



ROBSON VAN DIJK

**ASSOCIAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA
INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA**

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2014



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

ASSOCIAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Construções Rurais e Ambiente.

Orientadora: Dr^a Raquel Gonçalves

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA
PELO ALUNO ROBSON VAN DIJK, E ORIENTADA
PELA PROF^a DR^a RAQUEL GONÇALVES

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas Biblioteca
da Área de Engenharia e Arquitetura Rose Meire
da Silva - CRB 8/5974

D569a Dijk, Robson van, 1989-
Associação de métodos não destrutivos para inspeção de estruturas de
madeira / Robson van Dijk. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Raquel Gonçalves.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Agrícola.

1. Patrimônio histórico - Conservação e restauração. 2. Ultrassom. 3.
Propagação de ondas. I. Gonçalves, Raquel, 1961-. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Association of non-destructive techniques for inspection of timber
structures

Palavras-chave em inglês:

Historic heritage - Conservation and restoration

Ultrasound

Wave's propagation

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiência

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Raquel Gonçalves [Orientador]

Francisco Antonio Rocco Lahr

Alex Julio Trinca

Data de defesa: 26-02-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Robson Van Dijk**, aprovada pela Comissão Julgadora em 26 de fevereiro de 2014, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI



Profa. Dra. Raquel Gonçalves – Presidenta e Orientadora
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr – Membro Titular
EESC/USP



Dr. Alex Júlio Trinca – Membro Titular
Feagri/Unicamp

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

RESUMO

A madeira é alternativa real para construções sustentáveis, pois é material com baixa energia incorporada, capaz de armazenar carbono e renovável. Porém, como todo material, sofre degradação e perde capacidade resistente ao longo do tempo, tornando inspeções periódicas necessárias para acompanhar a integridade de estruturas em serviço. Os métodos não destrutivos (END) permitem inspecionar as estruturas sem a necessidade de retirada de amostras, sendo mais recomendados do que os destrutivos, principalmente em estruturas históricas. Todos os métodos apresentam limitações e, em geral, não são completos o suficiente para garantir, de forma isolada, resultados precisos de inspeção. Diferentes ensaios de END vêm sendo utilizados na prática, mas há poucos estudos que discutem tais técnicas utilizando fundamentos teóricos. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a associação de duas técnicas não destrutivas: a propagação de ondas e a resistência à perfuração. No caso do ultrassom, comportamentos relacionados aos fundamentos teóricos (tipos de medições e frequência) foram analisados. A tomografia ultrassônica, elaborada à partir das medições diretas de ultrassom na direção perpendicular às fibras, foi a melhor ferramenta de inspeção. Neste tipo de medição a condição real da peça foi identificada de forma clara quando a mesma estava íntegra ou em estado avançado de deterioração, eliminando a necessidade do uso da resistência a perfuração. Nos casos de deteriorações moderadas as imagens tomográficas causaram dúvidas, tornando o uso da resistência a perfuração importante para confirmar a existência e a extensão das degradações. Medições indiretas de ultrassom exigem cuidado de interpretação, pois a velocidade foi dependente da distância entre os transdutores (conversão da onda), foi muito sensível à pequenos defeitos (relação comprimento de onda e dimensão do defeito) e o resultado refletiu somente o estado superficial da peça. Os valores de velocidade obtidos nas medições semidiretas tenderam para o valor obtido de forma direta, demonstrando viabilidade em inspeções nas quais não se tem acesso às extremidades da peça. Transdutores de maior frequência foram mais sensíveis para detectar as zonas deterioradas, mas apresentam maior dispersão do sinal. Espera-se que os resultados desta pesquisa sejam úteis para a elaboração de manuais ou normas de inspeção de estruturas de madeira utilizando-se ensaios não destrutivos.

Palavras-chave: Patrimônio histórico, Ultrassom, Propagação de ondas

ABSTRACT

Wood is a real alternative to sustainable buildings, as this material has low energy needs, is a CO₂ storage and renewable. However, as all materials, wood degrades and loses its strength along years. So, regular inspections are necessary to verify timber integrity. Nondestructive testing (NDT) allows timber inspections without removing samples and therefore are recommended in historical structures. All methods, destructive or nondestructive, are, in general, incomplete to guarantee its exact inspection results. A lot of nondestructive testing is used in field to timber inspections, but there are a few studies using theory fundamental. The objective of this research was to evaluate the association of two nondestructive testing – ultrasound and drilling resistance. For the ultrasound test we also analyze behavior linked to theoretical fundamentals as different transducers positions (direct, indirect and semi direct measurements) and transducer frequency. Ultrasonic tomography, obtained by direct measurements perpendicular to the grain, was the better inspection technique. In this type of technique the real condition of the wood was clearly identified for clear pieces or pieces with strong degradation, excluding the use of the drilling. For pieces with moderate degradation the use of the drilling was important to ratify and give the extension of the degradation zone. Indirect measurement needs careful interpretation, because the velocity is transducer distance dependent (wave conversion), it is very sensitive to small defects (relation between wave length and dimension of the defect) and the result was very superficial. Velocity values obtained by semi direct measurements tending to the values obtained in direct measurements, indicating viability to be applied in inspections where the end of the piece is not available. High frequencies transducers have more sensibility to detect the deteriorations but have also high dispersion of the signal. We wait that our results can be useful to the elaboration of manuals or standards to timber inspections using nondestructive techniques.

Key words: Historic heritage - Conservation and restoration, Ultrasound, Wave's propagation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA	3
2.2 DEGRADAÇÃO DA MADEIRA	5
2.3 INSPEÇÃO VISUAL	7
2.4 PROPAGAÇÃO DE ONDAS	8
2.5 RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO	13
2.6 ASSOCIAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS	15
2.7. ASPECTOS TEÓRICOS	26
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1 ENSAIOS UTILIZANDO O ULTRASSOM	34
3.2 ENSAIOS UTILIZANDO EQUIPAMENTO DE RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO	38
3.3 CORTE DAS AMOSTRAS DE PILAR E DETERMINAÇÃO DA ÁREA DETERIORADA DA SEÇÃO.....	39
3.4 DETERMINAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA DAS SEÇÕES	40
3.5 CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 ANÁLISE VISUAL	47
4.2 INSPEÇÃO UTILIZANDO O ULTRASSOM.....	53
4.2.1. Medições diretas paralelas a grã.....	53
4.2.2 Ensaios diretos perpendiculares à grã.....	58
4.2.2.1. Peça 1	61
4.2.2.2. Peça 2	66
4.2.2.3. Peça 3	71
4.2.2.4. Peça 4	75
4.2.3 Medições Indiretas variando a distância entre os transdutores	79
4.2.3.1 Análise da conversão da onda.....	79

4.2.3.2 Medições indiretas com distância variável entre os transdutores em inspeção.....	87
4.2.3.2.1 Peça 1	87
4.2.3.2.2 Peça 2	92
4.2.3.2.3 Peça 3	96
4.2.3.2.4 Peça 4	99
4.2.4. Medições Indireta a distância fixa entre os transdutores	100
4.2.4 Ensaios semi-diretos	117
4.3 INSPEÇÃO UTILIZANDO O RESISTÓGRAFO	121
4.3.1 Peça 1	121
4.3.2 Peça 2.....	125
4.3.3 Peça 3.....	128
4.3.4 Peça 4.....	132
4.4 INSPEÇÃO UTILIZANDO A ASSOCIAÇÃO DOS MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS	134
4.4.1 Peça 1.....	135
4.4.2 Peça 2.....	137
4.4.3 Peças 3 e 4.....	139
5. CONCLUSÕES.....	141
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

AGRADECIMENTOS

A família.

Aos amigos.

A orientadora.

Ao grupo do laboratório de Ensaaios Não Destrutivos – LabEND e Laboratório de Materiais e Estruturas, pelo auxílio e companhia nas mais diversas atividades de pós graduação.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pela bolsa de estudos e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP – Processo 2012/22599-9) pelo apoio financeiro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Resíduos gerados por ataques de cupins (a) e brocas (b). Fonte: MONTANA, 2012 .	5
Figura 2.2: Aspecto da estrutura atacada por cupins (a) e por brocas (b). Fonte: MONTANA,2012	5
Figura 2.3: Exemplos de Grids de inspeção em elementos estruturais de madeira	10
Figura 2.4: Variação da velocidade na peça representada por isolinhas velocidade	11
Figura 2.5: Representação de áreas degradadas utilizando ondas de tensão	12
Figura 2.6:Medição utilizando resistógrafo (a) e gráfico resultante (b). Fonte: adaptado de Rinn, 2006	13
Figura 2.7: Posicionamento dos transdutores na medição semidireta	23
Figura 2.8: Ondas gerados a partir de um impacto na superfície de um material elástico	28
Figura 2.9: Exemplo de dispersão de onda superficial em uma viga de madeira. Fonte: Adaptado de Bertoldo <i>et al.</i> (2013).	29
Figura 3.1: Exemplos de seções sem degradação (a), parcialmente degradada (b) e com grande degradação (c)	33
Figura 3.2: Grid de medição	34
Figura 3.3: Equipamento de ultrassom com transdutores de faces planas (a) e transdutores de faces exponenciais (b)	35
Figura 3.4: Formas de medição utilizada, (a) direta perpendicular a grã, (b) direta paralela a grã, (c) semidireta, (d) indireta fixa e variável.	35
Figura 3.5: Ensaio Resistógrafo	39
Figura 3.6: Detalhe ensaio resistógrafo	39
Figura 3.7: Corte das amostras de pilar	40
Figura 3.8: Fotos tiradas sem inclinação (a) com inclinação lateral (b) com inclinação para frente (c) e escaneada (d)	41
Figura 3.9: Obtenção das áreas para as fotos aproximadamente de frente (a) com inclinação lateral (b) com inclinação para frente (c) e escaneada (d)	42
Figura 3.10: Confeção dos corpos de prova para ensaio de compressão paralela às fibras.	44
Figura 3.11: Nomenclatura dos corpos de prova a compressão.	45

