

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DETECÇÃO DE OCOS EM TORAS UTILIZANDO MÉTODOS
DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS**

CHIARA BARROS SECCO

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DETECÇÃO DE OCOS EM TORAS UTILIZANDO MÉTODOS
DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS**

*Dissertação de Mestrado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola, na área de
concentração em Construções Rurais e
Ambiência.*

CHIARA BARROS SECCO

Orientador (a): Prof^a. Dr^a. Raquel Gonçalves

Coorientador: Dr. Domingos Guilherme Pellegrino Cerri

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Se24d	<p>Secco, Chiara Barros</p> <p>Detecção de ocos em toras utilizando métodos de propagação de ondas ultrassônicas / Chiara Barros Secco. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.</p> <p>Orientadores: Raquel Gonçalves, Domingos Guilherme Pellegino Cerri.</p> <p>Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.</p> <p>1. Ultrassom. 2. Tomografia. 3. Madeira - Exploração. 4. Manejo florestal. I. Gonçalves, Raquel. II. Cerri, Domingos Guilherme Pellegino. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.</p>
-------	---

Título em Inglês: Detention of hollow in logs using methods of propagation of ultrasonic waves

Palavras-chave em Inglês: Ultrasound, Tomography, Timber - holding, Forest management

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiência

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

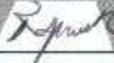
Banca examinadora: Claudio Henrique Soares Del Menezzi, Julio Soriano

Data da defesa: 18/02/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Chiara Barros Secco**, aprovado pela Comissão Julgadora em 18 de fevereiro de 2011, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI



Prof.ª. Dr.ª. Raquel Gonçalves – Presidente e Orientadora
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. Claudio Henrique Soares Del Menezzi – Membro Titular
UnB



Prof. Dr. Julio Soriano - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Américo e Leonice, meus eternos mestres;
Aos meus irmãos Natália, Artur e Letícia, minhas ligações eternas;
E aos meus familiares, em especial ao meu tio Éder e minha tia Ligia,
que fizeram parte de toda minha educação. Obrigada.

AGRADECIMENTOS

À prof^a. Dr^a. Raquel Gonçalves, pela dedicação, incentivo, críticas construtivas, paciência, apoio, angústia, correções, tristezas, ansiedades, alegrias, viagens e festas que estiveram presentes nesses dois anos de trabalho. A esta dedico minha profunda gratidão, admiração e amizade.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI – UNICAMP, aos quais fizeram parte desse trabalho em algum momento, em especial ao meu coorientador Dr^o. Domingos G. P. Cerri, a Dr^a. Gisleiva dos Santos e ao prof^o. Dr^o. Julio Soriano, agradeço imensamente a dedicação.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo apoio financeiro, ao qual foi possível realizar a pesquisa com toda dedicação que esta merece.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio como bolsista durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI de Itatiba, onde realizei a maior parte do estudo, em especial ao funcionário Antônio Paulo, que teve toda paciência e auxílio em todos os momentos da pesquisa.

A Empresa Tora Brasil, por ceder tempo, matéria prima certificada, pela ajuda dos funcionários André, Natália e Cícero, e em especial ao Cristiano, empresário majoritário, ao qual autorizou todas as nossas visitas, busca de matéria prima e até viagem para Marabá-PA. A estes devo toda minha gratidão e admiração.

Aos alunos de iniciação e pós-graduação da FEAGRI aos quais estiveram presentes atuando ou não diretamente no trabalho, em especial a Érica Vasques, Fernando Batista, Milton Giacon, Marcus Massak, Alex Trinca e Cinthya Bertoldo. A estes devo minha eterna amizade, gratidão e admiração profunda.

E por fim aos meus pais, e familiares, que acreditaram, apoiaram, compreenderam, suportaram a distância e a saudade, e por fim continuam incondicionalmente amando-me, e o qual sem este amor eu não teria conseguido nem metade de tudo que realizei.

EPÍGRAFE

“A imaginação é mais importante do que o conhecimento”.
(Albert Einstein).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE EQUAÇÕES	XVII
RESUMO	XVIII
ABSTRACT	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 BIODEGRADAÇÃO DO LENHO DE ÁRVORES	5
2.1.1 Defeitos naturais	5
2.1.2 Fungos (BRAZOLIN, 2009)	5
2.1.3 Cupins (BRAZOLIN, 2009).....	6
2.1.4 Brocas e besouros	8
2.2 Ocorrências de ocos em árvores vivas.....	9
2.3 Métodos de detecção de ocos em árvores florestais	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 MATERIAL	25
3.1.1 Etapa 1: Disco e prisma com ocos naturais	26
3.1.2 Etapa 2: Prismas com ocos artificiais	27
3.1.3 Etapa 3: Disco com ocos artificiais	28
3.2 MÉTODOS	29
3.2.1 Etapa 1: Disco e Prisma com ocos naturais	29
3.2.2 Etapa 2: Prismas com ocos artificiais	34
3.2.3 Etapa 3: Disco com oco artificial	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1 ETAPA 1: DISCO E PRISMA COM OCOS NATURAIS	43
4.1.1 Disco com oco natural	43
4.1.2 Prisma com oco natural	48
4.2 ETAPA 2: PRISMAS COM OCOS ARTIFICIAIS	52
4.2.1 Prisma com oco artificial circular.....	52
4.2.2 Prisma com oco artificial oblongo.....	61
4.3 ETAPA 3: DISCO COM OCOS ARTIFICIAIS	71
4.3.1 Malha reticulada	71
4.3.2 Malha difração	79

5. CONCLUSÕES.....	91
6. SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DA PESQUISA	92
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Estimativa do comprimento do oco na tora. Fonte: Amaral <i>et. al.</i> (1998).....	11
Figura 2.2 Esquema da propagação da onda e do aumento do tempo em função de um defeito. Fonte: Adaptado de Wang <i>et. al.</i> (2004).....	12
Figura 2.3 Arranjo dos transdutores durante as medições de tempo de propagação das ondas. Fonte: Divos e Szalai (2002).....	13
Figura 2.4 Tomografia da tora obtida pela propagação de ondas em diferentes direções. Fonte: Divos e Szalai (2002).....	13
Figura 2.5 Imagem da estrutura interna do tronco reconstruído em 3D na qual se verifica uma importante deterioração. Fonte: Bucur (2005).	14
Figura 2.6 Exemplo de cores utilizadas na tomografia por propagação de ondas mostrando a região com maior deterioração (área azul). Verde e violeta indicam zonas de início da deterioração e zonas de deterioração moderada enquanto o marrom são zonas intactas.	15
Figura 2.7 Tomogramas na espécie Sycamore depois de 2 meses (a), 16 meses (b) e 27 meses (c) de inoculação. Seção transversal do disco (d) com indicação das posições de inoculação dos diferentes fungos sendo: C = controle; Fp = Fomitopsis vinicola; Gad = Ganoderma resinaceum; Kd = Kretzschmaria deusta; Tv = Trametes versicolor. Fonte: Deflorio <i>et. al.</i> (2007).	16
Figura 2.8 Reconstrução de imagens utilizando modelos algoritmos coletados de medições em disco de madeira. Fonte: Fan <i>et. al.</i> (2008).....	18
Figura 2.9 Imagens de ocos no centro da peça por meio de tomografia ultrassônica. Fonte: Lin <i>et. al.</i> (2008).....	23
Figura 3.1 Equipamento de Ultrassom Modelo USLab, AGRICEF, Brasil.	26
Figura 3.2 Tipos de transdutores: a) Transdutores de faces planas. b) Transdutores de faces exponenciais.....	26
Figura 3.3 Peças de Pequiá com malha esquematizada para as medições: (a) Disco de Pequiá e (b) Prisma de Pequiá.	27
Figura 3.4 Prismas de Pequiá.....	28

Figura 3.5 Equipamento CNC (Comando Numérico Computadorizado) do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) em Itatiba-SP.	28
Figura 3.6 Disco de Pequiá maciço (com casca e alburno).	29
Figura 3.7 Posicionamento dos transdutores em medição direta e onda de compressão.....	30
Figura 3.8 Malha reticulada com dois eixos (X,Y) idealizada para as medições de ultrassom.	31
Figura 3.9 Medições de ultrassom na malha reticulada do disco e área de propagação da onda pelo oco (retângulo) calculada em cada posição de medição da malha.....	32
Figura 3.10 Medições de ultrassom na malha reticulada do prisma e área de propagação da onda pelo oco (retângulo) calculada em posição de medição da malha.	32
Figura 3. 11. Pontos de velocidade média dentro da malha.	33
Figura 3.12 Esquema da malha reticulada e da produção de oco circular e oblongo artificiais com aumento percentual da dimensão em relação à parte sã.....	35
Figura 3.13 Peça de Pequiá com orifício artificial circular de 55% (a) e peça de Pequiá com orifício artificial oblongo de 80% (b).	36
Figura 3.14 Esquemas dos pontos de medição: a) Mapeamento em malha reticulada. b) Mapeamento em malha difração. c) Exemplo de uma medição em malha difração. ...	39
Figura 3.15 Peça de Pequiá íntegra (a) e peça de Pequiá com orifício artificial de 90% (b)....	40
Figura 3.16 Rotas de A a D de medições na malha difração, de acordo com Lin <i>et. al.</i> (2008) e as Rotas E e F acrescentadas na pesquisa. Fonte: Lin <i>et. al.</i> (2008).....	41
Figura 4.1 Comportamento das velocidades em função da área do oco por onde a onda percorre.	46
Figura 4.2 Comportamento das velocidades em função da dimensão dos ocos.	49
Figura 4.3 Foto da peça real e imagem gerada com o uso das velocidades no prisma.....	51
Figura 4.4 Foto da peça real e imagem gerada com as condições 1 (existe o oco) e 0 (não existe o oco).	51
Figura 4.5 Comportamento do tempo de propagação da onda em função da posição na malha de medição nas direções X para a peça com oco circular.	53
Figura 4.6 Comportamento do tempo de propagação da onda em função da posição na malha de medição nas direções Y para a peça com oco circular.	53
Figura 4.7 Variação relativa do comprimento de percurso em função da posição de medição.	

Oco circular.....	54
Figura 4.8 Foto da peça de Pequiá integra (a) e imagem produzida (b).	58
Figura 4.9 Foto da peça de Pequiá com 5% de oco (a) e imagem produzida com 5% (b).	58
Figura 4.10 Foto da peça de Pequiá com 15% de oco (a) e imagem produzida com 15% (b).	58
Figura 4.11 Foto da peça de Pequiá com 25% de oco (a) e imagem produzida com 25% (b).	59
Figura 4.12 Foto da peça de Pequiá com 35% de oco (a) e imagem produzida com 35% (b).	59
Figura 4.13 Foto da peça de Pequiá com 55% de oco (a) e imagem produzida com 55% (b).	59
Figura 4.14 Comportamento do tempo de propagação da onda em função da posição na malha de medição nas direções X para a peça com oco oblongo.	62
Figura 4.15 Comportamento do tempo de propagação da onda em função da posição na malha de medição nas direções Y para a peça com oco oblongo.	62
Figura 4.16 Variação relativa do comprimento de percurso em função da posição de medição. Oco oblongo.	63
Figura 4.17 Variação da velocidade de propagação em função da posição de medição. Oco oblongo com proporção de 80% em relação à peça.	64
Figura 4.18 Comportamento da velocidade em função da porcentagem de oco em relação à parte sã das peças com oco circular e oblongo considerando a posição de medição 6 (mais centralizada em relação ao oco).	65
Figura 4.19 Variação da velocidade relativa (RVC) para peça com oco circular e oblongo.	66
Figura 4.20 Foto da peça de Pequiá integra (a) e imagem produzida (b).	67
Figura 4.21 Foto da peça de Pequiá com 10% de oco (a) e imagem produzida com 10% (b).	67
Figura 4.22 Foto da peça de Pequiá com 20% de oco (a) e imagem produzida com 20% (b).	67
Figura 4.23 Foto da peça de Pequiá com 30% de oco (a) e imagem produzida com 30% (b).	68
Figura 4.24 Foto da peça de Pequiá com 40% de oco (a) e imagem produzida com 40% (b).	68
Figura 4.25 Foto da peça de Pequiá com 50% de oco (a) e imagem produzida com 50% (b).	68
Figura 4.26 Foto da peça de Pequiá com 60% de oco (a) e imagem produzida com 60% (b).	69
Figura 4.27 Foto da peça de Pequiá com 70% de oco (a) e imagem produzida com 70% (b).	69
Figura 4.28 Foto da peça de Pequiá com 80% de oco (a) e imagem produzida com 80% (b).	69
Figura 4. 29 Comportamento da velocidade de propagação da onda em função da posição na malha de medição nas direções X para a peça com oco circular.	72
Figura 4. 30 Comportamento da velocidade de propagação da onda em função da posição na	

malha de medição nas direções Y para a peça com oco circular.	72
Figura 4.31 Variação relativa da velocidade (RVC) em função do aumento percentual de oco circular.	74
Figura 4.32 Foto da peça de Pequiá integro e imagem produzida com a malha reticulada.....	75
Figura 4.33 Foto da peça de Pequiá com 5% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.	75
Figura 4.34 Foto da peça de Pequiá com 15% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.	75
Figura 4.35 Foto da peça de Pequiá com 25% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.	76
Figura 4.36 Foto da peça de Pequiá com 35% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.	76
Figura 4.37 Foto da peça de Pequiá com 45% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.	77
Figura 4.38 Foto da peça de Pequiá com 55% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.	77
Figura 4.39 Foto da peça de Pequiá com 65% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.	78
Figura 4.40 Foto da peça de Pequiá com 75% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.	78
Figura 4.41 Foto da peça de Pequiá com 85% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.	78
Figura 4.42 Foto da peça de Pequiá com 90% de oco e imagem produzida com 90% com a malha reticulada.	79
Figura 4.43 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento percentual do oco para as medições segundo a Rota A (dois pontos de medição adjacentes).	81
Figura 4.44 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento percentual do oco para as medições segundo a Rota B (intervalo de um ponto entre duas medições).	81
Figura 4.45 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento	

percentual do oco para as medições segundo a Rota C (intervalo de dois ponto entre duas medições).....	82
Figura 4.46 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento percentual do oco para as medições segundo a Rota D (direção radial).....	83
Figura 4.47 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento percentual do oco para as medições segundo a Rota E (intervalo de quatro ponto entre duas medições).....	83
Figura 4.48 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento percentual do oco para as medições segundo a Rota F (intervalo de cinco ponto entre duas medições).....	84
Figura 4.49 Foto da peça de Pequiá integro e as imagens produzidas com uso das malhas difração e reticulada.....	85
Figura 4.50 Foto da peça de Pequiá com 5% de oco e as imagens produzidas com o uso das malhas difração e reticulada.....	86
Figura 4.51 Foto da peça de Pequiá com 15% de oco e as imagens produzidas com as malhas de difração e reticulada.....	86
Figura 4.52 Foto da peça de Pequiá com 25% de oco e as imagens produzidas utilizando as malhas difração e reticulada.....	87
Figura 4.53 Foto da peça de Pequiá com 35% de oco e as imagens produzidas com as malhas difração e reticulada.....	87
Figura 4.54 Foto da peça de Pequiá com 45% de oco e as imagens produzidas com as malhas difração e reticulada.....	88
Figura 4.55 Foto da peça de Pequiá com 55% de oco e as imagens produzidas pelas malhas difração e reticulada.....	88
Figura 4.56 Foto da peça de Pequiá com 65% de oco e as imagens produzidas com as malhas difração e reticulada.....	88
Figura 4.57 Foto da peça de Pequiá com 75% de oco e as imagens produzidas com as malhas difração e reticulada.....	89
Figura 4.58 Foto da peça de Pequiá com 85% de oco e as imagens produzidas com as malhas difração e reticulada.....	89
Figura 4.59 Foto da peça de Pequiá com 90% de oco e as imagens produzidas com as malhas	

difração e reticulada90

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Resultados de velocidade de propagação das ondas de ultrassom ($m.s^{-1}$) no disco de Pequiá com oco natural segundo as posições de medição da malha reticulada onde não houve interferência de alinhamento dos transdutores	44
Tabela 4.2 Quadro de ANOVA obtido do programa computacional Statgraphics Centurion®.	45
Tabela 4.3 Resultados médios de velocidade nas faixas sem presença de ocos e com presença de ocos de diferentes áreas.....	46
Tabela 4.4 Modelos de regressão considerando todo o trecho.	47
Tabela 4.5 Modelos de regressão considerando somente o trecho de área de oco de 0 a 700 mm^2	47
Tabela 4.6 Velocidades obtidas com transdutor de 45 kHz de faces planas na malha.	49
Tabela 4.7 Resultados médios de velocidade nas faixas sem presença de ocos e com presença de ocos de diferentes áreas.....	49
Tabela 4.8 Regressão linear utilizando todo o trecho de variação de área dos ocos e utilizando a em parte do trecho.....	50
Tabela 4.9 Velocidades de propagação de ondas de ultrassom obtidas na peça de Pequiá (P1), ainda integra, utilizando a malha reticulada.....	52
Tabela 4.10 Médias das velocidades e comprimentos de percurso calculado na faixa de medição central (X6, Y6) da peça com oco circular.....	55
Tabela 4.11 Modelos de regressão obtidos para as peças com oco circular.....	56
Tabela 4.12 Faixas de variação de comprimento de percurso e respectiva cor associada para a geração das imagens.....	57
Tabela 4.13 Velocidades de propagação de ondas de ultrassom obtidas na peça de Pequiá (P2), ainda integra, utilizando a malha reticulada.....	61
Tabela 4.14 Modelos de regressão obtidos para as peças com oco oblongo.....	66
Tabela 4.15 Velocidades médias de propagação das ondas de ultrassom na malha reticulada para as diferentes condições da peça.....	71
Tabela 4.16 Velocidades de propagação das ondas de ultrassom na malha tipo difração para as diferentes condições da peça.....	80
Tabela 4.17 Modelos e parâmetros das regressões entre velocidade de propagação média das	

ondas de ultrassom (V) e aumento percentual do oco ($\phi\%$) para cada rota de medição.
.....80

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1. $V = L / t$	30
Equação 3.2. $LR = [(L_{Referência} - L_{Percurso}) / (L_{Referência})] * 100$	36
Equação 3.3. $L_{Percurso} = V_{Integra} * T_{Oco}$	37
Equação 3.4. $RVC = [(V_{Referência} - V_{Medida}) / (V_{Referência})] * 100$	37
Equação 3.5. $X\% = (L_{Percurso} * 100) / DET$	37

RESUMO

Um dos grandes problemas enfrentados pelos empresários na exploração legal da floresta são as perdas decorrentes da escolha de árvores, quer seja pela baixa qualidade da madeira ou pelo baixo rendimento. As árvores com troncos classificados como sendo de baixo valor comercial, por uma das duas razões acima indicadas, deveriam ser preservadas, pois são importantes como produtoras de sementes, fonte de alimentos, abrigo para animais e preservação da floresta, podendo fazer parte, portanto, da reserva legal ou do montante que não deve ser explorado. Por outro lado, alguns empresários do ramo de móveis designs se interessam pela utilização de partes do tronco que tenham os ocos. No entanto, para que essa utilização seja realizada é importante que se conheça a extensão do oco em relação ao diâmetro e ao comprimento da tora. Dessa forma, para ambas aplicações há a importância de se detectar a existência e se conhecer a extensão do oco na peça. No caso do ultrassom a propagação de ondas é afetada pela presença de um vazio no interior do tronco, provocando variação na velocidade de propagação da onda e na amplitude do sinal emitido. Estas variações poderão ser detectadas pelo equipamento e estudadas para a elaboração de uma imagem que represente a situação interna da tora. Levando em conta os aspectos apresentados, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar o uso de equipamento de ultrassom, desenvolvido no país, como ferramenta para a detecção de ocos em secções de toras de árvores de espécie nativa e avaliar metodologia de elaboração de imagem (pós-processada) utilizando essa tecnologia (tomografia ultrassônica). Os resultados mostraram que a técnica (ultrassom) e o equipamento utilizado têm sensibilidade para serem utilizados em inspeções de árvores e que, por meio da variação da velocidade foi possível elaborar imagens que reproduziram, de forma aproximada, a presença do oco e de sua extensão. As conclusões da pesquisa indicam a importância de continuidade do estudo, principalmente com foco no desenvolvimento de algoritmos e software dedicados à aplicação da metodologia.

Palavras chave: setor florestal; ultrassom; geração de imagens; mapeamento 2D.

ABSTRACT

One of the great problems faced for the entrepreneurs in the legal exploration of the forest is the decurrent losses of the choice of trees, wants either for low the quality of the wood or for the low income. The trees with classified trunks as being of low commercial value, by one of the two reasons above indicated, would have to be preserved, therefore they are important as producing of seeds, source of foods, shelter for animals and preservation of the forest, being able to be part, therefore, of the legal reserve or the sum that does not have to be explored. On the other hand, some entrepreneurs of the branch of furniture designs if interest for the use of parts of the trunk that have the hollow ones. However, so that this use is carried through is important that if it knows the extension of the hollow one in relation to the diameter and the length of the log. Of this form, for both applications it has the importance of if detecting the existence and if knowing the extension of the hollow one in the part. In the case of ultrassom the propagation of waves is affected by the presence of an emptiness in the interior of the trunk, having provoked variation in the speed of propagation of the wave and in the amplitude of the emitted signal. These variations could be detected by the equipment and be studied for the elaboration of an image that represents the internal situation of the log. Taking in account the presented aspects, the general objective of this research was to evaluate the equipment use of ultrasound, developed in the country, as tool for the detention of hollow in log sections of trees of native species and evaluating methodology of image elaboration (after-processed) using this technology (ultrasonic tomography). The results had shown that the technique (ultrasound) and the used equipment has sensitivity to be used in inspections of trees and that, by means of the variation of the speed were possible to elaborate images that had reproduced, of approached form, the presence of the hollow one and its extension. The conclusions of the research indicate the importance of continuity of the study, mainly with focus in the development of dedicated algorithms and software to the application of the methodology.

Key-words: Forestry sector; Ultrasound; Imaging; 2D mapping.

1. INTRODUÇÃO

Por muitas décadas ocorreu o desmatamento contínuo das florestas nativas da Amazônia, não somente para a exploração de madeira, mas também para instalação de cultivos agrícolas e, principalmente, pela agropecuária. Ainda que se possa dizer que, por razões históricas e logísticas (problemas na malha viária), as florestas do Amazonas ainda foram pouco desmatadas quando comparadas à outras regiões, o mapa do “arco do desmatamento” indica que a pressão sobre as florestas nativas no Amazonas está crescendo.

Diante deste cenário tem havido, basicamente, duas posturas clássicas. Uma das posturas é a dos que acreditam não haver alternativas para evitar o desmatamento, e, até de que a Amazônia deveria tornar-se o celeiro do mundo. Tal postura é inaceitável levando-se em conta as consequências nefastas sob todos os pontos de vista - socioeconômicas ambientais e climáticas.

A segunda postura clássica é a dos que entendem que o governo deve garantir que a floresta seja intocável. Tal postura é irrealista, uma vez que o país tem milhões de hectares de florestas com comunidades que sobrevivem dela, além de ser equivocada do ponto de vista técnico, já que como qualquer ser vivo, a árvore tem seu ciclo de vida que, se respeitado, pode ser explorado comercialmente sem que isso represente consequências negativas.

Assim, uma postura alternativa consiste em promover o uso sustentável da floresta. Essa postura baseia-se na hipótese de que, havendo interesse econômico na extração contínua de riquezas da floresta haverá, também, incentivo para que a mesma não deixe de existir. Além disso, tecnicamente se sabe que é possível usar a floresta de forma sustentável, desde que o poder público crie ambiente jurídico legal e socioeconômico que incentive e viabilize a adoção de práticas sustentáveis.

A exploração da madeira de forma legal pode ser realizada através de Projetos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) ou de autorizações de desmatamento, licenciados pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e pelas organizações estaduais de meio ambiente (Oemas).

No caso do manejo, após a análise e a aprovação do órgão ambiental a respeito do PMFS, o empresário florestal é autorizado a realizar um montante de exploração baseado no inventário florestal que foi executado na área e no horizonte de uso. Este montante pode ser

encarado como um tipo de conta bancária que o empresário possui no órgão ambiental, sendo que cada vez que o mesmo executa a exploração o volume de madeira é creditado deste total.

No caso da autorização de desmatamento, amparada pelo Código Florestal, os proprietários de terra na Amazônia têm direito a desmatar até 20% de suas áreas florestais. O restante, 80%, é considerado como a reserva legal da propriedade. Esse tipo de desmatamento é normalizado pelo Ministério do Meio Ambiente e as autorizações são válidas por um ano e podem ser renovadas por mais um ano, caso o volume total de madeira não tenha sido retirado da área.

Um dos grandes problemas enfrentados pelos empresários na exploração legal da floresta são as perdas decorrentes da escolha de árvores, quer seja pela baixa qualidade da madeira ou pelo baixo rendimento. As árvores com troncos classificados como sendo de baixo valor comercial, por uma das duas razões acima indicadas, deveriam ser preservadas, pois são importantes como produtoras de sementes, fonte de alimentos, abrigo para animais e preservação da floresta, podendo fazer parte, portanto, da reserva legal ou do montante que não deve ser explorado.

Uma das razões para o baixo rendimento de uma árvore é a presença de ocos. Algumas espécies de valor comercial ou estratégico são naturalmente oçadas ou, em qualquer espécie, os ocos podem ser provocados pela ação de fungos e bactérias. Se esse oco for grande demais, inviabiliza economicamente a extração.

Por outro lado, há empresários do ramo de moveis “*design*” que podem aproveitar toras com ocos para criar móveis diferenciados.

Para avaliar se a árvore tem oco, muitas vezes o operador da motosserra introduz o sabre no tronco, no sentido vertical. Conforme a resistência de entrada pode-se avaliar a presença e a dimensão do oco. Esse processo, no entanto, é muito invasivo, podendo provocar danos irreversíveis à árvore.

Também é utilizada uma técnica que consiste em encostar o ouvido na árvore e bater no tronco com um martelo. Se o som emitido fizer um eco o operador conclui que a árvore está oca. Essa avaliação é muito subjetiva e dependente da experiência do operador, apresentando, portanto, grande índice de erros. Uma terceira forma de se avaliar é por meio da observação de sintomas que sugerem a presença de oco nas árvores, tais como casas de cupins, presença de secreções escuras ao longo do tronco e galhos quebrados.

Há, também, algumas experiências, principalmente no exterior, com o uso de resistógrafo para a detecção de defeitos internos, principalmente em postes de madeira e também em árvores.

Métodos acústicos são muito utilizados na detecção de defeitos internos nos mais diferentes materiais – aço, concreto, alumínio – inclusive na madeira e em materiais a base de madeira.

No caso do ultrassom a propagação de ondas é afetada pela presença de materiais com diferentes características de impedância acústica e também pela presença de um vazio no interior do tronco, o qual acarretará variação na velocidade de propagação da onda e na amplitude do sinal emitido. Estas variações podem ser detectadas pelo equipamento e estudadas para a elaboração de um perfil de comportamento, que pode ser associado não somente à presença ou ausência de um oco, como também à quantificação desse oco em termos de dimensões.

Por meio da revisão da literatura foi possível verificar que, em diferentes países, os métodos de propagação de ondas têm sido estudados como ferramentas para inspecionar a presença de ocos no interior de troncos de árvores florestais e urbanas. Alguns equipamentos foram desenvolvidos para essa finalidade, principalmente utilizando ondas geradas por impacto em sensores colocados nos troncos (stress wave). Alguns desses equipamentos já permitem, inclusive, a geração de imagens processadas imediatamente ou após o tratamento dos dados. No entanto, tais equipamentos são importados e de alto custo, muitas vezes inacessíveis aos empresários do setor florestal. Além do custo, os mesmos foram desenvolvidos levando em conta as propriedades e as características das espécies dos países onde foram desenvolvidos.

Considerando que há, no país, equipamento que foi desenvolvido para atender as especificidades e propriedades das espécies brasileiras ou crescidas no país, pesquisas que visem a sua avaliação são importantes para o país. Adicionalmente, se a pesquisa for focada em metodologia simplificada e de menor custo, os ganhos podem ser ainda mais imediatos, além de se constituírem em base para desenvolvimentos futuros de equipamentos nacionais que possibilitem inspeções mais automatizadas e precisas.

Considerando os aspectos destacados, a hipótese dessa pesquisa é a de que é possível, estudando-se as variações de velocidade de propagação de ondas de ultrassom em toras,

detectar a presença de um vazio e utilizar essa resposta (variação de velocidade) para construir imagem representativa da posição e da dimensão desse vazio.

Levando em conta os aspectos apresentados, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar o uso de equipamento de ultrassom, desenvolvido no país, como ferramenta para a detecção de ocos em secções de toras de árvores de espécie nativa e avaliar metodologia de elaboração de imagem (pós-processada) utilizando a tecnologia existente (tomografia ultrassônica).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biodegradação do lenho de árvores

Todo e qualquer material sofre degradação com o passar do tempo, seja por motivos naturais, seja por agentes degradadores.

Em sua tese de doutorado, Brazolin (2009) apresenta revisão bibliográfica ampla a respeito da biodeterioração do lenho de árvores. Embora a pesquisa tenha sido voltada para uma espécie específica de árvore urbana, a Tipuana tipu (*Benth. ssp*), a revisão a respeito da biodeterioração de árvores é geral e baseia-se em muitos outros autores.

Pinheiro (2001) e Apolinario e Martius (2004) apresentam também importantes aspectos a respeito desse tema. Essas três referências foram a base desse item e, por essa razão, são as referências mais citadas.

2.1.1 Defeitos naturais

Segundo Pinheiro (2001) a degradação de uma espécie vegetal oriunda dos defeitos naturais, como grã irregular, presença de nós, madeira de reação, falso cerne, fendas anelares e bolsões de resinas, está diretamente relacionada com a espécie e também com a forma de crescimento. Este tipo de ocorrência é muito comum em espécies nativas como a espécie escolhida para esse estudo.

2.1.2 Fungos (BRAZOLIN, 2009)

Os 3 tipos principais de apodrecimento, segundo a atividade enzimática dos fungos, são denominados de podridão branca, podridão parda e podridão mole. As podridões pardas e brancas são as que mais ocorrem em árvores vivas.

No ataque por fungos de podridão branca o lenho atacado torna-se macio, esponjoso e mais claro que o sadio e na madeira apodrecida aparecem linhas escuras e de tonalidade marrom, que delimitam a região afetada. No ataque por fungos de podridão parda o lenho apodrecido torna-se quebradiço e mais escurecido que o sadio. No ataque desses fungos são consumidas a celulose e a hemicelulose das paredes celulares, enquanto a lignina é mantida.

Em virtude desse tipo de ataque o lenho das árvores atacados por estes fungos tornam-se menos resistentes e mais propício a se romperem. Os fungos de podridão mole também atacam preferencialmente a celulose e a hemicelulose, produzindo cavidades na parede celular e tornando a madeira menos resistente à flexão.

O apodrecimento da medula é a maior causa da deterioração do lenho das árvores e, no caso dessa pesquisa, é a mais importante, pois é a que provoca defeitos internos. A colonização do alburno praticamente só se dá quando o mesmo fica exposto por injúria ou por morte da casca, resultando na descoloração do lenho e, eventualmente, no apodrecimento.

Os fungos se estabelecem em porções do tronco das árvores que estão sob condições micro-ambientais estressantes e têm a capacidade de se adaptar e/ou modificar estes microambientes.

