.

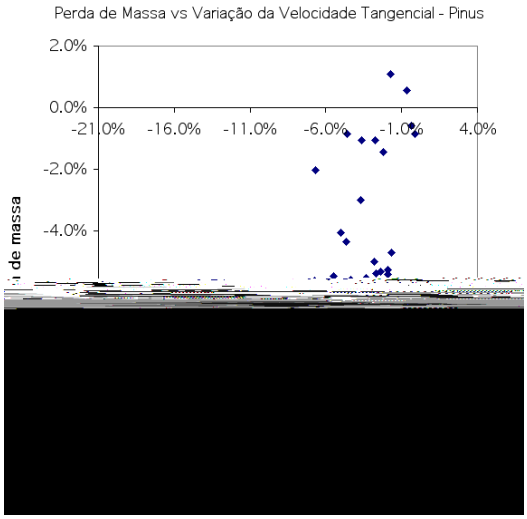


Figura 49: (esquerda) correlação entre Perda de massa e Variação da Velocidade Tangencial entre os momentos 1 e 2, para os corpos-de-prova de eucalipto.

Figura 50: (direita) correlação entre Perda de massa e Variação da Velocidade Tangencial entre os momentos 1 e 2, para os corpos-de-prova de pinus.

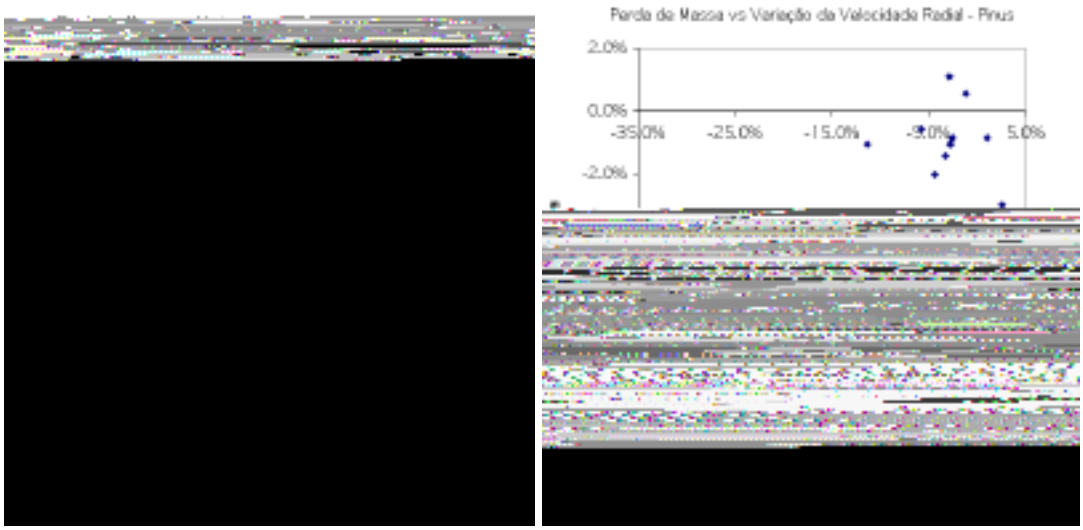


Figura 51: (esquerda) correlação entre Perda de massa e Variação da Velocidade

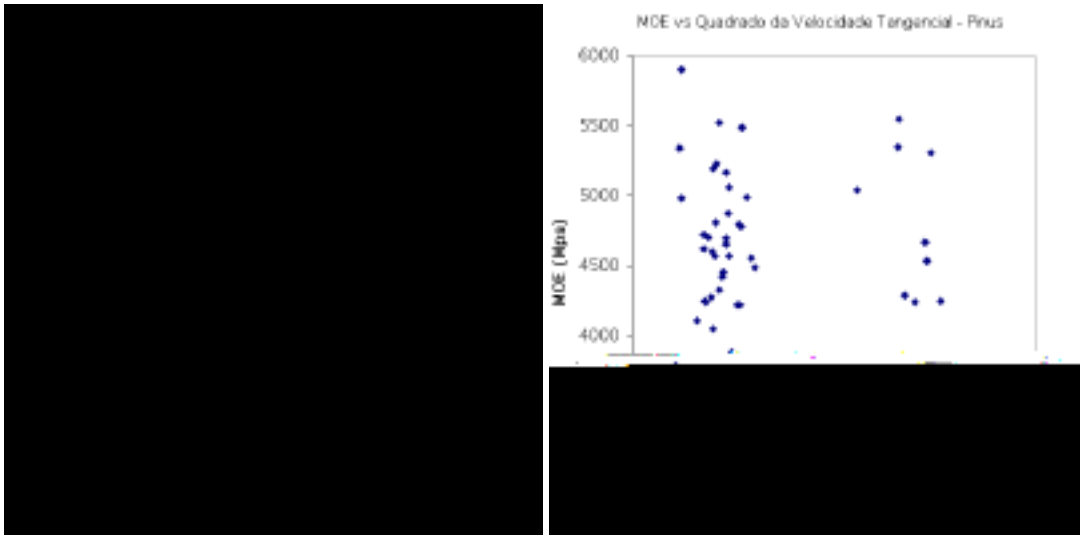


Figura 55: (esquerda) correlação entre MOE o Quadrado da Velocidade Tangencial para os corpos-de-prova de eucalipto.

Figura 56: (direita) correlação entre MOE o Quadrado da Velocidade Tangencial para os corpos-de-prova de pinus.