Figura 3.12: Determinação das dimensões e ensaio de compressão.....	45
Figura 4.1: Defeitos visuais nas faces da Peça 1.	49
Figura 4.2: Defeitos visuais nas faces da Peça 2.	50
Figura 4.3: Defeitos visuais nas faces da Peça 3.	51
Figura 4.4: Defeitos visuais nas faces da Peça 4.	52
Figura 4.5: Velocidades longitudinais médias em medições diretas paralelas a fibra	55
Figura 4.6: Faces de acoplamento dos transdutores para a realização dos ensaios longitudinais paralelos a grã, Peça 1.....	56
Figura 4.7: Faces de acoplamento dos transdutores para a realização do ensaio longitudinal paralelo a grã, peça 2.....	56
Figura 4.8: Faces de acoplamento dos transdutores para a realização do ensaio longitudinal paralelo a grã, peça 3.....	57
Figura 4.9: Faces de acoplamento dos transdutores para a realização do ensaio longitudinal paralelo a grã, peça 4.....	57
Figura 4.10: Ensaio direto paralelo a grã, peça 4, diferentes frequências; (a) 25kHz – face plana, (b) 45kHz – face plana, (c) 45kHz – face exponencial, (d) 80kHz– face plana.....	58
Figura 4.11: Tomografia ultrassônica do ensaio direto perpendicular a fibra da Peça 1.	63
Figura 4.12: Fotos das 11 seções cortadas longitudinalmente da Peça 1.....	65
Figura 4.13: Tomografia ultrassônica do ensaio direto perpendicular à fibras da Peça 2.	69
Figura 4.14: Fotos das 10 seções cortadas longitudinalmente da Peça 2.....	70
Figura 4.15: Tomografia ultrassônica do ensaio direto perpendicular a fibra da Peça 3.	72
Figura 4.16: Histograma das velocidades obtidas na medição direta perpendicular a grã, direção AC, peça 3, com transdutor de 45 kHz de faces exponenciais.	73
Figura 4.17: Fotos das 11 seções cortadas longitudinalmente da Peça 3.....	74
Figura 4.18: Tomografia ultrassônica do ensaio direto perpendicular a fibra da Peça 4.	77
Figura 4.19: Fotos das 11 seções cortadas longitudinalmente da Peça 4.....	78
Figura 4.20: Ensaio indireto a distância variável, face A, 25kHz.....	80
Figura 4.21: Ensaio indireto a distância variável, face A, 45kHz.....	80
Figura 4.22: Ensaio indireto a distância variável, face A, 45kHz exponencial.	80
Figura 4.23: Ensaio indireto a distância variável, face A, 80kHz.....	81

Figura 4.24: Ensaio indireto a distância variável, face B, 25kHz.....	81
Figura 4.25: Ensaio indireto a distância variável, face B, 45kHz.....	82
Figura 4.26: Ensaio indireto a distância variável, face B, 45kHz exponencial.	82
Figura 4.27: Ensaio indireto distância variável, face B, 80 kHz.	82
Figura 4.28: Imagens das seções da Peça 4 com presença de trincas superficiais.	83
Figura 4.29: Ensaio superficial, a distância variável, face C, 25kHz.	84
Figura 4.30: Ensaio superficial, a distância variável, face C, 45kHz.	84
Figura 4.31: Ensaio superficial, a distância variável, face C, 45kHz exponencial.	84
Figura 4.32: Ensaio superficial, a distância variável, face C, 80 kHz.	85
Figura 4.33: Ensaio superficial, a distância variável, face D, 25kHz.	85
Figura 4.34: Ensaio superficial, a distância variável, face D, 45kHz.	85
Figura 4.35: Ensaio superficial, a distância variável, face D, 45kHz exponencial.	86
Figura 4.36: Ensaio superficial, a distância variável, face D, 80 kHz.	86
Figura 4.37: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 1 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 25 kHz.	88
Figura 4.38: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 1 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz.	89
Figura 4.39: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 1 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz face exponencial	90
Figura 4.40: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 1 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 80 kHz.	91
Figura 4.41: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 2 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 25 kHz.	92
Figura 4.42: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 2 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz.	93
Figura 4.43: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 2 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz face exponencial.	94
Figura 4.44: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 2 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 80 kHz.	95
Figura 4.45: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 3 variando-se a	

distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 25 kHz.	96
Figura 4.46: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 3 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz – faces planas.....	97
Figura 4.47: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 3 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz – faces exponenciais.....	98
Figura 4.48: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 3 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 80 kHz – faces planas.....	99
Figura 4.49: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face A da Peça 1 para as diferentes frequências.	101
Figura 4.50: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face B da Peça 1 para as diferentes frequências.	102
Figura 4.51: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face C da Peça 1 para as diferentes frequências.	103
Figura 4.52: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face D da Peça 1 para as diferentes frequências.	104
Figura 4.53: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face A da Peça 2 para as diferentes frequências.	106
Figura 4.54: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face B da Peça 2 para as diferentes frequências.	107
Figura 4.55: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face C da Peça 2 para as diferentes frequências.	108
Figura 4.56: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face D da Peça 2 para as diferentes frequências.	109
Figura 4.57: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face A da Peça 3 para as diferentes frequências.	110
Figura 4.58: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face B da Peça 3 para as diferentes frequências.	111
Figura 4.59: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face C da Peça 3 para as diferentes frequências.	112
Figura 4.60: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores,	

na Face D da Peça 3 para as diferentes frequências.....	113
Figura 4.61: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face A da Peça 4 para as diferentes frequência.	114
Figura 4.62: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face B da Peça 4 para as diferentes frequências.....	115
Figura 4.63: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face C da Peça 4 para as diferentes frequências.....	116
Figura 4.64: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face D da Peça 4 para as diferentes frequências.....	117
Figura 4.65: Comportamento da velocidade em função do ângulo de propagação das ondas em relação às fibras nas medições semidiretas da Face A para a Face C.	118
Figura 4.66: Comportamento da velocidade em função do ângulo de propagação das ondas em relação às fibras nas medições semidiretas da Face B para a Face D.....	119
Figura 4.67: Velocidades médias obtidas de forma direta na direção paralela às fibras (V_0) e velocidades obtidas de forma semidireta (V_a).....	121
Figura 4.68: Foto da Seção 6 da peça 1, com destaque (linha vermelha) para a posição da agulha na furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).	122
Figura 4.69: Foto da Seção 1 da Peça 1 com destaque (linha vermelha) para a posição da agulha na furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).	123
Figura 4.70: Foto da Seção 8 com destaque (linha vermelha) para a posição da agulha na furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).....	124
Figura 4.71: Foto da Seção 9 com destaque (linha vermelha) para a posição da agulha na furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).....	125
Figura 4.72: Foto da Seção 1 da Peça 2 com destaque (linha vermelha) na posição da furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo na mesma posição (b).	126
Figura 4.73: Foto da Seção 2 da Peça 2 com destaque (linha vermelha) na posição de furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo na mesma posição (b).	127
Figura 4.74: Foto da Seção 8 da Peça 2 (a) com destaque (linha vermelha) na linha de furação e gráfico gerado pelo resistógrafo na mesma posição (b).....	128
Figura 4.75: Foto da Seção 10 da Peça 3 com destaque (linha vermelha) na posição da furação (a)	

e gráfico gerado pelo resistógrafo na mesma posição (b).	129
Figura 4.76: Foto da Seção 7 da Peça 3 com destaque (linha vermelha) para a posição na furação (a) e gráfico do resistógrafo na mesma posição (b).	130
Figura 4.77: Exemplos da deformação da agulha do Resistógrafo durante perfuração.....	131
Figura 4.78: Foto da Seção 1 da Peça 4 com destaque (linha vermelha) para a posição da perfuração (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).	132
Figura 4.79: Foto da Seção 6 na Peça peça 4 com destaque (linha vermelha) para a posição da furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).	133
Figura 4.80: Foto da Seção 2 na Peça 4 com destaque (linha vermelha) para a posição de furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).....	134
Figura 4.81: Tomografia ultrassônica obtida do ensaio direto perpendicular a graã- Peça 1, direção de medição AC, transdutor de 80kHz , indicação do grid de medição.	135
Figura 4.82: Gráfico gerado pelo resistógrafo na região de velocidade superior a 1500 m.s^{-1} , correspondente a medição no ponto de coordenada (1,5) na Peça 1.	136
Figura 4.83: Resultado do resistógrafo na região de velocidade entre 1000 e 1500 m.s^{-1} , correspondente a medição no ponto de coordenadas (2,2) na Peça 1.	136
Figura 4.84: Resultado do resistógrafo na região de velocidade entre 750 e 1000 m.s^{-1} , correspondente ao ponto de coordenada (1,10) da Peça 1.	137
Figura 4.85: Resultado do resistógrafo na região de velocidade menor que 750 m.s^{-1} , correspondente ao ponto de coordenada (4,11) da Peça 1.	137
Figura 4.86: Tomografia ultrassônica resultante da medição indireta perpendicular à fibra com transdutor de 80 kHz de frequência na direção de medição BD, com inserção do grid.	138
Figura 4.87: Resultado do resistógrafo no ponto de coordenadas (5,10) da Peça 2.	138
Figura 4.88: Resultado do resistógrafo no ponto de coordenadas (2,10) na Peça 2.	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Perda de peso e de propriedades mecânicas em estágio inicial de degradação da madeira.....	7
Tabela 2.2: Modelos de correlação entre resultados do Resistógrafo ($VR_{\text{médio}}$) e algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira.....	15
Tabela 2.3: Resumo das correlações obtidas.....	19
Tabela 2.4: Matriz de correlação (R) entre variáveis obtidas em ensaio destrutivo e não destrutivas. Fonte: Adaptado de Teder et al (2011).....	21
Tabela 2.5: Coeficientes de correlação (R) das regressões entre o resultado do resistógrafo e a densidade. Fonte: Adaptado de Teder et al (2011).....	21
Tabela 4.1: Resultados da Análise Visual da peça 1 com posicionamento (linha, coluna) (X, Y) do grid de medição.....	48
Tabela 4.2: Resultados da Análise Visual da peça 2 com posicionamento (linha, coluna) (X, Y) do grid de medição.....	50
Tabela 4.3: Resultados da Análise Visual da peça 3 com posicionamento (linha, coluna) (X, Y) do grid de medição.....	51
Tabela 4.4 Resultados da Análise Visual da peça 4 com posicionamento (linha, coluna) (X, Y) do grid de medição.....	52
Tabela 4.5: Resultados médios e coeficiente de variação (CV) da velocidade de propagação das ondas de ultrassom em medições diretas na direção paralela à grã.....	54
Tabela 4.6: Valores médios de densidade aparente (ρ), resistência (f_{c0}) e módulo de elasticidade (E_{c0}) obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras.....	55
Tabela 4.7: Resultados médios e coeficientes de variação (CV) da velocidade de propagação das ondas de ultrassom em medições diretas na direção perpendicular às fibras nas duas direções de medição (AC e BD).....	60
Tabela 4.8: Área e Perímetro das regiões degradadas e ocadas na Peça 1 para cada seção.....	66
Tabela 4.9: Área e Perímetro das regiões degradadas e ocadas na Peça 3 para cada seção.....	75
Tabela 4.10: Distância mínima entre transdutores para uso da medição indireta.....	87
Tabela 4.11: Relações entre a velocidade obtida de forma semidireta e direta paralela à grã para a maior distância horizontal entre os transdutores (ângulo de $14,9^\circ$ em relação às fibras).....	120