Alguns fungos apodrecedores podem colonizar o alburno sadio por mecanismos patogênicos, sendo o ataque considerado necrotrófico, quando ocorre a destruição das células vivas do lenho. Nesta estratégia os fungos modificam as condições micro ambientais do lenho da árvore degradando estruturas celulares e permitindo o avanço da deterioração ou atacam as células do câmbio, interrompendo as suas funções fisiológicas e expondo o xilema para a ação dos fungos e outros organismos.

As formas mais frequentes de apodrecimento da medula são o apodrecimento no topo, com origem na copa e propagação em direção à parte inferior da árvore, e o apodrecimento na base, com origem nas raízes ou no colo do tronco propagando-se em direção à parte superior da árvore. A colonização pode ocorrer em virtude de grandes injúrias provenientes de podas e de quebra de galhos, expondo a medula. O apodrecimento pode também se iniciar nos galhos secos e podres ou na raiz e propagar-se para o cerne do tronco. O apodrecimento da medula tendo como causa o apodrecimento de galhos tem sido detectado, também, nos Eucaliptos, principalmente no saligna (*Eucalyptus saligna*) e no grandis (*Eucalyptus grandis*).

2.1.3 Cupins (BRAZOLIN, 2009)

Os cupins, insetos sociais da Ordem Isoptera, formam colônias compostas por indivíduos de diferentes categorias. Nas regiões tropicais os mesmos se apresentam com

grande variedade de hábitos. Normalmente os cupins são organizados em 3 castas - reprodutores, operários e soldados (que são estéreis).

Os cupins se aproveitam da madeira apodrecida pelos fungos para se alimentarem da celulose do lenho. Por essa razão, a maioria das espécies não causa prejuízos, já que o ataque se dá em partes das árvores que já estão seriamente comprometidas. Tendo em vista que os cupins não produzem enzimas celulolíticas, em quantidade suficiente para digerir a celulose, essa digestão é normalmente feita com a ajuda de outros microorganismos que vivem em seus tratos digestivos.

Há registro de cerca de 2864 espécies de cupins no mundo, sendo 312 no Brasil. Esses cupins são pertencentes a 4 famílias: *Kalotermitidae*, *Rhinotermitidae*, *Serritermitidae* e *Termitidae*. Os cupins se agrupam pelos hábitos de nidificação, sendo denominados cupins de madeira quando a colônia se desenvolve integralmente na madeira seca ou úmida, de solo quando a colônia se desenvolve no solo, e arborícolas quando a colônia se desenvolve sobre suporte, acima do solo, geralmente em uma árvore.

Brazolin (2009) cita inúmeros casos de ataques de cupins em árvores urbanas, os quais não serão detalhados por não ser esse o foco dessa pesquisa. No entanto, há também citações de ataques de cupins em Eucalipto, como é o caso de um diagnóstico realizado em 726 árvores de eucaliptos do Parque do Ibirapuera no qual foram observados ataques de cupins em cerca de 20% das árvores.

No tronco da árvore o ataque de cupins normalmente se inicia pela raiz. Os cupins constroem galerias no interior do tronco, destruindo o cerne e deixando as árvores ocas.

Em sua tese, Brazolin (2009) destaca que, no Canadá, há a ocorrência de cupins *Reticulitermes flavipes* nas raízes, os quais avançaram seu ataque para o cerne das árvores, com a infestação iniciando-se no interior do seu tronco e nem sempre precedida ou associada a um ferimento.

Apesar da maioria dos cupins preferirem atacar os tecidos já deteriorados por fungos, diversos autores relatam que há espécies que atacam, também, a madeira sã e que, por exemplo, em florestas de Eucalipto na Austrália não há uma dependência do ataque de cupins ao ataque anterior de fungos.

Brazolin (2009) também menciona em seu texto a infestação de cupins como causa da morte de árvores de teca (*Tectona grandis*) na Malásia e de Eucalipto no Havai. Segundo o

autor as cavidades formadas na região do cerne do tronco afetaram os tecidos do alburno interferindo na circulação da seiva e secando a copa das árvores.

Algumas espécies de árvores possuem extrativos que são preservativos naturais contra o ataque de cupins. Brazolin (2009) relatou que os extrativos com propriedades fungicidas não se distribuem homoganeamente, tendo maior concentração na parte externa do cerne e próximo à base do tronco, diminuindo em direção à medula e ao topo das árvores.

A umidade é outra questão que afeta a condição ideal para o ataque das árvores por cupins. O alburno apresenta maior umidade e, portanto, menor quantidade de oxigênio, fatores desfavoráveis aos fungos. Dessa forma, o padrão de distribuição dos extrativos, da água e do oxigênio nos diferentes tecidos do lenho pode explicar a ocorrência e a colonização do cerne por fungos apodrecedores e/ou insetos xilófagos.

Cupins são responsáveis por ocos em madeiras, no entanto, ataques de cupins em árvores vivas são raros. Na tese de Brazolin (2009) há o relato de algumas exceções, como por exemplo, o *Coptotermes* que tem sido destacado como espécie que ataca a seringueira (*Hevea brasiliensis*), o pau rosa (*Aniba duxkei*), e algumas outras espécies amazônicas, além de plantações de eucalipto (*Eucalyptus*) no cerrado do Estado de Minas Gerais.

No trabalho de Apolinario e Martius (2004) é destacado o *Heterotermes* como cupins que também atacam plantações de Eucalipto nos Estados do Espírito Santo e São Paulo. No caso do ataque de cupins, a parte interna (cerne), composta de tecido morto, é a afetada enquanto a parte viva (alburno) e a casca continuam intactas fazendo com que os ocos não sejam visíveis. Os mesmos autores destacam que ataques em árvores vivas também podem ocorrer por fungos e salientam que o porquê e como esses ocos ocorrem em árvores vivas ainda não estão claramente compreendidos pela ciência. Eles destacam que esse entendimento seria importante, tanto do ponto de vista biológico quanto para a indústria madeireira.

2.1.4 Brocas e besouros

A ordem *Coleoptera* é a maior da Classe Insecta, correspondendo a aproximadamente 40% do total de espécies e, depois dos cupins, são os que maiores danos causam às madeiras. Dentre as famílias desta Ordem, algumas usam a madeira como fonte de alimentação - desde a árvore viva até bem seca (APOLINÁRIO & MARTIUS, 2004). Segundo os mesmos autores,

as brocas atacam mecanicamente as paredes celulares através de mandíbulas, podendo digerir a holocelulose (celulose e hemicelulose) e o conteúdo de algumas células parenquimáticas.

2.2 Ocorrências de ocos em árvores vivas

A presença de ocos, em muitos casos, é uma característica dos gêneros ou mesmo das espécies de árvores, aparecendo em quase todos os seus representantes enquanto que em algumas espécies o oco aparece ocasionalmente, ou muito raramente.

Amaral *et. al.* (1998) afirmam que grande parte dos acidentes graves em florestas encontra-se no momento do corte, pois as árvores ocadas, seja pelo corte incorreto ou pela previsão de localização e dimensão do oco incorreto, tende a cair rapidamente e em uma direção imprevisível.

Biasi e Rocha (2007) apontam que o rendimento de resíduos de toras de Eucaliptos com rachaduras, podridão e ocos, onde não se consegue prever o percurso e dimensão, é muito alto, quase 10% maior que o de uma tora integra. Assim, se para uma tora integra há uma perda de 10% de costaneiras, para uma tora com rachaduras, podridão e ocos haverá uma perda de 20%, aproximadamente. Tendo em vista que esse valor de perda é dado por tora, o acumulo de perdas finais se torna significativo.

Azevedo (2004) afirma que um fator a ser considerado quando se trata da proporção de árvores não produtivas é a ocorrência de árvores ocadas. Esse autor realizou estudo com 388 árvores de 5 tipos de Copaíba (*Copaifera spp*) – amarela, branca, mari-mari, preta e vermelha - provenientes de duas diferentes regiões. O autor verificou que não houve diferença estatística de proporção de árvores ocadas entre os diferentes tipos de copaíba. Dentre as árvores consideradas não produtivas a proporção de árvores ocadas foi de 15,4% em uma região e de 27,1% em outra.

Apolinário e Martius (2004) realizaram trabalho com 110 árvores, com DAP superiores a 50 cm, da Estação Experimental de Silvicultura Tropical (EEST) do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA) situado a aproximadamente 90 km de Manaus, verificando que 41 árvores (37, 7%) apresentavam grandes cavidades internas. Dessas árvores ocadas 57,4% apresentavam infestação por cupins. Os autores relataram que 16 espécies, pertencentes a 11 famílias, continham ocos em seus troncos. Entre essas árvores a que

apresentou maior incidência de ocos foi a faveira, com 6 ocorrências, a Cupiúba (*Goupia glabra*), o Ripeiro (*Allantoma lineata*) e a Tanimbuca (*Buchenavia capitata*), com 4 ocorrências cada, e o Cumarú (*Dipteryx odorata*) e o Pau rainha (*Brosimum rubescens*), com 3 ocorrência cada.

No trabalho de Apolinário e Martius (2004) também são citados resultados de avaliação em 145 árvores na Reserva Florestal Adolpho Ducke em Manaus, das quais 325 apresentavam ocos na parte interna dos troncos. Como conclusão de ampla revisão bibliográfica, e também da própria pesquisa, Apolinário e Martius (2004) indicaram que cerca de um terço das árvores de grande diâmetro da floresta amazônica devem possuir ocos no interior de seus troncos e que, desses, 15% devem estar infestados de cupins.

Na pesquisa de Apolinário e Martius (2004) não foi encontrada correlação entre a presença de oco na árvore e a presença ou ausência de cupins. Também não houve correlação entre a presença de oco e o DAP da árvore. Os autores também concluem que não houve, dentre as muitas diferentes espécies estudadas, nenhuma que tenha se destacado na incidência de ocos, ou seja, os ocos estavam presentes em todas as espécies estudadas.

Apolinário e Martius (2004) indicam que uma hipótese para explicar a existência de tão grande número de árvores vivas ocadas em áreas tropicais. De acordo o texto dos autores esses ocos ocorreriam em virtude do solo pobre em nutrientes, fazendo com que o apodrecimento das dicotiledôneas na parte central (cerne) de árvores vivas permitisse uma adaptação para obtenção de nutrientes, especialmente nitrogênio, em locais pobres desse nutriente.

2.3 Métodos de detecção de ocos em árvores florestais

Por não conhecer a condição interna das árvores os motosserristas cortam todas as árvores comerciais existentes e, desta forma, tombam até mesmo árvores ocas, que são abandonadas na floresta, provocando, além do corte de uma árvores inutilmente, problemas para a retirada das demais toras (PEREIRA, 2010).

Também é utilizada técnica que consiste em encostar o ouvido na árvore e bater no tronco com um martelo. Se o som emitido fizer um eco o operador conclui que a árvore estará oca. Essa avaliação é muito subjetiva e dependente da experiência do operador, apresentando,

portanto, grande índice de erros. Uma terceira forma de se avaliar é por meio da observação de sintomas que sugerem a presença de oco nas árvores, tais como casas de cupins, presença de secreções escuras ao longo do tronco e galhos quebrados.

A exploração florestal lucrativa pode ser realizada de forma sustentável utilizando-se as tecnologias e conhecimentos atuais. No entanto, os custos envolvidos em explorações florestais sustentáveis são maiores do que aqueles envolvidos em explorações sem as preocupações ambientais e, portanto, ilegais. Dessa forma, a aplicação de tecnologia que reduza as perdas dos empresários florestais engajados em explorações sustentáveis é imprescindível, não somente para incentivá-los a continuar como também para fomentar outros a esta prática.

As perdas devidas aos erros de identificação de árvores com ocos são significativas, pois reduzem o aproveitamento do tronco. Além disso, segundo Amaral *et. al.* (1998) a superestimativa do comprimento do oco (Figura 2.1) ocasiona um desperdício médio de 0,03 m³ por hectare. A estimativa da dimensão do oco é realizada por um teste que consiste em introduzir uma vara no oco para definir a sua extensão. Em geral, o corte é feito 30 cm além do oco, para excluir a madeira apodrecida (Figura 2.1). Entretanto, no caso de espécies de alto valor, mesmo essa parte oca pode ser aproveitada, desde que o oco tenha um diâmetro pequeno.



Figura 2.1 Estimativa do comprimento do oco na tora. Fonte: Amaral *et. al.* (1998)

Ainda de acordo com Amaral *et. al.* (1998) a maior parte dos acidentes graves no corte é provocada pela derrubada de árvores oçadas. Estes acidentes ocorrem porque estas árvores tendem a cair rapidamente e em uma direção imprevisível. Se a árvore está oçada apenas na base do tronco (um metro de altura), o corte acima do oco resolve o problema, mas se o oco se estende além da base do tronco, é necessário adotar um corte especial.

Métodos acústicos têm sido utilizados com sucesso em todo o mundo em avaliações florestais e vêm substituindo, a cada dia e em mais aplicações, as avaliações visuais, uma vez que em muitos casos, conforme destacado no item 2.1, as patologias não estão visíveis, como

é o caso de grande parte dos ocós em árvores.

A propagação de ondas na madeira é um processo dinâmico, que é diretamente relacionado com suas propriedades físicas e mecânicas. Em geral, as velocidades das ondas são mais rápidas em madeiras de melhor qualidade do que nas madeiras de baixa qualidade. Wang *et. al.* (2004) concluíram que medições do tempo de propagação de ondas utilizando stress wave no caule, na direção radial, permitem determinar, com precisão, a condição interna da árvore. Segundo os autores (WANG *et. al.*, 2004) a velocidade de propagação de ondas em sólidos com defeitos diminui porque a onda contorna o defeito fazendo com que o tempo de propagação aumente (Figura 2.2).

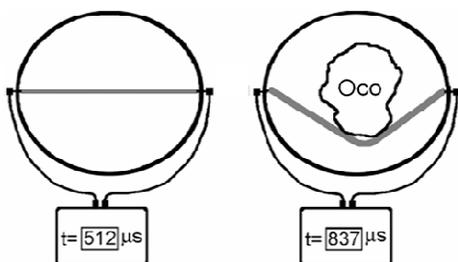


Figura 2.2 Esquema da propagação da onda e do aumento do tempo em função de um defeito. Fonte: Adaptado de Wang *et. al.* (2004).

Divos e Szalai (2002) indicam que diferentes arranjos nas medições de propagação de ondas permitem a detecção de diferentes tamanhos de defeitos internos. A

Figura 2.3 apresenta a proposta dos autores para esses arranjos. Os autores indicam que para os arranjos com 4, 5, 6, 7 e 8 pontos seria possível a detecção de defeitos de tamanhos mínimos de 8, 6, 4, 3 e 1% da área da seção transversal do tronco. Tendo em vista que a detecção do defeito está associada à redução da velocidade, tomando-se como base um valor de referência (madeira sã), e que esse valor de referência na madeira depende da direção de medição, é necessário tomar-se dois ou mais valores como referência para as comparações. A Figura 2.4 mostra o resultado obtido por Divos e Szalai (2002) utilizando 6 pontos de medição.

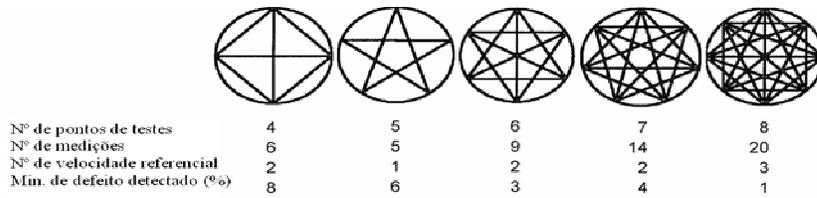


Figura 2.3 Arranjo dos transdutores durante as medições de tempo de propagação das ondas.

Fonte: Divos e Szalai (2002)

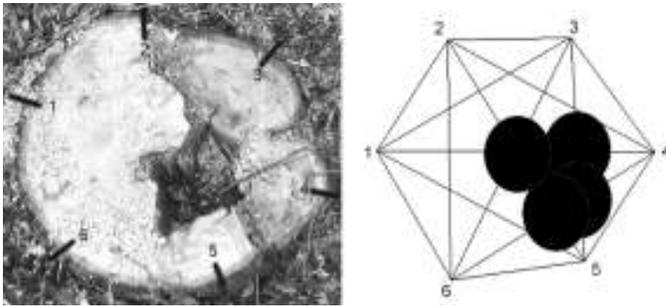


Figura 2.4 Tomografia da tora obtida pela propagação de ondas em diferentes direções. Fonte:

Divos e Szalai (2002).

Conforme Bucur (2005) a obtenção de imagens da estrutura interna das árvores é possível através de técnicas que utilizam parâmetros da propagação de ondas, gerando a denominada tomografia ultrassônica, a qual pode ser baseada no tempo de propagação, na amplitude ou na resposta em frequência. Segundo Bucur (2005), as frequências usuais para esse tipo de medição variam de 50 a 1000 kHz. Quanto mais alta a frequência melhor a resolução. Por outro lado, frequências altas apresentam atenuações mais elevadas, de forma que o objetivo da pesquisa ou da inspeção deve estar relacionado à escolha da frequência de transdutor a ser adotada.

Para demonstrar a viabilidade da tomografia ultrassônica na detecção de zonas internas deterioradas em árvores, a autora utilizou uma tora de Beech (*Fagus grandifolia*) com 0,55 m de diâmetro e com uma zona interna deteriorada. Medições de tempo de propagação das ondas nos troncos foram realizadas em três níveis – 0,36 m, 0,84 m e 1,38 m a partir do solo. Em cada nível foram realizadas 16 medições de tempo de propagação em dois eixos (x e y), considerando uma malha de aproximadamente 40 mm, gerando um total de 120 medições na árvore.

As medições de velocidade de ondas longitudinais, realizadas nos eixos x e y,

permitiram gerar imagens 2D. Tendo em vista as medições em diferentes níveis do eixo z (altura da tora), foi possível, também, a obtenção de uma imagem 3D, que reconstituiu a condição do tronco. As imagens foram geradas adotando-se diferentes cores para regiões de velocidades diferentes, que no caso do trabalho de Bucur (2005) foram fixadas em faixas de 300 m.s^{-1} .

A variação total de velocidades obtida nessa pesquisa foi de 2350 m.s^{-1} a 400 m.s^{-1} . Os resultados permitiram identificar que a região central da árvore possuía uma grande zona deteriorada (Figura 2.5), representada pela cor avermelhada, o que foi confirmado, posteriormente, com o corte da árvore. Bucur (2005) conclui que esta resolução é adequada para o controle e a detecção de defeitos em árvores florestais e de jardins públicos, bem como para postes de madeira e outros elementos estruturais.

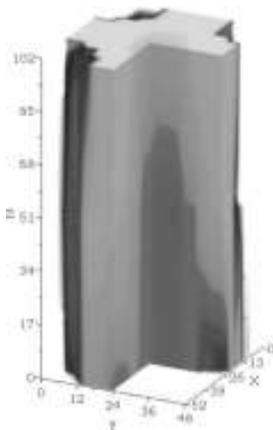


Figura 2.5 Imagem da estrutura interna do tronco reconstruído em 3D na qual se verifica uma importante deterioração. Fonte: Bucur (2005).

Rabe *et. al.* (2004) apresentam exemplo de associação de cores ligadas às variações de velocidades em função da condição da árvore (Figura 2.6).

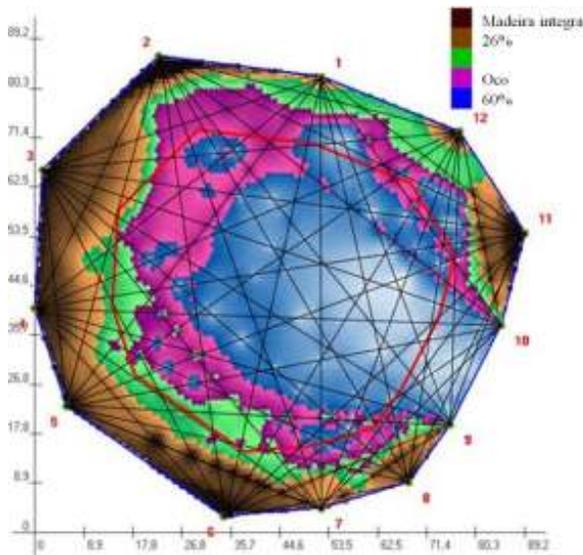


Figura 2.6 Exemplo de cores utilizadas na tomografia por propagação de ondas mostrando a região com maior deterioração (área azul). Verde e violeta indicam zonas de início da deterioração e zonas de deterioração moderada enquanto o marrom são zonas intactas.

Fonte: Rabe *et. al.* (2004).

Deflorio *et. al.* (2007) utilizaram tomografia obtidas por meio de ondas geradas por stress wave para detectar a deterioração provocada por 6 tipos de fungos em madeira de Douglas Fir (*Pseudotsuga manziessi*), Beech (*Fagus grandifolia*), Oak (*Quercus robur*) e Sycamore (*Populus tremuloides*). Após inoculação artificial ensaios foram realizados aos 2, 16 e 27 meses. Os autores utilizaram 14 sensores em torno do disco os quais realizaram medições cruzadas de velocidade. Além da variação de velocidade foram avaliadas, também, perdas de peso e redução de densidade para a realização de comparação dos resultados. Exemplo de resultado pode ser visto na Figura 2.7.

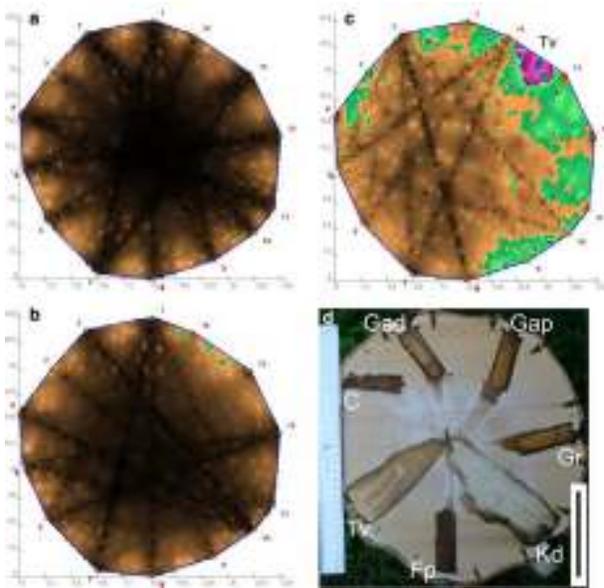


Figura 2.7 Tomogramas na espécie Sycamore depois de 2 meses (a), 16 meses (b) e 27 meses (c) de inoculação. Seção transversal do disco (d) com indicação das posições de inoculação dos diferentes fungos sendo: C = controle; Fp = *Fomitopsis vinicola*; Gad = *Ganoderma resinaceum*; Kd = *Kretzschmaria deusta*; Tv = *Trametes versicolor*. Fonte: Deflorio *et. al.* (2007).

Deflorio *et. al.* (2007) concluíram que a tomografia por propagação de ondas foi capaz de detectar a deterioração por fungos desde o início da inoculação. Em todas as combinações de fungo-hospedeiro foram detectadas perdas de peso, redução da densidade e redução da velocidade de propagação de ondas.

Kim *et. al.* (2007) realizaram estudo para avaliar equipamento de tomografia ultrassônica desenvolvido por eles, utilizando dois algoritmos para a geração das imagens. Para a realização dos ensaios utilizaram um cilindro de *Pinus densiflora* (*Pinus densiflora*), com 200 mm de diâmetro e 300 mm de altura, no qual foi inoculado um fungo (*Fomitopsis palustris*) no centro da peça e após 8 meses foram realizadas as medições para avaliar a deterioração. Para as medições a amostra foi dividida em 3 discos ao longo do comprimento, e, em cada disco, as medições foram realizadas em malha de 20 mm x 20 mm em duas direções perpendiculares entre si.

Após as medições os discos foram cortados para realizar comparação das imagens geradas pelo equipamento com o estado real da peça. Kim *et. al.* (2007) também retiraram

corpos de prova prismáticos de 20 mm x 20 mm x 60 mm entre os discos para realizarem medições de densidade e de resistência a compressão. Para a obtenção das imagens os autores compararam duas técnicas: um algoritmo desenvolvido pela equipe, denominado de Distribuição Elétrica Constante (DET), e um algoritmo utilizado em equipamentos de avaliações médicas, denominada Filtro por Retorno de Projeção (FBP). O algoritmo desenvolvido pelos autores levava em conta a anisotropia da madeira e a difração do ultrassom no material.

Na análise visual, Kim *et. al.* (2007) verificam que o sintoma de ataque do fungo não podia ser observado. Os resultados dos ensaios nos corpos de prova indicaram que a densidade básica reduziu cerca de 30% na região da deterioração, passando de 380 kg.m^{-3} para 300 kg.m^{-3} e que a resistência a compressão paralela as fibras reduziu cerca de 40%, de 50 MPa (máximo valor obtido) para 20 MPa (valor obtido na região atacada pelo fungo).

Considerando as imagens geradas os autores observaram que o equipamento permitiu a identificação da região com máxima deterioração com ambos algoritmos utilizados para a elaboração da imagem. No caso da região de início da deterioração, a qual possuía densidade cerca de 10% inferior à região não afetada, somente o algoritmo DET produziu imagem capaz de identificar o ataque. Apesar do pequeno decréscimo de densidade essa região já apresentava valores de resistência muito variáveis e alguns bem inferiores à madeira sã (20 a 40 MPa).

Fan *et. al.* (2008) afirmam que quando as mudanças de impedância acústica são notáveis entre a peça sã e com oco, a qualidade da imagem diminui pela influência da refração e da reflexão da onda sonora. Além disso, a reconstrução da imagem utilizando o algoritmo de FBP apresenta valor negativo para o pixels, tornando difícil estabelecer a quantidade, o nível e a distribuição da degradação com a imagem da Tomografia Computadorizada (CT).

Para resolver alguns problemas do algoritmo FBP, o algoritmo de Máxima Verossimilhança e de Maximização da Expectativa (ML-EM) é usado em aplicações médicas. O Processo ML-EM apresenta valor positivo para os pixels e a absorção, o espalhamento e a resolução podem ser corrigidos no processo de ML-EM.

A inspeção de madeira por CT utilizando, de forma comparativa, os algoritmos FBP e o ML-EM. A imagem tomográfica foi reconstruída utilizando 306 pontos de Tempo de Propagação de Ondas (TOF), coletados com transdutores que tinham a função de transmissores e receptores e comprimento de onda de 40 mm. As medições foram dispostas

em intervalos iguais.

Fan *et. al.* (2008) prepararam quatro peças de madeira (*Pseudoacacia robinia*) com defeitos artificiais como amostra. O centro dos defeitos artificiais estava a 50 mm da medula. Os diâmetros dos defeitos artificiais foram de 18 mm, 22 mm, 33 mm e 40 mm. O diâmetro do disco inspecionado foi 220 mm. As imagens reconstruídas com base no método FBP e ML-EM são mostradas na Figura 2.8.

Segundo Fan *et. al.* (2008) o defeito pode ser reconhecido em todas as imagens. No entanto, o defeito não pode ser dimensionado claramente nas imagens utilizando o algoritmo FBP. Foram observadas algumas interferências nas imagens obtidas pelos algoritmos FBP, ML-EM (a) e ML-EM (b). Na reconstrução da imagem do ML-EM (c), as interferências quase desapareceram, e a qualidade da imagem foi melhorada. No caso do ML-EM (a) foram realizadas 36 medições, no ML-EM (b) 53 medições e no ML-EM (c) 72 medições, ou seja, a malha foi sendo detalhada.

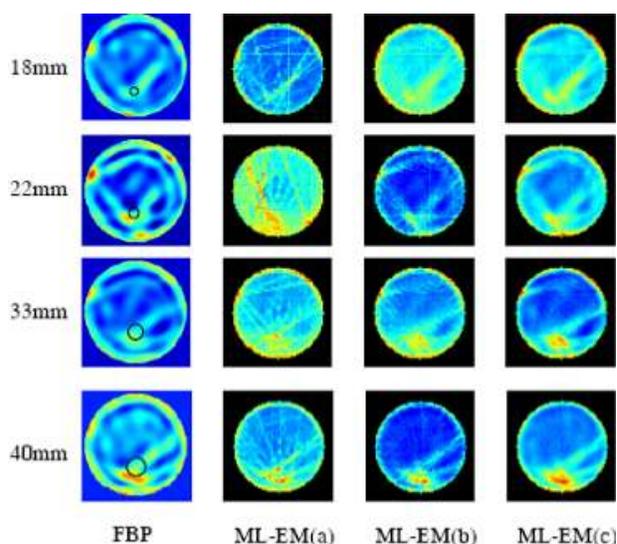


Figura 2.8 Reconstrução de imagens utilizando modelos algoritmos coletados de medições em disco de madeira. Fonte: Fan *et. al.* (2008).

Fan *et. al.* (2008) concluíram que quando o método ML-EM foi utilizado para a CT por ultrassom, os 306 dados de TOF não foram suficientes para obter imagens nítidas. As interferências de linha que apareceram nas imagens reconstruídas ao aplicar o método ML-EM para a CT ultrassom devem ser minimizadas se forem obtidos mais dados de TOF ou ao serem

usados processos de interpolação de imagem mais adequados.

Lasaygues *et. al.* (2007) geraram tomografia ultrassônica usando equipamento de ultrassom (Epoch, Panametrics, Alemanha) e transdutores com frequência nominal de 0,5 MHz. Foram utilizadas amostras de madeira de Abeto (*Picea abies*) na condição saturada, com casca, e com 125 mm de diâmetro. Uma mistura de cola e serragem foi colocada em furos de 30 mm de diâmetro perfurados no centro das amostras. O algoritmo de reconstrução foi o algoritmo denominado UCT, que tem como base a soma e a difusão das projeções filtradas. O tamanho das imagens foi de 300 x 300 pixels.

Devido às propriedades acústicas da madeira (atenuação e contraste de impedância), foi necessário adaptar a inversão linear, procedimento usualmente aplicado aos dados, usando um método de aproximação linear denominada aproximação de Born. Lasaygues *et. al.* (2007) encontraram dificuldades, principalmente devidas à fortes atenuações que ocorreram durante a propagação das ondas em função da água contida na madeira. Em virtude dessa atenuação os sinais tiveram que ser ampliados e, após essa ampliação, os autores consideraram que os resultados da tomografia ultrassônica representaram, de forma adequada, a condição real da peça.

Göcke *et. al.* (2007) afirmam que existem algumas circunstâncias que podem afetar a obtenção de bons resultados na técnica de inspeção não destrutiva em árvores vivas. Dentre elas os autores destacam a presença de fissuras, falhas nos anéis de crescimento e cavidades na madeira, as quais podem confundir as imagens geradas pelos equipamentos não destrutivos, tornando importante o conhecimento prévio destes tipos de ocorrências características em algumas espécies. Os autores realizaram amplo estudo no qual analisaram duas técnicas de inspeção de árvores: a tomografia utilizando propagação de ondas e a tomografia utilizando impedância elétrica. Além da análise das técnicas de forma isolada, no mesmo trabalho realizaram, também, análise de resultados associando as duas técnicas. Para os ensaios utilizaram as espécies Maple (*Acer ssp*), Beech (*Fagus sylvatica*), Oak (*Quercus robur*) e Cedar (*Cedrus ssp*).