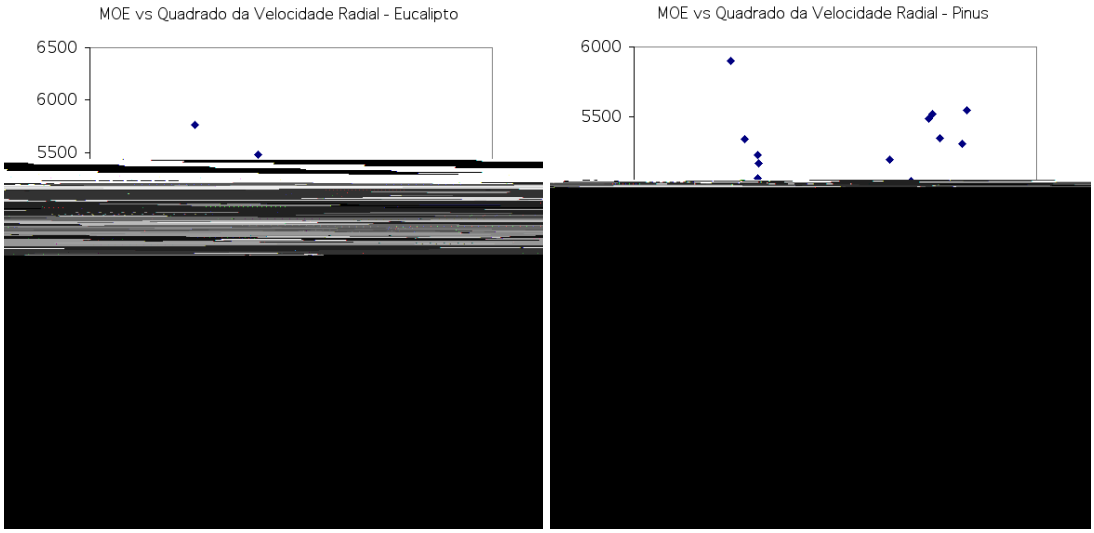


Figura 57: (esquerda) correlação entre MOE o Quadrado da Velocidade Radial para os corpos-de-prova de eucalipto.

Figura 58: (direita) correlação entre MOE o Quadrado da Velocidade Radial para os corpos-de-prova de pinus.

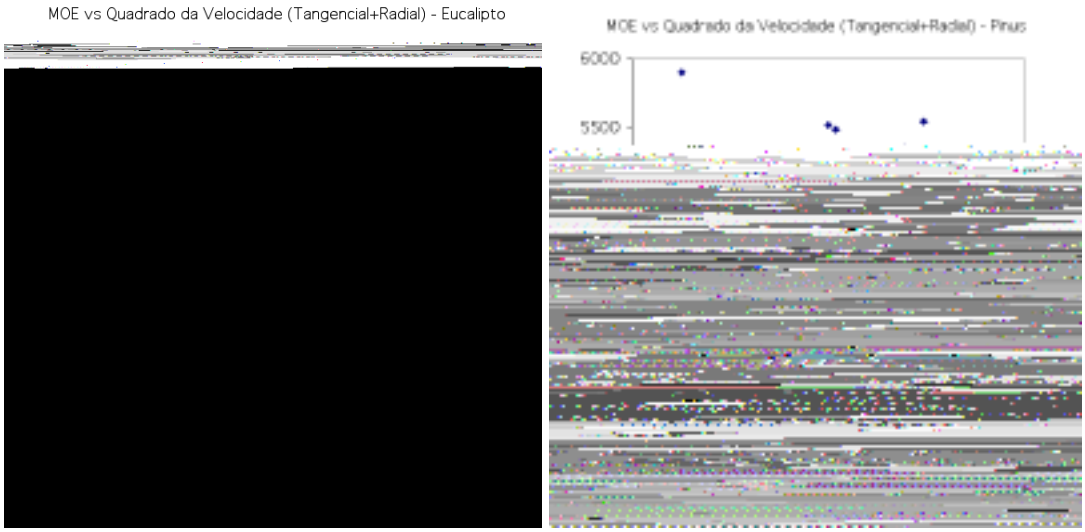


Figura 59: (esquerda) correlação entre MOE o Quadrado da soma das Velocidades Tangencial e Radial para os corpos-de-prova de eucalipto.

Figura 60: (direita) correlação entre MOE o Quadrado da soma das Velocidades Tangencial e Radial para os corpos-de-prova de pinus.

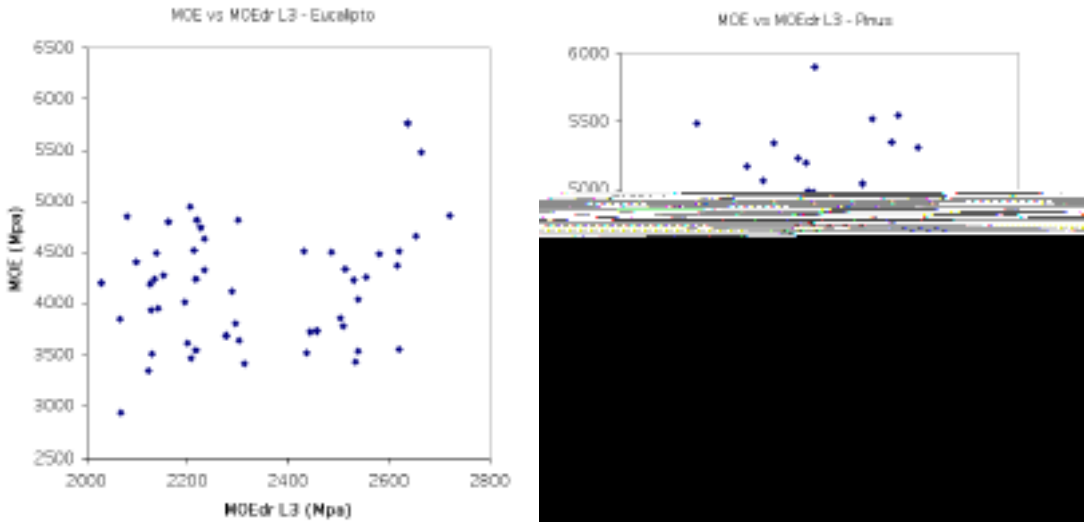


Figura 61: (esquerda) correlação entre MOE o Módulo de Elasticidade Dinâmico para referência na direção L3, para os corpos-de-prova de eucalipto.

Figura 62: (direita) correlação entre MOE o Módulo de Elasticidade Dinâmico para referência na direção L3, para os corpos-de-prova de eucalipto.

Embora a representação gráfica seja uma das formas mais indicadas de se visualizar uma possível correlação entre duas variáveis, ela traz um limite máximo de variáveis que possam ser analisadas criticamente em um espaço. Procurando possíveis correlações entre os dados que não tenham sido esperadas com base na teoria, fez-se uma tabela (apresentada em anexo) com os coeficientes de determinação e a inclinação da correlação entre diversos dados com a perda de massa, MOE e TR. Os dados analisados foram as velocidades, o quadrado das velocidades, a variação das velocidades, o quadrado da variação das velocidades, as densidades e os próprios MOE e TR. Em um segundo instante, pretendia-se representar graficamente estes resultados para uma análise mais detalhada, desde que mostrassem coeficientes de determinação superiores a 0,4 e inclinação sensível entre os dados. Todavia, tais condições não foram atingidas por dados que ainda não tivessem sido analisados neste capítulo.