1. Introdução e justificativa do estudo

Todos os materiais se deterioram e deixam de ter sua capacidade resistente com o tempo, necessitando, portanto, ser inspecionados periodicamente. Estas inspeções periódicas apresentam-se ainda mais importantes para os materiais de origem vegetal utilizados em engenharia, pois, adicionalmente, estes também estão sujeitos a deteriorações provocadas por microrganismos (fungos e bactérias) e por insetos. A suscetibilidade à degradação não inviabiliza seu uso, tanto que a madeira é um dos mais consagrados da história da civilização, além de ser, atualmente, reconhecida como o mais sustentável.

No caso da madeira, mais do que para materiais mais homogêneos como o aço e até o mesmo o concreto, o uso de técnicas de inspeção exige conhecimento mais aprofundado do material, pois, como todo material biológico, ela apresenta características naturais e intrínsecas que podem ser confundidas com defeitos ou deteriorações, como, por exemplo, a variabilidade nas propriedades entre espécies, dentro de uma mesma espécie e até mesmo dentro de uma mesma árvore; a heterogeneidade dada pelos diferentes tipos de elementos anatômicos e a ortotropia, evidenciada pela variação na resposta a uma determinada solicitação nas direções longitudinal (paralela à grã), radial (perpendicular à grã e paralela ao raio) e tangencial (perpendicular à grã e tangenciando os anéis de crescimento).

Atualmente as técnicas não destrutivas têm sido estudadas visando aplicações em inspeções de estruturas, pois são menos demoradas e dispendiosas do que as tradicionais, que exigem a retirada de amostras do elemento inspecionado, e mais efetivas do que a análise visual, quando aplicada como forma única de inspeção. Dentre as técnicas não destrutivas destacam-se as baseadas em propagação de ondas (ultrassom, ondas de tensão, ressonância) e de resistência à perfuração.

A inspeção visual é o método mais simples de vistoria. Nele o inspetor observa o estado atual ou potencial de deterioração da estrutura. Este tipo de inspeção é adequado para constatações de dano superficial, seja causado pela água, por falha dos elementos construtivos, por danos mecânicos ou por ataque de microrganismos e insetos, que deixam vestígios.

As técnicas de propagação de ondas são altamente recomendáveis na inspeção de elementos estruturais, notoriamente de edifícios históricos, por serem totalmente não invasivas.

Por meio delas é possível identificar as partes da estrutura com respostas diferenciadas em relação ao esperado para a madeira sem deterioração.

A técnica de resistência à perfuração, por sua vez, permite confirmar, de forma localizada, a existência de material com resistência reduzida em função de degradação ou a existência de vazio no interior de uma peça. No entanto, há a necessidade de se introduzir uma broca no elemento em análise, que, apesar de bastante fina, em geral tem seu uso restringido em edifícios históricos.

Considerando os aspectos acima destacados, a principal questão tratada nesta pesquisa foi da associação do ensaio de propagação de ondas e de resistência à perfuração, visando dar subsídios para a proposição de metodologia de inspeção que faça uso do melhor de cada uma das técnicas para alcançar resultados mais precisos e de mais adequada aplicação.

A hipótese da pesquisa foi a de que a associação das respostas (resistência à perfuração e velocidade) obtidas por meio dos métodos de ensaio não destrutivo de propagação de ondas de ultrassom e de resistência à perfuração, otimiza o uso das técnicas e melhora a precisão da identificação das zonas deterioradas em peças estruturais de madeira, quando comparado com o uso das técnicas de forma isolada.

Visando testar a hipótese, o objetivo geral da pesquisa foi avaliar a associação de duas técnicas não destrutivas - ultrassom e resistência à perfuração - na inspeção de estruturas de madeira.

Como objetivos específicos avaliou-se cada uma das técnicas, de forma isolada, na localização e na inferência das dimensões das deteriorações. No caso da propagação de ondas foram analisados, também, três diferentes formas de medição (direta, semidireta e indireta) e três diferentes frequências de transdutor (25, 45 e 80 kHz), aspectos estes importantes nas aplicações práticas “in loco”.

2. Revisão Bibliográfica

Este item apresenta, inicialmente, aspectos a respeito da inspeção de estruturas de madeira, tema geral da pesquisa. Em seguida abordam-se aspectos a respeito da deterioração da madeira, agentes responsáveis pela necessidade de inspeção. Apesar de não ser foco dessa pesquisa, em toda a revisão bibliográfica foi possível verificar que a análise visual deve preceder qualquer utilização de tecnologia. Dessa forma, o terceiro item abordará alguns aspectos da inspeção visual. Os quarto e quinto itens abordarão aspectos relacionados às tecnologias foco dessa pesquisa (ultrassom e resistência à perfuração) e, no sexto item, serão apresentados os artigos mais diretamente relacionados com o foco principal desta pesquisa, que é a associação de métodos não destrutivos. Por fim, serão apresentadas as referências relacionadas a aspectos teóricos envolvendo a propagação de ondas e as considerações finais.

2.1 Inspeção de Estruturas de madeira

Ross *et al.* (2006) relatam que as razões mais comuns para inspeções em estruturas de madeira são a preservação histórica, o cumprimento de legislação e avaliações ligadas ao uso alternativo da construção. Segundo estes autores, grande variedades de técnicas podem ser utilizadas para essa finalidade, de forma individual ou combinada.

Em estruturas de madeira há áreas mais suscetíveis à deterioração como, por exemplo, as regiões das ligações, onde há furações, as áreas próximas ao solo em peças diretamente engastadas, as extremidades aparentes, nas quais pode haver fendas sujeitas a penetração de umidade e microrganismos. Sendo assim, é fundamental, para o inspetor, conhecer os pontos onde as deteriorações aparecem mais frequentemente. Além disso, é fundamental conhecer as causas da deterioração de elementos estruturais, as falhas que ocorrem em função das deteriorações e a necessidade de substituição de peças deterioradas (BRASHAW *et al.*,2011). Estes autores sugerem que inicialmente se obtenha o maior número possível de detalhes a respeito da estrutura, inclusive informações a respeito da espécie utilizada, se possível. Após o detalhamento, Brashaw *et al.* (2011) indicam ser de fundamental importância, antes de qualquer aplicação de tecnologia ou utilização de equipamentos, a análise visual, na qual são observadas evidências da existência de fungos ou de ataque de insetos.

Fungos (MONTANA, 2012)

Para que os fungos possam colonizar a madeira é necessário que ela apresente condições favoráveis de umidade, de temperatura, de aeração, de pH e de ausência de substâncias tóxicas. Todos estes fatores básicos são indispensáveis e a ausência de qualquer um deles pode ocasionar o não desenvolvimento do fungo. No caso da umidade, o ponto ótimo para o desenvolvimento dos fungos é acima de 30% e abaixo de 60%. A temperatura ideal para o crescimento de fungos é de 22° a 30°C. Em temperaturas próximas de zero os fungos entram em estado latente e, se por várias horas permanecerem acima de 60 °C, morrem. Como mencionado anteriormente, os fungos também necessitam de oxigênio. O desenvolvimento ótimo dos fungos se dá entre 4,5 e 5,5 de PH, que é um valor próximo do PH da maioria das espécies de madeira. Os fungos não são todos iguais e, dependendo do tipo, a madeira será atacada de forma mais ou menos prejudicial. Os fungos manchadores e emboloradores não provocam diminuição da resistência, mas os apodrecedores, como diz o nome, são os responsáveis por graves perdas de resistência da madeira. Assim, os conhecimentos técnicos para reconhecer o tipo de fungo presente na estrutura são de grande importância para um inspetor.

Bactérias (MONTANA, 2012)

O ataque de bactérias na madeira ocorre, principalmente, em condições de alta umidade e baixo (ou nenhum) teor de oxigênio, como é o caso de madeira submersa ou enterrada (fundações). Visualmente o ataque de bactérias pode ser reconhecido pelo aparecimento de pequenas manchas distribuídas na superfície da madeira e, em estágios avançados, pode ocorrer o amolecimento da área, com conseqüente perda de resistência mecânica.

Brocas (MONTANA, 2012)

O resíduo de peças atacadas por brocas tem o aspecto de pó fino, semelhante ao talco. Visualmente o ataque de brocas pode ser reconhecido por furos pequenos, que são usados para a sua entrada e saída da peça de madeira.