Propriedades elétricas (resistividade e condutividade) permitem obter conclusões a respeito da estrutura de objetos, e foi com base nessas propriedades que a técnica foi desenvolvida. No caso da técnica utilizando a impedância, as medições são realizadas com a introdução de eletrodos, aos pares, em torno do tronco, nos quais se aplica corrente elétrica. A

condução da corrente depende da distribuição da resistividade, a qual é medida por meio da diferença de potencial (voltagem). No caso da existência de anomalias no tronco há um acréscimo de voltagem. Enquanto a técnica de ultrassom é baseada nas propriedades mecânicas da madeira, a técnica da impedância está associada às propriedades químicas.

Göcke *et. al.* (2007) concluíram que a tomografia por impedância elétrica apresenta resultados ambíguos e exige muitos mais pontos de medição do que a tomografia ultrassônica. Além disso, cada espécie apresenta uma distribuição de resistividade típica e que, adicionalmente, varia com a época do ano, dificultando a obtenção de um parâmetro de referência. Os autores indicam que a combinação dos dois métodos, impedância elétrica e tomografia ultrassônica, oferecem novas oportunidades para a análise de defeitos em árvores e para as pesquisas.

Liang *et. al.* (2007) selecionaram 20 árvores de Black Cherry (*Prunus serotina*) para realizar ensaios com tomografia sônica, a fim de detectar defeitos internos. As árvores foram escolhidas com base em pré-seleção utilizando avaliação visual, medições com stress wave e avaliações fisiológicas, com o objetivo de obter amostragem com árvores sem sintomas de ataque, árvores com sintomas de ataques leves e árvores muito atacadas. Das 20 árvores inicialmente escolhidas foram adotadas 12 para a amostragem final. Essas 12 árvores passaram por medições utilizando stress wave. Inicialmente as medições eram realizadas a 500 mm do solo.

Liang *et. al.* (2007) observaram, pelos resultados de velocidade, as árvores com grande probabilidade de estarem com deterioração ou defeitos internos. Para essas árvores outras duas medições eram realizadas a 1000 mm e a 1500 mm do solo. Após as medições as imagens foram reconstruídas utilizando um software desenvolvido para essa finalidade. Não há detalhamento no artigo a respeito do software. Após os ensaios as árvores foram cortadas e delas foram retirados discos de 50 mm de espessura em todos os pontos de medição, os quais foram imediatamente fotografados. Em seguida os discos foram transportados ao laboratório onde passaram por avaliação visual.

Nessa avaliação foram observados os tipos de defeito, as variações de coloração e a localização dos pontos de degradação mais severos. Dentre os 12 discos, 7 foram escolhidos para a realização de testes de dureza. Para isso os pesquisadores fizeram uma grade (x, y) de aproximadamente 250 mm x 250 mm para servir de guia para o ensaio de dureza. Os discos

foram então condicionados em câmara de climatização até atingirem 12% de umidade.

Liang *et. al.* (2007) realizaram os ensaios de dureza Janka de acordo com a ASTM D143 (1994). Os valores de dureza foram utilizados para a determinação da distribuição de dureza na seção transversal. Um mapa tridimensional de dureza foi gerado utilizando o software Matlab. As análises iniciais (visual e stress wave) permitiram a classificação do material em 4 sub-grupos em função do nível de deterioração. As árvores ensaiadas possuíam DAP entre 340 mm a 610 mm.

Os discos demonstraram haver grandes variações nos tipos de defeitos, sendo os mais comuns a deterioração na região da medula e fissuras internas. Liang *et. al.* (2007) concluíram que, para a espécie avaliada, o stress wave permitiu detectar o tamanho, a forma e a localização do defeito. Os autores descrevem, no entanto, que há necessidade de estudos adicionais, uma vez que, quando o tipo de defeito é a deterioração da medula o método apresenta resultados conservadores, uma vez que a imagem indicou defeitos com proporções menores do que as que foram indicadas pelos mapas de dureza. Por outro lado, no caso de fissuras, a técnica tende a mostrar defeitos maiores que os reais.

Najafi *et. al.* (2009) realizaram inspeções com onda ultrassônica (SylvatestDuo, Concept Bois-Technologie, Suíça) a fim de detectar ocos em Beech (*Fagus orientalis*). Para a obtenção de melhores contrastes, discos de árvores saudáveis de diferentes secções do tronco foram selecionados e furos (representando apodrecimento interno) foram criados manualmente e progressivamente alargados. Os furos artificiais foram de dois tipos, circulares e lineares. Velocidades de ondas de ultrassom foram mensuradas nesses discos de madeira sem furos e com os furos de diferentes tipos e em diferentes posições.

Os resultados deste estudo mostraram que as velocidades das ondas ultrassônicas diminuíram significativamente com o aumento das dimensões dos furos. A localização dos furos não teve qualquer influência sobre a magnitude ou sobre o nível de redução da velocidade. A comparação entre os orifícios circulares e lineares mostrou que os lineares tinham maior efeito sobre a diminuição das velocidades de ultrassom, ainda que a relação entre o volume da parte oca e maciça fosse maior para os furos circulares. Esse resultado levou Najafi *et. al.* (2009) a concluírem que a onda se desvia do furo, como também concluíram Wang *et. al.* (2004).

Conforme Bucur (2005) o método da difração de ondas de ultrassom também pode

ser utilizado para a elaboração de imagem representativa da condição interna de árvores. Nesse caso um aspecto muito importante para a obtenção de bons resultados se refere ao número de pontos mensurados. Quanto mais fina a malha melhor a qualidade da imagem, pois há redução dos pontos “cegos” do objeto sob inspeção.

Lin *et. al.* (2008) utilizaram o método de tomografia ultrassônica em 10 discos de Cedar (*Cryptomaria japonica*) onde foram realizados orifícios artificiais de forma circular em duas posições diferentes - no centro e próximo ao alburno. Esses orifícios foram realizados com aumento gradual a cada 20 mm, iniciando em 10 mm e atingindo um valor máximo de 230 mm. Os discos foram retirados de três árvores com diâmetros de aproximadamente 1300 mm. Inicialmente as medições foram realizadas, nas três árvores vivas, em seção próxima ao nível do solo utilizando-se o equipamento de ultrassom (Sylvatest, Suíça) com transdutores de frequência de 22 kHz.

Das árvores foram retirados discos de 100 mm de espessura e, logo após o corte, os discos foram embalados em sacos plásticos e refrigerados por 24 horas a fim de conservar a umidade do momento do corte. As medições nas árvores e nos discos com orifícios artificiais foram realizadas em malha de difração.

Para a geração das imagens provenientes dos resultados das medições com ultrassom foi utilizado o software Arbotom (Rinn Tech, Alemanha). As correlações obtidas entre a velocidade ultrassônica e o raio do orifício do disco apresentaram coeficientes de correlação entre 0,94 e 0,97. As imagens (Figura 2.9) foram comparadas com o disco real e Lin *et. al.* (2008) concluíram que o mapeamento utilizando diferença de cores permitiu a detecção aproximada dos orifícios.

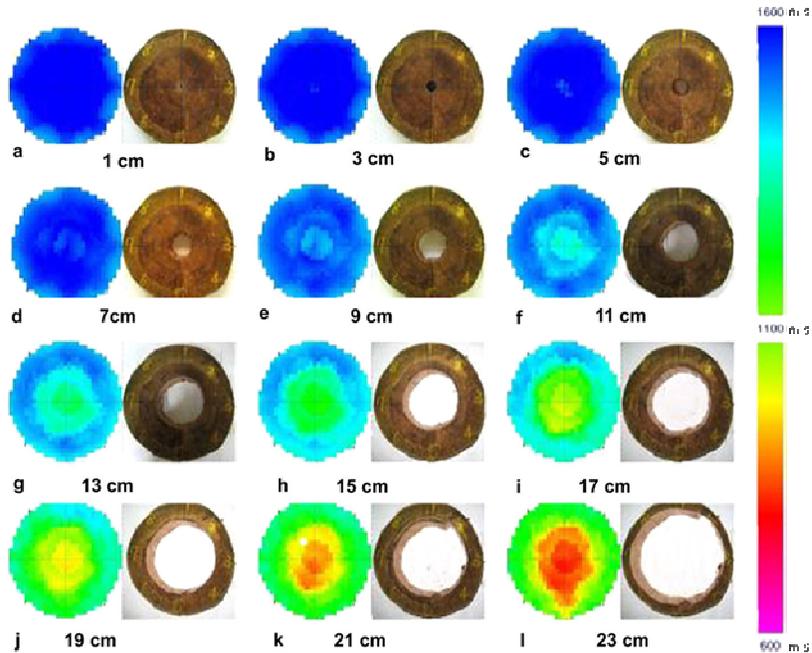


Figura 2.9 Imagens de ocos no centro da peça por meio de tomografia ultrassônica. Fonte: Lin *et. al.* (2008).

Allison *et. al.* (2007) compararam técnicas e equipamentos para ensaios não destrutivos em 10 árvores de Red Pines (*Pinus resinosa*) com maior probabilidade de conter defeitos na estrutura interna do fuste. Para a comparação utilizaram o teste visual, um equipamento de stress wave (Fakopp), um equipamento de tomografia baseada em stress wave (Fakopp 2D), um equipamento baseado em tomografia ultrassônica (PICUS Sonic Tomograph) e um equipamento baseado na resistência à penetração (Resistógrafo). Inicialmente as árvores foram examinadas visualmente a fim de diagnosticar previamente qualquer defeito externo que pudesse ser também identificado com os equipamentos.

Após esta análise visual os três primeiros aparelhos citados foram utilizados para identificar prováveis defeitos internos nas árvores. O equipamento de stress wave indicou problema em 3 árvores. Os problemas foram confirmados com o uso da tomografia por stress wave, tomografia por ultrassom e com o resistógrafo.

Essas três árvores também haviam sido indicadas, pela análise visual, como portadoras de deterioração. O equipamento de tomografia ultrassônica utilizou 12 sensores, o que possibilitou obter melhor identificação e resolução das áreas dos ocos, do que com o equipamento de tomografia utilizando ondas de tensão que utilizou 8 sensores.

Porém, quanto a localização e indicação de presença de ocos, ambos aparelhos tiveram resultados correlatos quando comparados entre si e ambos apresentaram resultados compatíveis com posteriores medições de resistência a penetração, confirmando a presença de deterioração.

Lee *et. al.* (2007) inspecionaram uma construção histórica do Daeseongjeon em Yeosan Hyanggyo na Korea. Essa construção possui colunas cilíndricas de madeira e a inspeção foi realizada utilizando três métodos de inspeção: o método do martelo, o ultrassom e o resistógrafo. No total foram inspecionadas 14 colunas, sendo 10 colunas com a base enterrada, e as medições foram a 0,75 m do piso.

Na inspeção com o método do martelo foram verificados 36 pontos buscando-se sons de áreas vazias, as quais seriam indicação de defeitos. O método do martelo identificou apenas 3 colunas com defeitos internos, sendo confirmadas pelos outros equipamentos.

Para a inspeção com ultrassom foram utilizados transdutores de 68 kHz em 18 pontos em torno da seção da coluna. O método do ultrassom identificou 10 das 14 colunas como portadora de defeitos internos.

Para a inspeção com resistógrafo foram utilizados 8 pontos. O método de inspeção por resistógrafo obteve resultados correlatos com os testes acústicos (ultrassom), identificando rachaduras e ocos internos através dos gráficos gerados pelo equipamento.

Este estudo concluiu que o ultrassom possibilitou identificar, com maior precisão, a condição interna das colunas. No entanto, o resistógrafo apresentou maior precisão na detecção de defeitos menores. O método do martelo obteve menor precisão e menor número de acertos em relação aos outros dois métodos, não detectando defeitos em colunas que estavam deterioradas internamente, conforme detecção pelos outros dois métodos.

As referências apresentadas e brevemente discutidas nesse capítulo indicam que as pesquisas de métodos não destrutivos para a avaliação da sanidade e detecção da condição interna de árvores têm sido foco atual de atenção de muitos pesquisadores em várias partes do mundo. Dessa forma, acredita-se que o desenvolvimento desse tema seja também viável e importante para o setor florestal brasileiro.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados os materiais, os equipamentos e a metodologia utilizada em três diferentes etapas da pesquisa. Inicialmente são apresentados os materiais utilizados em cada etapa e, em seguida, a metodologia.

3.1 Material

Para os ensaios de todas as etapas foi adotada a espécie Pequiá (*Aspidosperma desmanthum*), cuja densidade é de aproximadamente 790 kg.m^{-3} na condição seca ao ar (umidade em torno de 13%), e de cerca de 1210 kg.m^{-3} na condição saturada. Esta espécie foi escolhida por apresentar problemas de aparecimento de ocos com maior frequência, e por ser a espécie de maior disponibilidade na empresa com a qual se firmou parceria para o desenvolvimento desse projeto - a Tora Brasil. Essa empresa produz móveis utilizando “design” de peças de madeira com ocos na produção de mobiliário e de decoração diferenciados. A madeira é adquirida no Pará. .

Considerando se tratar de pesquisa científica houve preocupação de se obter material (madeira nativa) que fosse legalizado e essa empresa possui, desde 2007, o selo FSC – Forest Stewardship Council (Conselho de Manejo Florestal), que confere a garantia de que a matéria prima utilizada provém de áreas de manejo florestal de acordo com critérios de mínimo impacto ao meio ambiente. Dessa forma, foram utilizadas, no desenvolvimento da pesquisa, peças de madeira de espécies trazidas do estado do Pará, fornecidas pela empresa Tora Brasil.

Para a realização dos ensaios de todas as etapas utilizou-se equipamento de ultrassom (USLab, AGRICEF[®], Brasil), desenvolvido pela empresa AGRICEF[®] em parceria com o grupo de pesquisa do LabEND/UNICAMP (Figura 3.1).



Figura 3.1 Equipamento de Ultrassom Modelo USLab, AGRICEF, Brasil.

Para a escolha da frequência e do tipo de transdutor mais adequado às medições realizou-se, na primeira etapa (item 3.1.1), medições com transdutores de diferentes frequências: 25 kHz, 45 kHz e 80 kHz de faces planas (Figura 3.2a) e com transdutores de 45 kHz de faces exponenciais (Figura 3.2b). Já na segunda etapa (item 3.1.2) foram utilizados apenas os transdutores de faces planas de 45 kHz. Na etapa três (item 3.1.3) foram utilizados apenas transdutores de 45 kHz exponenciais. Para os ensaios utilizando o transdutor de faces planas foi utilizado gel medicinal como acoplante.

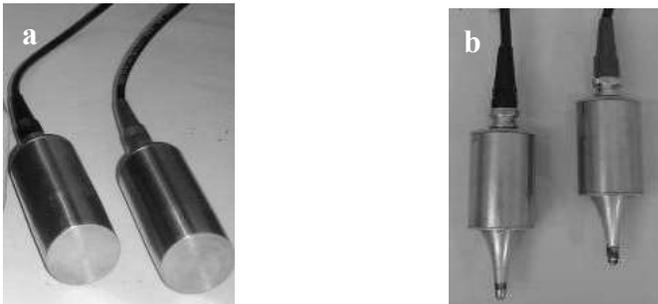


Figura 3.2 Tipos de transdutores: a) Transdutores de faces planas. b) Transdutores de faces exponenciais.

Para a organização e avaliação dos dados e para a elaboração das imagens foram utilizados os seguintes programas: o Microsoft Office Excel[®], o Statgraphics Centurion[®], o AutoCAD[®] e o ArcGis 9.3[®].

3.1.1 Etapa 1: Disco e prisma com ocos naturais

Para os ensaios da Etapa1 foram utilizadas duas secções de toras de Pequiá. Uma das peças com 530 mm x 410 mm x 50 mm, com casca e com oco natural (Figura 3.3a), foi

denominada de Disco com oco natural. A outra peça, com 390 mm x 390 mm x 80 mm, sem casca e com oco natural (Figura 3.3b) foi denominada de Prisma com oco natural. Essas duas peças apresentavam umidade de 35%. No caso das duas peças a maior parte da madeira estava íntegra, exceto pela zona onde havia a presença do oco natural.

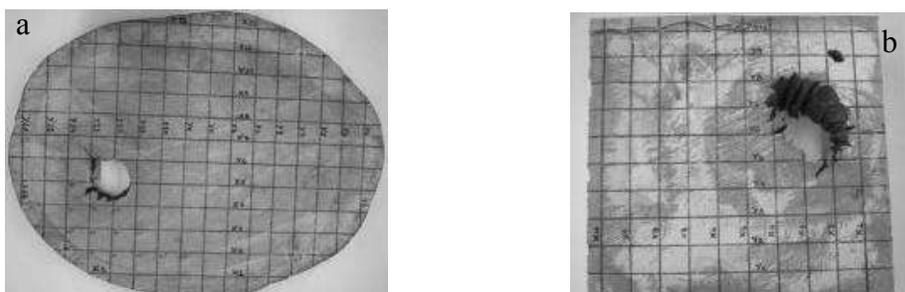


Figura 3.3 Peças de Pequiá com malha esquematizada para as medições: (a) Disco de Pequiá e (b) Prisma de Pequiá.

Nessa etapa as medições foram realizadas com transdutores de diferentes frequências - 25 kHz, 45 kHz e 80 kHz de faces planas (Figura 3.2a) - e com transdutores de 45 kHz de faces exponenciais (Figura 3.2b), a fim de identificar qual transdutor seria o mais sensível na detecção dos ocos.

3.1.2 Etapa 2: Prismas com ocos artificiais

Na Etapa 2 a amostra foi composta de duas peças provenientes de troncos de Pequiá sem as costaneiras, íntegros e em forma de prismas com 390 mm x 390 mm x 50 mm. Essas peças foram denominadas de Prismas com ocos artificiais (Figura 3.4) e apresentavam umidade de 33%.

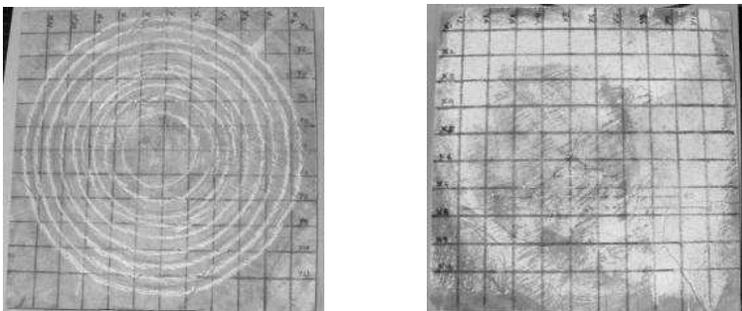


Figura 3.4 Prismas de Pequiá

Em função da análise dos resultados da Etapa 1, nessa etapa as medições foram realizadas apenas com transdutores de frequência de 45 kHz. Tendo em vista a forma geométrica da peça (prisma de faces retas) optou-se pelo uso do transdutor plano (Figura 3.2a).

As amostras anteriormente descritas (Figura 3.4) foram ensaiadas conforme a metodologia proposta, descrita no item 3.2.2, na qual o oco artificial foi produzido utilizando-se máquina de CNC (Comando Numérico Computadorizado) do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) em Itatiba-SP (Figura 3.5).

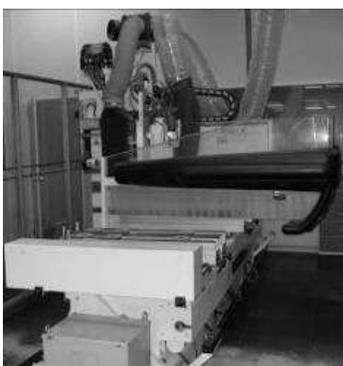


Figura 3.5 Equipamento CNC (Comando Numérico Computadorizado) do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) em Itatiba-SP.

3.1.3 Etapa 3: Disco com ocos artificiais

Para avaliar a metodologia de inspeção de toras, baseando-se nos ensaios das etapas anteriores foi utilizada, como amostragem, uma peça sã, com casca, proveniente de tronco de

Pequiá com diâmetro médio 670 mm e espessura 100 mm e com 33% de umidade. (Figura 3.6).

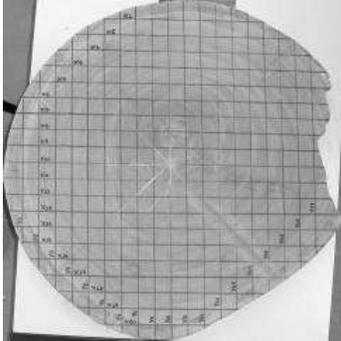


Figura 3.6 Disco de Pequiá maciço (com casca e albúrnio).

Em função dos resultados da Etapa 1, convalidados na Etapa 2, nessa etapa as medições foram realizadas com transdutores de 45 kHz de frequência. Tendo em vista a forma geométrica da peça foram adotados os transdutores de faces exponenciais (Figura 3.2b), evitando-se problemas de alinhamento observados na Etapa 1 com o uso de transdutores de faces planas. Também se levando em conta problemas de variação do sinal observados na Etapa 1, na qual não se utilizou furos para a introdução do transdutor exponencial, nessa etapa os furos foram executados, permitindo melhor acoplamento e alinhamento do transdutor.

A amostra anteriormente descrita (Figura 3.6) foi ensaiada conforme a metodologia proposta, descrita no item 3.2.3, na qual o oco artificial foi produzido utilizando-se máquina de CNC (Figura 3.5).

3.2 Métodos

3.2.1 Etapa 1: Disco e Prisma com ocos naturais

Nessa etapa os objetivos foram avaliar, de forma inicial, a sensibilidade do ultrassom na detecção de ocos na madeira, a influência da frequência do transdutor, a influência do tipo de transdutores (plano e exponencial), a existência de correlação estatisticamente significativa entre a velocidade e a presença de um oco na madeira, e, também, a viabilidade de se transformar o resultado das medições em imagem representativa da condição da peça real de

madeira (tomografia ultrassônica).

Essa etapa foi fundamental para o aprofundamento da elaboração da proposta metodológica que foi adotada nas etapas seguintes.

As medições de velocidade de propagação de ondas de ultrassom foram realizadas utilizando-se dois transdutores, posicionados um frente ao outro em faces opostas. Essa medição é chamada direta e a onda gerada foi de compressão (Figura 3.7).

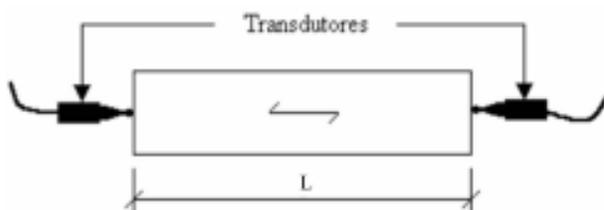


Figura 3.7 Posicionamento dos transdutores em medição direta e onda de compressão.

Fonte: Azevedo (2004).

O equipamento de ultrassom permite a medição do tempo (t) que a onda leva para ser propagar no comprimento de percurso (L) que, no caso dessa medição, é a distância entre os transdutores. Assim, a velocidade foi determinada utilizando a Equação 3.1.

$$V = L / t$$

Equação 3. 1

Tanto no disco quanto no prisma de Pequiá foi idealizada malha reticulada de medição com dois eixos perpendiculares entre si, denominados X e Y, de 30 mm x 30 mm (Figura 3.8).

O espaçamento da malha reticulada foi determinado em função do diâmetro do transdutor plano, sendo a distância mínima que permite colocar dois transdutores, um ao lado do outro, no caso de haver a possibilidade de usar vários transdutores ao mesmo tempo durante as inspeções.

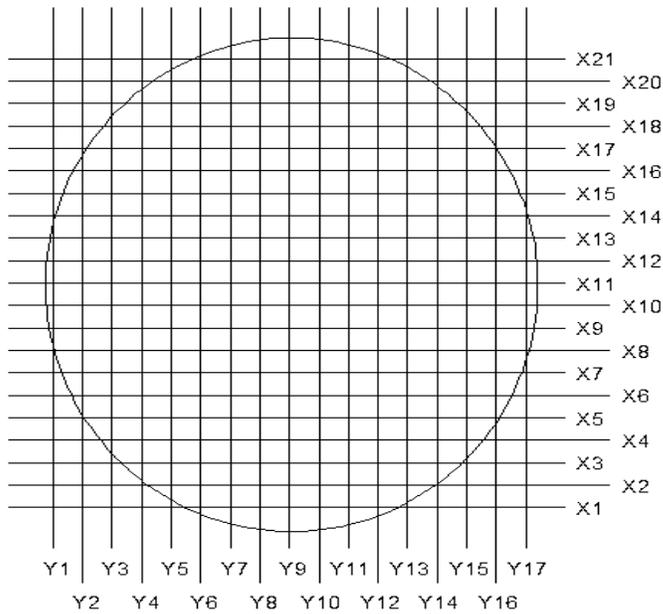


Figura 3.8 Malha reticulada com dois eixos (X,Y) idealizada para as medições de ultrassom.

Para o disco foram utilizadas, na malha reticulada de medição (X1, X2, etc. Y1, Y2, etc.), transdutores de diferentes frequências 25 kHz, 45 kHz e 80 kHz de faces planas (Figura 3.2a) e transdutores de 45 kHz de faces exponenciais (Figura 3.2b). Para cada tipo e frequência de transdutor foram obtidos os tempos de propagação das ondas (Figura 3.9 e Figura 3.10), com os quais foram determinadas as velocidades (Equação 3.1).

Esse procedimento teve como objetivo avaliar a influência da frequência e do acoplamento dos transdutores (plano e exponencial) nos resultados.

Após a análise dos resultados dos ensaios no disco, verificou-se que o transdutor de 45 kHz foi um dos que apresentou resultados adequados. Assim, no ensaio do prisma essa frequência foi adotada, por ser aquela para a qual, no laboratório, havia a disponibilidade de transdutores de faces planas e de faces exponenciais. Essa questão é importante, porque a opção do tipo de face do transdutor a ser utilizado é realizada em função da geometria da peça em análise, já que o transdutor de faces planas não se ajusta facilmente a peças com geometria circular e de pequeno diâmetro, por exemplo. Por outro lado, o transdutor de faces exponenciais exige que se realize um pequeno orifício nos pontos de medição, o que nem sempre é viável. Assim, a adoção de uma mesma frequência para a continuidade da pesquisa foi importante para não introduzir variabilidades adicionais nos resultados.

A área da parte ocada, que correspondia a uma determinada faixa de medição, foi

estimada considerando a onda passando pelo oco, como exemplificado no esquema das Figuras 3.9 e 3.10.

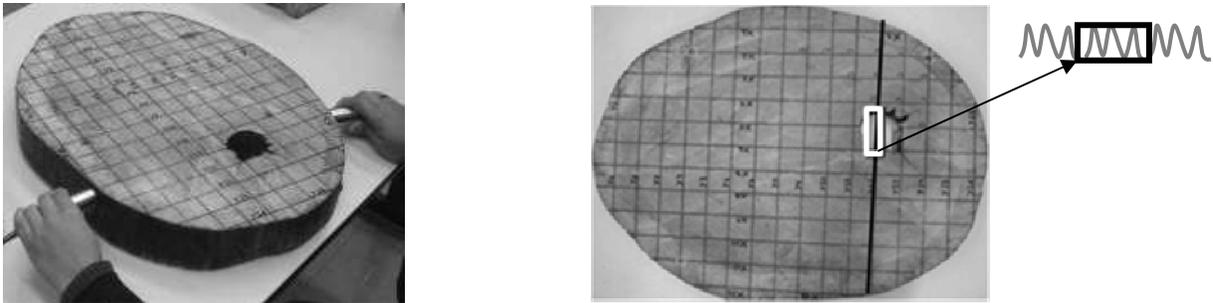


Figura 3.9 Medições de ultrassom na malha reticulada do disco e área de propagação da onda pelo oco (retângulo) calculada em cada posição de medição da malha.

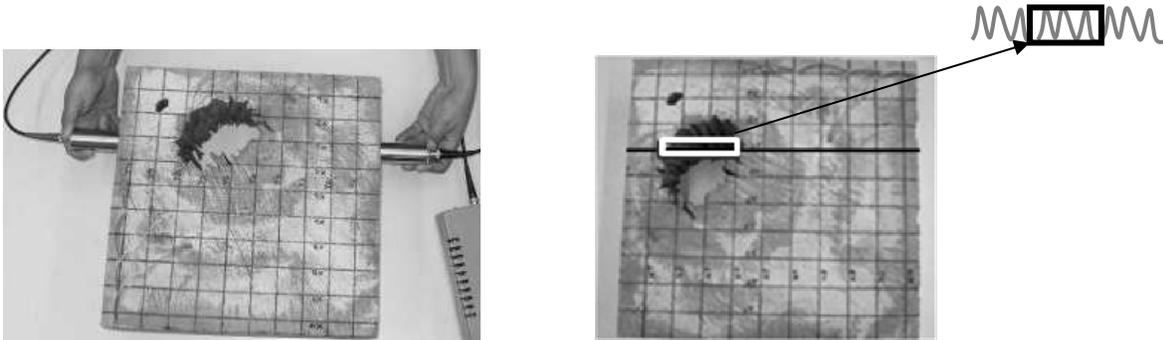


Figura 3.10 Medições de ultrassom na malha reticulada do prisma e área de propagação da onda pelo oco (retângulo) calculada em posição de medição da malha.

Para a obtenção de áreas mais exatas de ocos, as peças foram fotografadas e, utilizando-se o software AutoCAD[®], as áreas dos ocos e das partes maciças da madeira foram calculadas nas faixas correspondentes às medições de velocidade nos dois eixos.

O posicionamento e a pequena dimensão dos ocos nessas duas peças tornaram difícil a obtenção de grande número de diferentes áreas de oco que pudessem ser correlacionadas às velocidades de propagação das ondas de ultrassom, uma vez que apenas pequena parte da malha de medição efetivamente passava por esses ocos. Apesar disso, os resultados das velocidades e das áreas de ocos na direção correspondente foram utilizados para a determinação de correlações preliminares entre os parâmetros, utilizando-se, para isso, software estatístico Statgraphics, Centurion[®].

Como primeira tentativa de gerar imagens do prisma com oco natural, dois diferentes

métodos foram utilizados.

O primeiro método consistiu em utilizar as medições do tempo de propagação da onda e da distância entre os transdutores para determinar a velocidade de propagação das ondas ao longo da cada linha de medição nos sentidos X e Y. Para que fosse possível a geração das imagens, a velocidade média foi obtida através do cruzamento dos eixos X e Y, como esquematizado na Figura 3.11. A cada ponto da malha foi atribuído um valor resultante do cruzamento de velocidades entre os eixos X e Y e sua respectiva coordenada (x,y), obtida por meio do programa AutoCAD®. Tais dados foram interpolados por meio do método Inverso da Distância - IDW no ArcGis, e assim, obtidas as imagens representativas da variação da velocidade na peça. As cores das faixas utilizadas nas imagens estão associadas à variações da velocidade que, por sua vez, estão associadas à variação da dimensão do oco.