Conclui-se assim que as correlações buscadas não foram observadas neste estudo. Credita-se este fato às ocorrências que seguem:

- houve uma variação reduzida na perda de massa (%), de forma que não se pôde detectar sua influência em uma provável mudança das propriedades mecânicas, sendo portanto impossível correlacionar um ensaio não destrutivo com tal alteração;

- as medidas de MOE foram realizadas com extensômetros que abrangiam a deformação de todo o aparato, não apenas do corpo-de-prova, além de abranger regiões dos próprios corpos-de-prova com uma distribuição de tensões heterogênea (princípio de Saint-Venant). Esta variável pode dificultar sua relação com outros dados;

- as duas madeiras experimentadas tinham densidades semelhantes, diminuindo o espectro de análise desta variável;

- a umidade das madeiras utilizadas estava demasiadamente baixa em relação à umidade de serviço, possivelmente conduzindo a mecanismos de fratura não típicos e encobrindo a influência dos defeitos;

- a velocidade de propagação de ultra-som no sentido radial e tangencial se indica mais sensível para a avaliação de galerias de cupins e das fissuras de secagem, uma vez que estas de estendem no sentido longitudinal.

Pode-se também concluir que, na umidade utilizada para o eucalipto e para o pinus na ocasião dos ensaios mecânicos, um ataque por cupins de solo em seu estado inicial, tendo causado perdas de massa da ordem de 3% e 8% respectivamente, não procou depreciação das propriedades mecânicas à compressão paralela às fibras.

5 Discussão, conclusões e recomendações

O medo talvez seja um dos sentimentos originais da natureza humana. O medo só enxerga as consequências negativas de um possível evento. Já o risco é o medo municiado de dados e de teorias que permitem enxergar a probabilidade de que um evento ocorra.

Uma das aptidões da engenharia é justamente calcular os riscos e fazer com que um evento de consequências negativas tenha uma baixa probabilidade de ocorrer. Todavia, quando o conhecimento é zero, o risco é absoluto.

Neste trabalho foram exploradas duas frentes para se aumentar o conhecimento sobre estruturas de madeira de edificações em serviço, de forma a poder melhor calcular seus riscos de falha e melhor conservá-la, evitando trocar partes da estrutura sem base científica, apenas por medo.

Conclui-se que a metodologia de inspeção de carpintarias de edificações é não só uma forma de garantir que os dados necessários sejam levantados, permitindo a aplicação das teorias de estruturas, como uma forma de evitar inspeções recorrentes, para rever este ou aquele detalhe esquecido na primeira inspeção e necessário a verificação da segurança. Indo além dos requisitos de engenharia, a metodologia de inspeção proposta procura fornecer dados para o registro arquitetônico e histórico da obra, bem como para

Já a outra frente explorada, o uso de ensaios não destrutivos com velocidade de ultra-som para determinação das propriedades mecânicas de madeiras deterioradas por cupins, não pode aqui ter conclusões definitivas, devido às limitações apresentadas na conclusão parcial sobre este tópico. Todavia, ao aprofundar os estudos para verificar a validade da técnica e mesmo incrementá-la com a análise da atenuação e espectro do sinal de ultra-som, a metodologia apresentada, uma vez corrigida, poderá fornecer subsídios para a condução de experimentos futuros.

Sobre a avaliação da deterioração por cupins empregando a velocidade de propagação do ultra-som, percebe-se que ainda há um grande potencial no campo dos ensaios não-destrutivos. Especialmente ao considerar o superior estado da arte dos exames não-intrusivos da medicina, que empregam muitas vezes princípios físicos semelhantes aos de engenharia, embora os equipamentos médicos não exijam a portabilidade necessária para inspeções de campo.

Conclui-se que não foi possível correlacionar a velocidade de propagação do ultra-som com as propriedades mecânicas uma vez que estas últimas não foram significativamente afetadas pela degradação provocada. Todavia há indícios de boa sensibilidade do ultra-som nas direções tangencial e radial para estes desgastes, o que mostra potencial para aprofundamento de estudos.

Recomenda-se em trabalhos futuros procurar formas de obter uma gama de perdas de massa maior por ataques de cupins, com o objetivo de obter uma variação maior da depreciação das propriedades mecânicas, bem como do ensaio não-destrutivo utilizado. O uso de mais espécies de madeira, com densidades diferentes e resitências ao ataque diferentes pode ser uma forma de abranger uma maior espectro de ultra-som e

Do ponto de vista dos ensaios não-destrutivos, recomenda-se o uso de outras variáveis possíveis do ultra-som, como a atenuação e o espectro de ondas, de forma a procurar uma maior sensibilidade neste ensaio. Outra possibilidade será utilizar diferentes técnicas de ensaios não destrutivos para comparar resultados ou mesmo tornar suas medidas complementares através de uma correlação múltipla.

Quanto à exposição aos cupins, sugere-se aprofundar os estudos sobre o meio acoplante, procurando formas que influenciem ainda menos a ação dos cupins. Será de grande importância desenvolver um ensaio que permita obter um ataque mais severo aos corpos-de-prova em menos tempo, de forma a propiciar a desejada ampla gama de perdas de massa. O uso de colônias completas, no lugar de sub-colônias é uma possibilidade para atingir este objetivo. Será sempre muito importante, todavia, que as necessidades de pesquisa do laboratório de biologia se casem com as necessidades do laboratório de engenharia, para garantir o sucesso da parceria.

Finalmente, como conclusão igualmente importante, ressalta-se o sucesso dos trabalhos realizados em conjunto com instituições de outras especialidades, nominalmente IPHAN e a UNESP. Foram experiências enriquecedoras pelo seu caráter multidisciplinar, além de serem bons exemplos de sinergia, onde o resultado foi maior do que soma das partes, tendo a sociedade como maior beneficiada.

6 Anexos

Tabela de correlações, apresentando os valores de r^2 e das inclinações "B" para amostras de eucalipto (E) e pinus (P), dentro de um intervalo de 95% de confiança.