Cupins (MONTANA, 2012)

Os cupins de madeira seca se alimentam preferencialmente de peças e madeiras manufaturadas, como rodapés, batentes, janelas e etc. Os cupins subterrâneos atacam madeira estrutural, papel, papelão, reboco, couro, tecidos. Os cupins arbóreos, por fim, atacam a madeira de edificações, postes e mourões de cerca. O resíduo gerado por brocas apresenta-se como um pó fino (Figura 2.1, a), enquanto o gerado pelo cupim tem aspecto granular (Figura 2.1, b). Na Figura 2.2 apresenta-se o aspecto da madeira atacada por cupins (a) e por brocas (b).



(a)

(b)

Figura 2.1: Resíduos gerados por ataques de cupins (a) e brocas (b). Fonte: MONTANA, 2012



(a)

(b)

Figura 2.2: Aspecto da estrutura atacada por cupins (a) e por brocas (b). Fonte: MONTANA, 2012

2.2 Degradação da madeira

As estruturas de madeira podem ser atacadas por fungos, bactérias, brocas e cupins. Para estruturas em meios marinhos há ainda os agentes perfuradores.

Emerson *et al.* (2002) relatam que o progresso da degradação da madeira ocorre em 4 estágios: *incipiente*, *inicial*, *moderado* e *avançado*. Segundo os autores, durante o estágio *incipiente* o fungo penetra e coloniza a madeira. Nesse estágio enzimas já iniciam a degradação,

mas ela é ainda limitada e imperceptível na inspeção visual. No estágio *inicial* as enzimas e oxidantes liberados pelos fungos começam a degradar as paredes das células dos traqueídes/fibras, e a madeira começa a mudar de cor e de textura. No estágio *moderado* as mudanças na cor e na textura da madeira tornam-se mais evidentes, mas a madeira ainda está íntegra. A madeira começa a ficar completamente degradada no estágio *avançado* de degradação. Nesse último estágio a madeira remanescente está fragmentada e frequentemente resta apenas o pó da mesma. Com o avanço dos estágios de degradação, a podridão parda e branca degrada completamente os carboidratos na parede da célula do traqueíde/fibra. Em seu trabalho, Emerson *et al.* (2002) apresentam dados de Wilcox (1978) a respeito dos efeitos da degradação na resistência e nas propriedades mecânicas. Essa descrição traz informações importantes para estudos de inspeção. Segundo esses autores, no estágio insipiente de degradação, a perda de peso da madeira é ainda pequena (em torno de 10%) e praticamente imperceptível, mas podem apresentar perdas de 80% na resistência. Essa questão é apresentada por Emerson *et al.* (2002) utilizando resultados de Wilcox (1978) a respeito de perdas de peso e de resistência em madeira degradada (Tabela 2.1). Os autores (Emerson *et al.*, 2002) destacam, ainda, que os resultados da Tabela 2.1 indicam que, em estágios moderado e avançado de deterioração, a madeira perde totalmente suas propriedades mecânicas. Assim, para reduzir a possibilidade de rupturas bruscas de elementos estruturais, as degradações devem ser detectadas em estágio inicial, antes que perdas acentuadas de resistência ocorram.

Tabela 2.1: Perda de peso e de propriedades mecânicas em estágio inicial de degradação da madeira.

Propriedades mecânicas	Perdas de peso		
	2%	6%	10%
	Perdas em termos de propriedades mecânicas (%)		
Dureza e resistência ao impacto na flexão	50	--	15
Módulo de elasticidade na flexão	4	66	--
Módulo de Resistência a flexão	13 a 50	61	70
Compressão perpendicular à grã	18 a 24	48	66
Compressão paralela à grã	10	25	45
Tração paralela à grã	23 a 40	60	--
Cisalhamento paralelo à grã	2	--	20

Adaptado de Emerson (2002) apud Wilcox (1978).

2.3 Inspeção Visual

A inspeção visual é o método mais simples de avaliação. Nela o inspetor observa o estado atual ou o potencial de degradação da estrutura. Este tipo de inspeção é adequado para constatações de dano superficial de intermediário a avançado, causados pela água, por falha dos elementos estruturais ou por danos mecânicos. Segundo Ross *et al.* (2006), na inspeção visual devem ser observados:

- Corpos de frutificação, que indicam ataque de fungos, mas não a quantidade ou a extensão do ataque, pois alguns fungos apresentam estas estruturas em estágio inicial de deterioração, enquanto outros após degradações avançadas.

- Superfícies afundadas, que podem indicar degradação nas camadas subjacente. Nestas camadas podem se desenvolver bolsões de degradação, que deixam uma fina camada de madeira na face do elemento inspecionado.

- Atividade de insetos, caracterizada por perfurações, pó ou fezes.

- Solo acumulado em rachaduras e furos, ou plantas e musgos crescendo nos elementos estruturais, os quais indicam que a madeira das adjacências passou por longos períodos com umidade alta, o que se constitui em ambiente favorável para a deterioração.

- Manchas de ferrugem próximas a elementos de conexão, que indicam a presença da umidade.

Todos os detalhes da análise visual devem ser fotografados e repassados para o plano de inspeção, no qual todos os elementos estruturais devem estar representados e numerados (ROSS *et al.*, 2006).

Wacker *et al.* (2011) indicam a importância de se realizar, além da inspeção visual para o detalhamento das deteriorações visíveis, medições de umidade nos elementos estruturais e, até mesmo, de temperatura e de umidade relativa do ambiente, que permite avaliar o favorecimento do aumento da umidade da madeira.

2.4 Propagação de ondas

A utilização da aplicação de diferentes técnicas não destrutivas em inspeções de estruturas em serviço está em ascensão nos Estados Unidos (Brashaw *et al.*, 2009). Esses autores comentam que, ao invés das avaliações tradicionalmente utilizadas, que permitiam avaliar pequenas áreas dentro de peças estruturais, um extenso programa experimental tem sido conduzido nesse país para avaliar essas técnicas aplicadas de forma mais geral, em todo o sistema estrutural.

A madeira é material cuja complexidade, por si só, já se constitui um desafio. As propriedades desse material variam entre espécies, dentro da mesma espécie e até mesmo dentro da mesma árvore, sendo que esta variabilidade se constitui um desafio tecnológico para trabalhos de inspeção, pois inspeções normalmente se baseiam em comparações com valores referenciais.

Para o ensaio de propagação de ondas considere, como exemplo, o caso de avaliação de um tubo de aço por ultrassom. Nesse caso o inspetor se baseia nas propriedades do tubo íntegro ou nas propriedades básicas apresentadas na literatura, o que lhe permite indicar, por meio da variação de velocidade, os locais onde pode haver corrosão, problemas de soldagem etc. No caso da madeira, de forma análoga, poderia se utilizar a velocidade básica de propagação da onda na

espécie (dada na literatura), como referência na inspeção. O uso de uma velocidade de referência apresenta dois desafios. Um deles está no conhecimento da espécie utilizada na estrutura, pois, no Brasil, não é usual que as empresas que comercializam a madeira saibam precisar a espécie comercializada. Caso a espécie estivesse corretamente identificada, o segundo desafio seria encontrar a referência da velocidade de propagação de ondas de ultrassom para a espécie. Em estruturas mais antigas conhecer a espécie é praticamente inviável, a não ser que uma amostra seja levada para ensaio de laboratório. Adicionalmente, em obras antigas, há a possibilidade de terem sido executadas restaurações, nas quais se tenham utilizado outras espécies de madeira. Como alternativa aos desafios apresentados, os pesquisadores da área têm indicado o uso de comparações dentro da peça. Essas comparações podem ser realizadas utilizando um valor de referência obtido na própria peça, em uma região onde se sabe não haver deterioração ou por comparação de valores obtidos nos vários trechos sob inspeção, sabendo-se que os trechos de menor velocidade seriam os que possivelmente apresentam deterioração.

Beall (2002) indica que velocidade típica de ondas ultrassônicas para madeiras isentas de defeitos e na condição seca são de 1000 a 2000 m.s⁻¹ na direção perpendicular às fibras e de 5000 a 6000 m.s⁻¹ na direção paralela às fibras. O mesmo autor assinala que a velocidade radial é cerca de 50% maior do que a velocidade tangencial. Estes valores de velocidade, para as condições citadas, também são apresentadas por Bartholomeu *et al.* (2003) e por Puccini *et al.* (2002).

Para facilitar a inspeção, Ross *et al.* (2006) sugerem o uso de tempo de propagação por metro ao invés da velocidade, indicando valores de aproximadamente 200 μs.m⁻¹ na direção longitudinal às fibras e de 850 a 1000 μs.m⁻¹ na direção perpendicular as fibras para a espécie Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*).

As faixas de velocidades indicadas por Beall (2002) e Ross *et al.* (2006) são aplicáveis para situações de ensaio que satisfaçam as condições teóricas, como, por exemplo, dimensões do elemento ensaiado compatível com a dimensão do transdutor (que deve estar inscrito ao elemento) e com o comprimento de onda, permitindo a consideração de ondas de volume em meios infinitos (TRINCA, 2009; BUCUR, 2006). Considerando-se essas questões teóricas, tais faixas de velocidade são aplicáveis para muitas espécies quando a madeira está isenta de defeitos (PUCCINI *et al.*, 2002; SHAJI *et al.*, 2000).

A opção de utilizar um valor de velocidade de referência obtido na própria peça inspecionada foi adotada pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (LabEND), durante o desenvolvimento de dissertação de mestrado que visou avaliar o ultrassom em inspeções de árvores e de toras com presença de ocos (SECCO, 2011). Waker *et al.* (2011) também utilizaram esse procedimento, mas verificaram que os tempos/m nas zonas aparentemente são variavam de 457 a 914 $\mu\text{s.m}^{-1}$, o que contrasta com os resultados de Brashaw *et al.* (2011), que consideraria tempos nessa faixa de valores como sendo regiões com degradação moderada. Essa contradição pode estar relacionada com a espécie, indicando que o uso de faixas fixas pode levar a problemas de interpretação da inspeção .