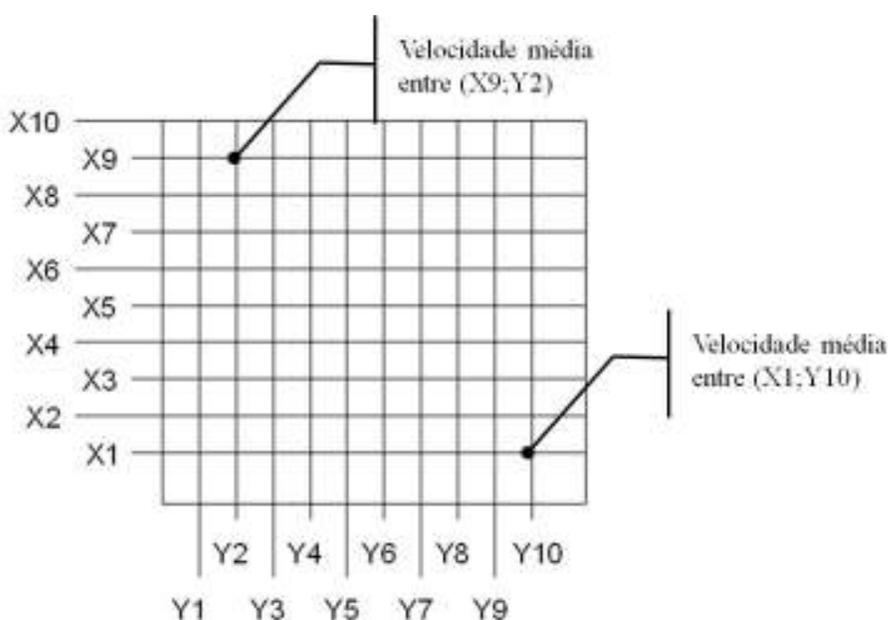


Figura 3. 11. Pontos de velocidade média dentro da malha.

O segundo método utilizado como tentativa de construção da imagem consistiu em utilizar apenas duas condições - a condição 1 (presença de oco) ou a condição 0 (ausência de oco). Para isso utilizou-se o mesmo procedimento de determinação da velocidade de propagação das ondas ao longo da cada linha de medição, nos sentidos X e Y adotado no método anterior. Para cada linha da malha foram determinadas coordenadas (x,y) dos pontos iniciais e finais com o auxílio do AutoCad, obtendo-se dessa forma uma tabela de dados

contendo as coordenadas de cada ponto com o respectivo valor de velocidade. Tais dados foram interpolados no ArcGis pelo método IDW gerando-se uma imagem vetorial. Essa imagem foi transformada em imagem raster (grid). Cada pixel dessa imagem possui uma coordenada e um valor de velocidade. Com base nos resultados da etapa 1 (item 4.4.1), foi fixada uma velocidade de 1600 m.s^{-1} para discriminar a presença (valores de velocidade menores que 1600 m.s^{-1}) ou ausência de oco (valores de velocidade maiores que 1600 m.s^{-1}) em cada pixel da peça, gerando dessa forma uma nova imagem que representa a condição da peça estudada.

As imagens geradas foram comparadas à situação real das peças, para que fosse verificada a viabilidade do uso dessa tecnologia e a aplicabilidade do método na inferência da existência de ocos nos troncos e de suas proporções em relação a parte sã.

3.2.2 Etapa 2: Prismas com ocos artificiais

Para a continuidade da pesquisa decidiu-se pela realização de novos ensaios utilizando peças inicialmente integras, nas quais furos (simulando ocos) com aumentos percentuais conhecidos foram sendo realizados. Esse procedimento foi realizado para confirmar a correlação linear entre a dimensão do oco e a redução da velocidade, obtida na etapa anterior. Na Etapa 1, além do pequeno número de pares de pontos (velocidade – oco) não havia como controlar a dimensão pois os ocos eram naturais, de forma que a amostragem não era a ideal para a determinação das correlações. Além disso, o procedimento de ocos artificiais dessa etapa permitiu, também, verificar a dimensão de oco a partir da qual o ultrassom apresenta sensibilidade de detecção.

Adicionalmente, a elaboração de furos artificiais permitiu a simulação de ocos de maiores dimensões do que os naturais da Etapa 1, de forma a ser possível verificar se a potência do equipamento seria suficiente para obter resultados em peças com diâmetros de ocos superiores aos estudados.

Nessa etapa optou-se, também, pela simulação de dois tipos de geometria para os ocos: a circular e a oblonga, por serem os tipos de geometrias mais próximas da condição real e com incidência nas árvores dessa espécie.

Os dois prismas de Pequiá, inicialmente são (sem oco natural), passaram por

medições de ultrassom utilizando a malha reticulada (30 mm x 30 mm), proposta na Etapa 1. Cada etapa do ensaio foi fotografada, de modo a se ter o maior número possível de detalhes.

Os dois tipos de orifícios artificiais foram realizados utilizando-se máquina de usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado) do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI de Itatiba (Figura 3.5). Os orifícios foram sendo aumentados nos seguintes percentuais em relação à área total: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 35% e 55% para o oco circular e 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80% para o oco oblongo (Figura 3.13).

O uso do CNC permitiu a realização desses orifícios de forma precisa. A Figura 3.12 apresenta os esquemas representativos das malhas reticuladas e dos orifícios artificiais (circular e oblongo) em seus respectivos percentuais de aumento e a Figura 3.13 mostra as peças após o último corte, ou seja, com os orifícios (circular e oblongo) em sua dimensão máxima.

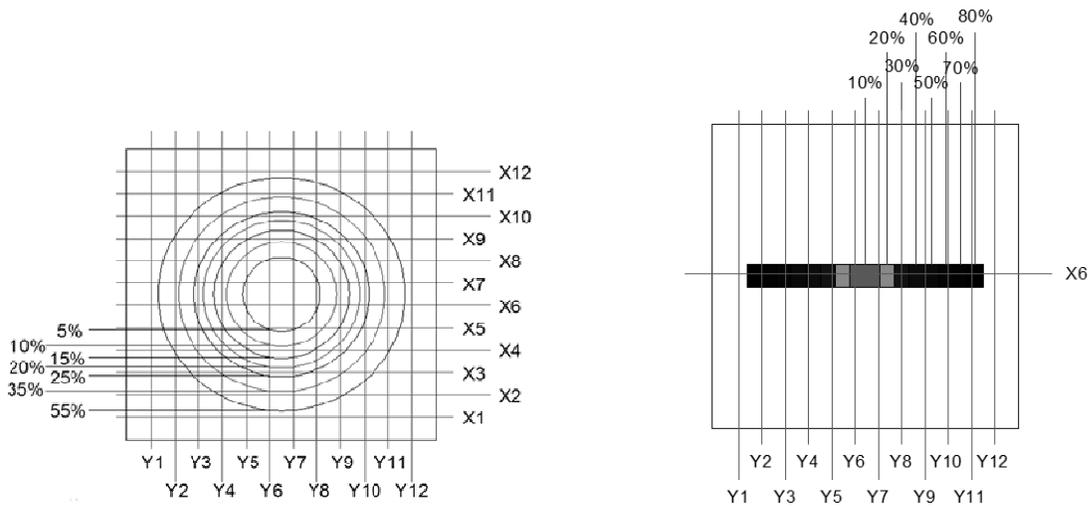
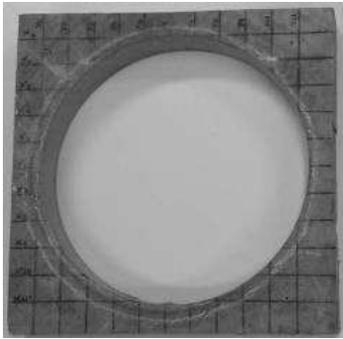
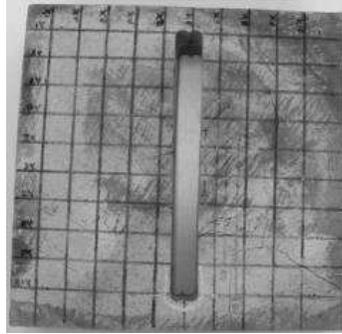


Figura 3.12 Esquema da malha reticulada e da produção de oco circular e oblongo artificiais com aumento percentual da dimensão em relação à parte sã.



a



b

Figura 3.13 Peça de Pequiá com orifício artificial circular de 55% (a) e peça de Pequiá com orifício artificial oblongo de 80% (b).

Os tempos de propagação das ondas (t) foram obtidos em cada faixa da malha reticulada (X1, X2, etc. Y1, Y2, etc.) utilizando-se o equipamento de ultrassom USLab. Os ensaios foram realizados utilizando-se transdutores de faces planas e de frequências 45 kHz, adotados em função dos resultados obtidos na Etapa 1.

Inicialmente foram realizadas medições de ultrassom em malha reticulada nas peças sãs (sem oco), determinando-se os tempos de propagação das ondas. Em seguida, foram realizados oscos artificiais segundo as porcentagens indicadas (Figura 3.12), com a finalidade de avaliar as variações do tempo de percurso e de velocidade de propagação de onda ultrassônica em função do tamanho do oco e do percurso realizado pela onda de ultrassom.

Adicionalmente foram realizadas avaliações da variação relativa do comprimento de percurso da onda (LR), proposta por Najafi *et. al.* (2009), utilizando a Equação 3.2 e a variação relativa da velocidade (RVC), proposta por Najafi *et. al.* (2009) e por Lin *et. al.* (2008), utilizando a Equação 3.4.

$$LR = [(L_{Referência} - L_{Percurso}) / (L_{Referência})] * 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde: $L_{Referência}$ é o comprimento de percurso da onda na peça integra e $L_{Percurso}$ é o comprimento obtido utilizando-se a velocidade obtida na peça integra e o tempo medido na peça com oco, conforme a Equação 3.3, baseado na Equação 3.1.

$$L_{\text{Percurso}} = V_{\text{Integra}} * T_{\text{Oco}} \quad \text{Equação 3. 3}$$

Onde: L_{Percurso} é o percurso que a onda de propagação teoricamente faz contornando o oco, V_{Integra} é a velocidade de propagação na peça integra e T_{Oco} é o tempo de propagação da onda na peça com oco.

$$R_{\text{VC}} = [(V_{\text{Referência}} - V_{\text{medida}}) / (V_{\text{Referência}})] * 100 \quad \text{Equação 3. 4}$$

Onde: $V_{\text{Referência}}$ é a velocidade na peça integra e V_{medida} é a velocidade medida na peça com o oco.

Para a geração das imagens, inicialmente a velocidade de propagação foi calculada segundo a Equação 3.1, onde L foi dado pelas distâncias entre os transdutores (DET) divididos pelo tempo de propagação, após a realização de cada orifício. Posteriormente foi calculado o L_{Percurso} através da Equação 3.3, com o qual foi possível gerar equação de regressão linear correlacionando a velocidade e o comprimento de percurso para cada porcentagem de orifício.

Considerando os comprimentos de percurso obtidos a porcentagem de oco (X%) foi calculada pela Equação 3.5

$$X\% = \frac{(L_{\text{Percurso}} * 100)}{\text{DET}} \quad \text{Equação 3. 5}$$

Assim, valores de X próximos de 0% indicam peça mais íntegra, já que $L_{\text{percurso}} \cong \text{DET}$, enquanto valores de X próximos de 100% peças com as maiores dimensões de ocos.

De posse das correlações entre velocidade e dimensão do oco (X) e entre variação de comprimento de percurso x dimensão do oco o processo de geração das imagens foi iniciado.

Com os valores de variação de comprimento de percurso em cada eixo da malha e suas respectivas coordenadas (x,y) foi criada tabela de dados, a qual por meio de interpolação Inverso da Distância - IDW no programa ArcGis 9.2, permitiu a geração de imagem vetorial das porcentagens de variação do comprimento de percurso. As cores das faixas utilizadas nas imagens estão associadas à variações do comprimento de percurso que, por sua vez, estão

associadas à variação da dimensão do oco.

As imagens geradas por essa técnica foram comparadas à situação real das peças, para que fosse verificada a viabilidade do uso dessa tecnologia e a aplicabilidade do método na inferência da existência de ocos nos troncos e de suas proporções em relação a parte sã.

Para verificar o comprimento de percurso obtido pela Equação 3.3, que considera a onda se desviando do oco, foram realizadas medições correspondentes ao menor perímetro em torno do oco produzido. Esse cálculo foi realizado utilizando-se fotos tiradas no momento do ensaio, as quais foram reproduzidas no programa AutoCad (Figura 3.14) e, através dele, os comprimentos de percurso em torno do oco puderam ser determinados de forma precisa. Esses valores foram comparados aos obtidos utilizando-se a Equação 3.3.

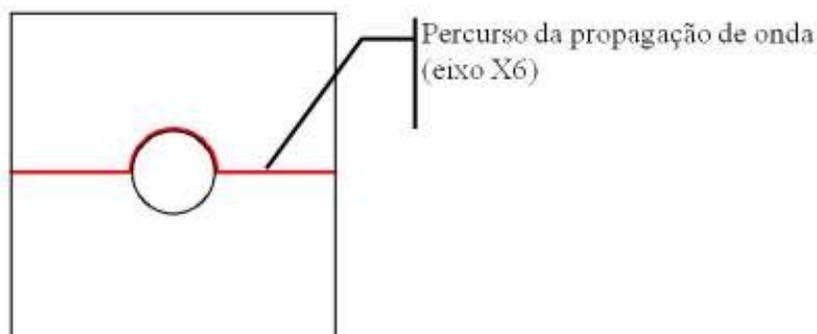


Figura 3.14. Exemplo do percurso da propagação de onda de ultrassom obtido pelo AutoCAD no eixo X6.

3.2.3 Etapa 3: Disco com oco artificial

Nessa etapa o objetivo foi o de consolidar os resultados das correlações, obtidas nas etapas anteriores para a espécie adotada na pesquisa (Pequiá), e avaliar um novo tipo de malha de medição. Assim, para os ensaios dessa etapa, utilizou-se um disco da mesma espécie de madeira (Pequiá) no qual as medições foram realizadas utilizando-se dois tipos de malha: reticulada (como nas etapas anteriores) e de difração (Figura 3.14).

Assim, nessa etapa, a malha reticulada continuou sendo utilizada, mas o arranjo de leituras de tempo de propagação das ondas não foi somente em linhas paralelas. Alguns pontos da malha reticulada foram utilizados para leituras tipo difração, segundo arranjos propostos por Divos e Szalai (2002), conforme Figura 3.14b.

No caso do arranjo proposto por Divos e Szalai (2002) o transdutor emissor é colocado em um dos pontos da malha difração enquanto o transdutor receptor é colocado nos demais pontos da malha, de forma que se tenha uma varredura em cada ponto da malha difração, que permite obter o comportamento da velocidade na peça de forma diferenciada em relação à varredura obtida em faixas planas, como no caso da malha reticulada das etapas anteriores preliminares (Figura 3.14c).

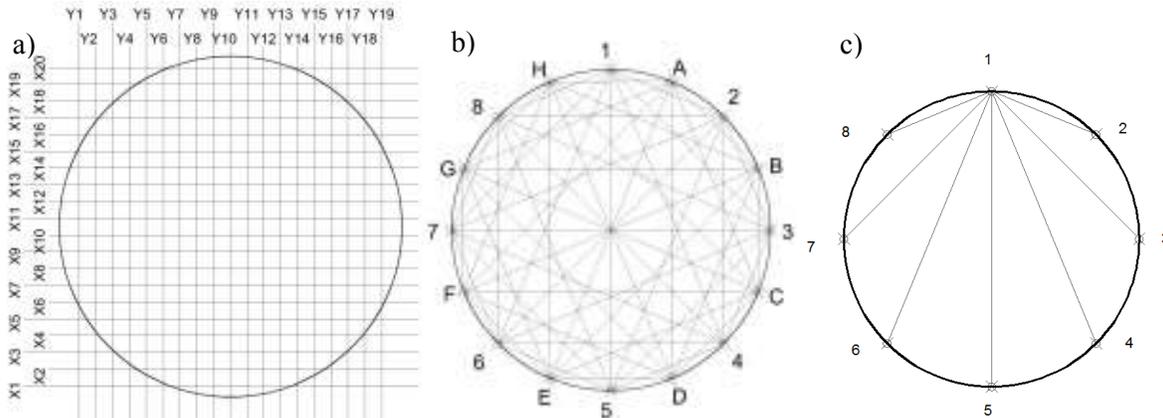


Figura 3.14 Esquemas dos pontos de medição: a) Mapeamento em malha reticulada. b) Mapeamento em malha difração. c) Exemplo de uma medição em malha difração.

No caso dessa pesquisa a peça foi esquematizada com duas malhas de difração, uma identificada por números (1 a 8) e outra identificada por letras (A a H) (Figura 3.15b). As duas nomenclaturas foram adotadas apenas para manter uma comparação com os resultados de Lin *et. al.* (2008), porque a peça era muito grande em comparação as utilizadas pelos autores citados. Em virtude da diferença entre os diâmetros, a manutenção do número de pontos utilizados por Lin *et. al.* (2008) teria como consequência a perda de precisão. Assim, para refinar o resultado, foi necessário aumentar o número de pontos da malha de difração.

Para a confirmação dos resultados obtidos nas etapas anteriores estudou-se também, nessa etapa, a variação da velocidade em função da dimensão do oco.

Nessa etapa foram adotados os transdutores de frequência 45 kHz de faces exponenciais. A adoção da frequência e a forma de utilização do transdutor exponencial (com furos) já foram previamente explicadas.

Para a obtenção da correlação entre a velocidade e a dimensão do oco foram realizados ensaios na peça sã (sem orifício) e na peça com os orifícios artificiais de dimensões

conhecidas e crescentes, conforme metodologia utilizada na Etapa 2.

Nessa etapa adotou-se um disco de Pequiá de grande dimensão, a fim de representar uma situação mais aproximada da situação real em campo para essa espécie e, mais uma vez, testar a potência do equipamento de ultrassom.

Da mesma forma como foi feito na etapa 2, para a obtenção dos ocos artificiais no disco maciço utilizou-se máquina de usinagem CNC. As dimensões dos ocos artificiais confeccionado nas peças em relação à parte sã tinham as seguintes proporções: 5%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% e 90%. Adotou-se somente o oco de forma circular. A Figura 3.15 mostra a peça integra (antes dos furos) e a peça com a dimensão máxima de furo.

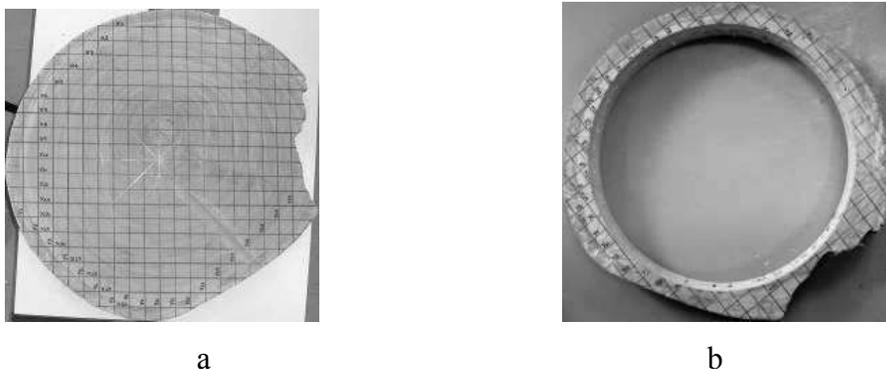


Figura 3.15 Peça de Pequiá integra (a) e peça de Pequiá com orifício artificial de 90% (b).

Os tempos de propagação das ondas (t) foram obtidos em cada faixa das malhas (reticulada e difração) utilizando-se equipamento de ultrassom USLab e, com esses tempos de propagação foram calculadas as velocidade.

Inicialmente as medições foram realizadas no disco sem nenhum oco e, em seguida, após cada realização de um orifício artificial, o disco passou por medições de ultrassom na malha reticulada e também na malha difração.

Os resultados de velocidade de propagação e de comprimento de percurso da onda foram analisados estatisticamente, utilizando-se análise de regressão por meio de programa computacional Statgraphics, Centurion[®].

Para as análises dos resultados da malha difração foram seguidos os passos sugeridos por Lin *et. al.* (2008). Esse autor definiu, de acordo com a varredura de medição, 4 diferentes rotas (Figura 3.16).

A Rota A corresponde à dois pontos adjacentes e seguidos, como no caso dos pontos 1 a 2, 2 a 3, 3 a 4 e assim por diante. A Rota B corresponde a um intervalo com um ponto entre os pontos de medição, como por exemplo, 1 a 3, 3 a 5 e assim por diante. A Rota C considera um intervalo com dois pontos entre os pontos de medição, como por exemplo, 1 a 4, 4 a 7 e assim por diante. A Rota D considera dois pontos frontais, como se fossem medições radiais, como, por exemplo, 1 a 5, 3 a 7 e assim por diante.

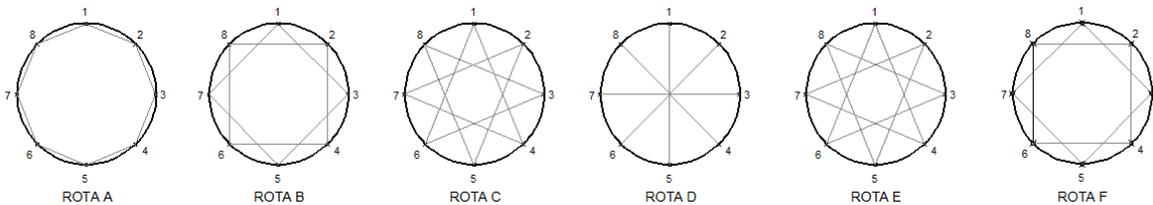


Figura 3.16 Rotas de A a D de medições na malha difração, de acordo com Lin *et. al.* (2008) e as Rotas E e F acrescentadas na pesquisa. Fonte: Lin *et. al.* (2008).

No caso dessa pesquisa, em virtude da grande dimensão da peça, foram ainda obtidas outras duas rotas de medição. A Rota E, que considera um intervalo com três pontos entre os pontos de medição e a Rota F que considera um intervalo com quatro pontos entre os pontos de medição.

Utilizando as rotas de medições A, B, C, D, E e F, foram calculados os valores de velocidade em função do aumento percentual do oco e, com esses valores, os modelos de correlação entre essas variáveis.

O primeiro passo para a geração das imagens do disco com ocos artificiais consistiu em determinar as velocidades para cada linha, tanto da malha reticulada quanto da malha difração.

O segundo passo consistiu em determinar as coordenadas (x,y) dos pontos iniciais e finais de cada linha para os dois tipos de malha adotados.

O terceiro passo foi criar 10 pontos equidistantes para cada linha das malhas e vincular a cada um desses pontos a mesma velocidade obtida na linha (Figura 3.18).

A partir desses dados o passo seguinte foi, utilizando-se o método de interpolação por *Kriging* disponível no programa ArcGis, gerar imagem vetorial, tanto para malha reticulada como para a malha difração.

Para a construção das imagens utilizou-se apenas duas faixas de variação de velocidade, as quais correspondem à existência (de 0 a 1500 m.s^{-1}) ou não existência do oco (de 1500 a 2500 m.s^{-1}). O valor de velocidade adotado para discriminar as classes foram obtidos no item 4.4.1.

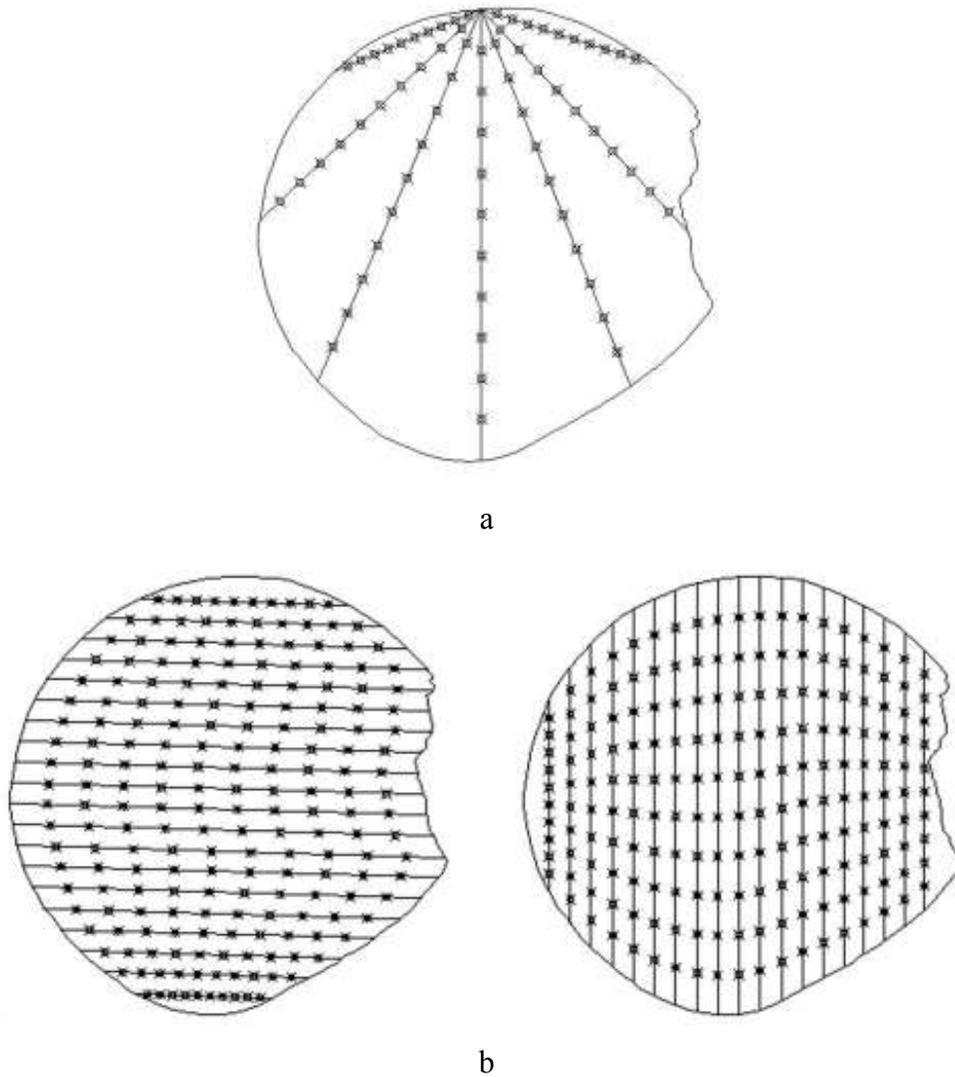


Figura 3.18. Esquema ilustrando os 10 pontos equidistantes para cada linha das malhas a) Difração e b) Reticulada (eixos x e y respectivamente).

Da mesma forma que nas etapas anteriores, as imagens geradas por essa técnica foram comparadas à situação real das peças, para que fosse verificada a viabilidade do uso dessa tecnologia e a aplicabilidade do método na inferência da existência de ocos nos troncos e de suas proporções em relação a parte sã.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados das três diferentes etapas da pesquisa. Inicialmente serão apresentados os resultados gerais e as análises estatísticas de cada etapa, e, em seguida serão apresentados os resultados das imagens geradas de acordo com a metodologia de cada etapa.

4.1 Etapa 1: Disco e prisma com ocos naturais

4.1.1 Disco com oco natural

A Tabela 4.1 apresenta os resultados de velocidade de propagação das ondas obtidos em cada faixa de medição do disco de Pequiá com oco natural, utilizando-se malha reticulada (X, Y) e transdutores de faces planas de 25 kHz, 45 kHz e 80 kHz e de faces exponenciais de 45 kHz.

As faixas situadas nas extremidades da malha foram descartadas porque não permitiram bom acoplamento e direcionamento dos transdutores. No caso dos transdutores de faces planas a falta de alinhamento e de acoplamento ocorreu em razão da curvatura da face e no caso dos transdutores de faces exponenciais em virtude da falta de um orifício para inserção das pontas do transdutor.

Assim, considerando-se somente a parte da malha na qual se observou o bom acoplamento e direcionamento dos transdutores, as faixas consideradas foram X3 a X10 e Y4 a Y14.

Considerando o posicionamento do oco na malha verifica-se que o mesmo se localiza, aproximadamente em X5 e X6; Y12 e Y13 (Figura 3.3). Observando-se os valores da Tabela 4.1 verifica-se que essa foi a região com menores valores de velocidade, indicando a influência do oco na propagação da onda. O transdutor de face exponencial apresentou maior diferença de velocidade nessa região, aproximadamente 55% nas direções X e Y. Os demais transdutores (faces planas) apresentaram diferenças médias de 11% na direção X e 20% na direção Y.

Essas diferenças foram determinadas utilizando-se, como referência, a maior

velocidade na direção considerada para o cálculo, uma vez que essa velocidade corresponderia à madeira integra. Esse resultado indica que o transdutor de faces exponenciais apresenta maior sensibilidade na detecção do oco. No entanto é importante considerar que, no caso do transdutor de faces planas, o resultado não é pontual. O valor que o aparelho de ultrassom exibe nesse caso é uma média da zona de propagação da onda do mesmo e, no caso da malha reticulada, há situações nas quais a onda passa parte por região afetada e parte por região sã, como é o caso de X4 e X7 e Y11 e Y14.

Tabela 4.1 Resultados de velocidade de propagação das ondas de ultrassom ($m.s^{-1}$) no disco de Pequiá com oco natural segundo as posições de medição da malha reticulada onde não houve interferência de alinhamento dos transdutores

Malha	Frequência dos transdutores			
	25 kHz FACES PLANAS	45 kHz FACES PLANAS	80 kHz FACES PLANAS	45kHz FACES EXPONENCIAIS
x3	1635	1662	1567	920
x4	1702	1697	1594	939
x5	1622	1642	1529	934
x6	1604	1643	1512	998
x7	1772	1747	1659	1218
x8	1778	1768	1733	1409
x9	1750	1755	1680	1452
x10	1655	1667	1586	1380
y4	1619	1904	1583	1589
y5	1681	1668	1586	1614
y6	1711	1730	1685	1682
y7	1740	1746	1742	1678
y8	1766	1789	1751	1773
y9	1801	1800	1740	1707
y10	1752	1734	1575	1650
y11	1781	1718	1631	1596
y12	1529	1555	1438	1141
y13	1509	1510	1451	1184
y14	1504	1546	1280	1248

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da avaliação estatística das velocidades obtidas com o uso de transdutores de diferentes frequências, utilizando-se o teste de comparação múltipla do Programa Statgraphics Centurion[®]. A tabela de ANOVA (Tabela 4.2) decompõe a variância dos dados em duas componentes: entre grupos e dentro do grupo.

Tendo em vista que o P-valor do teste F foi menor do que 0,05, há diferenças estatísticas entre as médias das 4 velocidades com 95% de nível de confiança.

Tabela 4.2 Quadro de ANOVA obtido do programa computacional Statgraphics Centurion[®].

Fonte	Soma dos quadrados	Diferença	Quadrado da média	F-ratio	P-value
Entre grupos	1,94 E06	3	648697,0	11,98	0,0000
Dentro do grupo	5,85 E06	108	54170,1		
Total	7,80 E06	111			

Tendo em vista que a Tabela de ANOVA indicou diferenças estatísticas entre as médias, realizou-se o teste de comparações múltiplas (Multiple Range Test) que, com 95% de confiança, indicou que somente o transdutor de face exponencial apresentou resultados estatisticamente diferentes. Todos os transdutores de faces planas apresentaram resultados estatisticamente iguais, independente da frequência.

Os resultados das velocidades e das áreas de ocos na direção correspondente foram utilizados para a determinação de correlações preliminares entre os parâmetros, utilizando-se, para isso, regressões.

A Tabela 4.3 resume os valores das áreas de ocos e das velocidades nas diferentes faixas de medição. Para a determinação das velocidades adotou-se, para a área integra (sem oco) a média das maiores velocidades em X e em Y. Isso foi realizado porque pode haver grandes diferenças de velocidades entre as direções, já que uma determinada faixa pode estar associada à direção radial (R) enquanto que outra à direção tangencial (T). Tendo em vista que as velocidades nessas direções são diferentes ($V_R > V_T$) foi necessário levar isso em conta na correlação, pois uma área afetada em uma direção de maior velocidade pode mascarar o resultado.