	∂m E		∂m P		MOR (E)		MOR (P)		MOE (E)		MOE (P)	
	r^2	B	r^2	B	r^2	B	r^2	B	r^2	B	r^2	B
vL 1	0,04	0,00	0,06	0,00	0,03	0,00	0,07	-0,01	0,03	0,60	0,01	0,64
vT 1	0,09	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	-0,14	0,03	3,98
vR 1	0,11	0,00	0,08	0,00	0,02	0,00	0,02	-0,01	0,01	0,51	0,07	-2,79
vL 2	0,01	0,00	0,01	0,00	0,11	0,01	0,07	-0,01	0,07	1,03	0,00	-0,29
vT 2	0,15	0,00	0,10	0,00	0,01	0,00	0,07	-0,03	0,01	-0,44	0,08	-4,07
vR 2	0,14	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,34	0,01	-0,44
vL 3	0,01	0,00	0,00	0,00	0,07	0,01	0,11	-0,02	0,02	0,54	0,01	-0,73
vT 3	0,16	0,00	0,15	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,03	-0,59	0,00	0,23
vR 3	0,09	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,54	0,02	-0,33
∂ vL 2-3	0,00	0,05	0,16	0,65	0,00	-20,6	0,03	52,11	0,03	-6751	0,00	-407
∂vT 2-3	0,02	0,20	0,18	0,08	0,19	-192	0,06	7,70	0,17	-24E3	0,00	-18,4
∂vR 2-3	0,02	0,17	0,07	0,06	0,07	-118	0,00	1,48	0,01	-6878	0,02	686,6
∂vL 1-2	0,01	-0,06	0,01	-0,13	0,02	31,19	0,06	83,66	0,00	-604	0,01	4351
∂vT 1-2	0,00	0,00	0,07	0,27	0,01	-18,0	0,16	-76,7	0,00	-1498	0,10	-7955

	MOE (E)		MOE (P)	
B	r^2	B	r^2	B
6,99	0,07	-5180	0,01	1356
22,6	0,00	-935	0,00	-2567
4,02	0,06	-6227	0,03	1248
1,67	0,08	-5522	0,01	-502
1,00	0,50	94,08	0,31	74,81
0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,02	0,00	0,13	0,00	-0,21
0,01	0,01	0,20	0,01	0,46
0,00	0,00	-0,18	0,02	0,72
0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
0,00	0,00	0,00	0,07	0,00
0,00	0,07	0,00	0,00	0,00
0,00	0,01	0,00	0,08	0,00

0,00 (0,00)TjET1529 1630 265.44 0,00 1256.086 T TD

56.20627 9TD (0.00)TjET1529 3f017.28 ref BT T

	∂m E		∂m P		MOR (E)		MOR (P)		MOE (E)		MOE (P)	
	r^2	B	r^2	B	r^2	B	r^2	B	r^2	B	r^2	B
$(\partial vT2\text{-}3)^2$	0,02	0,10	0,17	0,03	0,19	-95,7	0,06	3,25	0,17	-12E3	0,00	-18,9
$(\partial vR2\text{-}3)^2$	0,02	0,08	0,06	0,02	0,07	-59,1	0,00	0,31	0,01	-3400	0,02	267,7
$(\partial vL1\text{-}2)^2$	0,01	-0,03	0,01	-0,06	0,02	15,08	0,06	39,70	0,00	-290	0,01	2087
$(\partial vT1\text{-}2)^2$	0,00	0,00	0,07	0,14	0,01	-8,61	0,16	-40,1	0,00	-733	0,10	-4133
$(\partial vR1\text{-}2)^2$	0,00	-0,01	0,04	0,05	0,02	-10,7	0,01	-3,65	0,06	-2473	0,01	709
$(\partial vL1\text{-}3)^2$	0,01	-0,03	0,21	0,43	0,03	20,49	0,11	59,47	0,00	-424	0,00	-1203
$(\partial vT1\text{-}3)^2$	0,01	-0,03	0,28	0,09	0,07	-24,1	0,07	8,66	0,06	-3002	0,03	800,1
$(\partial vR1\text{-}3)^2$	0,00	0,01	0,12	0,04	0,05	-16,3	0,00	-0,80	0,08	-2639	0,01	-266
vT1+vR1	0,02	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,01	0,00	0,12	0,02	-1,49
$(vT1+vR1)^2$	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
vT2+vR2	0,02	0,00	0,11	0,00	0,01	-0,01	0,03	-0,01				

	∂m E		∂m P		MOR (E)		MOR (P)		MOE (E)		MOE (P)	
	r^2	B	r^2	B	r^2	B	r^2	B	r^2	B	r^2	B
(vT3+ vR3)^2	0,01	0,00	0,26	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00
Densidade 1	0,07	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	-0,03	0,03	-3,12	0,00	0,21
Dendidade 2	0,21	0,00	0,41	0,00	0,01	0,01	0,05	0,06	0,00	-0,66	0,01	3,29

7 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas. **NORMA NBR 7190:1997. Projeto de estruturas de madeira** Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 1997.

AVAT, F. (Coord.). **Le traitement des bois dans la contruction – termite, capricorne, lyctus, vrillette, syrex, mérule… comment s'en débarrasser?.** Paris: Éditions Eyrolles/ CTBA, 1996. 140p.

BEALL,F.C. Future of nondestructive evaluation of wood and wood-based materials. **Holzforschung-und-Holzverwertung**, Austria, v.48, no.5, 1996, p.73-75,

BERRY, R:W. . **Remendial tretament of wood rot and insect attack in buildings.** Building Research establishment. Garston, Watford. 1994, 122pp.

BONAMINI, G., **Restoring timber structures – inspection and evaluation**. STEP/ EUROFORTECH, vol.2, 1995.

EMERSON et al. Nondestructive evaluation techniques for timber bridges. In: 5th World Conference on Timber Engineering, Montreux, 1998, pp. **Proceedings…** Montreux, 1998. p.670-677

FERRANTI, M. **Seleção de Materiais**. São Carlos: Ea998. p.670-677

ROSS, R.J. et al. Stress wave NDE of biologically degraded wood. In: International Wood Engineering Conference, 1996, New Orleans. **Proceedings…**, New Orleans, 1996. vol.3, p.213-217.

SEABY, D. **Calculating density of wood from Sibert microProbe readings**. Guildford: Sibert Technology Limited.

SHAJI, T.; SOMAYAJI, S.; MATHEWS, M.S. Ultrasonic pulse velocity technique for inspection and evaluation of timber. **Journal of materials in civil engineering,** BaltiTRe, maio 2000. p. 180-185

SINGH, J. Environmental Monitoring and Control. **Building Conservation**, Wiltshire, Disponível em: <http://www.buildingconservation.com/articles/ damp/EnvMon.htm>, visitado em 6 de fevereiro de 2001

SMULSKI, S. Wood fungi - Causes and cures. **Journal of Light Construction**, New England Edition, 1993. p.22-26,

SMULSKI, S. A Builder's Guide to Wood-Destroying Insects. **Journal of Light Construction,** New England Edition, September 1993b

SMULSKI, S. Controling Indoor Moisture Source in Wood-Frame Houses. **Wood Design Focus**, Madison, 1997.