A alternativa baseada na avaliação da variação da velocidade ao longo da peça sob inspeção, possibilita indicar, também por comparação com a própria peça, locais onde é possível haver problemas de deterioração. Nesse caso é comum utilizar grid de medições (Figura 2.3) e apresentar os resultados ressaltando-se áreas ou zonas de mesma velocidade, com uso de isolinhas (Figura 2.4) de velocidade ou de regiões com mesma velocidade agrupadas por cores. Resultado semelhante é obtido quando se utiliza o tomógrafo industrial, onde há a automatização da medição do grid, uma vez que o equipamento atua com vários sensores (RIGGIO *et al.*, 2011; LI *et al.*, 2009 e YU *et al.*, 2009).

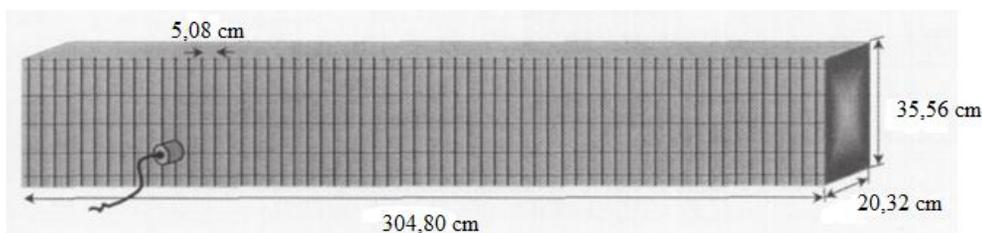


Figura 2.3: Exemplos de Grids de inspeção em elementos estruturais de madeira

Fonte : Adaptado de Emerson *et al.* (2002)

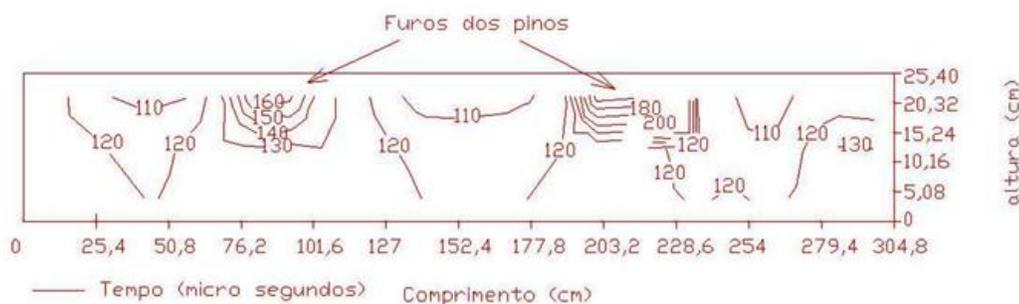


Figura 2.4: Variação da velocidade na peça representada por isolinhas velocidade

Fonte : Adaptado de Emerson *et al.* (2002)

Emerson *et al.* (2002) afirmam que a velocidade da onda de ultrassom pode ser utilizada para detectar a presença de deterioração de moderadas a avançadas, mas não pode ser utilizada para detectar deteriorações incipientes. Esses autores propõem o uso da atenuação do sinal para detectar deteriorações ainda iniciais, indicando que essa detecção é importante para prevenir o agravamento desses pontos de fragilidade. A atenuação é a redução de amplitude do sinal e está diretamente relacionada com perdas ocasionadas, principalmente, por diferenças de impedância, tanto internas (diferentes meios de propagação ocasionados pela estrutura celular da madeira ou por deteriorações) quanto externas (material de acoplamento, pouca pressão ao se acoplar os transdutores na madeira, fazendo com que o acoplamento não seja adequado) e pela transformação da energia em calor. Quanto maior a distância a ser percorrida pela onda maiores serão as atenuações do sinal, podendo inviabilizar a recepção do sinal pelo transdutor. Considerando a importância desse parâmetro e o fato de que alguns fatores de atenuação são intrínsecos ao material, deve-se observar, nas inspeções, a utilização do acoplante adequado (Gonçalves *et al.*, 2011), evitando-se atenuações adicionais do sinal. A atenuação na madeira é comparativamente maior do que a de outros materiais: cerca de uma ordem de grandeza a mais do que materiais de origem mineral e duas em relação aos metais. Adicionalmente a atenuação na direção perpendicular às fibras é uma ordem de grandeza maior do que na direção paralela às fibras (Beall, 2002). Madeiras deterioradas apresentam atenuações elevadas do sinal, o que poderia se constituir em ferramenta importante de inspeções. No entanto, Gonçalves e Trinca, (2007) demonstraram que, para avaliações utilizando a atenuação, é necessária a manutenção de

uma pressão fixa nos transdutores, o que, do ponto de vista prático, poderia dificultar muito ou até inviabilizar inspeções de estruturas *in situ*. Para possibilitar as medições da atenuação, Emerson *et al.* (2002) desenvolveram um sistema para proporcionar acoplamento suficiente, bem como permitir medições com as mãos livres. O sistema de fixação foi feito com barra rosqueada com arruelas e porcas e tiras de borracha. É possível que com a evolução dos equipamentos e acessórios o uso desse parâmetro (atenuação), que já é bastante utilizado em laboratório, venha a ser mais viável também em campo. Tendo em vista a dificuldade de medição da atenuação em situações de campo, inspeções utilizando a ultrassonografia costumam ser baseadas somente na velocidade de propagação da onda.

Emerson *et al.* (2002), em trabalho de inspeção de pontes de madeira, chamam a atenção para a problemática do acoplamento. Para superfícies lisas o acoplamento é relativamente simples, sendo necessária pequena quantidade de acoplante e pequena pressão. Para superfícies rugosas, caso comum na inspeção de estruturas, há uma série de problemas ainda sem solução, uma vez que nesses casos é necessária a utilização de grande quantidade de acoplante, que é absorvido pela madeira trazendo modificações na leitura do sinal em função da elevação local da umidade. Os autores utilizaram, como acoplante, um elastômero, que, segundo eles, apresentou comportamento adequado mesmo em faces rugosas. Infelizmente Emerson *et al.* (2002) não detalham esse material, nem indicam o fabricante, dificultando a reprodução dessa metodologia.

Ross *et al.* (2006) sugerem que a associação das velocidades de propagação de ondas de tensão com estados de deterioração da madeira poderiam ser utilizadas para inspeções de estruturas. A imagem da Figura 2.5 é apresentada na publicação de Ross *et al.* (2006), mas infelizmente as faixas de velocidade que permitem a associação com o nível de deterioração não são apresentadas no artigo. Assim, para que a técnica seja utilizada da forma como apresentada na Figura 2.5 é necessário primeiro que tais faixas sejam determinadas.



Figura 2.5: Representação de áreas degradadas utilizando ondas de tensão.

Fonte: Adaptado de Ross *et al.* (2006)

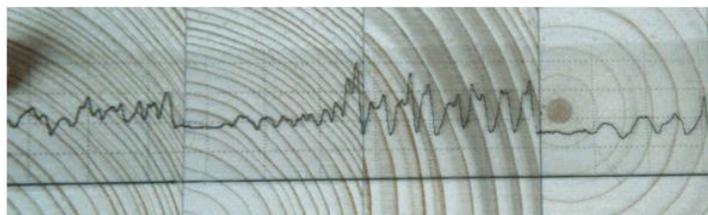
2.5 Resistência à perfuração

Essa tecnologia é uma forma de sondagem mecânica cada vez mais utilizada em campo para caracterizar as propriedades da madeira e para detectar condições físicas anormais. O instrumento comumente utilizado é o Resistógrafo (ROSS *et al.*, 2006). Esse equipamento é amplamente reportado na bibliografia nacional e internacional em várias aplicações na madeira (BOTELHO JR, 2006, CALDERONI *et al.*, 2010, EL-KASSABY *et al.*, 2011, FÁTIMA *et al.*, 2011, KUBUS, 2009, MADHOUSHI *et al.*, 2008, ROSS *et al.* 2006).

Originalmente chamado de *Desitomat*, foi inventado em 1985 com a intenção de avaliar a deterioração de postes públicos, sendo renomeado para *Resistograph* em 1993 (RINN, 1996). O resistógrafo aciona uma broca fina sob rotação constante e mede a resistência da madeira à entrada dessa broca (resistência à perfuração), apresentando os resultados na forma de gráfico, normalmente com a ordenada mostrando o consumo de potência (Figura 2.6.). A profundidade de medição varia conforme o modelo do equipamento e do comprimento da broca adotada.



a



b

Figura 2.6: Medição utilizando resistógrafo (a) e gráfico resultante (b). Fonte: adaptado de Rinn, 2006.

A resistência a perfuração R_D (Nm.s./rad) é definida pela Equação 1 (ROSS, 2006).

$$RD = \frac{T}{\omega} \quad \text{Equação 1}$$

Onde T = Torque (N.m) e ω = velocidade angular (rad.s⁻¹)

A resposta do aparelho é a curva de resistência à penetração pela profundidade, dada graficamente (Figura 2.6 b) e também em um arquivo no formato “*txt*”. Comumente os trabalhos reportados na literatura utilizam como resposta do resistógrafo a porcentagem de resistência, tomando como referência o valor de resistência à perfuração máximo do trecho. Brashaw *et al.* (2011) obtiveram resistências a perfuração variando de 0 a 25% (em relação ao valor máximo) nas zonas com diferentes níveis de degradação da madeira.

Resumo apresentado por Botelho Jr. (2006) na Tabela 2.2, indica que o resultado obtido com o resistógrafo é comumente associado com a densidade da madeira, apresentando coeficientes de determinação superiores a 70%. Segundo Botelho Jr. (2006) resultados do resistógrafo podem ainda ser correlacionados com propriedades de resistência residual, determinadas, em geral, a partir da relação entre a resistência a perfuração e a resistência obtida em corpos de prova para ensaios de compressão retirados da peça em análise. Nesse caso, segundo os autores, os resultados costumam apresentar coeficiente de determinação inferiores a 60%.