Para as velocidades obtidas nas regiões do oco tomou-se, da mesma forma, a média entre as direções X e Y, sempre que o mesmo valor de área se repetia nessas duas direções.

Os resultados dessa primeira etapa permitiram verificar que, caso não se tenha cuidado ao estabelecer faixas de inspeção em função da velocidade, uma área sem oco de uma direção de menor velocidade pode indicar a presença de um oco onde ele não existe. Esse ponto foi foco de avaliação nas etapas posteriores da pesquisa.

Tabela 4.3 Resultados médios de velocidade nas faixas sem presença de ocos e com presença de ocos de diferentes áreas.

Área do oco (mm ²)	25 kHz FACES PLANAS	45 kHz FACES PLANAS	80 kHz FACES PLANAS	45 kHz FACES EXPONENCIAIS
0	1790	1784	1742	1612
200	1781	1718	1631	1596
300	1702	1698	1564	939
700	1556	1643	1481	998
1800	1572	1598	1484	1038

A Figura 4.1 mostra o comportamento da variação da velocidade em função da área do oco por onde a onda percorre, para cada frequência de transdutor.

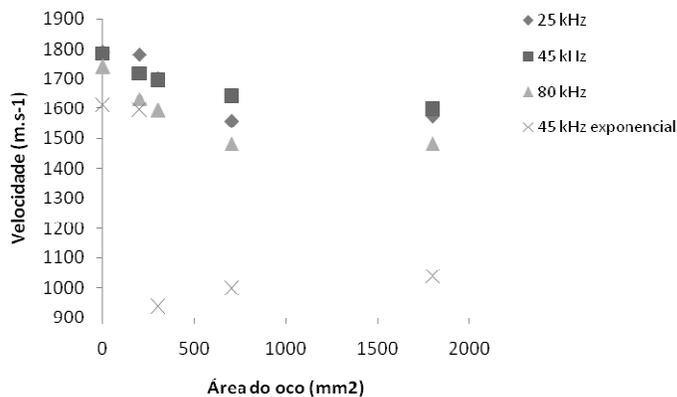


Figura 4.1 Comportamento das velocidades em função da área do oco por onde a onda percorre.

Observando o comportamento da velocidade no gráfico da Figura 4.1 e os resultados apresentados na Tabela 4.3 verifica-se que, para todos os transdutores planos a velocidade diminui com o aumento da área do oco até 700 mm², mantendo-se praticamente constante até a área de 1800 mm².

O comportamento do transdutor de faces exponenciais foi diferente, apresentando queda muito mais acentuada na velocidade quando a área do oco aumentou para 300 mm², mas mantendo-se praticamente constante para áreas maiores. Esse comportamento pode ter relação com a questão discutida no capítulo de Revisão Bibliográfica a respeito do percurso da onda. Se a onda realiza um desvio do oco (WANG *et. al.*, 2004) a variação da velocidade vai também relacionada à posição de leitura e não somente ao tamanho do oco. Tendo em vista a pequena dimensão do oco esse resultado se refletiu mais no transdutor exponencial do que no plano.

Tendo em vista o comportamento da variação da velocidade, foi realizada regressão linear considerando todo o trecho (Tabela 4.4), mas também considerando somente o trecho correspondente a 0 - 700 mm² (Tabela 4.5) no qual para todos os transdutores a velocidade variou em função da área do oco.

Tabela 4.4 Modelos de regressão considerando todo o trecho.

Frequência (kHz)	Equação	R	R²
25plano	$V_{xy} = 1754 - 0,123$ (área do oco)	0,89	79,6%
45 plano	$V_{xy} = 1742 - 0,089$ (área do oco)	0,95	90,4%
80 plano	$V_{xy} = 1658 - 0,119$ (área do oco)	0,89	78,6%
45 expon.	$V_{xy} = 1394 - 0,263$ (área do oco)	0,75	56,0%

Tabela 4.5 Modelos de regressão considerando somente o trecho de área de oco de 0 a 700 mm².

Frequência (kHz)	Equação	R	R²
25plano	$V_{xy} = 1814 - 0,356$ (área do oco)	0,98	96,9%
45 plano	$V_{xy} = 1768 - 0,191$ (área do oco)	0,98	96,8%
80 plano	$V_{xy} = 1719 - 0,358$ (área do oco)	0,99	98,0%
45 expon.	$V_{xy} = 1567 - 0,938$ (área do oco)	0,87	75,4%

Observando-se os coeficientes da regressão, tanto no caso da Tabela 4.4 quanto da Tabela 4.5 verifica-se que as maiores variações de velocidade em função da área do oco ocorreram para o transdutor de 45 kHz de faces exponenciais, seguida dos transdutores de 80kHz e 45 kHz de faces planas e, por último, para o transdutor de 25 kHz de faces planas.

Esse fato deve-se por não ter sido realizado orifícios nos pontos de medição para que os transdutores de faces exponenciais ficassem alinhados e fixos, como os transdutores de faces planas. Para as correlações, os melhores coeficientes foram sempre para os transdutores de faces planas. Considerando todo o trecho o melhor coeficiente de correlação (R) foi para o transdutor plano de 45 kHz e, para o trecho considerado na Tabela 4.5, todos os transdutores planos tiveram praticamente o mesmo resultado.

Apesar do transdutor exponencial de 45 kHz ter apresentado maior sensibilidade, observada pela maior variação de velocidade em função da área de oco, os coeficientes de correlação mais baixos refletiram a dificuldade de obtenção de valores estáveis. Tendo em vista a pequena área de contato é muito difícil, sem a utilização de um orifício para introduzir a ponta do transdutor, manter o transdutor alinhado e sem inclinação. O transdutor exponencial pode ser muito útil em avaliações em campo, por ser possível realizar as medições sem o uso do gel e, também, por possibilitar bom acoplamento mesmo em áreas curvas, que é o caso das árvores. Por essa razão esse transdutor voltou a ser adotado nas etapas posteriores dessa pesquisa.

A análise estatística (Multiple Range Test) demonstrou não haver diferença estatística entre as velocidades obtidas com os transdutores planos de diferentes frequências, dessa forma o transdutor plano de 45 kHz foi o adotado para a condução dos ensaios das etapas seguintes, por ser o único disponível no laboratório na mesma frequência do exponencial que, em etapas posteriores seria utilizado comparativamente.

4.1.2 Prisma com oco natural

A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos em medições no prisma de Pequiá com oco natural, utilizando-se malha reticulada (X, Y) onde os valores de velocidades correspondentes às áreas de ocos estão destacados em negrito. O comportamento da redução da velocidade em função da área do oco pode ser visualizado na Figura 4.2.

O resultado da Tabela 4.7 permite verificar que as incongruências verificadas nas bordas do disco de Pequiá (com casca) não existiram para o prisma, comprovando a necessidade de se manter o alinhamento dos transdutores e o acoplamento entre o transdutor e a peça a ser ensaiada.

Tabela 4.6 Velocidades obtidas com transdutor de 45 kHz de faces planas na malha.

Malha	Vel. (m.s ⁻¹)	Malha	Vel. (m.s ⁻¹)
x1	1714,0	y1	1859,1
x2	1621,9	y2	1897,7
x3	1643,7	y3	1892,9
x4	1813,2	y4	1878,4
x5	1817,9	y5	1780,6
x6	1817,6	y6	1648,1
x7	1785,1	y7	1556,2
x8	1739,6	y8	1662,4
x9	1750,6	y9	1748,0
x10	1718,8	y10	1788,8

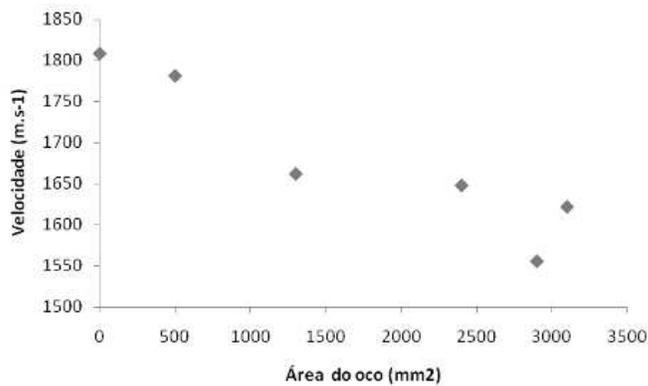


Figura 4.2 Comportamento das velocidades em função da dimensão dos ocos.

Tabela 4.7 Resultados médios de velocidade nas faixas sem presença de ocos e com presença de ocos de diferentes áreas.

Área do oco (mm ²)	45 kHz Faces planas
0	1808
500	1781
1300	1662
2400	1648
2900	1556
3100	1622

Observando-se a Figura 4.2 verifica-se que, da mesma forma que no disco de Pequiá com oco natural, a velocidade parece sofrer redução mais significativa até área de 1300 mm².

A mesma discussão da questão do percurso da onda também é válida para esses resultados. Adicionalmente é importante salientar que as condições do entorno do oco podem influenciar o resultado, já que essa região será o percurso alternativo da onda. Assim, a existência de fissuras ou rachaduras nesse entorno aumentará o impacto na redução da velocidade.

Para realizar comparação com os resultados obtidos nos ensaios dos discos de Pequiá com oco natural (4.1.1) foram realizadas as regressões utilizando a variação total de área dos ocos e também utilizando somente o trecho com variação constante da velocidade (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 Regressão linear utilizando todo o trecho de variação de área dos ocos e utilizando a em parte do trecho.

Trecho considerado	Modelo de regressão	R	R²
Completo	$V_{xy} = 1798 - 0,069$ (área do oco)	0,97	93,4%
0 a 1300 mm ²	$V_{xy} = 1819 - 0,115$ (área do oco)	0,99	97,6%

Comparando-se os modelos de regressão obtidos nas duas peças (disco e prisma) verifica-se que a influência do oco na velocidade foi um pouco superior no caso do disco, mas o comportamento e tendência do modelo foram próximos.

Considerando uma regressão única com os valores obtidos no disco e no prisma obtêm-se:

$$V_{xy} = 1742 - 0,053 \text{ (área do oco) com } R = 0,81$$

Utilizando-se as velocidades obtidas no prisma foi realizada uma primeira tentativa de construção de imagem representativa da condição da peça. Para isso, os resultados de médias das velocidades em cada posição de medição X e Y da malha e as coordenadas encontradas através do AutoCAD[®] foram utilizados em programa computacional ArcGis[®], que por interpolação resultou na imagem da Figura 4.3.

Na Figura 4.3 as zonas mais claras representam madeira em melhor condição e as zonas mais escuras madeira mais deteriorada. Nesse caso a imagem não se restringe a apresentar somente as regiões com oco, mas sim regiões com madeira em diferentes

condições. Assim, a presença de outros tipos de defeitos como, por exemplo, trincas, fissuras, desvios das fibras etc. estarão também representadas.

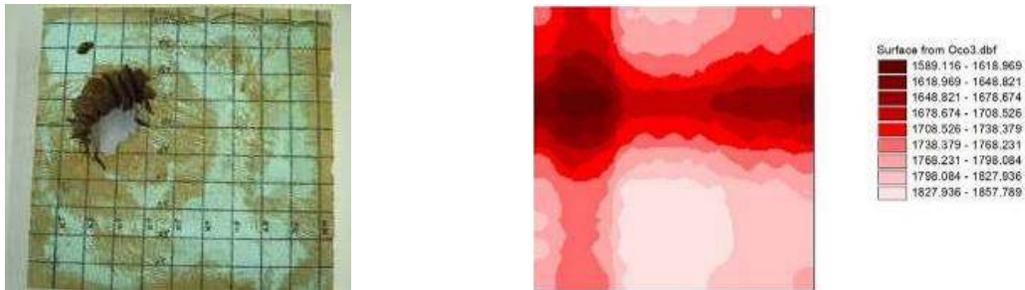


Figura 4.3 Foto da peça real e imagem gerada com o uso das velocidades no prisma.

Verifica-se que a imagem (Figura 4.4) indica a presença de uma região mais afetada na posição aproximada do oco no prisma, mas também indica outros tipos de comprometimento da peça no entorno e na direção do oco, como se o oco tivesse ocasionado perda de resistência em duas faixas perpendiculares. A apresentação dessa imagem em termos de variação de cores depende das faixas de velocidade que se queira representar. Por outro lado, as faixas de velocidade estarão associadas à dimensão do defeito que se quer observar com o uso da técnica.

Outra tentativa de construção da imagem está apresentada na Figura 4.4. Para a obtenção dessa imagem foram utilizadas apenas duas condições - a condição 1 (presença de oco) ou a condição 0 (ausência de oco). Com base nos resultados dessa etapa, foi fixada uma velocidade de 1600 m.s^{-1} para discriminar a presença ou ausência de oco na peça. Essa imagem não discrimina regiões com pequenos defeitos ou redução de resistência, mas apenas regiões com ocos.

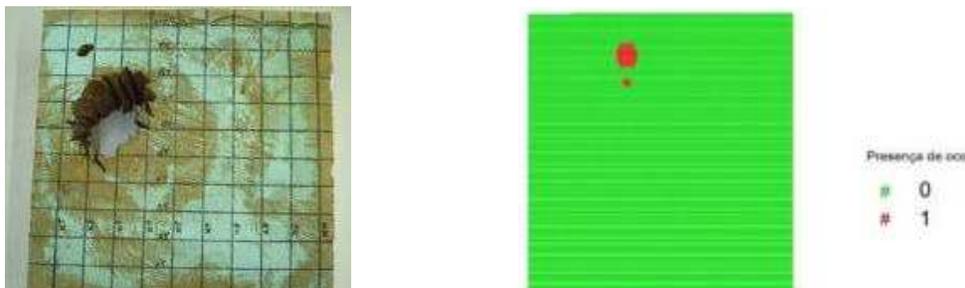


Figura 4.4 Foto da peça real e imagem gerada com as condições 1 (existe o oco) e 0 (não existe o oco).

Embora as imagens não estejam na mesma proporção, se observa que, no caso da Figura 4.4, o oco pode ser visto e sua localização é aproximadamente correta, mas a dimensão do oco parece ser menor do que o real. Isso ocorreu porque a malha era muito grande em relação à dimensão do oco, fazendo com que os pontos de medição que efetivamente passavam pelo oco tenham sido apenas os X2 e X3 e Y6 e Y7, embora o oco estivesse entre X1 e X4 e Y5 e Y8 (Figura 3.3). Dessa forma o oco representado na Figura 4.4 corresponde ao intervalo compreendido entre esses 4 eixos (2 em X e 2 em Y) pois X1, X4, Y5 e Y8 demarcam exatamente o início do oco, mas a onda não passou por ele. Apesar das imagens não terem sido exatas ficou demonstrada a potencialidade do método para gerar imagens representativas da condição interna da peça de madeira.

4.2 Etapa 2: Prismas com ocos artificiais

4.2.1 Prisma com oco artificial circular

Os resultados de velocidade de propagação das ondas, obtidos em cada faixa de medição da malha, para o Prisma com oco artificial circular (P1) encontram-se na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 Velocidades de propagação de ondas de ultrassom obtidas na peça de Pequiá (P1), ainda integra, utilizando a malha reticulada.

Local da Malha	Velocidade m.s ⁻¹	Local da Malha	Velocidade m.s ⁻¹
X1	1904	Y1	1947
X2	1884	Y2	1927
X3	1859	Y3	1959
X4	1804	Y4	1841
X5	1738	Y5	1809
X6	1718	Y6	1622
X7	1788	Y7	1631
X8	1881	Y8	1737
X9	1894	Y9	1791
X10	1913	Y10	1786
X11	1863	Y11	1785
Média e CV (%)	1841 (3,7)		1803 (6,3)
Média geral (X e Y) e CV (%)		1822 (5,1)	

*Valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%)

A partir dos gráficos das Figuras 4.5 e 4.6 é possível avaliar o comportamento do tempo de propagação da onda nos diferentes pontos da malha, em relação às direções X e Y da peça, para as diferentes dimensões de ocos circulares.

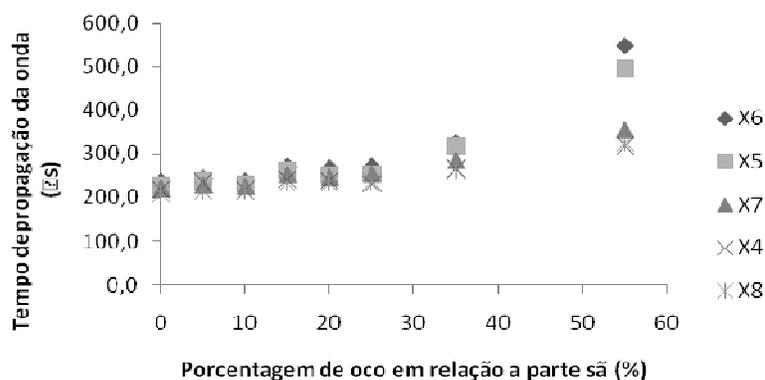


Figura 4.5 Comportamento do tempo de propagação da onda em função da posição na malha de medição nas direções X para a peça com oco circular.

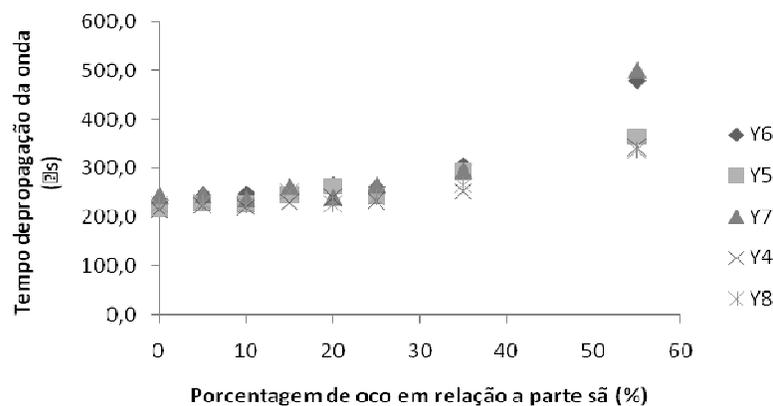


Figura 4.6 Comportamento do tempo de propagação da onda em função da posição na malha de medição nas direções Y para a peça com oco circular.

Analisando os gráficos das Figuras 4.5 e 4.6 observa-se que para o oco circular, os maiores valores de tempo de propagação da onda foram obtidos nos pontos que passavam no centro da peça (X6 e Y6), sendo que os picos vistos no gráfico se referem às regiões centrais dos ocos posicionados nessa região, enquanto os valores de pequenas variações se referem às partes sãs.

O gráfico da Figura 4.7 apresenta a variação relativa do comprimento de percurso (LR), obtida também no estudo de Najafi *et. al.* (2009) (descrita no item 3.2.1), em função da posição de medição, considerando a maior proporção de oco analisada (55% para o oco circular).

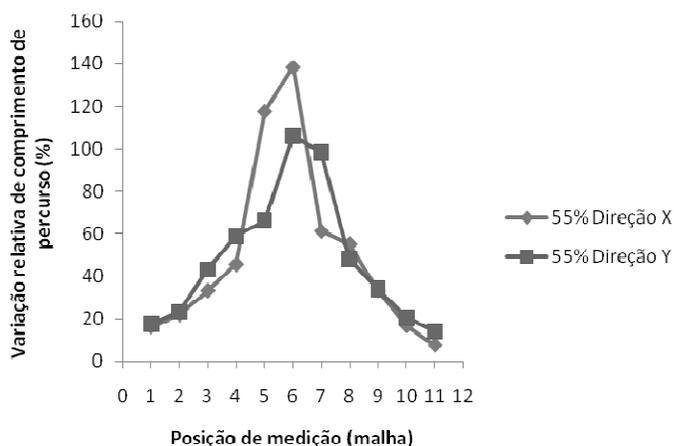


Figura 4.7 Variação relativa do comprimento de percurso em função da posição de medição. Oco circular.

A partir do gráfico da Figura 4.7 verifica-se que os maiores comprimentos de percurso se encontram na posição de medição 6, na qual a propagação da onda ultrassônica encontra-se localizada mais próximo da zona central, em ambos osocos. Nas regiões mais afastadas da zona central do oco o LR foi menor, pois o percurso descrito pela onda para desviar da região oca foi menor.

Para o oco circular os valores de velocidades na peça, considerando as médias obtidas em todos os pontos da malha nas direções X e Y, variaram 45%, entre 1847 m.s^{-1} (peça inteira) a 1274 m.s^{-1} (peça com oco de 55% de oco).

Adotando-se uma velocidade padrão (na peça inteira) e considerando que a onda se desvia do oco é possível determinar a variação no comprimento de percurso. A variação média para a peça com oco circular, considerando todos os pontos nas malhas X e Y, foi de 23%, pois o percurso variou de 390 mm (peça inteira) a 480 mm (na peça com 55% de oco).

Para que se possa visualizar melhor a variação do comprimento de percurso, a Tabela 4.10 apresenta os valores de velocidade e de comprimento de percurso obtidos considerando a faixa da malha mais influenciada pelo oco (X6 e Y6), por ser a faixa que passa pela região

mais central da peça.

É importante lembrar que a variação de velocidade e a variação de comprimentos de percurso são provenientes de avaliações distintas. No primeiro caso se considera o percurso como sendo a distância entre os transdutores e no segundo caso se considera a velocidade média na madeira integra como padrão e a avaliação do comprimento de percurso se faz por meio da variação da velocidade.

A Tabela 4.10 também apresenta o comprimento de percurso determinado utilizando-se as fotos obtidas para cada porcentagem de oco. Essas fotos foram utilizadas no Programa AutoCAD, no qual foi feito o cálculo do comprimento de percurso da onda considerando que a mesma contorna o oco.

Tabela 4.10 Médias das velocidades e comprimentos de percurso calculado na faixa de medição central (X6, Y6) da peça com oco circular.

Oco (%)	Velocidade (m.s⁻¹)	Comprimento de percurso (Equação 3.3) (mm)	Comprimento de percurso (AutoCAD) (mm)
0	1670	390	390
5	1604	426	440
10	1600	427	450
15	1480	447	470
20	1470	449	490
25	1470	449	520
35	1240	486	540
55	762	563	560

Por meio da Tabela 4.10 verifica-se que, para a faixa de medição central (X6, Y6) as variações de velocidade foram de 119% e de comprimento de percurso de 69%. Essas variações foram superiores às demais faixas porque, nesse caso, o ponto investigado apresenta-se com maior influência do oco.

Os valores de comprimento de percurso calculados pela equação 3.3 e os obtidos através do programa AutoCAD apresentaram valores próximos (diferença média de 6%). Esse resultado permite concluir que a onda contorna o vazio buscando o meio material para se propagar e que os resultados da equação para a determinação do percurso da onda é adequada.

Dessa forma, assim como Wang *et. al.* (2004) e Najafi *et. al.* (2009) verificaram nos seus estudos, nesse trabalho também foi possível verificar que o aumento do tempo de

propagação da onda em presença dos ocos na peça foram ocasionados pela mudança de percurso da onda e não pela sua passagem pelo vazio interno.

Verifica-se, também, pelos resultados apresentados na Tabela 4.10, que para o aumento de 5% para 10% de oco, 15% para 20% e 20% para 25% de oco não houve variação significativa de velocidade ou de comprimento de percurso. Esse resultado está relacionado à frequência do transdutor indicando que, caso se deseje maior sensibilidade na detecção de ocos seria necessário aumentar a frequência do transdutor. A passagem da condição íntegra para 5% de oco apresentou variação de 4% na velocidade e de 9% no comprimento de percurso.

Embora essa variação também seja de 5%, como nos casos anteriormente citados, o equipamento foi sensível para detectar a presença do oco porque houve variação brusca de condição da peça (de íntegra para ocada).

O mesmo ocorreu quando o oco passou de 10 para 15%, com variação de velocidade de 8% e de comprimento de percurso de 5%. Levando-se em conta que o comprimento de onda (λ) nas condições desse ensaio é da ordem de 40 mm, pode ser esperado que a sensibilidade do equipamento não permita detectar variações de ocos menores do que 20 mm ($\lambda/2$).

As regressões entre velocidade e porcentagem de oco e entre comprimento de percurso e velocidade (Tabela 4.11) foram estatisticamente significativas e apresentaram coeficientes de correlação similares, demonstrando que ambas poderiam ser utilizadas na construção das imagens.

No entanto, avaliações utilizando ambas correlações permitiram verificar que o uso da variação do percurso possibilitou a geração de imagens mais próximas da condição real da peça.

Tabela 4.11 Modelos de regressão obtidos para as peças com oco circular

Parâmetros	Regressão	P-valor	R	R²
Velocidade (V) x porcentagem de oco circular ($\phi\%$).	$V = -16,2 \phi\% + 1760$	0,0020	-0,96	92%
Comprimento de percurso para o oco circular (L ϕ) x Velocidade (V).	$L\phi = -0,16 V + 685$	0,0010	-0,91	82%

Considerando os modelos apresentados na Tabela 4.11 verifica-se que, para cada 10% de aumento da porcentagem do oco a variação da velocidade é de cerca de 160 m.s^{-1} para o oco circular. Esse mesmo resultado foi também obtido por Najafi *et. al.* (2009), mas no caso desses autores as diferenças foram inferiores, pois, para 10% de aumento da porcentagem do oco a variação de velocidade foi cerca de 110 m.s^{-1} para o oco circular.

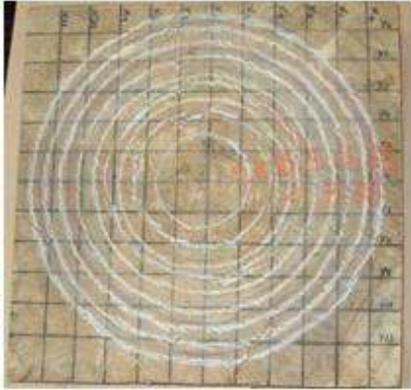
As Figuras 4.8 a Figura 4.13 apresentam as imagens geradas utilizando-se as Equações de correlação entre a velocidade e o comprimento de percurso da onda em cada faixa de medição da peça de Pequiá com oco circular. As cores estão associadas à variações do comprimento de percurso que, por sua vez, estão associadas à variação da dimensão do oco. Na peça integra os comprimentos de percurso representam a distância entre os transdutores, ou seja, correspondem à dimensão da peça na faixa de leitura.

Tendo em vista que a peça não é perfeita, há uma pequena variação de comprimento de percurso, representada pela faixa de variação de 0 a 8%, correspondente à cor verde escura (Figura 4.8). A partir dessa faixa foram construídas as demais, as quais foram associadas às diferentes cores na elaboração da imagem (Tabela 4.12).

Nas imagens das Figuras 4.8 a Figura 4.13 foram inseridos retângulos que delimitam a área sem interferências (mancha verde completa).

Tabela 4.12 Faixas de variação de comprimento de percurso e respectiva cor associada para a geração das imagens.

Faixa de variação do comprimento de percurso (%)	Cor
0 – 8	Verde escuro
8 – 16	Verde claro
16 – 24	Amarelo
24 – 32	Laranja
32 – 100	Vermelho

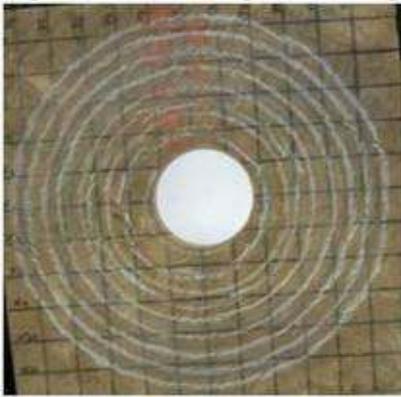


a

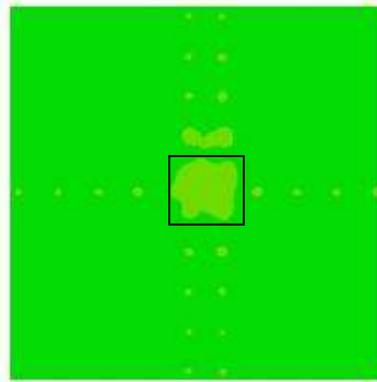


b

Figura 4.8 Foto da peça de Pequiá íntegra (a) e imagem produzida (b).

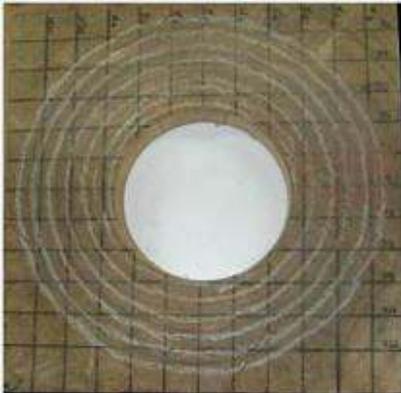


a

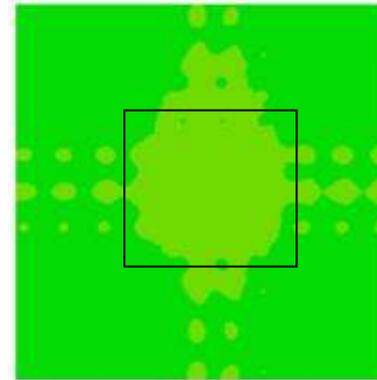


b

Figura 4.9 Foto da peça de Pequiá com 5% de oco (a) e imagem produzida com 5% (b).

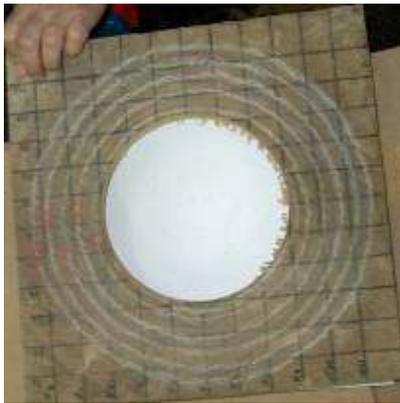


a

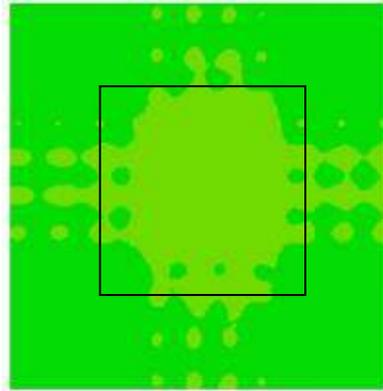


b

Figura 4.10 Foto da peça de Pequiá com 15% de oco (a) e imagem produzida com 15% (b).

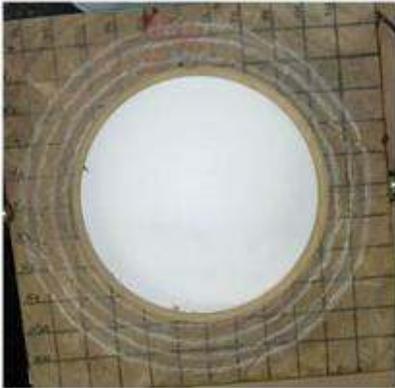


a

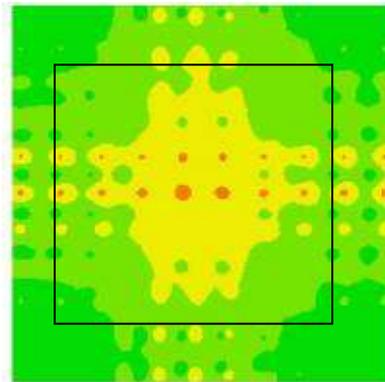


b

Figura 4.11 Foto da peça de Pequiá com 25% de oco (a) e imagem produzida com 25% (b).