TANAKA, T. Wood inspection by thermography. In: Wood NDT-2000 – 12th International Symposium on non-destructive testing of wood, Buxton, 2000. **Procedings…,** Buxton, Vol6. No. 03., 2000. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/v06n03/tanaka/tanaka.htm>, Acesso em: 25 de maio de 2001.

TOGNI, M. **Elasticità e resistenza di travi lignee antiche di grande sezione: stima con metodologie non distruttive applicabili in opera**. 1995. Tese (doutoramento em Ricerca in Scienze del Legno), Università degli Studi di Firenze, Firenze.

TRAITEMENT des bois: une révolution dans la prévention des termites (1ère partie). **Revue du Bois**, No. 6 (septembre), 1995. p.40-43

TRUSTY, W. B.; MEIL, J. K. Building life cycle assessment: residential case study. In: AIA Conference, Chattanooga, 1999. **Proceedings**… Chattanooga, 1999. Disponível em <http://www.athenasmi.ca/papers/down_papers/ ATH_AIA_paper.pdf> , Acesso em: 18 de abril de 2001

WEAVER, ME; Matero, FG. **Conserving buildings: guide to techniques and materials**. Nova York: ed. John Wiley and Sons Inc., 1993. 270p.

WILLAMSON,T.; et al. **Environmentally friendly housing using timber – principles**. Australia, National Timber Development Council, 2001. 16p

8 Bibliografia indicada

CHARLES, F.W.B. CHARLES, M. **Conservation of timber buildings,** 2ª ed. Shaftesbury: Donhead Publishing Ltd, 1995. 256p.

LARSEN, K.E. MARSTEIN N. **Conservation of historic timber structures: an ecological approach**. London: Ed. E&FN Spon, 2000. 250p.

RIDOUT, B. **Timber decay in buildings: the conservation approach to treatment** London: Ed. E&FN Spon, 2000. 250 p.

ROBSON, P. **Structural Repair of Traditional Buildings**. Shaftesbury: Donhead Publishing Limited, 1999. 318 p.

9 Software utilizado

ADOBE SYSTEMS INC. **Adobe Photoshop 5.0, v.5.0.2 PowerPC**. San Jose, Ca. c.1989-1998. CD. Software de processamento de imagens.

APPLE COMPUTER INC. **AppleWorks 6.0.4**. Palo Alto, CA. c.1991-2000. CD. Edição de texto, imagens, desenhos e planilha de cálculo.

COMPUNeering Inc. **MiniCAD7.** Columbia, MD. c.1997. Projeto auxiliado por computador.

COMPUTERS&STRUCTURES INC. **SAP2000.** Berkley, Ca, 2000. CD. Software de elementos finitos para engenharia estrutural.

COURTOIS, F.; STEER, S.; CHANCELIER, J.P. **SciLab v 2.1 Scientific Laboratory.** Massy. Disponível em: <ftp.iria.fr/IRIA/SciLab/contrib/Mac> Acesso em: fevereiro 2002. Software gratuito para cálculos matemáticos.

CRICKET SOFTWARE. **Cricket Graph Version 1.3**. Malvern, PA., c.1986-88. Disquette 3 1/2 polegadas. Tratamento de dados, regressão e gráficos.

GARY SMITH. **Smith's statistical package**. Claremont, Ca. c.1995-2001. Disponível em <http://www.economics.pomona.edu/StatSite/framepg.html>, Acesso em: março, 2002. Software gratuito para análise estatística.

JIM MATTHEWS. **FETCH- FTP FOR THE MACINTOSH.** Hanover, NH. c.1997. Disponível em: <ftp://ftp.dartmounth.edu>, Acesso em: fevereiro, 2001. Software gratuito para transmissão de dados pelo protocolo FTP.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Word 98, Macintosh Edition.** Redmond, Wa, c1983-1998. CD. Editor de textos.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Word 98, Macintosh Edition.** Redmond, Wa, c1985-1998. CD. Planilha de cálculo.

NETSCAPE COMMUNICATION COORP. **Netscape communicator 4.75.** Mountain View, CA., c.1994-2000. Zip Drive. Navegação na internet.

10 Apêndices

(A) tabela de dimensões médias e massas dos corpos-de-prova.

CP	massa1	massa2	L1	T1	R1	L3	T3	R3
unidade	g	g	mm	mm	mm	mm	mm	mm
E01	19,200	18,686	31,89	29,12	29,84	32,0	30,1	30,6
E02	19,234	18,716	32,02	28,94	29,72	32,2	30,1	30,4
E03	20,650	20,657	31,82	29,19	29,43	32,0	29,9	30,5
E04	20,562	20,438	31,51	29,16	29,51	31,8	29,7	30,2
E05	19,024	18,59	31,32	27,87	29,42	31,5	28,9	30,2
E06	18,544	18,028	31,14	28,15	29,48	31,3	29,4	30,1
E07	19,170	18,693	30,89	28,28	29,63	31,0	29,2	30,5
E08	18,449	18,505	30,69	28,22	29,40	30,7	29,4	30,5
E09	18,243	17,705	31,25	28,19	29,38	31,4	29,2	30,2
E10	17,933	17,926	30,54	28,37	29,54	30,6	29,5	30,6
E11	19,277	19,238	31,56	28,73	30,20	31,7	30,1	30,9
E12	19,156	18,628	31,26	27,89	29,65	31,4	29,0	30,3
E13	19,438	18,947	31,32	28,08	29,49	31,4	28,9	30,0
E14	19,904	19,315	32,15	29,33	29,92	32,3	30,4	30,3
E15	20,586	20,544	31,94	29,11	29,91	32,0	30,5	30,6
E16	19,300	18,74	31,58	27,98	29,58	31,7	29,0	30,2
E17	20,520	20,162	32,04	29,07	29,43	32,2	29,9	30,3
E18	19,828	19,657	30,92	29,16	29,13	31,3	29,7	30,0
E19	18,445	17,928	31,20	28,18	29,53	31,4	29,4	30,3
E20	19,703	19,132	31,94	28,96	29,98	32,1	30,1	31,0
E21	18,879	18,775	31,34	28,10	29,60	31,4	29,4	30,5
E22	20,508	20,046	31,97	29,10	29,22	32,1	29,8	29,8
E23	21,519	21,087	32,10	29,08	29,44	32,2	29,6	30,1
E24	19,860	19,432	30,45	28,94	29,31	30,7	30,2	29,4
E25	19,543	19,049	31,92	29,21	29,81	32,0	30,5	30,5
E26	19,136	18,601	31,85	29,08	29,85	31,9	30,3	30,6
E27	20,627	20,162	32,10					