Tabela 2.2: Modelos de correlação entre resultados do Resistógrafo ($VR_{\text{médio}}$) e algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira

Modelo	R ² (%)	Autor*	Nº de CPs
$MOR = -41,62 + 8,86 VR_{\text{médio}}$	26,6	Capuz (2003)	122
$VR_{\text{médio}} = 2,07 \rho - 1005,2$	71,0	Feio et al (2005)	47
$VR_{\text{médio}} = 13,94 Ec,o + 216,2$	60,0	Feio et al (2005)	47
$VR_{\text{médio}} = 2,6 fc,o + 212,1$	59,0	Feio et al (2005)	47
$VR_{\text{médio}} = 1,59 \cdot \rho - 666,9$	68,0	Feio et al (2005)	47
$VR_{\text{médio}} = 16,82 Ec,o + 126,0$	64,0	Feio et al (2005)	47
$VR_{\text{médio}} = 1,81 fc,o - 188,2$	64,0	Feio et al (2005)	47
$\rho^2 = 1242215 V_{R_{\text{médio}}}^{0,1} - 2020664$	91,0	Pin-Hui Tsai <i>et al.</i> (2004)	23
$MOE = 28122 - 2207 VR_{\text{médio}}^{0,5} + 0,101 \cdot \rho^2$	80,6	Pin-Hui Tsai <i>et al.</i> (2004)	23
$MOE = -18320 + 11088 VR_{\text{médio}}^{0,1} + 0,02281 \cdot \rho^2$	75,0	Pin-Hui Tsai <i>et al.</i> (2004)	23
$MOE = -11246 + 6963 VR_{\text{médio}}^{0,1} + 0,01595 \cdot \rho^2$	86,6	Pin-Hui Tsai <i>et al.</i> (2004)	26

Fonte: Botelho Jr. (2006).

ρ = densidade aparente; MOR = módulo de ruptura em flexão; MOE = módulo de elasticidade em flexão; $Ec,0$ = Módulo de Elasticidade na compressão paralela às fibras; $fc,0$ = resistência à compressão paralela às fibras

*citados por Botelho Jr. (2006)

2.6 Associação de métodos não destrutivos

Brashaw *et al.* (2011) apresentam estudo de caso da inspeção de uma cabine situada nas margens do lago Bearskin, nos Estados Unidos, construída de madeira roliça em 1935. A

inspeção constou do uso da associação de identificação da espécie (retirando-se uma pequena amostra), análise visual, martelo, propagação de ondas (de tensão e ultrassom) e resistência a perfuração. O resultado da identificação apontou que a madeira utilizada na construção era spruce (*Picea spp*). A análise visual indicou a possibilidade de zonas com deteriorações severas, principalmente nas regiões mais próximas do solo. Havia também região que havia sido queimada, promovendo pontos de acesso para a entrada de insetos. Em diversos locais os autores notaram a presença de infestação de insetos e de besouros. Os autores comentam que os resultados de velocidade de propagação das ondas foram próximos para os dois equipamentos (ondas de tensão e ultrassom) e que a inspeção com propagação de ondas detectou indícios de deterioração em muitas zonas que não haviam sido indicadas pela análise visual. Os autores concluíram que tempos de propagação de ondas da ordem de $200 \mu\text{s.m}^{-1}$ indicavam deterioração moderada, enquanto que superiores a $400 \mu\text{s. m}^{-1}$ apontavam para deteriorações significantes. Em relação ao resistógrafo os autores concluíram que a resistência a penetração variando de 0 a 25% (do valor máximo) confirmava os vários níveis dessa deterioração.

Waker *et al.* (2011) apresentaram estudo de caso utilizando a região de uma mina de cobre abandonada, localizada no Alasca, dentro de um parque nacional. O complexo incluía 45 prédios em três diferentes minas. As construções datavam de 1912 e as minas ficaram em serviço por quase 27 anos, antes da produção cessar abruptamente em 1938. Por muitos anos a cidade que vivia dessas minas se tornou uma cidade fantasma e, com a falta de manutenção, houve deterioração das coberturas nos andares superiores, provocando danos significativos para toda a estrutura dos edifícios. Essa cidade possui muitos edifícios históricos que estão em processo de restauração pelo National Park Service (NPS), que comprou a propriedade em 1998. O foco da inspeção descrita nesse trabalho foi a dos blocos de apoio de uma usina construída na lateral de uma montanha. Essa estrutura era composta de peças de madeira de grandes seções. A inspeção foi realizada com o uso de análise visual acompanhada de teste do martelo, de identificação de espécies, de determinação da umidade, de aplicação de ensaio de ondas de tensão direto e perpendicular às fibras, de resistência à perfuração e de remoção de amostras para análise posterior em laboratório. Tendo em vista que os autores não sabiam a espécie de madeira utilizada na construção, ensaios iniciais com os equipamentos (de ondas de tensão e de resistência a perfuração) foram realizados em partes da estrutura que aparentavam estar sãs. Os valores

desses testes foram utilizados como valores de referência. Para mapear as zonas de possíveis deteriorações com os resultados das velocidades de propagação das ondas, os autores estabeleceram que valores acima da faixa de referência (obtida inicialmente) seriam considerados indicativos de presença moderada ou severa (dependendo do nível de variação) de deterioração e essas zonas eram assinaladas para checagem mais detalhada. Para comprovar as zonas indicadas como de possível presença de deterioração pela velocidade, os autores utilizaram a resistência à perfuração. Segundo eles, zonas de deterioração interna tipicamente apresentam mais de 25 mm com zero de resistência à perfuração. A madeira da construção foi detectada como sendo Douglas-fir. As médias de umidade variaram de 19,7% a 27,3%. Os pontos de umidade mais alta normalmente eram coincidentes com a análise visual de zona com deterioração. Os autores apresentaram um gráfico que resume os resultados da propagação de ondas e da resistência à penetração, indicando zonas com diferentes cores correspondentes a diferentes níveis de condição do elemento estrutural (normal, degradação moderada, degradação avançada e degradação severa). Infelizmente no gráfico apresentado não há como separar o que é resultado do método de propagação de ondas e o que é resultado da resistência à perfuração, porque o detalhamento para essas conclusões não foi apresentado. Os resultados dos ensaios de compressão das 8 amostras retiradas de diferentes partes da estrutura mostraram que os valores de resistência variaram de 2,54 MPa a 5,3 MPa, com média 3,6 MPa e coeficiente de variação de 25%, o que comparado com os valores tabelados para Douglas-fir (cerca de 5 MPa com coeficiente de variação de 28%) indicam regiões bem afetadas, com apenas 50% de resistência residual, enquanto outras com 100% de resistência residual. Os resultados da análise em laboratório de 20 amostras indicaram que 80% apresentavam presença de algum apodrecimento sendo a maior parte em estágio inicial, típico de locais com umidade elevada. Pequena parte apresentou-se bem comprometida, com presença de características típicas de ataques mais severos. Os autores não discutiram os resultados da associação dos métodos, nem da correlação entre as resistências residuais e os resultados do gráfico que resume os resultados de propagação de ondas e resistógrafo. No entanto, na comparação dos valores de resistência tabelados para as 8 amostras ensaiadas em compressão normal é possível verificar que nas regiões onde o gráfico resultante de propagação de ondas e resistência à penetração indicaram inexistência de degradação, a resistência residual média foi de 3,7 MPa (74% do valor esperado para a espécie).

Zhang *et al.* (2011) utilizaram 4 vigas estruturais obtidas de um Templo localizado no Jardim Imperial em Beijing, China, que foi originalmente construído em 1773 e passou por renovação iniciada em 2002. As 4 peças eram da espécie Larch (*Larix principis-rupprechtii* Mayr.), foram identificadas com A, B, C e D e apresentavam umidade média de 9%. Todas as peças foram desdobradas na dimensão 20 mm x 20mm x 300 mm de acordo com a norma Chinesa (GB 1929-91). De cada peça foram retirados 30 corpos de prova, totalizando 120 corpos de prova. Todos os corpos de prova (20 mm x 20 mm x 300 mm) passaram por medições de ondas de tensão na direção longitudinal (indireto com transdutor a 45°) e em seguida por medições de resistência à penetração, realizadas perto das bordas, nas duas extremidades do corpo de prova e sempre na direção radial. Após esses ensaios os corpos de prova com 300 mm de comprimento foram ensaiados em flexão estática para a determinação do módulo de elasticidade (E_M) e do módulo de resistência à flexão (f_m). De cada corpo de prova de flexão estática foram cortados corpos de prova de 20 mm x 20 mm x 30 mm, de regiões não danificadas pelo ensaio de flexão, para serem ensaiados em compressão para a obtenção da resistência de ruptura (f_c). Considerando pesquisas que demonstram que há correlação entre o resultado do resistógrafo e a densidade ($R^2 > 0,80$) os autores propuseram a determinação do que chamaram de “*módulo de tensão-resistência*” obtida utilizando o resultado do resistógrafo (F), para substituir a densidade, e o resultado de velocidade (FV^2), como se fosse o cálculo do coeficiente de rigidez (ρV^2). Os autores concluíram que o uso associado do resistógrafo e das ondas de tensão permite melhores previsões da resistência residual da madeira do que o uso isolado de cada um deles (Tabela 2.3)

Tabela 2.3: Resumo das correlações obtidas.