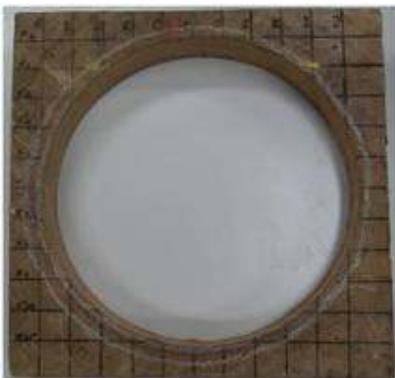


a

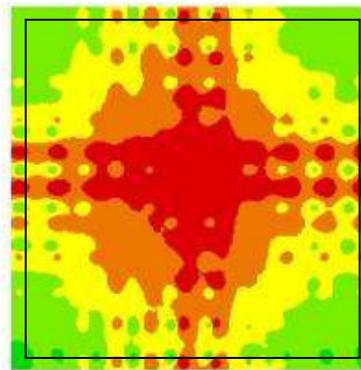


b

Figura 4.12 Foto da peça de Pequiá com 35% de oco (a) e imagem produzida com 35% (b).



a



b

Figura 4.13 Foto da peça de Pequiá com 55% de oco (a) e imagem produzida com 55% (b).

Na Figura 4.9 (oco com 5%) verifica-se a formação de uma mancha central de cor mais clara, que representa o aumento do comprimento de percurso e indica a existência de área oca. Variações na velocidade de propagação de ondas de ultrassom também ocorrem em áreas

de madeira degradada de forma que, o reconhecimento do tipo de ocorrência (degradação ou oco) será depende de estudos que especifiquem faixas de variação associadas às diferentes condições.

Há algumas “sombras” provocadas pelo programa utilizado para a elaboração das imagens (ArcGis[®]). Esse programa não foi projetado para elaborar esse tipo de imagem e está sendo utilizado pela equipe de forma provisória enquanto um programa específico está sendo desenvolvido. Para a elaboração da imagem, o programa ArcGis[®] trabalha com malha e, por meio de interpolação de pontos dessa malha associado às cores, a imagem é gerada. O aparecimento dos pontos menores, de mesma cor da zona central, ou de ramificações da imagem ocorre em decorrência dessa interpolação.

Dessa forma a imagem deve ser interpretada em função da cor correspondente as variações de comprimento de percurso superiores à 8% (verde claro) e somente para a mancha que aparece de forma completa, ou seja, desconsiderando os pontos e as ramificações ocasionadas pelo processo de elaboração utilizado pelo programa. A imagem do oco não aparece na forma circular porque o programa trabalha com malhas retangulares.

As imagens das 4.9, 4.10, e 4.11 permitem verificar que até 25% de oco existe uma única faixa de variação diferente da faixa que corresponde à peça integra. Esse comportamento permite visualizar facilmente o aumento do oco, pois corresponde ao aumento da mancha verde clara.

Para o caso de ocos com 35% e 55% (Figura 4.12 e Figura 4.13) há o aparecimento de outras faixas de variação, que podem confundir a visualização do oco porque a imagem terá mais de duas cores. No caso da peça com 35% de oco (Figura 4.12) verifica-se o aparecimento de pontos da cor laranja na parte central. Esses pontos correspondem a áreas onde o comprimento de percurso encontra-se na faixa de variação de 24 a 32%. Em seguida aparece uma zona amarela, que corresponde a faixa de variação de 16 a 24% e, finalmente, uma área verde clara que sinaliza o ponto a partir do qual a peça apresenta o oco. Sendo assim, é possível saber, pela imagem, que o oco já atingiu a parte delimitada pelo retângulo desenhado nas figuras, pois, na parte verde escura a peça continua integra.

Finalmente, para a peça com 55% de oco (Figura 4.13) há o aparecimento da cor vermelha, que indica variações de 32 a 100%. Como era de se esperar essa cor está na parte central da peça, pois é na parte central que ocorrerão os maiores comprimentos de percurso,

como se pode verificar também na Tabela 4.10. Independente da variação interna de cores, a peça encontra-se praticamente sem a cor verde escura, indicando que o oco tomou toda a extensão da mesma.

4.2.2 Prisma com oco artificial oblongo

Os resultados de velocidade de propagação das ondas, obtidos em cada faixa de medição da malha, para as duas peças de Pequiá (orifício oblongo) encontram-se na Tabela 4.13.

Analisando-se os valores de velocidade na peça P2, pode-se notar que estes foram um pouco inferiores aos valores de velocidade da peça P1. Comparando-se as médias através da análise estatística, verificou-se que as velocidades das duas peças não podem ser consideradas estatisticamente equivalentes. Porém, em relação às direções X e Y de cada peça a análise estatística de comparação de médias indicou igualdade estatística.

Tabela 4.13 Velocidades de propagação de ondas de ultrassom obtidas na peça de Pequiá (P2), ainda integra, utilizando a malha reticulada.

Local da Malha	Velocidade m.s ⁻¹	Local da Malha	Velocidade m.s ⁻¹
X1	1778	Y1	1706
X2	1797	Y2	1687
X3	1808	Y3	1618
X4	1750	Y4	1621
X5	1637	Y5	1745
X6	1574	Y6	1840
X7	1565	Y7	1899
X8	1690	Y8	1898
X9	1742	Y9	1856
X10	1738	Y10	1731
Média e CV (%)	1708 (5,2)		1760 (6,1)
Média geral (X e Y) e CV (%)		1734 (5,7)	

*Valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%)

A partir dos gráficos das Figuras 4.14 e 4.15 é possível avaliar o comportamento do tempo de propagação da onda nos diferentes pontos da malha, em relação às direções X e Y da peça, para as diferentes dimensões de ocos oblongos.

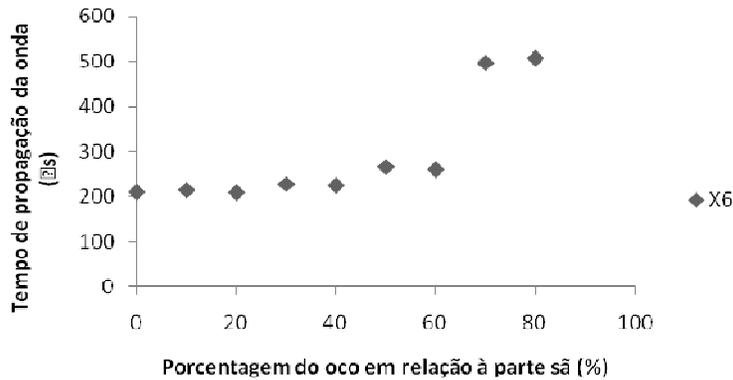


Figura 4.14 Comportamento do tempo de propagação da onda em função da posição na malha de medição nas direções X para a peça com oco oblongo.

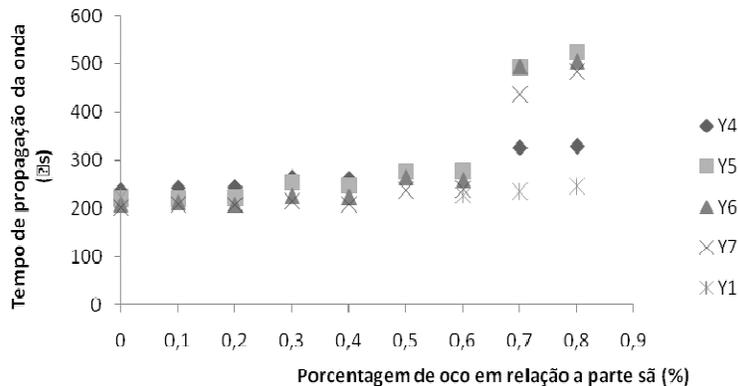


Figura 4.15 Comportamento do tempo de propagação da onda em função da posição na malha de medição nas direções Y para a peça com oco oblongo.

Analisando os gráficos observa-se que para o oco oblongo os maiores valores de tempo de propagação da onda foram obtidos nos pontos que passavam no centro da peça (X6 e Y6), sendo que os picos vistos no gráfico se referem às regiões centrais dos ocos posicionados nessa região, enquanto os valores de pequenas variações se referem às partes sãs.

Pode-se também verificar no gráfico da Figura 4.15, verifica-se que a variação se dá a partir de valores acima de 60%, e no gráfico da Figura 4.14 a partir de 70%. Ou seja, essas

variações indicam que, para a frequência de transdutor utilizada, a sensibilidade do método é menor para o oco oblongo do que no caso o oco circular. Essa constatação será melhor explanada no gráfico da Figura 4.18.

O gráfico da Figura 4.16 apresenta a variação relativa do comprimento de percurso (LR), obtida também no estudo de Najafi *et. al.* (2009) (descrita no item 3.2.1), em função da posição de medição, considerando a maior proporção de oco analisada (80% para o oco oblongo).

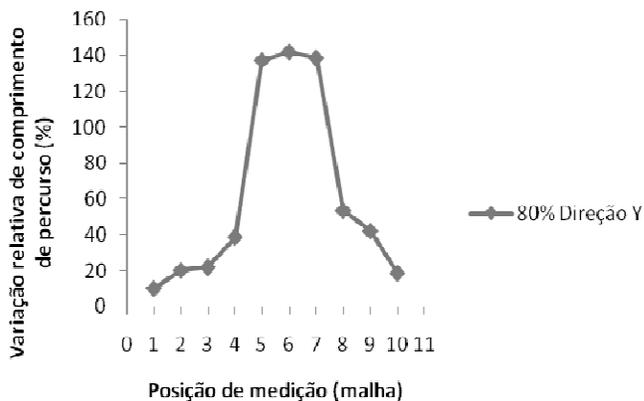


Figura 4.16 Variação relativa do comprimento de percurso em função da posição de medição. Oco oblongo.

A partir do gráfico da Figura 4.16 verifica-se que os maiores comprimentos de percurso se encontram na posição de medição 6, na qual a propagação da onda ultrassônica encontra-se localizada mais próximo da zona central, em ambos osocos. Nas regiões mais afastadas da zona central do oco o LR foi menor, pois o percurso descrito pela onda para desviar da região oca foi menor.

Sob outro ponto de vista, a avaliação da variação da velocidade das ondas ultrassônicas poderia ser realizada considerando sua propagação em dois meios distintos, sendo um a madeira (íntegra) e o outro o ar.

Caso o percurso da onda passasse por dentro do oco a redução da velocidade apresentaria picos e vales iguais para todas as medições no eixo Y da peça com oco oblongo com 80% de vazio. A velocidade seria um valor proporcional entre as velocidades de propagação da onda nos dois meios (velocidade de propagação no ar 300 m.s^{-1} e na madeira

1800 m.s⁻¹) e, levando em conta que, para as medições mais centrais da peça no eixo Y, a onda faz praticamente o mesmo percurso, a proporção entre madeira e ar seria a mesma para todos os pontos de medição que passassem pelo oco, o que não foi confirmado (Figura 4.17).

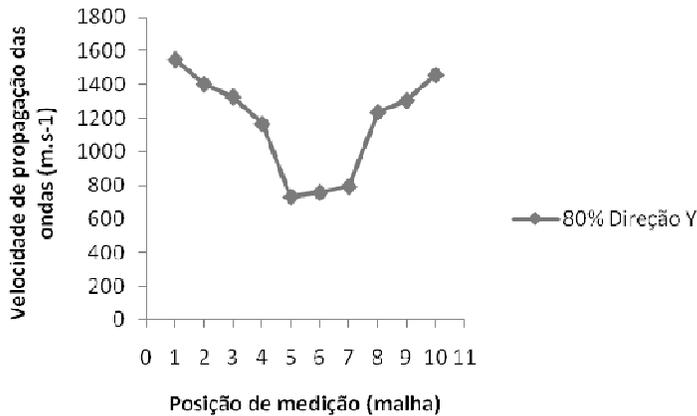


Figura 4.17 Variação da velocidade de propagação em função da posição de medição. Oco oblongo com proporção de 80% em relação à peça.

A hipótese de que a onda busca o meio material para se propagar é confirmada, analisando a velocidade média, e considerando o comprimento do percurso pela madeira (355 mm) e o comprimento do percurso pelo ar (30 mm). Assim, se a onda passasse pela madeira e pelo ar, a velocidade média seria em torno de 1600 m.s⁻¹ para todas as posições de medição, pois na forma oblonga a dimensão do oco na direção do percurso (Y) é sempre a mesma.

Observando-se o gráfico da Figura 4.17, nota-se que esse valor (1600 m.s⁻¹) só é alcançado nas posições 1 e 11, enquanto que nas posições centrais as velocidades obtidas são inferiores à esperada, caso a onda passasse pelo ar.

No gráfico da Figura 4.18 pode ser observado o comportamento da variação da velocidade com o aumento da porcentagem do oco. No caso do oco oblongo há três patamares de velocidade constante, sendo o primeiro até 20%, o segundo de 30% a 65% e o terceiro de 70% a 80%. Já para o caso do oco circular, destacam-se dois patamares de velocidade, sendo o primeiro até 10% e o segundo de 15% a 25%, seguido de variação contínua e linear até a máxima porcentagem do oco.

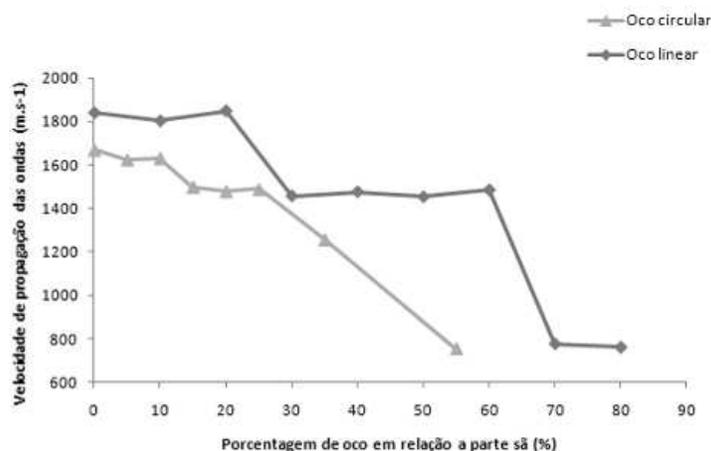


Figura 4.18 Comportamento da velocidade em função da porcentagem de oco em relação à parte sã das peças com oco circular e oblongo considerando a posição de medição 6 (mais centralizada em relação ao oco).

A análise desses patamares permite concluir, mais uma vez, que para a frequência de transdutor utilizado a sensibilidade do método é menor no caso do oco oblongo do que no caso do oco circular, já que as velocidades só mostrariam a existência de um oco oblongo a partir de 20%, e, no caso do oco circular essa indicação já ocorreria a partir de 10% de oco. Além disso, para o oco oblongo, há ocorrência de patamares maiores, onde a velocidade não indicaria o aumento do oco (30% a 65%). Para o oco circular, além de esses patamares serem menores, a partir de 25% a velocidade sempre varia conforme o aumento do oco, indicando a possibilidade de detecção de pequenas variações de tamanho de oco.

Outra forma de avaliar qual tipo de oco tem maior influência na velocidade é utilizando-se a variação relativa da velocidade (RVC), adotada por Najafi *et. al.* (2009) e Lin *et. al.* (2008).

O gráfico da Figura 4.19 apresenta o comportamento da variação de RVC para os dois tipos de oco analisados. Levando-se em conta a inclinação do gráfico verifica-se que a influência do oco circular (1,05) foi levemente superior à do oco oblongo (0,84) na variação da velocidade. Pesquisas de Najafi *et. al.* (2009) obtiveram tendências similares, com aumento das diferenças de velocidade para maiores porcentagens de ocos, mas no caso do trabalho desses autores as maiores variações ocorreram para o oco oblongo.

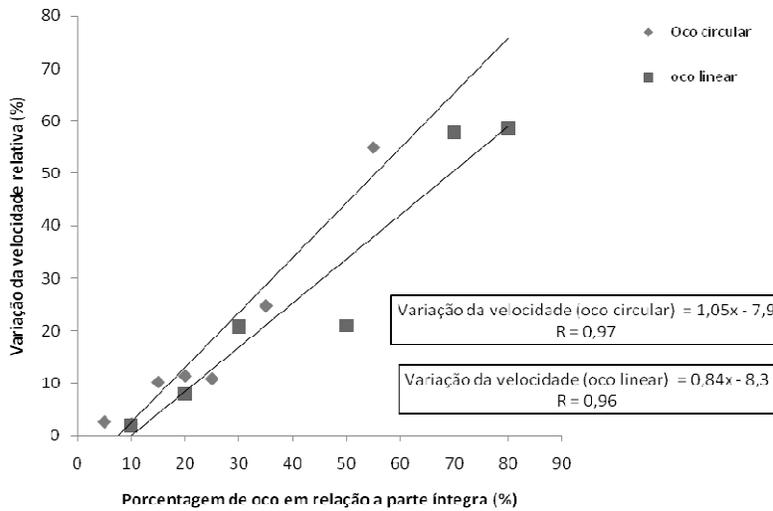


Figura 4.19 Variação da velocidade relativa (RVC) para peça com oco circular e oblongo.

As regressões entre velocidade e porcentagem de oco e entre comprimento de percurso e velocidade (Tabela 4.14) foram estatisticamente significativas e apresentaram coeficientes de correlação similares, demonstrando que ambas poderiam ser utilizadas na construção das imagens. No entanto, avaliações utilizando ambas correlações permitiram verificar que o uso da variação do percurso possibilitou a geração de imagens mais próximas da condição real da peça.

Tabela 4.14 Modelos de regressão obtidos para as peças com oco oblongo

Parâmetros	Regressão	P-valor	R	R ²
Velocidade (V) x porcentagem de oco oblongo ($\phi\%$).	$V = -13,5 \phi + 1975$	0,0010	-0,89	79%
Comprimento de percurso para o oco oblongo (Ll) x Velocidade (V).	$Ll = -0,68 V + 1424$	0,0010	-0,98	96%

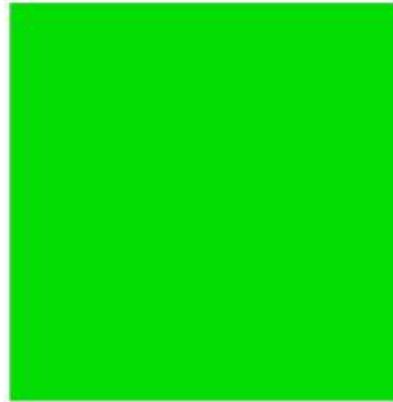
Considerando os modelos apresentados na Tabela 4.14 verifica-se que, para cada 10% de aumento da porcentagem do oco a variação da velocidade é de cerca de 130 m.s^{-1} para o oblongo. Esse mesmo resultado foi também obtido por Najafi *et. al.* (2009), mas no caso desses autores as diferenças foram inferiores, pois, para 10% de aumento da porcentagem do oco a variação de velocidade foi cerca de 70 m.s^{-1} para o oblongo.

As Figura 4.20 a Figura 4.28 apresentam as imagens geradas utilizando-se as Equações de correlação entre a velocidade e o comprimento de percurso da onda em cada

faixa de medição da peça de Pequiá com oco oblongo. As faixas de cores são as mesmas apresentadas na Tabela 4.12.



a

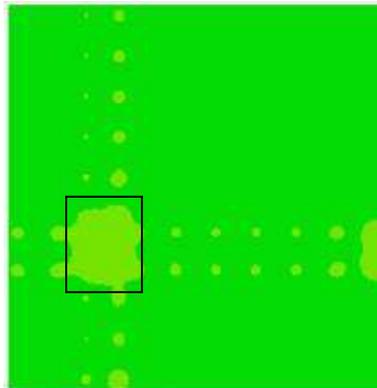


b

Figura 4.20 Foto da peça de Pequiá inteira (a) e imagem produzida (b).



a

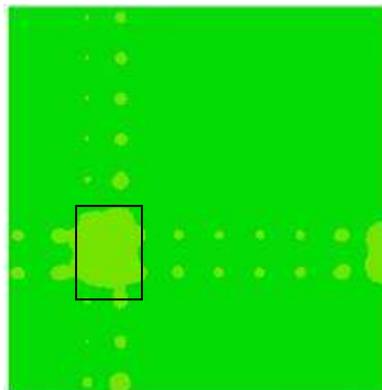


b

Figura 4.21 Foto da peça de Pequiá com 10% de oco (a) e imagem produzida com 10% (b).



a

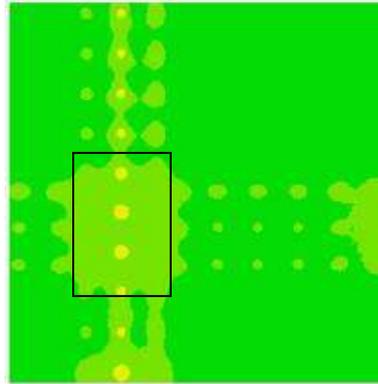


b

Figura 4.22 Foto da peça de Pequiá com 20% de oco (a) e imagem produzida com 20% (b).

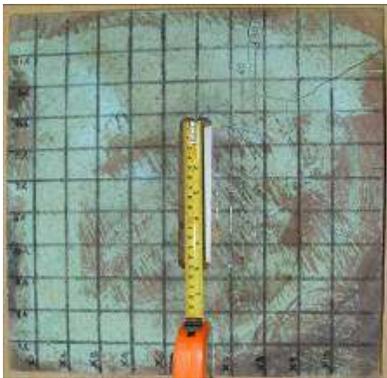


a

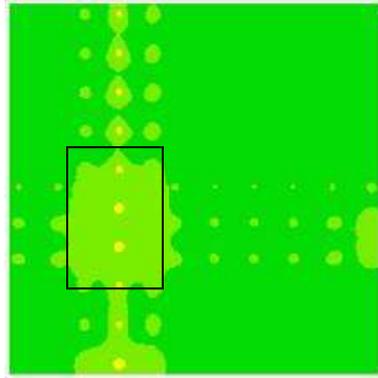


b

Figura 4.23 Foto da peça de Pequiá com 30% de oco (a) e imagem produzida com 30% (b).



a

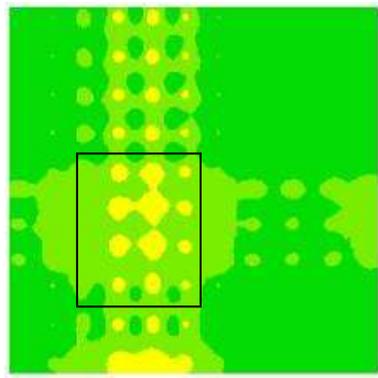


b

Figura 4.24 Foto da peça de Pequiá com 40% de oco (a) e imagem produzida com 40% (b).



a

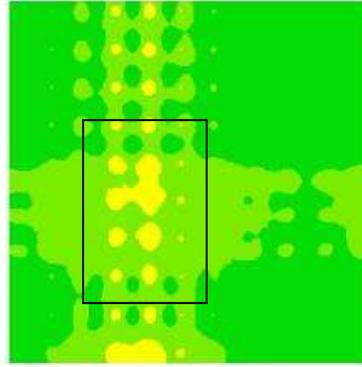


b

Figura 4.25 Foto da peça de Pequiá com 50% de oco (a) e imagem produzida com 50% (b).



a

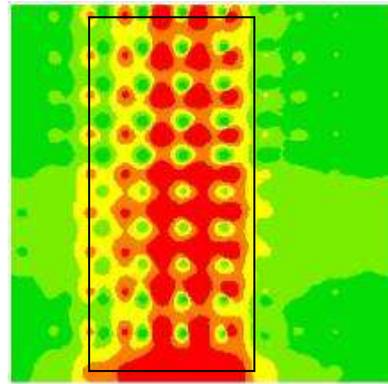


b

Figura 4.26 Foto da peça de Pequiá com 60% de oco (a) e imagem produzida com 60% (b).

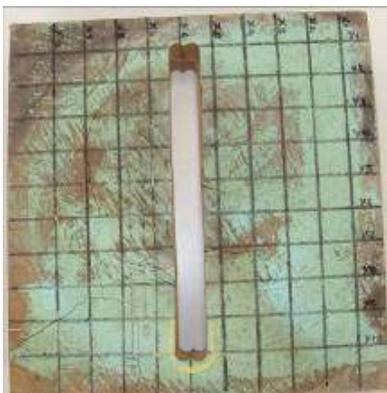


a

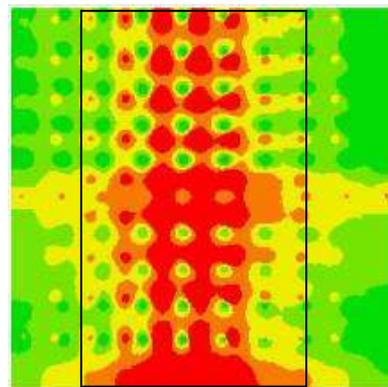


b

Figura 4.27 Foto da peça de Pequiá com 70% de oco (a) e imagem produzida com 70% (b).



a



b

Figura 4.28 Foto da peça de Pequiá com 80% de oco (a) e imagem produzida com 80% (b).

As imagens das Figuras 4.21 e 4.22 permitem verificar que até 20% de oco existe uma única faixa de variação diferente da faixa que corresponde à peça inteira real. Esse

comportamento permite visualizar facilmente o aumento do oco, pois corresponde ao aumento da mancha verde clara e o aparecimento das outras faixas.

Para o caso de ocos com 30% e 40% (Figura 4.23 e Figura 4.24) há o aparecimento de outras faixas de variação, porém as dimensões dos ocos são praticamente iguais, a não ser por uma leve suavização da faixa amarela no oco com 40%, o que pode ser explicado pelo tipo de interpolação que o programa realiza.

Até a Figura 4.26 nota-se que as faixas de variação estão deslocadas do centro, se comparadas com as imagens reais. Essa interferência pode ter ocorrido porque nessa peça havia uma descentralização da medula fazendo com que a onda, ao desviar do oco artificial, não encontrasse a estrutura celular normal da madeira e sim da medula, na qual também há redução de velocidade de propagação das ondas de ultrassom.

Nas Figuras 4.25 e 4.26 nota-se que esta faixa de variação da velocidade começa a se aproximar mais do centro, e esta tendência segue com o aumento do oco. Considerando a hipótese da interferência da medula, esse resultado pode ter sido função da dimensão do oco que supera, nesses dois casos, a dimensão da medula, fazendo com que ao desviar do oco artificial a onda voltasse a percorrer a estrutura celular normal da madeira.

Finalmente, para a peça com 70% e 80% de oco (Figura 4.27 e Figura 4.28) há o aparecimento das cores laranja e vermelho, que indicam variações de 32% a 100%. Como era de se esperar essa cor está na parte central da peça, o que não ocorreu nas outras imagens, porém a dimensão do oco está muito maior que a dimensão do oco real.

A hipótese que se tem para esse comportamento é decorrente da perfuração da peça. Ao utilizar o CNC para perfurar a peça e aumentar o oco de forma gradativa, a estrutura celular da madeira foi agredida de forma artificial, ocasionando fissuração em torno desse oco. No entanto, desconsiderando essas interferências foi possível concluir que a imagem produzida acompanhou o aumento percentual e representou de forma aproximada a posição e dimensões dos orifícios.

Para a continuidade da pesquisa (Etapa 3) foi decidido realizar novos ensaios utilizando peça de maior diâmetro. Essa decisão teve como objetivo verificar se a potência do equipamento seria suficiente para obter resultados em peças de diâmetro superior aos já estudados e, também, para aproximar os resultados de laboratório às condições de inspeções de campo em espécies nativas.

A obtenção de uma peça de grande diâmetro na empresa Tora Brasil foi difícil, uma vez que essas peças têm grande valor comercial para essa empresa. Por essa razão, foi possível a obtenção de somente uma peça e, por essa razão, era necessário optar por um dos dois tipos de oco (circular ou oblongo). Assim, optou-se pelo oco circular, por ser o tipo com muito maior incidência nas árvores dessa espécie.

4.3 Etapa 3: Disco com ocos artificiais

4.3.1 Malha reticulada

Na Tabela 4.15 encontram-se resultados médios de velocidade de propagação das ondas obtidos no disco de Pequiá, desde a condição íntegra até a condição na qual o orifício circular atingiu 90% do diâmetro da peça. Os valores médios foram obtidos na malha reticulada, considerando as direções X (X1 a X20) e Y (Y1 a Y19).

Tabela 4.15 Velocidades médias de propagação das ondas de ultrassom na malha reticulada para as diferentes condições da peça.

Condição da peça	Direção X	Direção Y
Íntegra (0%)	1803 (3)	1901 (4)
5%	1713 (3)	1797 (6)
15%	1705 (3)	1787 (6)
25%	1676 (5)	1776 (11)
35%	1624 (8)	1737 (13)
45%	1561 (13)	1650 (20)
55%	1542 (15)	1593 (23)
65%	1451 (20)	1560 (20)
75%	1401 (22)	1412 (25)
85%	1311 (24)	1303 (21)
90%	1212 (26)	1208 (22)

*Valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%)

Como esperado, os valores de velocidade foram diminuindo, conforme o oco foi sendo aumentado, tanto para o eixo X quanto para o eixo Y. Conforme há o aumento da porcentagem de oco os coeficientes de variação das velocidades vão aumentando, pois quando o oco é pequeno apenas algumas faixas de medição passam pelo oco e a velocidade é, portanto, mais constante. Conforme há o aumento do oco, várias faixas de medição sofrem variação de velocidade aumentando o coeficiente de variação.

A partir dos gráficos das Figuras 4.29 e 4.30 é possível avaliar o comportamento da velocidade de propagação da onda nas diferentes posições de medição da malha reticulada nas direções X e Y da peça em relação ao aumento percentual das dimensões de ocos circulares.

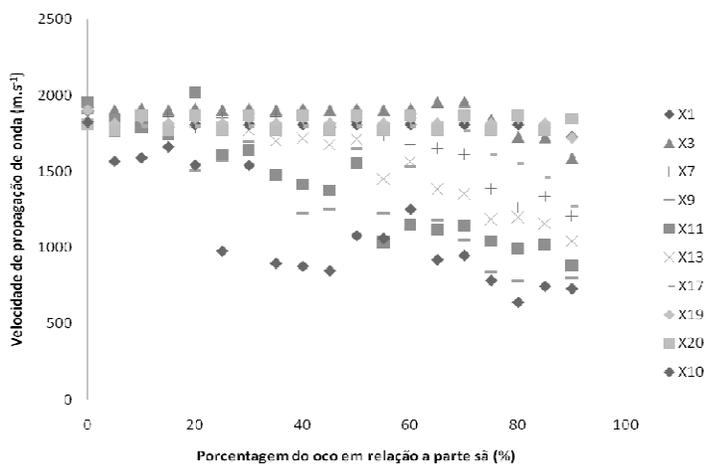


Figura 4. 29 Comportamento da velocidade de propagação da onda em função da posição na malha de medição nas direções X para a peça com oco circular.