CP	massa1	massa2	L1	T1	R1	L3	T3	R3
unidade	g	g	mm	mm	mm	mm	mm	mm
E32	19,307	18,814	31,96	29,05	29,94	32,0	30,1	30,6
E33	19,472	19,046	31,71	29,02	30,06	31,8	30,3	31,1
E34	19,237	18,794	32,01	29,00	29,81	32,1	30,2	30,6
E35	20,549	20,101	31,87	29,14	29,41	31,9	29,8	30,2
E36	20,077	19,632	31,91	29,30	29,78	32,0	30,4	30,3
E37	20,599	20,171	31,95	29,08	29,40			
E38	20,155	19,689	31,92	29,23	29,66	32,0	30,4	30,3
E39	20,163	19,752	31,42	28,99	29,66	31,5	30,1	30,0
E40	20,844	20,508	32,21	29,06	29,50	32,3	29,6	30,2
E41	18,568	18,068	30,86	27,96	29,14	31,0	28,9	29,7
E42	19,093	18,614	31,54	27,92	29,50	31,6	29,1	30,2
E43	20,480	20,042	31,71	29,10	29,51	31,9	29,7	30,1
E44	20,055	19,536	31,10	29,04	28,96	31,2	29,4	29,8
E45	19,763	19,273	31,88	29,02	29,89	31,9	29,9	30,5
E46	19,159	18,618	31,83	28,96	29,94	31,9	29,9	30,5
E47	19,863	19,323	31,92	29,30	29,88	31,2	30,5	30,6
E48	19,336	19,881	31,77	29,34	30,03	32,0	30,6	30,5
E49	20,499	20,518	31,64	29,06	29,48	31,7	30,1	29,6
E50	20,637	20,623	31,95	29,25	29,15	32,0	29,9	29,5
E51	18,323	18,272	30,71	28,46	29,55	30,8	29,4	30,2
E52	19,062	18,947	31,83	29,05	29,90	31,9	29,8	30,4
E53	18,213	18,046	30,82	28,34	29,49	30,9	29,2	30,4
E54	20,766	20,69	32,11	29,26	29,39	32,2	29,7	30,0
E55	19,713	19,496	31,71	28,04	29,67	31,7	29,0	30,2
E56	18,776	18,479	31,33	28,22	29,59	31,4	29,2	29,8
E57	19,752	19,496	31,42	28,79	29,14			
Etst01						31,7	29,3	30,0
Etst02						29,3	28,2	29,4
Etst03						32,0	28,2	29,5
P01	17,967	16,967	33,41	28,43	29,13	33,6	29,2	28,6
P02	17,281	15,966	31,77	29,04	28,43	31,3	29,0	28,4
P03	18,234	16,297	33,65	28,90	28,41	31,9	29,2	28,4
P04	17,141	15,933	31,53	29,05	28,42	31,7	29,2	28,3
P05	17,637	16,694	31,87	29,12	28,46	32,0	29,2	28,4
P06	17,214	16,754	31,94	29,19	28,44	32,1	29,3	28,4
P07	17,351	16,389	31,53	29,08	28,41	31,7	29,2	28,5

CP	massa1	massa2	L1	T1	R1	L3	T3	R3
unidade	g	g	mm	mm	mm	mm	mm	mm
P08	17,583	17,504	31,91	29,20	28,35	32,0	29,1	28,4
P09	18,413	17,306	33,68	28,99	28,50	33,8	29,2	28,4
P10	17,475	17,345	31,53	29,15	31,52	31,7	29,3	28,4
P11	17,671	17,534	31,62	29,08	28,58	31,9	29,1	28,5
P12	17,633	16,599	31,79	29,13	28,32	31,9	29,3	28,2
P13	17,852	16,734	31,48	29,31	28,56	31,6	29,4	28,5
P14	17,363	16,249	31,76	28,98	28,51	31,9	28,9	28,4
P15	17,625	16,592	31,40	29,50	28,40	31,5	29,8	28,4
P16	17,807	17,524	32,55	29,60	28,18	32,7	29,0	28,2
P17	16,428	15,300	31,13	29,17	28,39	31,3	29,1	28,5
P18	18,355	17,205	32,86	29,42	28,37	33,0	29,9	28,4
P19	17,400	16,476	31,53	29,16	28,45	31,6	29,1	28,4
P20	17,404	18,180	32,47	29,58	28,46	32,9	29,6	28,4
P21	17,030	15,996	31,30	29,53	27,62	31,4	29,8	28,2
P22	16,877	16,743	32,71	29,38	27,97	32,8	29,6	27,9
P23	17,736	16,610	31,46	29,13	28,27	31,7	29,3	28,3
P24	18,111	18,001	33,52	29,24	28,35	33,7	29,4	28,4
P25	17,679	16,855	31,69	29,07	28,44	31,9	29,3	28,3
P26	16,950	15,841	32,03	29,04	28,20	32,2	29,1	28,1
P27	17,705	16,718	31,35	29,37	28,58	31,5	29,4	28,6
P28	17,626	16,634	31,62	29,21	28,49	31,7	29,3	28,5
P29	16,586	15,610	31,59	29,07	27,94	31,8	29,2	27,8
P30	17,596	16,472	31,70	29,09	28,41	31,8	29,1	28,3
P31	17,211	16,374	32,50	29,41	28,18	32,7	29,7	28,1
P32	18,701	17,792	33,68	29,44	28,47	33,9	29,5	28,3
P33	17,543	16,605	31,61	29,19	28,61	31,8	29,4	28,4
P34	17,844	17,168	31,75	29,53	28,48	31,9	29,2	28,5
P35	17,031	16,190	32,49	29,36	28,04	32,7	29,4	27,9
P36	17,428	16,347	31,60	29,10	28,53	31,7	29,2	28,5
P37	17,587	16,689	31,65	29,10	28,55	31,8	29,1	28,5
P38	17,671	16,680	31,93	29,11	28,50	32,2	29,1	28,4
P39	17,726	16,773	32,70	29,17	28,20	32,9	29,4	28,3
P40	18,885	17,996	33,78	29,37	28,54	33,9	29,7	28,5
P41	17,033	17,269	31,10	29,05	28,52	33,8	28,9	28,4
P42	18,266	17,157	32,61	29,02	28,37	33,1	29,2	28,3
P43	17,415	16,331	31,70	28,86	28,54	31,8	29,3	28,4