Parâmetros	Modelo	R
V x E _M	E _M = 2,09 V + 1,18	0,64
V x f _m	f _m = 8,56 V + 40	0,38
V x f _c	f _c = 5,83 V + 33,8	0,43
F x E _M	E _M = 0,042 V + 8,79	0,38
F x f _m	f _m = 0,30 V + 65,4	0,36
F x f _c	f _c = 0,26 V + 49,0	0,43
FV ² x E _M	E _M = 0,0038 FV ² + 7,18	0,71
FV ² x f _m	f _m = 0,0202 FV ² + 60,6	0,55
FV ² x f _c	f _c = 0,0155 FV ² + 46,2	0,69

V = velocidade obtida no ensaio de ondas de tensão (km.s⁻¹); E_M = módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão estática (GPa); f_m = módulo de resistência a flexão (MPa); f_{c,0} = resistência a compressão paralela (MPa); F = resistência à perfuração (Resi); FV² = módulo de tensão resistência (Resi. km².s⁻²)

Teder *et al.* (2011) realizaram medições de propagação de ondas de ultrassom na forma direta e indireta. As medições diretas foram realizadas com propagação da onda na direção longitudinal (paralela às fibras) e transversal (perpendicular às fibras) e as indiretas com propagação longitudinal. No caso da medição direta com propagação longitudinal os transdutores foram posicionados nas extremidades da peça e para as medições diretas com propagação perpendicular às fibras os transdutores foram posicionados lateralmente. Os ensaios foram realizados em 124 peças de seção transversal 50 mm x 50 mm e comprimento de 1005 a 1100 mm retiradas de peças provenientes de demolição. Todas as peças foram classificadas visualmente de acordo com norma Nórdica (INSTA 142) e as classes foram < C18, C18 e C24. Em 92 peças foram realizadas medições de ultrassom com transdutores de 54 kHz de frequência. Os ensaios foram realizados de quatro formas distintas:

- A: medições indiretas com transdutores distanciados de 200 mm
- B: medições indiretas com transdutores distanciados de 600 mm
- C: medição direta longitudinal – paralela à fibra
- D: medição direta na direção perpendicular à fibra

Após as medições com ultrassom as peças foram ensaiadas em flexão estática para a determinação do módulo de elasticidade (E_M) e módulo de resistência a ruptura (f_m). Medições de resistência à penetração foram realizadas com o resistógrafo após o ensaio de flexão. Em cada peça foram realizadas 5 medições com resistógrafo, a cada 100 ou 150 mm evitando-se os nós. Adicionalmente a dureza superficial foi medida utilizando-se equipamento denominado Pilodyn.

A tabela 2.4 resume os principais resultados de correlações entre as velocidades mensuradas nas condições A, B, C e D e os resultados do ensaio de flexão e de densidade. A velocidade na medição longitudinal direta foi a que apresentou melhor correlação com as propriedades mecânicas obtidas no ensaio de flexão estática e, também, com a densidade (Tabela 2.4), resultado esse já esperado. Das medições indiretas as melhores correlações foram obtidas com a maior distância entre os transdutores – medição B (Tabela 2.4). Esse resultado pode estar associado ao fato de que o aumento da distância entre os transdutores favorece o modo de conversão de onda, tornando o valor mais próximo do obtido de forma direta, mas essa discussão não foi realizada pelos autores. Teder *et al.* (2011) estudaram, também, as correlações entre o resultado do resistógrafo e a densidade, em várias condições (Tabela 2.5), tendo encontrado valores elevados. O coeficiente de correlação obtido pelos autores para a relação entre dureza superficial e o módulo de resistência à flexão foi de 0,47 e entre dureza superficial e densidade de 0,70. Os resultados obtidos com o resistógrafo não apresentaram correlação estatisticamente significativa com os ensaios estáticos. Os autores não comentaram nenhuma avaliação de correlação entre as velocidades de propagação das ondas e o resistógrafo ou a dureza superficial. Os autores concluem que, embora as melhores correlações tenham sido obtidas para a velocidade mensurada de forma direta e na direção longitudinal, considerando a dificuldade de medições desse tipo em estruturas em serviço, é necessário que pesquisas sejam feitas para obter relações entre medições diretas e indiretas.

Tabela 2.4: Matriz de correlação (R) entre variáveis obtidas em ensaio destrutivo e não destrutivas. Fonte: Adaptado de Teder et al (2011).

Tipos de medições	f_m	E_M	ρ
Velocidade A	0,12	0,11	-0,09
Velocidade B	0,25	0,31	0,07
Velocidade C	0,42	0,61	0,40
Velocidade D	-0,25	-0,38	0,31

E_M = módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão estática; f_m = módulo de ruptura à flexão; ρ = densidade; A: medições indiretas com transdutores distanciados de 200 mm; B: medições indiretas com transdutores distanciados de 600 mm; C: medição direta longitudinal – paralela à fibra; D: medição direta na direção perpendicular à fibra.

Tabela 2.5: Coeficientes de correlação (R) das regressões entre o resultado do resistógrafo e a densidade. Fonte: Adaptado de Teder et al (2011)

Grupos de corpos de prova	R
Todos (124 corpos de prova)	0,67
Corpos de prova da classe C24 (46 corpos de prova)	0,57
Corpos de prova com nós < 250 mm ² (18 corpos de prova)	0,80
Corpos de prova sem rachaduras ou ataques de fungos (61 corpos de prova)	0,73
Corpos de prova com ataques de fungos e de besouros (28 corpos de prova)	0,85

Cavalli *et al.* (2011) utilizaram 13 vigas provenientes de edificações antigas da Itália, sendo a mais recente com aproximadamente 70 anos. As vigas tinham seções transversais e comprimentos diferentes, o que foi útil para garantir a variabilidade da amostra. A menor relação vão livre-altura foi superior a 10, o que tornou a amostragem aceitável para estudos utilizando vibração e ensaio de flexão estática. A umidade das vigas durante os ensaios foi de 11%. A primeira etapa da pesquisa consistiu em classificar as vigas por análise visual utilizando a norma italiana UNI 11119. Em seguida foram realizados ensaios não destrutivos para a determinação do que os autores denominaram de módulo de elasticidade dinâmico. Esse módulo foi obtido com ensaios de vibração em flexão (E_f), vibração longitudinal (E_l) e ondas de tensão (E_{sw}). Para a

determinação da densidade os autores optaram pela utilização da dureza superficial. Os ensaios de dureza superficial foram realizados nas 4 faces das vigas e a cada 800 mm. Todas as vigas foram ensaiadas em flexão estática utilizando a norma europeia EM 408 (2010) para a determinação do módulo de elasticidade local ($E_{m,l}$) e global ($E_{m,g}$). Os autores utilizaram, como dois principais parâmetros da avaliação visual, a incidência de nós (KI) e inclinação das fibras (SoG) e associaram esses parâmetros aos ensaios não destrutivos para verificar se haveria elevação dos coeficientes de correlação (regressão linear múltipla) com as propriedades obtidas em flexão estática. Cavalli *et al.* (2011) concluíram que, considerando a regressão simples, os ensaios de vibração (flexão e longitudinal) foram os que apresentaram melhores correlações com os módulos de elasticidade obtidos em flexão estática ($R^2 = 0,80$ para E_f e $0,70$ para E_l). Combinando os dados dos ensaios de propagação de ondas (E_{sw}) e da análise visual (KI e SoG) as correlações melhoraram consideravelmente ($R^2 = 0,91$). No entanto, os autores argumentam que os ensaios de vibração não são adequados para uso em estruturas em serviço, sendo o ensaio de ondas de tensão muito mais aplicáveis para esses casos. Adicionalmente os autores mencionam que quase nunca é possível, em estruturas em serviço, ter acesso às 4 faces da peça. Considerando essas condições, e também, levando em conta a norma de análise visual da Itália, que indica que o ensaio visual só é aceito quando se tem acesso a pelo menos três faces da peça, os autores realizaram novas análises estatísticas envolvendo os resultados dos ensaios de ondas de tensão e da análise visual em apenas três faces da peça e concluíram que as correlações com os resultados dos ensaios estáticos foram muito boas ($R^2 = 0,83$).

Riggio *et al.* (2011) analisaram degradações naturais provocadas por fungos e insetos em peças retiradas de estruturas demolidas, bem como em vigas em serviço. Para os ensaios de tomografia os autores utilizaram equipamento multicanal, com 16 transdutores, sendo um deles emissor de ultrassom de frequência 55 kHz. Com esse equipamento os autores elaboraram mapas de velocidades utilizando 256 níveis de cinza, representando as variações de velocidade na peça. As velocidades variaram de cerca de 400 a 1200 $m.s^{-1}$. Os autores comentam que esse mapa de velocidade não é facilmente interpretável, pois as velocidades podem ser afetadas pela presença de nós ou outros pequenos defeitos que não poderiam ser confundidos com a degradação que se está buscando. Dessa forma, os autores associaram as imagens com fotos em alta resolução da inspeção visual, buscando correlacionar os defeitos visíveis nas peças, tais como os nós, com as

imagens da estrutura interna do material. Isso permitiu aos pesquisadores julgar, de forma mais apropriada, a imagem gerada pela tomografia, já que puderam associar uma faixa de velocidade a um defeito visível como é o caso dos nós. Após a separação das zonas com possíveis degradações, por meio da comparação com fotos detalhada anteriormente, os autores utilizaram o resistógrafo nas áreas onde julgavam haver efetivamente estado de degradação. Os autores confirmaram que as zonas com baixa velocidade eram as que apresentavam baixos valores de resistência à penetração e as zonas com altas velocidades os valores altos de resistência a penetração, mostrando a eficiência da tomografia. Como conclusão os autores comentam que, tendo em vista que a tomografia é completamente não invasiva, pode se tornar importante ferramenta para a inspeção de estruturas, mas que como a interpretação não é simples, ela deveria ser utilizada como análise global, seguida de análise local mais detalhada com outro equipamento como, por exemplo, o resistógrafo.