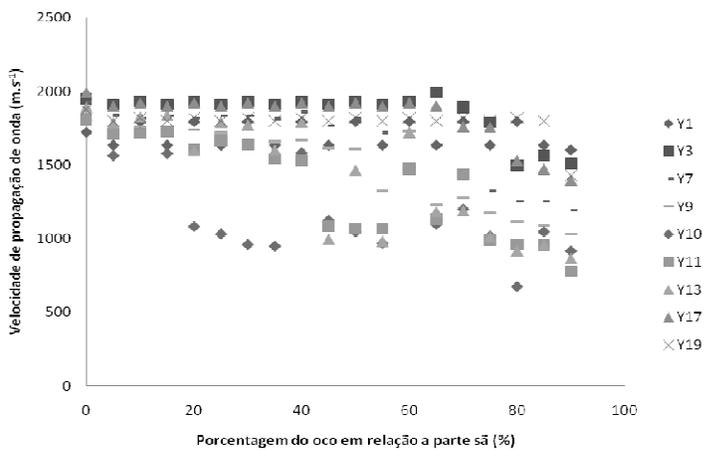


Figura 4. 30 Comportamento da velocidade de propagação da onda em função da posição na malha de medição nas direções Y para a peça com oco circular.

Os gráficos apresentam o mesmo comportamento de velocidade já verificado nas etapas anteriores, indicando pequenas variações de velocidade de propagação nas posições de medição mais extremas do disco, e reduções de velocidade significativas nas posições de medição mais centrais. Esse comportamento indica, mais uma vez, que a onda contornou o oco, aumentando o tempo de propagação e reduzindo a velocidade.

Nas faixas mais centrais da peça as variações são mais significativas, pois é na região do oco onde ocorrem as maiores interferências do sinal de ultrassom. Tomando-se essa região central, que no caso dessa peça é X10 e Y10 e utilizando, como no caso da Etapa 2, as médias de velocidade em X e Y para as diferentes porcentagens de oco circular ($\phi\%$), obtêm-se o modelo de regressão:

$$\text{Velocidade} = - 12,2 \phi\% + 1770 \text{ com P-valor} = 0,0000, R = -0,99 \text{ e } R^2 = 97,9\%$$

Esse modelo indica que, a cada 10% de aumento de oco a velocidade cai cerca de 120 m.s^{-1} , valor esse inferior ao obtido na Etapa 2 com a mesma espécie de madeira (160 m.s^{-1}).

Considerando todas as condições analisadas, desde a peça integra até a peça com 90% de oco, a velocidade variou de aproximadamente 1800 m.s^{-1} a 800 m.s^{-1} , o que se aproximou dos resultados de Najafi *et. al.* (2009), cujas velocidades variaram de 1700 m.s^{-1} a 800 m.s^{-1} .

O gráfico da Figura 4.31 apresenta o comportamento da variação relativa da velocidade (RVC) em função do aumento percentual do oco para os dois eixos da malha reticulada. Foram utilizadas as posições centrais X8, X9, X10, X11 e X12 – para o eixo x e Y8, Y9, Y10, Y11 e Y12 – para o eixo y. Essas posições foram adotadas porque permitem a passagem da onda pelo oco em praticamente todas as porcentagens. As faixas X e Y mais próximas das bordas só permitem a passagem da onda pelo oco quando esse atinge dimensões elevadas.

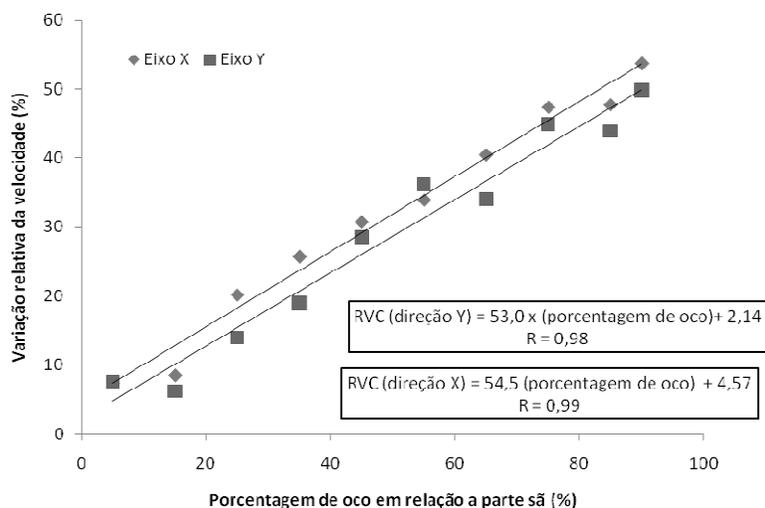


Figura 4.31 Variação relativa da velocidade (RVC) em função do aumento percentual de oco circular.

Najafi *et. al.* (2009) obtiveram regressões com tendências similares, com aumento de RVC para maiores porcentagens de ocos, mas no caso do trabalho desses autores a malha de medição tinha apenas um eixo. O coeficiente de determinação (R^2) obtido pelos autores foi de 99% enquanto nesse trabalho de 96% para a direção Y e de 98% para a direção X.

As Figuras 4.32 a 4.42 apresentam as imagens geradas utilizando-se as variações de velocidade de propagação de onda de ultrassom em cada faixa de medição da peça de Pequiá para malha tipo reticulada. Para a construção das imagens utilizou-se apenas duas faixas de variação de velocidade, as quais correspondem à existência ou não existência do oco. Esse mesmo procedimento foi realizado por Lin *et. al.* (2008), que definiram, em função das correlações estudadas, velocidades de 0 m.s^{-1} a 600 m.s^{-1} como sendo a faixa correspondente à existência de oco na madeira.

No caso dessa pesquisa o marrom corresponde à partes da peça onde a madeira está integra e o amarelo claro partes da peça onde há a presença de oco. Para a construção das imagens utilizando essas cores a faixa de velocidade correspondente à madeira integra foi de 1500 m.s^{-1} a 2500 m.s^{-1} e a faixa de velocidade correspondente à existência do oco foi de 0 m.s^{-1} a 1500 m.s^{-1} . As velocidades foram superiores às obtidas por Lin *et. al.* (2008) porque a velocidade na madeira integra também foi superior.

Utilizando esse tipo de malha de medição (reticulada) verifica-se que a detecção do oco só foi possível quando as dimensões do mesmo representavam, pelo menos, 25% da peça

(Figura 4.35). Esse resultado confirmou o que já tinha sido verificado na Etapa 2.

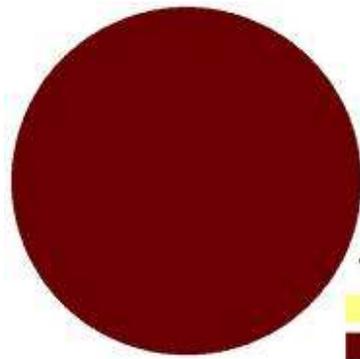
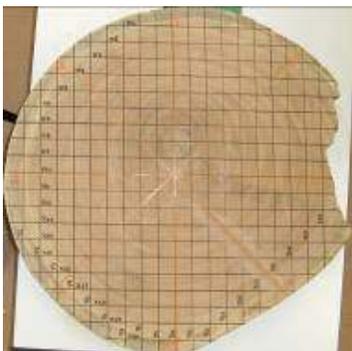


Figura 4.32 Foto da peça de Pequiá íntegro e imagem produzida com a malha reticulada.

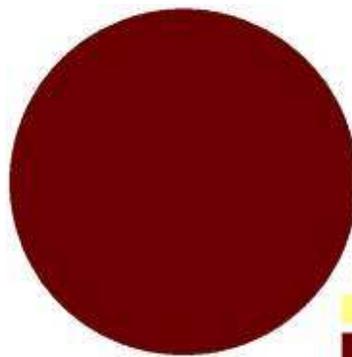
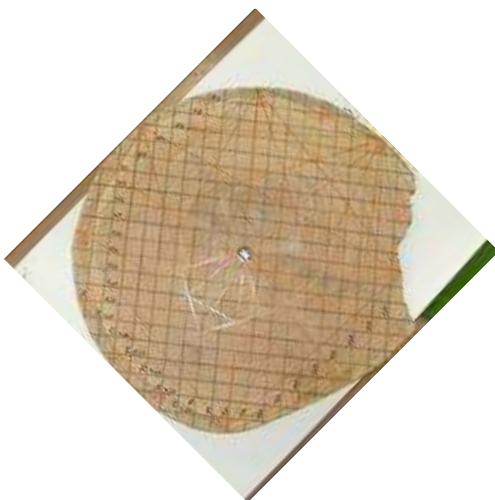


Figura 4.33 Foto da peça de Pequiá com 5% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.

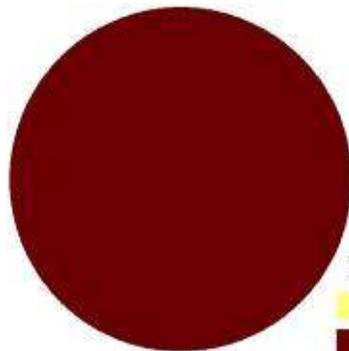


Figura 4.34 Foto da peça de Pequiá com 15% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.

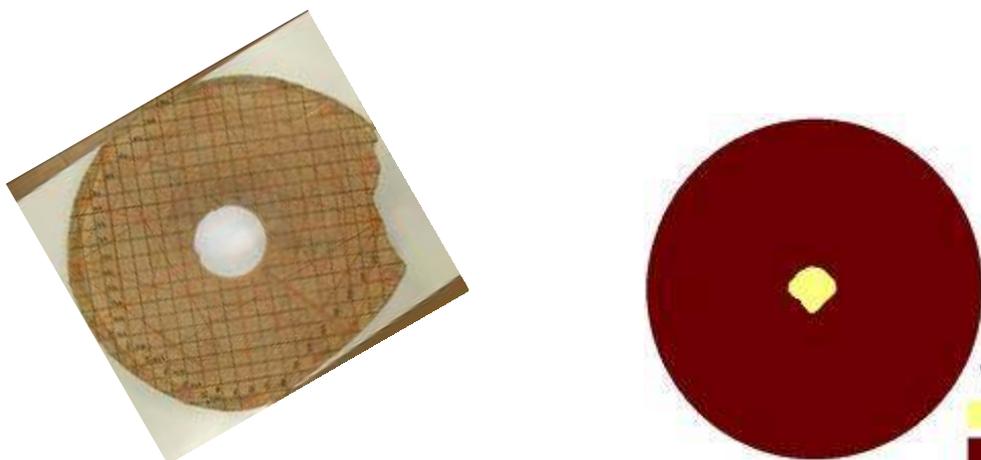


Figura 4.35 Foto da peça de Pequiá com 25% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.

Verifica-se que para a 35% (Figura 4.36) o oco continuou a ser detectado, com um aumento significativo em relação a porcentagem anterior e começou a ter uma forma “cruciforme” tanto para 35%, quanto para 45% e para 55% (Figura 4.37 e Figura 4.38). Esse comportamento ocorreu em função do tipo de malha, reticulada, que tem apenas dois sentidos de medição.



Figura 4.36 Foto da peça de Pequiá com 35% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.

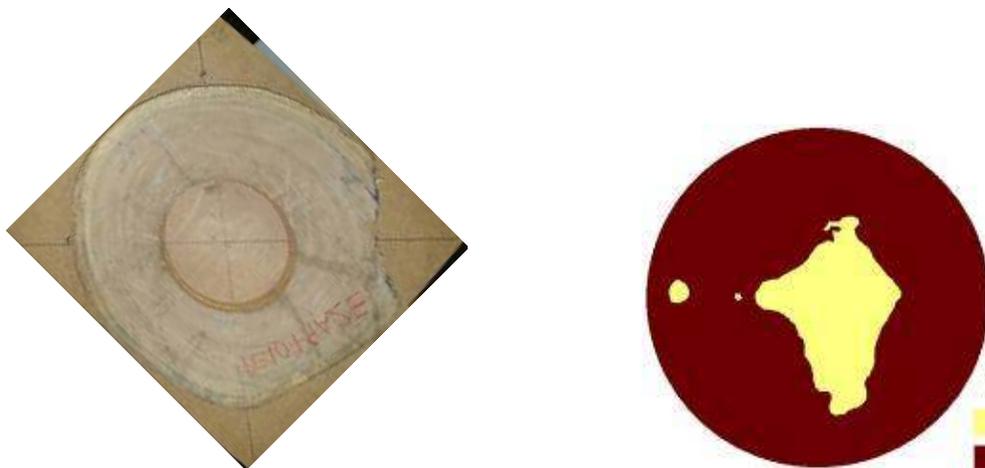


Figura 4.37 Foto da peça de Pequiá com 45% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.

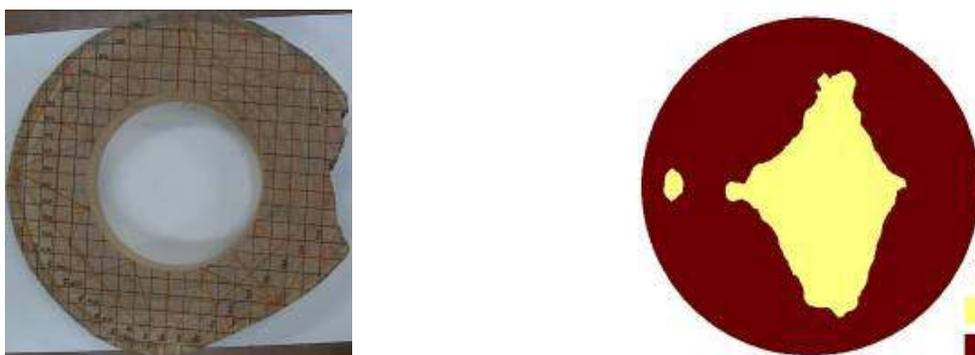


Figura 4.38 Foto da peça de Pequiá com 55% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.

Verifica-se que a partir de 65% (Figura 4.39) o oco continuou a ser detectado, com um aumento significativo em relação a porcentagem anterior e começou a ter uma forma mais circular também para 75%, 85% e 90% (Figura 4.40, Figura 4.41 e Figura 4.42). Esse comportamento decorre do fato do oco interferir em maior número de pontos de medições da malha reticulada para porcentagens mais elevadas.

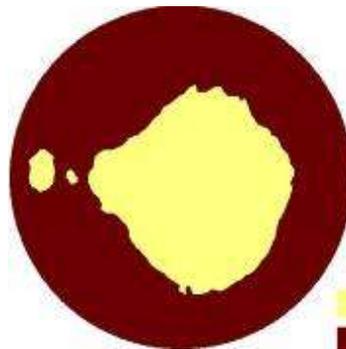


Figura 4.39 Foto da peça de Pequiá com 65% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.

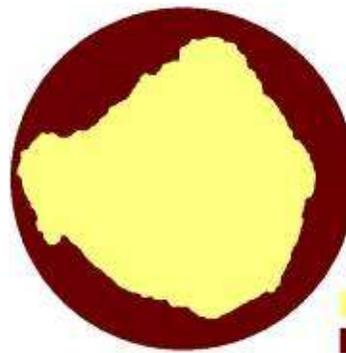


Figura 4.40 Foto da peça de Pequiá com 75% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.

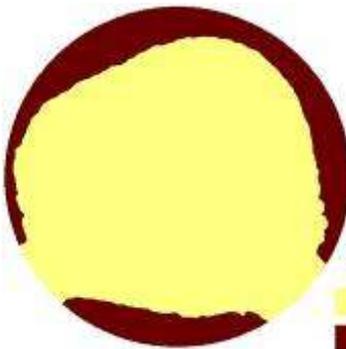
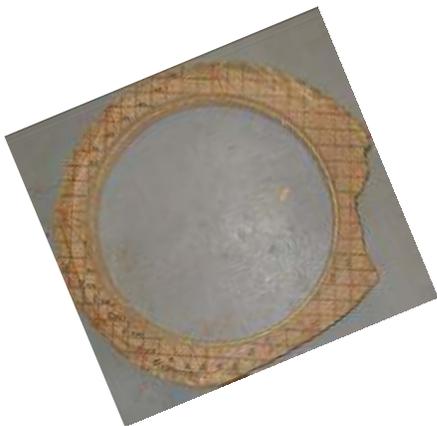


Figura 4.41 Foto da peça de Pequiá com 85% de oco e imagem produzida com a malha reticulada.

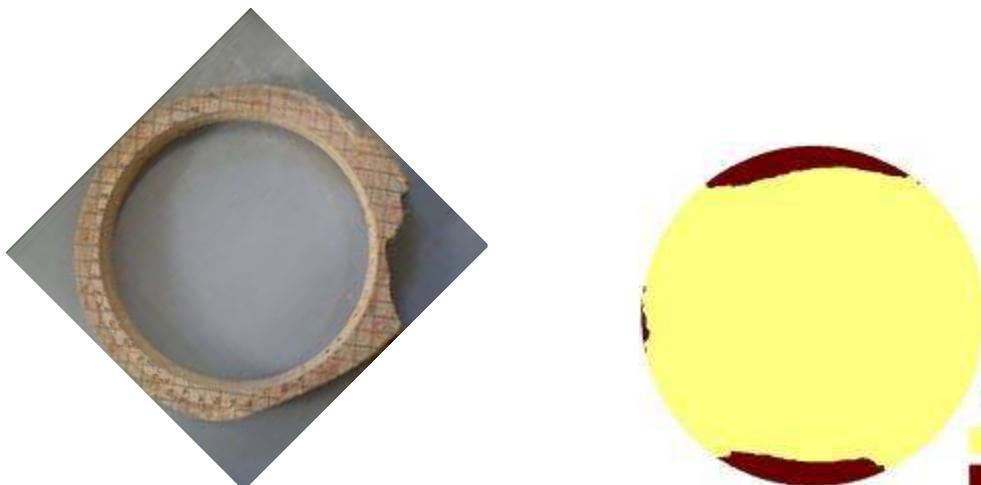


Figura 4.42 Foto da peça de Pequiá com 90% de oco e imagem produzida com 90% com a malha reticulada.

Verifica-se que, apesar de algumas distorções no formato do oco representado pela imagem e, também, no caso da peça com 85% e 90% (Figura 4.41 e Figura 4.42) de oco, a imagem indicar o oco avançando nas bordas, de maneira geral a imagem representa de forma adequada a existência e o posicionamento do oco.

4.3.2 Malha difração

A Tabela 4.16 apresenta-se os resultados médios de velocidade de propagação das ondas obtidas segundo as rotas A, B, C, D, E e F para o método de difração, para o disco de Pequiá enquanto a Tabela 4.17 os parâmetros das regressões lineares considerando as médias das medições em cada uma das rotas.

Para ilustrar o comportamento de todas as medições em cada uma das Rotas são apresentados os gráficos da Figura 4.43 até a Figura 4.48.

Tabela 4.16 Velocidades de propagação das ondas de ultrassom na malha tipo difração para as diferentes condições da peça.

Condição da peça	Rota A	Rota B	Rota C	Rota D	Rota E	Rota F
Integra (0%)	1871 (9)	1971 (18)	2044 (4)	1955 (6)	2036 (8)	2100 (5)
5%	1657 (8)	1700 (18)	1712 (12)	1673 (7)	1792 (7)	1921 (3)
15%	1704 (8)	1789 (15)	1706 (13)	1557 (13)	1873 (5)	1958 (2)
25%	1724 (9)	1783 (17)	1762 (10)	1386 (20)	1894 (4)	1943 (2)
35%	1759 (10)	1829 (16)	1672 (10)	1076 (18)	1853 (5)	1871 (5)
45%	1753 (11)	1823 (16)	1544 (17)	977 (10)	1791 (10)	1941 (4)
55%	1754 (11)	1823 (16)	1534 (17)	1042 (13)	1781 (4)	1941 (4)
65%	1754 (11)	1823 (16)	1385 (14)	1012 (8)	1575 (6)	1941 (4)
75%	1755 (11)	1746 (21)	1274 (9)	1015 (10)	1340 (8)	1952 (4)
85%	1756 (11)	1374 (20)	1151 (8)	949 (11)	1284 (6)	1647 (9)
90%	1697 (13)	1284 (18)	1045 (12)	823 (11)	1202 (9)	1630 (2)

*Valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%)

Tabela 4.17 Modelos e parâmetros das regressões entre velocidade de propagação média das ondas de ultrassom (V) e aumento percentual do oco ($\phi\%$) para cada rota de medição.

Rotas de medição	Equação	R	R²	P-valor
A	$V = - 0,18 (\phi\%) + 1752$	- 0,011	1,15%	0,7537*
B	$V = - 4,42 (\phi\%) + 1921$	- 0,68	46,2%	0,0213
C	$V = - 8,88 (\phi\%) + 1930$	- 0,96	91,4%	0,0000
D	$V = - 10,3 (\phi\%) + 1690$	- 0,90	81,9%	0,0001
E	$V = - 8,05 (\phi\%) + 2037$	- 0,91	82,9%	0,0001
F	$V = - 3,15 (\phi\%) + 2036$	- 0,72	52,2%	0,0121

*regressão não significativa

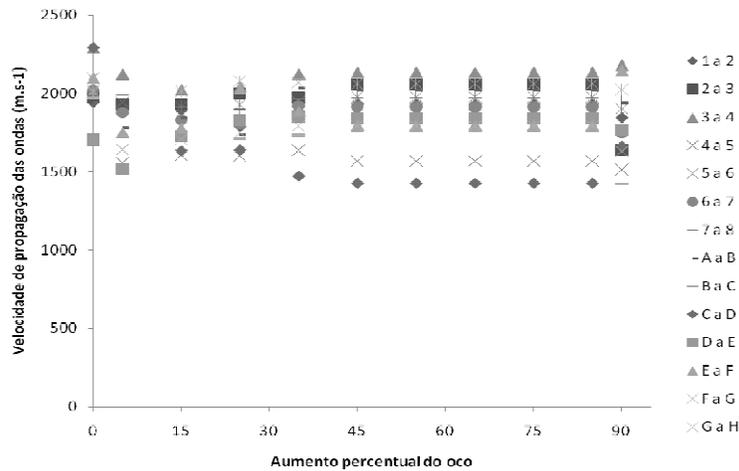


Figura 4.43 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento percentual do oco para as medições segundo a Rota A (dois pontos de medição adjacentes).

Levando-se em conta a região de medição, era de se esperar que na Rota A (medições em pontos adjacentes, Figura 4.43) os valores de velocidade apresentassem pouca variação com o aumento percentual do oco, já que a medição é periférica. Resultado muito semelhante foi obtido por Lin *et. al.* (2009) com coeficiente de determinação $R^2 = 0,016$. Tanto o resultado obtido nessa pesquisa quanto o obtido por Lin *et. al.* (2009) indicam que não há correlação estatisticamente significativa entre a velocidade de propagação das ondas e o aumento percentual do oco considerando a Rota A.

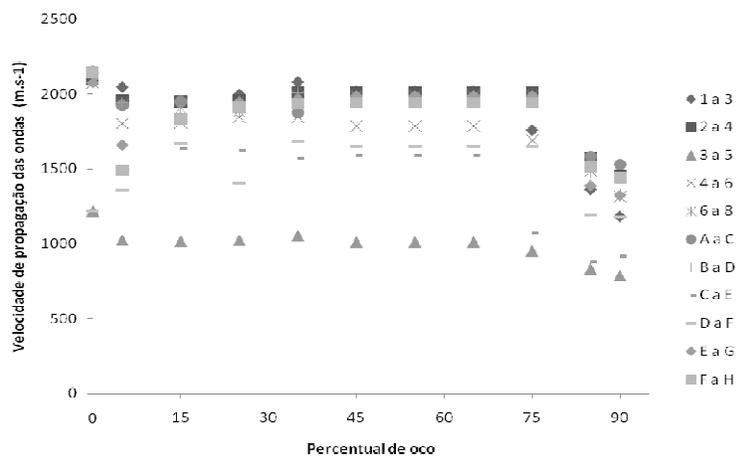


Figura 4.44 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento percentual do oco para as medições segundo a Rota B (intervalo de um ponto entre duas medições).

A Rota B (intervalo de um ponto entre duas medições, Figura 4.44), no caso dessa pesquisa, é mais periférica do que na pesquisa de Lin *et. al.* (2009), pois a peça tem o dobro do diâmetro. No caso de Lin *et. al.* (2009) o coeficiente de correlação para a Rota B foi de 0,77 enquanto para o caso dessa pesquisa de 0,68, conforme apresentado na Tabela 4.17. Tanto na pesquisa de Lin *et. al.* (2009) quando nesse trabalho as correlações foram significativas para essa rota.

Pelo gráfico da Figura 4.44 verifica-se que na medição “3 a 5” houve uma interferência que fez com que as velocidades ficassem muito inferiores dos demais. Durante o corte utilizando a CNC houve rompimento de algumas fibras, fazendo com que houvesse nesse percurso, fissuras e, em decorrência dessas fissuras, as velocidades foram inferiores. Essa interferência se refletiu nas imagens elaboradas à partir das velocidades conforme pode ser visto nas Figura 4.49 a Figura 4.59.

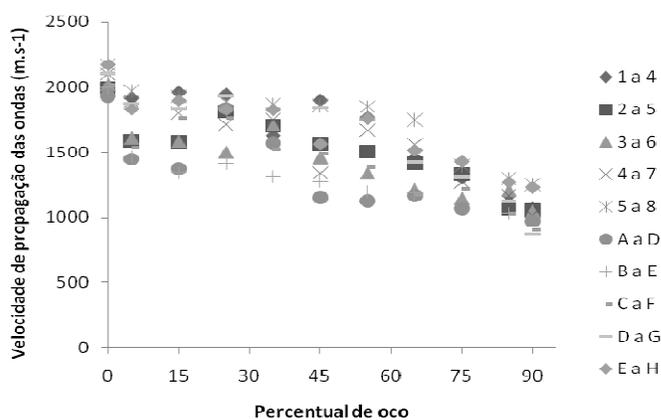


Figura 4.45 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento percentual do oco para as medições segundo a Rota C (intervalo de dois ponto entre duas medições).

Para a Rota C (Figura 4.45), tanto no trabalho de Lin *et. al.* (2009) quanto nessa pesquisa as regressões foram estatisticamente significativas e os coeficiente de correlação de 0,95 e 0,96, respectivamente.

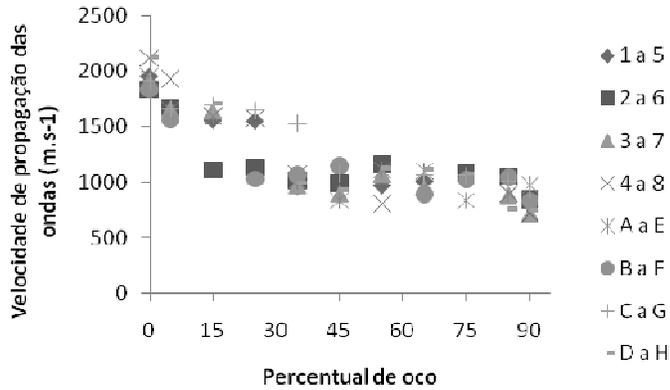


Figura 4.46 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento percentual do oco para as medições segundo a Rota D (direção radial).

A Rota D (intervalo de três pontos entre as leituras, Figura 4.46) representa as medições realizadas de forma radial. No caso da pesquisa de Lin *et. al.* (2009) foi nessa rota que foram obtidas as melhores correlações da velocidade com o aumento percentual do oco ($R = 0,97$). No caso dessa pesquisa a regressão foi significativa e as correlações indicam boa relação entre as variáveis, mas o R foi um pouco inferior ao obtido na Rota C.

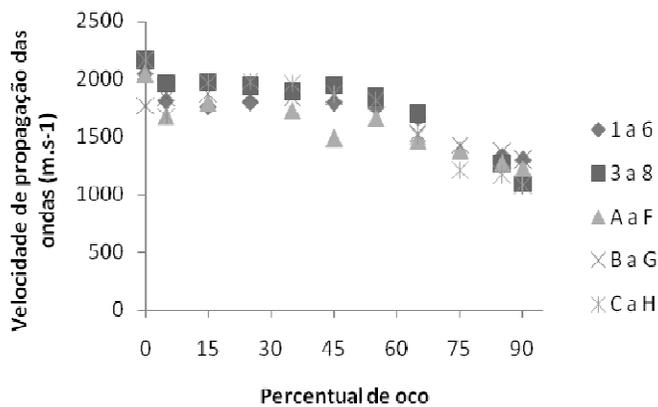


Figura 4.47 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento percentual do oco para as medições segundo a Rota E (intervalo de quatro ponto entre duas medições).

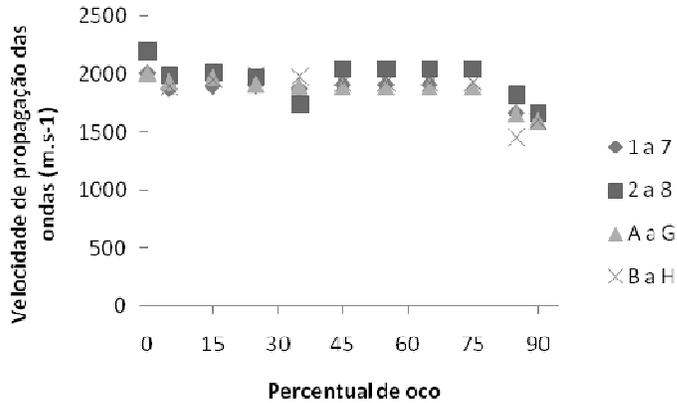


Figura 4.48 Comportamento da velocidade de propagação das ondas em função do aumento percentual do oco para as medições segundo a Rota F (intervalo de cinco ponto entre duas medições).

As Rotas E e F (Figura 4.47 e Figura 4.48) não foram analisadas por Lin *et. al.* (2009) porque o diâmetro da peça analisada pelos autores era bem menor do que o dessa pesquisa. A Rota F corresponde à Rota B em uma posição invertida da peça. Como o oco artificial foi feito no centro da peça, espera-se que os modelos de variação da velocidade com o aumento do oco, obtidos para essas duas rotas sejam semelhantes. Observando os modelos apresentados na Tabela 16 verifica-se a confirmação desse resultado.

Considerando os resultados gerais na madeira integra e na madeira com a maior porcentagem de oco, a velocidade variou de aproximadamente 2000 m.s^{-1} a aproximadamente 600 m.s^{-1} . Lin *et. al.* (2008) obtiveram, também com uso de malha de difração, velocidades no intervalo 1600 m.s^{-1} a 600 m.s^{-1} .

É importante destacar que, no caso da peça utilizada nessa pesquisa a medula não estava centralizada. Ou seja, o oco artificial foi criado no centro da peça e não no centro da medula, o que gerou algumas interferências nas rotas que passavam pela medula e pelo oco, já que a velocidade na região de medula é inferior à velocidade em outras regiões da madeira.

As Figuras 4.49 à 4.59 apresentam as imagens geradas utilizando-se as variações de velocidade de propagação de onda de ultrassom em cada faixa de medição da peça de Pequiá para malha tipo difração. Para facilitar a comparação dos resultados da malha de difração com a malha reticulada, nas Figuras são apresentadas, além da imagem gerada com a malha de difração, a fotos da peça real e a imagem gerada pela malha reticulada (já apresentada e

discutida no item anterior).

As cores estão associadas à variações de velocidade e, assim como foi definido na malha tipo reticulada, a imagem foi elaborada com apenas duas cores, marrom e amarelo claro. Também da mesma forma como foi realizado para a malha reticulada, a faixa de velocidade correspondente a cor marrom está representando valores de velocidade entre 1500-2500 m.s^{-1} , e a faixa de cor amarela está representando valores de velocidade entre 0 -1500 m.s^{-1} , e, a partir dessas faixas, as imagens foram construídas.

Por este método de geração de imagens foi possível detectar a presença, inclusive, do defeito lateral que a peça possuía, embora com dimensão menor do que a real (Figura 4.49).