CP	massa1	massa2	L1	T1	R1	L3	T3	R3
unidade	g	g	mm	mm	mm	mm	mm	mm
P44	17,638	16,614	31,68	28,94	28,54	31,8	29,1	28,6
P45	17,680	18,840	31,82	29,11	28,58	34,1	29,5	28,5
P46	18,962	17,588	33,79	29,38	28,53	32,0	29,1	28,6
P47	17,503	16,808	31,90	29,15	28,46	32,0	29,0	28,5
Ptst01						28,4	29,4	28,7
Ptst02						26,9	29,8	28,8
Ptst03						32,0	29,2	28,4

(B) tabela de tempos de transmissão de ultra-som dos corpos-de-prova (μs)

CP	vL1	vT1	vR1	vL2	vT2	vR2	vL3	vT3	vR3
E01				5.5	20.2	14.1	5.5	20.2	14.0
E02				5.6	19.9	13.7	5.6	20.0	13.7
E03	5.5	16.0	16.7	5.5	16.4	15.9	5.4	16.5	15.8
E04	5.6	16.5	15.7	5.5	16.4	15.4	5.4	16.4	15.4
E05	5.5	19.0	14.0	5.3	18.7	13.9	5.3	18.8	13.9
E06	5.7	19.5	13.8	5.9	19.3	13.5	5.4	19.4	13.6
E07	5.6	18.4	14.9	5.4	18.1	14.3	5.4	18.1	14.5
E08	5.5	18.2	14.8	5.3	17.5	14.4	5.4	17.5	14.6
E09	5.7	19.7	14.0	5.4	19.6	13.6	5.5	19.5	13.6
E10	5.5	17.5	15.4	5.4	17.2	14.6	5.4	17.0	14.7
E11	5.6	19.8	14.7	5.6	19.3	14.1	5.5	19.1	14.1
E12	5.4	19.5	14.1	5.2	19.3	14.0	5.3	19.3	14.0
E13	5.3	19.3	13.9	5.3	19.0	13.7	5.2	19.0	13.7
E14	5.8	20.7	14.0	5.7	21.2	13.6	5.6	21.5	13.7
E15	5.7	20.4	13.9	5.6	20.1	13.5	5.6	20.1	13.4
E16	5.4	19.0	14.0	5.3	19.1	13.7	5.2	19.2	13.8
E17	5.6	16.7	15.5	5.4	16.7	15.3	5.4	16.8	15.3
E18	5.4	16.9	15.5	5.3	16.4	15.4	5.3	16.4	15.3
E19	5.7	19.7	14.0	5.5	19.4	13.4	5.5	19.6	13.6
E20	5.9	19.2	15.6	5.6	19.1	14.8	5.6	18.8	14.7
E21	5.5	19.3	14.0	5.5	19.0	13.6	5.5	19.1	13.5
E22	5.5	16.6	13.8	5.4	16.6	15.5	5.4	16.7	15.5
E23	5.5	16.6	15.1	5.4	16.5	15.2	5.4	16.8	15.0
E24	5.4	17.0	15.5	5.2	16.5	15.2	5.3	16.8	15.4
E25	5.8	20.2	14.2	5.5	20.0	13.7	5.5	20.1	13.7
E26	5.7	20.6	14.6	5.5	20.4	13.9	5.5	20.7	14.2
E27	5.6	16.8	15.3	5.4	16.7	15.2	5.4	16.8	15.1
E28	5.7	19.8	14.1	5.5	19.3	13.5	5.5	19.4	13.6
E29	5.6	19.0	14.9	5.5	18.5	14.4	5.5	18.6	14.3
E30	5.5	17.7	15.3	5.4	17.3	14.7	5.4	17.3	14.8
E31	5.7	20.3	14.0	5.5	20.1	13.6	5.5	20.4	13.7
E32	5.8	20.1	14.4	5.5	20.3	13.7	5.6	20.2	14.0
E33	5.8	19.5	15.3	5.5	19.5	14.6	5.0	19.4	14.6

CP	vL1	vT1	vR1	vL2	vT2	vR2	vL3	vT3	vR3
E34	5.7	20.4	14.4	5.6	20.0	14.0	5.6	20.4	14.6
E35	5.4	16.7	15.9	5.4	16.5	15.6	5.4	16.8	15.7
E36	5.7	20.4	14.1	5.5	20.0	13.5	5.5	20.2	13.6
E37	5.5	16.3	16.4	5.3	16.1	16.2	5.4	16.5	16.3
E38	5.8	20.2	13.7	5.5	19.7	13.3	5.6	20.0	13.5
E39	5.7	19.9	13.7	5.5	19.6	13.3	5.5	20.2	13.5
E40	5.6	16.8	13.6	5.4	16.5	15.3	5.4	16.6	15.8
E41	5.4	19.3	14.0	5.3	18.9	13.7	5.4	19.2	13.7
E42	5.5	19.1	14.1	5.3	18.7	13.7	5.3	19.0	14.0
E43	5.6	16.5	15.7	5.4	16.4	15.2	5.4	16.3	15.3
E44	5.5	16.6	15.6	5.2	16.3	15.1	5.3	16.3	15.4
E45	5.8	19.7	14.3	5.7	19.2	13.9	5.7	19.5	14.1
E46	5.8	19.8	14.4	5.6	19.3	13.7	5.7	19.5	13.7
E47	5.7	20.6	14.0	5.4	20.1	13.6	5.6	20.0	13.8
E48	5.8	20.5	14.1	5.4	19.9	13.4	5.5	20.1	13.5
E49	5.5	16.9	15.7	5.2	16.7	15.7	5.3	17.0	15.9
E50	5.5	17.1	15.5	5.3	16.8	15.5	5.3	17.0	15.6
E51	5.6	19.4	14.5	5.4	19.7	14.2	5.4	19.6	14.2
E52	5.7	20.2	14.3	5.5	20.1	13.9	5.6	20.2	14.1
E53	5.6	17.7	15.5	5.4	17.3	14.9	5.5	17.4	15.1
E54	5.6	16.6	16.3	5.3	16.6	16.2	5.4	16.7	16.2
E55	5.4	19.3	14.0	5.2	19.3	13.7	5.3	19.4	13.9
E56	5.6	19.4	14.0	5.4	19.4	13.7	5.5	19.5	13.9
E57	5.5	16.5	15.1						
P01				5.2	16.3	14.2	5.2	19.7	14.4
P02				4.9	15.7	13.7	4.9	19.5	14.7
P03	5.5	15.1	12.8	4.9	16.7	18.6	5.0	20.6	19.0
P04	5.1	15.2	12.9	4.9	16.3	18.9	5.0	20.2	19.0
P05	5.2	15.2	13.2	5.0	16.4	13.7	5.1	20.2	14.5
P06	5.4	15.2	13.9	5.2	15.8	13.5	5.2	16.1	13.1
P07	5.3	15.2	13.9	5.0	16.3	16.3	5.1	20.2	19.0
P08	5.2	15.2	13.6	4.9	15.9	13.5	5.0	16.4	13.7
P09	5.5	14.9	13.3	5.2	15.6	13.9	5.3	20.6	19.2
P10	5.2	15.3	13.0	5.0	15.8	13.2	5.0	16.1	13.6
P11	5.1	15.2	13.2	5.0	15.8	13.6	5.0	16.4	14.2
P12	5.3	15.4	12.9	5.0	16.1	14.7	5.1	19.9	16.0
P13	5.1	15.4	13.1	4.8	16.3	14.2	4.9	17.3	14.7