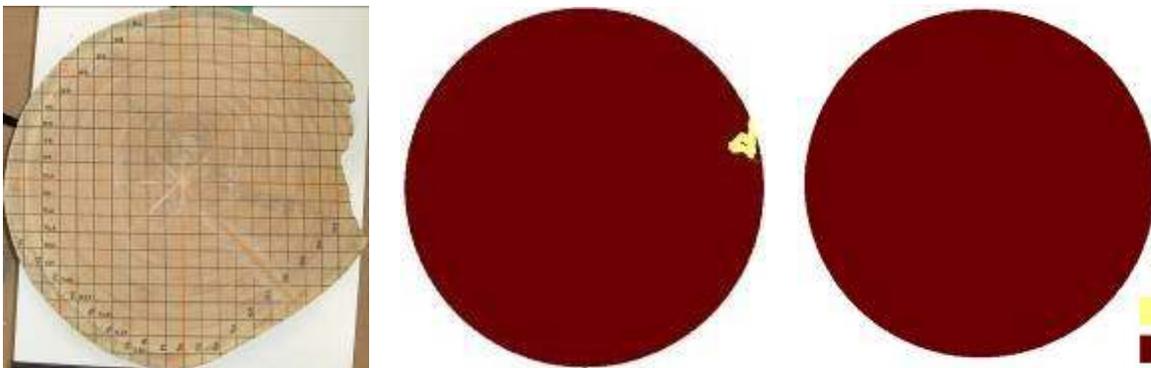


Figura 4.49 Foto da peça de Pequiá íntegro e as imagens produzidas com uso das malhas difração e reticulada.

Na Figura 4.50 pode ser vista a peça com oco de 5%, que não pôde ser detectado pela medição em malha de difração, assim como ocorreu no caso da malha reticulada. No entanto, a dimensão do defeito na borda correspondeu melhor ao real.

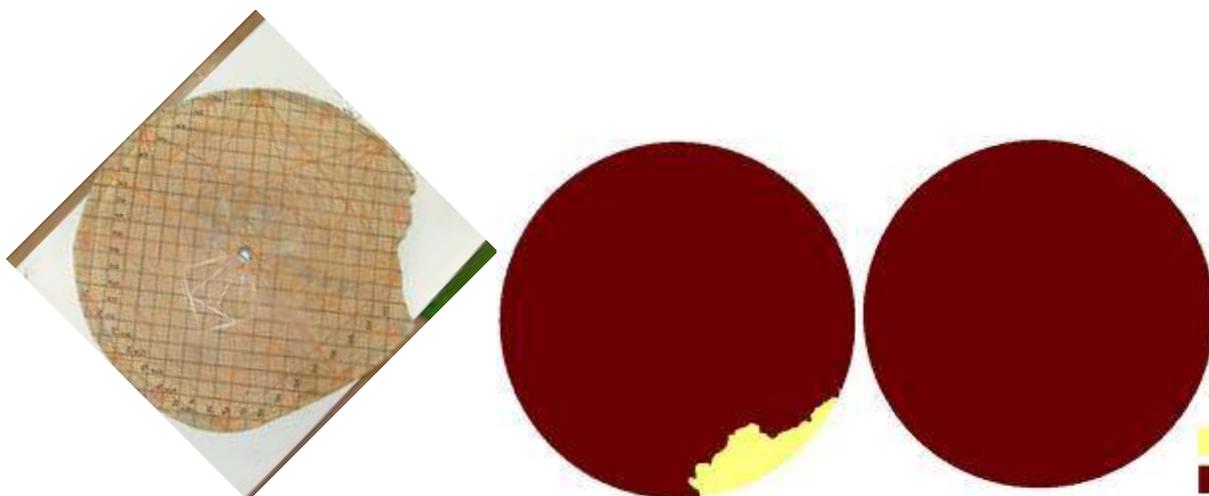


Figura 4.50 Foto da peça de Pequiá com 5% de oco e as imagens produzidas com o uso das malhas difração e reticulada.

Para o oco de 15% (Figura 4.51) a imagem já começa a ser representativa, mas houve alguma interferência, pois o mesmo aparece como se não fosse contínuo. No caso da malha reticulada o oco só começa a aparecer na imagem a partir de 25%, demonstrando que a malha de difração pode detectar a presença de ocos um pouco menores do que a reticulada.

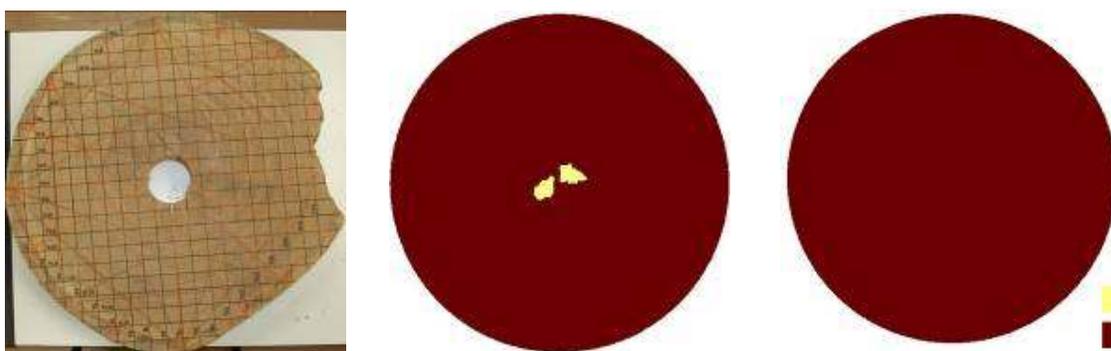


Figura 4.51 Foto da peça de Pequiá com 15% de oco e as imagens produzidas com as malhas de difração e reticulada.

Nas Figuras 4.52 e 4.53 verifica-se que o oco de 25% e 35%, respectivamente, foi identificado, em termos de posição e de dimensão, pela imagem utilizando a malha de difração. No entanto, para a peça com oco de 35% houve uma interferência e o defeito da borda ficou mal posicionado na imagem. Para ambas dimensões de oco a malha de difração

representou a dimensão de forma mais adequada do que a malha reticulada.

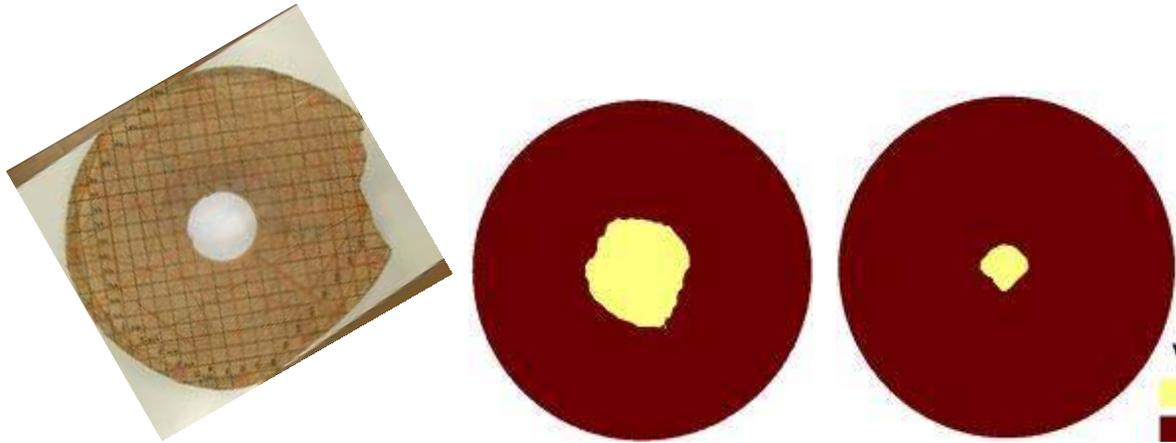


Figura 4.52 Foto da peça de Pequiá com 25% de oco e as imagens produzidas utilizando as malhas difração e reticulada.

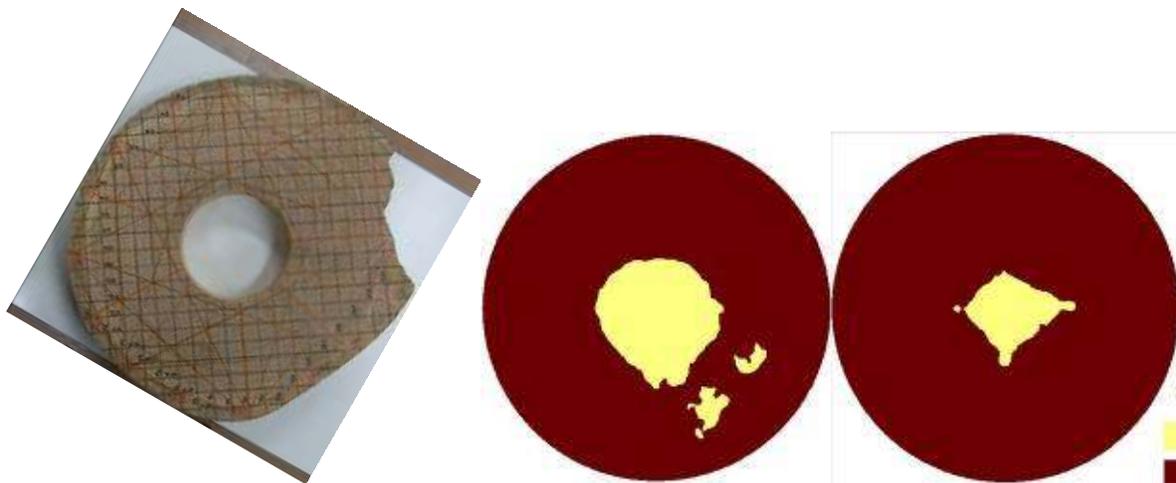


Figura 4.53 Foto da peça de Pequiá com 35% de oco e as imagens produzidas com as malhas difração e reticulada.

Para 45%, 55%, 65%, 75%, 85% e 90% de oco (Figura 4.54 a 4.59) o defeito na borda da peça pode ter provocado a interferência na imagem real do oco central fazendo com que ele pareça ter formato mais alargado do que o real.

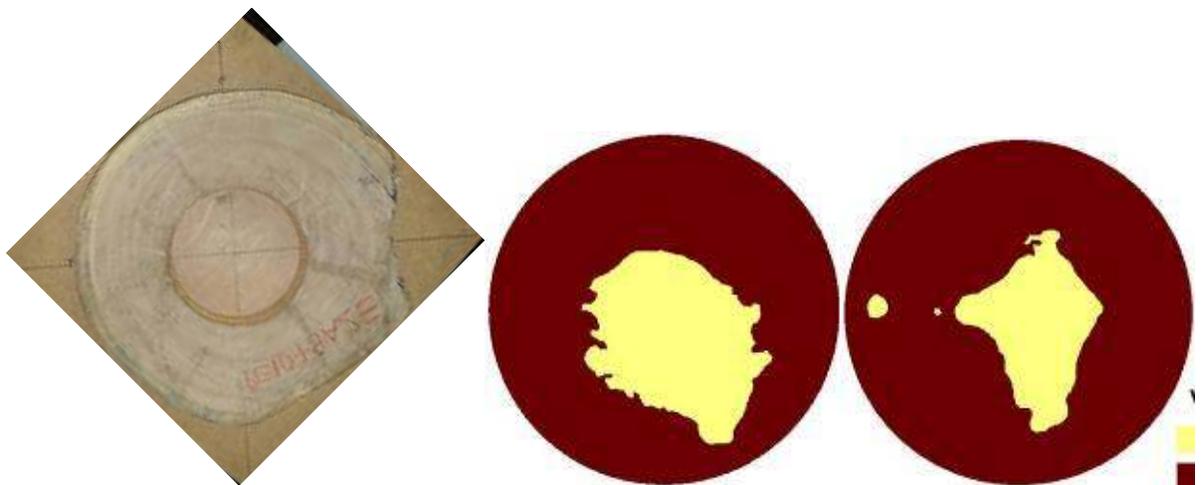


Figura 4.54 Foto da peça de Pequiá com 45% de oco e as imagens produzidas com as malhas difração e reticulada.

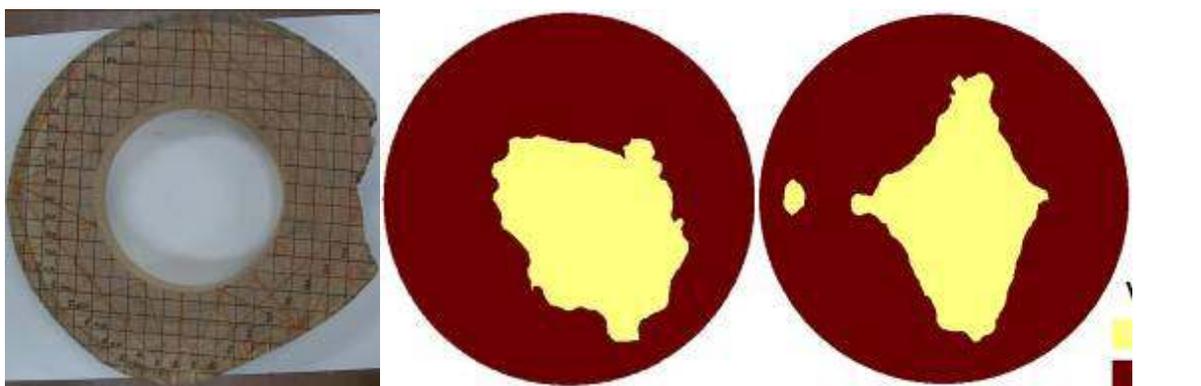


Figura 4.55 Foto da peça de Pequiá com 55% de oco e as imagens produzidas pelas malhas difração e reticulada.

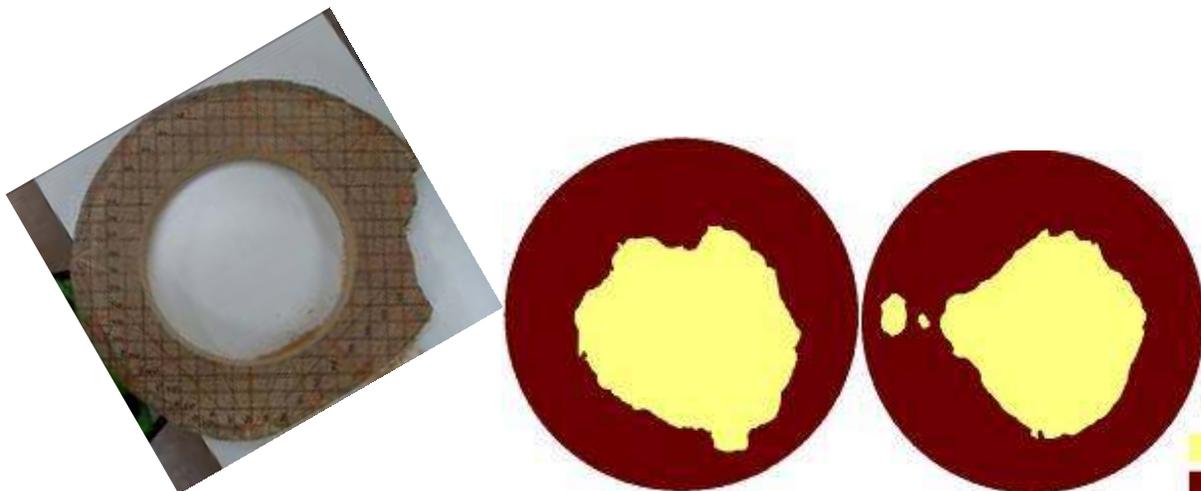


Figura 4.56 Foto da peça de Pequiá com 65% de oco e as imagens produzidas com as malhas

difração e reticulada.

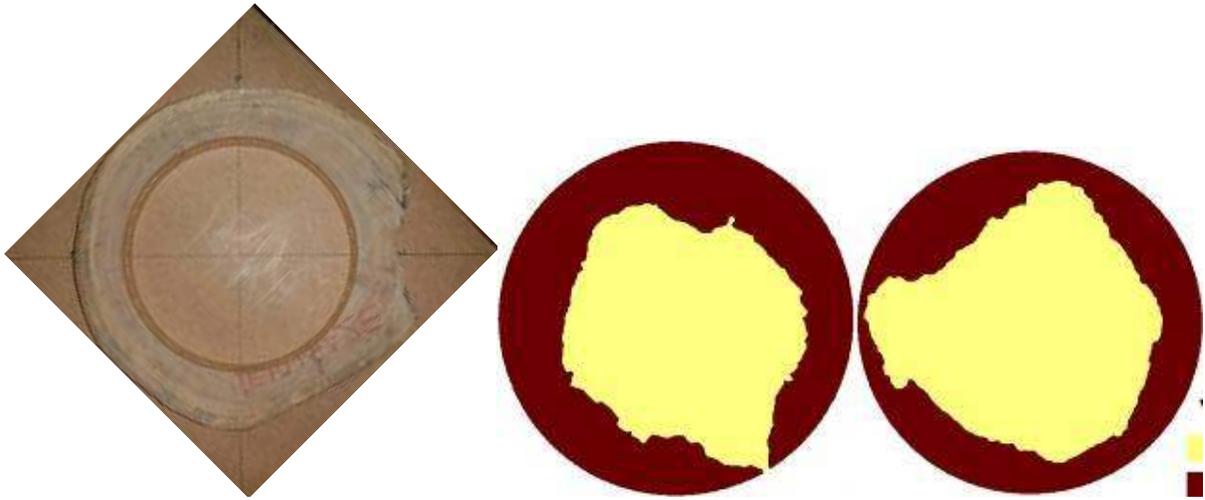


Figura 4.57 Foto da peça de Pequiá com 75% de oco e as imagens produzidas com as malhas difração e reticulada.

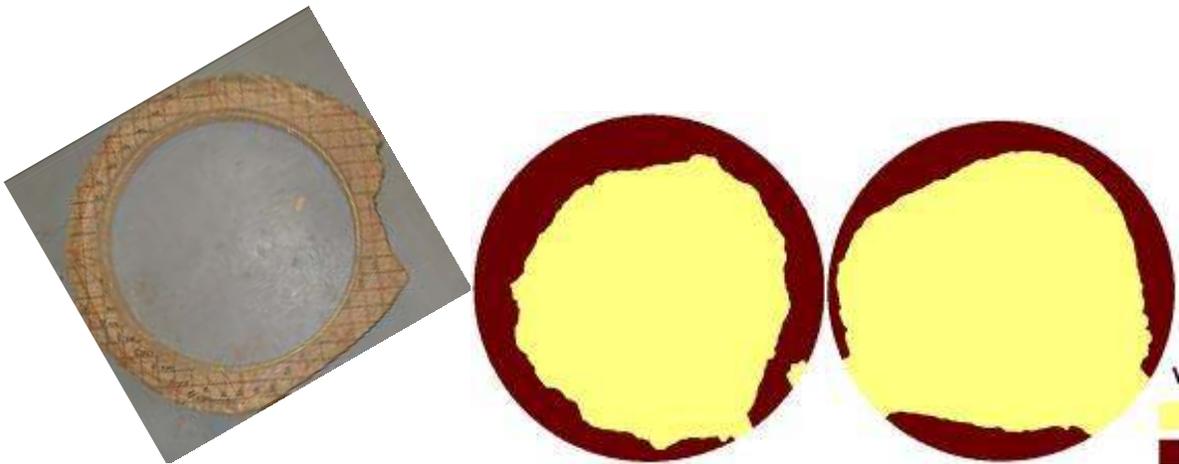


Figura 4.58 Foto da peça de Pequiá com 85% de oco e as imagens produzidas com as malhas difração e reticulada.

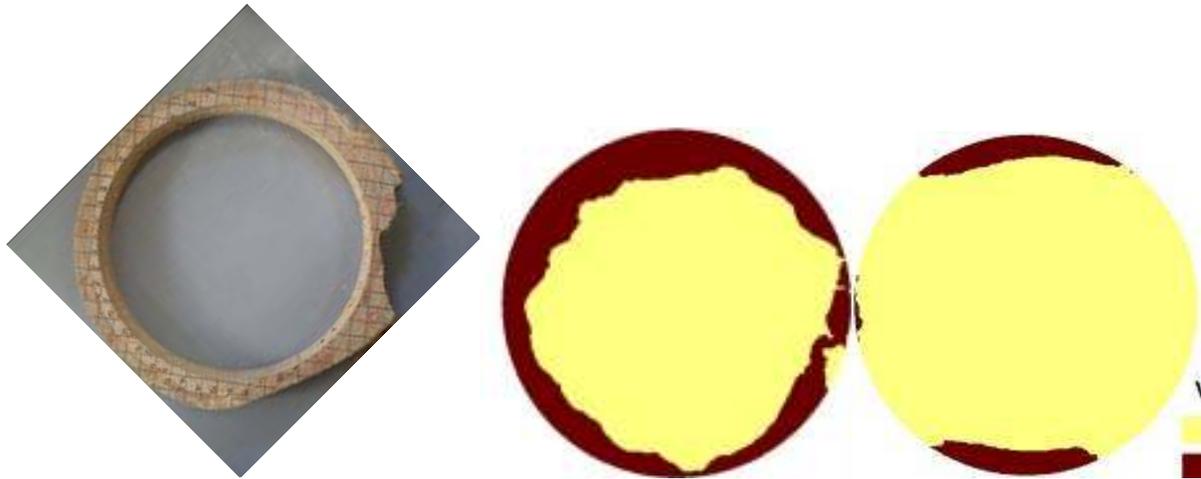


Figura 4.59 Foto da peça de Pequiá com 90% de oco e as imagens produzidas com as malhas difração e reticulada.

Os resultados obtidos nessa etapa convalidam as etapas anteriores e mostra que a utilização dos transdutores exponenciais de 45 kHz é adequada, desde que sejam realizados os orifícios nos pontos de medição na tora, permitindo bom acoplamento e alinhamento dos mesmos. Esse transdutor apresenta resultados tão adequados quanto os de faces planas, com a vantagem de não ser necessário aplicar-se o gel e de ser possível obter-se alinhamento e acoplamento adequados mesmo em faces com curvatura, como é o caso de árvores e toras. Dessa forma, o transdutor de face exponencial mostrou maior potencial para aplicações em campo.

Os resultados obtidos nessa etapa também validam o potencial do equipamento, uma vez que mesmo com o aumento da dimensão da peça e da dimensão dos ocos, o equipamento foi capaz de realizar as medições com bom nível de sinal e sem apresentar problemas de leitura ou de estabilização. Esse resultado mostra que o mesmo possui potencia adequada para ser utilizado em inspeções de árvores ocadas.

Em relação ao tipo de malha de medição, essa última etapa permitiu verificar que a malha de difração apresentou resultado de imagem superior ao da malha reticulada, por realizar uma varredura maior da peça e com maior número de repetições de leituras no mesmo trecho de medição.

5. CONCLUSÕES

De posse dos resultados obtidos por meio das três etapas de ensaio foi possível comprovar que o método de propagação de ondas de ultrassom tem sensibilidade para ser utilizado na detecção de ocos em peças de madeira. Essa detecção pode ser realizada utilizando-se a variação de velocidade de propagação das ondas.

O equipamento de ultrassom nacional utilizado apresentou características e potência adequada para esse tipo de inspeção, não havendo problemas na recepção do sinal mesmo na peça de maior dimensão (aproximadamente 600 mm) e com a maior porcentagem de oco (90%).

Os resultados também permitiram concluir que as imagens, produzidas por meio da adoção de uma velocidade crítica de propagação das ondas de ultrassom, a partir da qual se considera a existência de um oco na peça, refletem de forma aproximada a dimensão e a posição do oco. As interferências na imagem podem ter sido causadas pelo software utilizado, o qual não foi elaborado para esse tipo de aplicação e que, por isso, não permite a inserção de parâmetros específicos da madeira como fazem os algoritmos mais especializados.

Tanto a malha reticulada quanto a malha difração permitiram a elaboração de imagem aproximada da dimensão e da posição do oco na peça, mas a malha de difração apresentou melhor resolução, uma vez que permitiu a detecção, com uso de transdutor de frequência de 45 kHz, de um oco com dimensão correspondente a 15% da dimensão da peça enquanto na malha reticulada a detecção só se deu a partir de 25%.

Apesar de um número muito maior de leituras, as medições com a malha de difração foram mais fáceis de realizar, uma vez que, nesse caso, há a movimentação de apenas um dos transdutores (receptor) em cada ponto. Além disso, pela grande quantidade de rotas de medição, a questão da precisão na manutenção do alinhamento é menos importante do que no caso da malha retilínea. Finalmente, a malha de difração é a mais indicada para a utilização em campo, por ser uma malha que se adequa melhor à forma orgânica da árvore/tora.

6. SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DA PESQUISA

Aprofundar o estudo dos mecanismos de variação da velocidade de propagação das ondas de ultrassom na madeira em presença de ocos e estabelecer padrões de comportamento a serem utilizados para a determinação de faixas de velocidade a serem tratadas em software para a elaboração de imagem pós processada que represente esse oco em termos de posicionamento e dimensões.

Desenvolver, com o uso dos resultados dos estudos específicos acima mencionados, algoritmos e software específicos para a elaboração de imagens à partir da variação das velocidades.

Comparar os resultados do uso dessa tecnologia com os métodos empíricos e as técnicas destrutivas utilizadas atualmente para se detectar a presença de ocos em espécies nativas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLISON, R. Bruce; WANG, Xiping; ROSS, Robert J. **Visual e nondestructive evaluation of red pine supporting a ropes course in the USFS Nesbit Lake Camp, Sidnaw, Michigan.** In: International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 15., 2007,. Duluth, Minnesota, USA. Anais Duluth: Forest Products Society, 2007, v.1, p. 43-48.

AMARAL, Paulo; VERÍSSIMO, Adalberto; BARRETO, Paulo; VIDAL, Edson. *Floresta para Sempre: um Manual para Produção de Madeira na Amazônia.* Belém: Imazon, 1998. pp 130

Amigos da Terra - Amazônia Brasileira: Copyright © Amigos da Terra - Amazônia Brasileira. (<http://www.manejoflorestal.org/guia.cfm?cap=7>) acessado em 05 de fevereiro de 2009.

APOLINÁRIO, F.E., MARTIUS, C. Ecological role of termites (Insecta, Isoptera) in tree trunks in central Amazonian rain forests. **Forest Ecology and Management**, 194 (2004) 23–28.

AZEVEDO, Onofra Cleuza Rigamonte. Copaíba: estrutura populacional, produção e qualidade do óleo-resina em populações nativas do sudoeste da Amazônia. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Acre, 2004. 79 p.

BIASI, Cândido Pietro.; ROCHA, Mário Pereira. Rendimento em madeira serrada e quantificação de resíduos para três espécies tropicais. **Floresta.** Curitiba, PR, v.37, n.1, p 95-108, jan./abr. 2007.

BRANZOLIN, Sérgio. Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, *Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP. Tese (Doutorado), Recursos Florestais, ESALQ, USP, 2009. 207p.

BUCUR, V. **Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees.** Ultrasonics. (2005) 43:237-239.

DEFLORIO, Giuliana; FINK, Siegfried; SCHWARZE, Francis W. M. R. (2007) **Detection of incipient decay in tree stems with sonic tomography after wounding and fungal inoculation.** Wood Sci Technol 42:117-132.

DIVOS, F.; SZALAI, L. 2002. **Tree evaluation by acoustic tomography.** In: Proceedings of the 13th International symposium on nondestructive testing of wood; 2002 August 19. 21; Berkeley, CA. Madison, WI: Forest Products Society: 251.256.

FAN, Honghui; GUO, Shuqing; TAMURA, Yasutaka; YANAGIDA, Hirotaka; TAKAHASHI, Tatsuhisa; ADACHI, Kazunari. Time of Flight Ultrasonic CT Based on ML-EM for Wooden Pillars. In: IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2008, p.4.

FOELKEL C.E.; BUSNARDO C.A. O fenômeno de apodrecimento central do cerne de árvores vivas de *Eucalyptus*: qualidade da madeira. **IPEF**, Piracicaba, n. 33, p. 31-38, ago. 1986. *apud*. BRANZOLIN, Sérgio. Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, *Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP. Tese (Doutorado), Recursos Florestais, ESALQ, USP, 2009. 207p.

GÖCKE, Lothar; RUST, Steffen; WEIHS, Ulrich; GÜNTHER, Thomas; RÜCKER, Carsten. **Combining sonic and electrical impedance tomography for nondestructive testing of trees**. In: International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 15., 2007,. Duluth, Minnesota, USA. Anais Duluth: Forest Products Society, 2007, v.1, p.31-42.

KIM, Kwang-Mo; PARK, Joo-Saeng; LEE, Sang-Joon; YEO, Hwanmyeong; LEE, Jun-Jae. **Development of a portable ultrasonic computed tomography system for detecting decay in wood**. In: International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 15., 2007,. Duluth, Minnesota, USA. Anais Duluth: Forest Products Society, 2007, v.1, p. 191-195.

LASAYGUES, Philippe; FRANCESCHINI, Emilie; DEBIEU, Eric; BRANCHERIAU, Loïc. Non-destructive diagnosis of the integrity of green wood using ultrasonic computed tomography. In: International Congress on Ultrasonics, 2007, Vienna, Austria, v.1, p.1-4.

LEE, Sang-Joon; OH, Jung-Kwon; YEO, Hwanmyeong; LEE, Jun-Jae; KIM, Ki-Bok; KIM, Kwang-Mo. **Field application of nondestructive testing for detecting deterioration in Korean historic wood buildings**. In: International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 15, 2007,. Duluth, Minnesota, USA. Anais Duluth: Forest Products Society, 2007, v.1, p. 227-232.

LIANG, Shanqing; WANG, Xiping; WIEDENBECK, Janice; CAI, Zhiyong; FU, Feng. **Evaluation of acoustic tomography for tree decay detection**. In: International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 15., 2007, Duluth, Minnesota, USA. Anais Duluth: Forest Products Society, 2007, v.1, p.49-54.

LIN, Cheng-Jung; KAO, Yu-Chien; LIN, Ta-Te; TSAI, Ming-Jer; WANG, Song-Yung; LIN, Lang-Dong; WANG, Ya-Nan; CHAN, Ming-Hsun. (2008). **Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees**. International Biodeterioration & Biodegradation. v.62. p434-441.

NAJAFI, Saeed Kazemi; SHALBAFAN, Ali; EBRAHIMI, Ghanbar. (2009). **Internal decay assessment in standing beech trees using ultrasonic velocity measurement**. Eur J Forest Res:1-6.

Portal da Madeira Manejada ([www.http://www.florestavivaamazonas.org.br](http://www.florestavivaamazonas.org.br)) acessado em 12 de dezembro de 2008.

PEREIRA, Denys; LENTINI, Marco. Guia SAMFLOR. Belém, PA: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, 2010. 66p.

PINHEIRO, Roberto Vasconcelos. Influência da preservação contra a demanda biológica em propriedades de resistência e de elasticidade da madeira. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2001. 187 p.

RABE C., FERNER D., FINK S., SCHWARZE F.W.M.R. (2004) **Detection of decay in trees with stress waves and interpretation of acoustic tomograms**. Arb J 28:3–19.

TORA BRASIL, Copyright © Tora Brasil – Todos os direitos reservados (<http://www.torabrasil.com.br/>) acessado em 15 de maio de 2009.

WANG, Xiping; DIVOS, Ferenc; PILON, Crystal; BRASHAW, Brian K.; ROSS, Robert J.; PELLERIN, Roy F. (2004). **Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools: A guide for use and interpretation**. United States Department of Agriculture. Forest Products Laboratory. General Technical Report FPL-GTR-147. 12p.