CP	vL1	vT1	vR1	vL2	vT2	vR2	vL3	vT3	vR3
P14	5.3	15.0	12.8	5.0	15.6	13.6	5.2	19.7	14.5
P15	5.1	15.3	13.0	4.9	16.0	13.7	5.0	21.2	15.2
P16	5.4	15.1	13.2	5.2	15.9	13.8	5.2	19.7	14.7
P17	5.3	15.6	13.0	5.0	16.2	14.2	5.1	19.8	17.7
P18	5.3	15.3	13.1	5.0	15.7	13.8	5.2	21.1	15.5
P19	5.2	15.4	13.0	4.9	16.2	13.9	5.0	20.6	15.1
P20	5.3	15.2	13.1	5.1	15.5	13.5	5.1	16.2	13.8
P21	5.3	15.3	12.8	5.0	16.6	14.1	5.1	20.2	14.3
P22	5.5	15.8	13.4	5.3	15.9				

(C) tabela de TR (Mpa), MOE (Mpa) e coeficientes r^2 do cálculo de MOE

CP	MOR (MPa)	MOE (MPa)	r^2
E01	40.33	4015.17	0.77
E02	41.09	4490.84	0.52
E03	45.62	4039.48	0.55
E04	40.44	3532.32	0.71
E05	40.50	3517.56	0.49
E06	44.07	4323.31	0.59
E07	42.91	3684.43	0.57
E08	43.31	3542.38	0.77
E09	42.90	3335.05	0.73
E10	38.11	3504.10	0.58
E11	37.54	3459.18	0.73
E12	39.85	3726.55	0.57
E13	45.18	4482.83	0.68
E14	42.01	3613.41	0.79
E15	41.19	3799.25	0.77
E16	44.68	4251.97	0.60
E17	41.88	4333.43	0.63
E18	36.85	3774.14	0.82
E19	43.46	4235.17	0.75
E20	39.83	3951.71	0.78
E21	41.79	4237.27	0.68
E22			
E23	44.38	5473.39	0.70
E24	43.58	3720.89	0.85
E25	45.10	4516.17	0.59
E26	51.23	4797.40	0.53
E27	44.59	4227.47	0.61
E28	42.60	3846.51	0.86
E29	41.98	4194.16	0.64
E30	36.30	2927.33	0.73
E31	49.58	4629.62	0.64
E32	39.92	3932.91	0.79
E33	41.63	3552.29	0.56
E34	45.47	4188.83	0.80
E35	42.10	4500.57	0.37

CP	MOR (MPa)	MOE (MPa)	r^2
E36	39.83	3636.00	0.73
E37	49.24	4698.47	0.58
E38	43.80	4737.76	0.72
E39	40.56	3408.25	0.76
E40	63.98	5762.31	0.69
E41	44.53	4121.35	0.78
E42	49.76	4510.79	0.66
E43	41.91	3849.92	0.80
E44	53.59	3424.30	0.80
E45			
E46	48.23	4846.48	0.66
E47	40.96	4400.12	0.53
E48	47.71	4814.70	0.67
E49	44.15	4656.00	0.60
E50	50.73	4855.62	0.69
E51	50.33	4806.96	0.55
E52	41.93	4947.99	0.67
E53	44.80	4265.95	0.56
E54	45.75	4363.74	0.43
E55	45.99	4509.09	0.66
E56			
E57			
P01	44.39	4986.12	0.78
P02	65.77	6556.67	0.82
P03	47.29	5229.52	0.74
P04	48.76	5061.99	0.87
P05	60.82	4875.11	0.85
P06	51.98	4664.01	0.77
P07	52.57	5168.88	0.83
P08	54.53	5549.00	0.78
P09	52.76	4565.59	0.77
P10	50.15	4530.14	0.82
P11	49.24	5344.46	0.80
P12	42.44	4218.48	0.77
P13	46.18	5038.60	0.69
P14	45.30	4220.42	0.91
P15	42.68	4698.30	0.73

CP	MOR (MPa)	MOE (MPa)	r^2
P16	48.99	4782.22	0.76
P17	46.16	4790.45	0.68
P18	44.35	4046.19	0.70
P19	49.20	5190.22	0.75
P20	53.22	5303.38	0.72
P21	56.63	5489.75	0.74
P22	45.92	4555.35	0.63
P23	43.29	3881.29	0.67
P24	43.58	4487.66	0.84
P25	44.26	4249.44	0.75
P26	44.02	4275.39	0.80
P27	41.57	3449.24	0.76
P28	46.62	4978.48	0.67
P29	44.28	4327.26	0.69
P30	43.84	4289.76	0.48
P31	42.29	4597.98	0.69
P32	42.65	4568.85	0.67
P33	46.44	4622.87	0.78
P34	50.31	4454.06	0.66
P35	47.87	4418.40	0.81
P36	54.01	4808.68	0.73
P37	45.39	4656.65	0.67
P38	45.97	4240.01	0.64
P39	43.32	4694.45	0.69
P40	45.05	5341.31	0.75
P41	45.31	7467.39	0.68
P42	46.26	4722.64	0.75
P43	46.86	4104.44	0.70
P44	47.85	5901.59	0.65
P45	41.62	4248.18	0.61
P46	46.10	5521.96	0.72
P47	47.42	4240.63	0.79