Arriaga et al. (2009) utilizaram 25 peças de Scots pine (*Pinus sylvestris*) de seção transversal 141 mm x 196 mm e comprimento 4,48 m obtidos de uma construção do fim do século 18. As peças foram ensaiadas em flexão estática de acordo com a norma europeia EM 408 para a determinação do módulo de elasticidade (E_M) e da resistência à flexão (f_m). Antes dos ensaios de flexão as vigas foram ensaiadas por ultrassom (medição semidireta) com os transdutores posicionados em faces opostas mas com a propagação das ondas atravessando a viga (Figura 2.7)

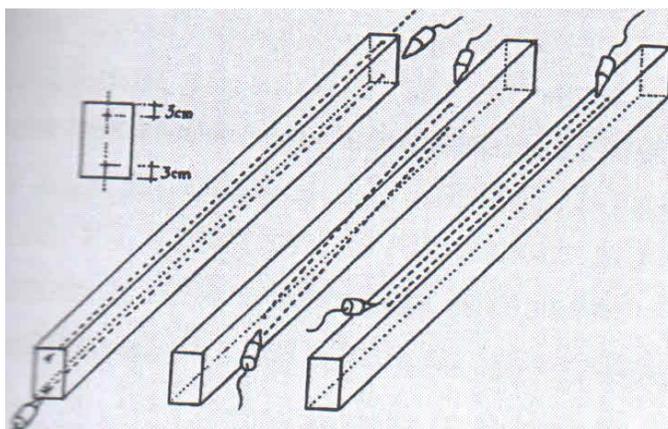


Figura 2.7: Posicionamento dos transdutores na medição semidireta

Fonte: Adaptado de Arriaga et al (2009)

Para corrigir a velocidade em função da umidade (referência de 12%), da propagação da onda com respeito à direção da fibra (referência $\alpha = 0^\circ$) e da distância entre os transdutores (referência 3,6 m), os autores utilizaram modelos de correlação previamente estudados pelo grupo de pesquisa. A densidade das peças foi estimada utilizando correlação com o arrancamento de parafuso, também anteriormente obtida pelo grupo de pesquisa. Para estimar o E_M e o f_m por meio da velocidade de propagação das ondas de ultrassom, os autores também utilizaram modelos de correlação previamente estabelecidos entre o coeficiente de rigidez (ρV^2) e esses parâmetros. De posse dos valores preditos e dos valores efetivamente obtidos no ensaio de flexão os autores determinaram as correlações, alcançando $R = 0,76$ para a relação entre E_M estimado e real e $R = 0,54$ para a relação entre f_m estimado e real. Os autores concluíram que a metodologia é adequada para estimar o módulo de elasticidade, mas que a resistência residual foi superestimada.

Esteban *et al.* (2009) apresentam estudo de caso realizado em uma estrutura treliçada de cobertura. Inicialmente os autores determinaram a espécie de madeira em laboratório, utilizando pequenas amostras retiradas das peças e concluíram que se tratava de Scots pine (*Pinus sylvestris*). A primeira etapa consistiu de análise visual, de acordo com a norma espanhola UNE 56544 (2007). A densidade foi determinada utilizando os resultados de dureza superficial e arrancamento de parafuso aplicados em modelos de correlação anteriormente obtidos pelo grupo de pesquisa. As medições de velocidade de propagação de ondas de tensão foram feitas de forma direta e semidireta. No caso da medição semidireta os transdutores foram posicionados em faces opostas, fazendo com que a propagação se desse com ângulo de $1,5^\circ$ em relação à direção da fibra. Os valores de velocidade foram corrigidos em relação à umidade e à inclinação utilizando modelos anteriormente obtidos pelo grupo de pesquisa. Também utilizando modelos previamente determinados pelo grupo de pesquisa, os valores de módulo de elasticidade (E_M) e de resistência (f_m) em flexão estática foram previstos à partir das velocidades e densidades mensuradas nos elementos. Os autores concluíram que a classificação das peças por análise visual, por f_m , por densidade (mínima), por arrancamento de parafuso e por dureza superficial indicaram classes C18, C22, C24 e C27, mas pela propagação de ondas na predição de E_M as peças pertenciam apenas às classes C18 e C22.

Os trabalhos de Arriaga et al. (2009) e Esteban et al. (2009) são os únicos que propõem medições semidiretas para os ensaios de propagação de ondas. Essas medições visam simular a medição longitudinal direta, que se sabe ser melhor correlacionada com resistência. Dentre os demais autores citados foram utilizadas as medições indiretas para a mesma finalidade.

Li *et al.* (2009) apresentam estudo de caso realizado em um pilar retirado do Palácio Imperial em Beijing, China. As peças foram analisadas utilizando resistógrafo em toda a circunferência do pilar. Com os valores obtidos, os autores desenharam um mapa da seção transversal, associando diferentes cores ao resultado da resistência à perfuração, para representar a situação interna do pilar. Dessa forma conseguiram identificar e posicionar, na seção, a área degradada. Realizando as medições com o resistógrafo em 4 diferentes alturas os autores conseguiram desenhar a degradação da peça em 3 dimensões. Além do resistógrafo, os autores aplicaram tomografia, utilizando 24 sensores, em 3 posições na altura do pilar, obtendo assim 3 imagens da seção do pilar. A comparação do resultado do resistógrafo e da tomografia demonstrou total compatibilidade do posicionamento do defeito.

Yu *et al.* (2009) utilizaram uma peça de 600 mm x 540 mm x 300 mm de *Picea sp* com uma rachadura de 20 mm de largura e uma peça de 350 mm x 200 mm x 450 mm de *Pinus sp* com fissuras e rachaduras visíveis, mas menores. As peças foram obtidas do Palácio Imperial da China. Também realizaram medições no local em alguns pilares. Os ensaios foram realizados utilizando tomografia (com ondas de tensão), com diferentes números de sensores (24, 12 e 6), para comparar a qualidade das imagens geradas. Os sensores foram posicionados a partir de 30 mm do defeito. Quando foram utilizados os 24 sensores, a posição da rachadura foi claramente representada na imagem gerada pela tomografia. Quando o número de sensores foi de 12 e de 6 a imagem gerada representou a rachadura muito maior do que de fato ela era. Com 24 sensores a dimensão da rachadura foi 1,8% superior ao real enquanto com 12 sensores foi 6,25% superior e com 6 sensores 33,3% superior. Os autores concluíram que o uso de pequeno número de sensores pode levar a grandes erros de interpretação da inspeção. A localização dos sensores também teve efeito na imagem gerada pelo tomógrafo. Os autores posicionaram de forma diferente os sensores em uma mesma peça e verificaram que a posição do defeito variava conforme o posicionamento dos sensores, afetando portanto o julgamento da inspeção. Nas inspeções *in loco* os autores verificaram que há, também, problemas no uso de tomografia quando a peça inspecionada tem

outra peça nas proximidades, como por exemplo um pilar combinado com uma parede ou viga, havendo interferência na imagem gerada. A imagem gerada em um pilar indicava um grande defeito, mas com o uso do resistógrafo foi verificado que o pilar estava íntegro. A imagem sofreu interferência de uma parede que cruzava o pilar. Os autores concluem que a tomografia pode ser importante ferramenta para inspeções, mas que para ser aplicada em estruturas em serviço ainda se deve pesquisar as interferências para que as inspeções sejam realizadas com maior segurança.

2.7. Aspectos Teóricos

É importante que os ensaios de propagação de ondas sejam realizados em conformidade com bases teóricas, do contrário os resultados podem estar afetados.

Uma questão relevante para que as velocidades obtidas nos ensaios representem valores não afetados por interferências na propagação das ondas, é a relação entre o comprimento de percurso da onda (L) e o comprimento de onda (λ). O comprimento de onda é calculado (Equação 2) pela relação entre a velocidade (V) e a frequência do transdutor (f).

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad \text{Equação 2}$$

Os equacionamentos relacionados com a propagação de ondas são baseados na hipótese de meios infinitos (BUCUR, 2006), que nesse caso é obtido quando o comprimento de percurso é muito superior ao comprimento de onda ($L \gg \lambda$). Assim, quando o comprimento de percurso, segundo a direção de propagação da onda, se aproxima do comprimento de onda, o meio passa a se denominar finito e, nesse caso, a propagação começa a ser afetada por fenômenos de reflexão e de refração, fazendo com que o meio passe a ser dispersivo, alterando a velocidade (BUCUR, 2006).

Além do comprimento de percurso, que no caso de medições diretas é o comprimento da peça, a dimensão da seção transversal da peça também pode afetar o ensaio. O diâmetro do transdutor deve estar, no mínimo, circunscrito à peça. Bucur (2006) sugere que a seção transversal seja pelo menos igual ao comprimento de onda e algumas vezes maior do que o diâmetro do transdutor, para evitar a ocorrência do efeito parede, que também afeta a condição teóricas de ondas planas.

Diversos trabalhos de pesquisa foram realizados para determinar qual a relação L/λ a partir da qual as velocidades não seriam mais afetadas (meios infinitos). Bucur (2006) concluiu, para a espécie *Fagus sylvatica*, que a taxa mais acentuada de variação da velocidade longitudinal (30%) foi obtida para relações L/λ entre 0,1 e 1,0. Para o intervalo de L/λ entre 1 e 10 a variação foi de apenas 2,6%.

Trabalho de Goia *et al.* (2006) utilizando *Pinus caribaea*, *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus grandis* e *Hymenaea sp* indicou que, para relação $L/\lambda \geq 3$ as velocidades não são mais afetadas. O mesmo resultado ($L/\lambda \geq 3$) foi obtido por Trinca e Gonçalves (2009).

A dimensão da seção transversal também tem sido relatada como responsável por variações na velocidade por afetarem a propagação livre da onda. Bucur (2006) indica que o maior valor de velocidade longitudinal foi obtido para relação entre largura (b) e altura da peça (h) entre 1 e 2 e quando tanto b quanto h eram superiores a λ . A velocidade atingiu valor mínimo quando a relação b/h chegou a 13 e, a partir desse valor, se tornou praticamente constante. Bartholomeu *et al.* (2003) indicaram relações b/h maiores que 0,75 para que a propagação longitudinal da onda na peça não seja afetada. Trinca e Gonçalves (2009) observaram que as velocidades longitudinais foram afetadas (diminuíram) quando b e h eram menores do que o comprimento de onda, não sendo mais afetadas para frequências que geravam comprimentos de ondas menores do que as dimensões da seção transversal.

Outro aspecto importante para fundamentar a metodologia e a discussão de resultados desta pesquisa é a relacionada ao tipo de medição – direta ou indireta. Quando se aplicam impulsos mecânicos sobre materiais sólidos, três tipos de ondas podem ser geradas. Cada tipo de onda ocasiona um movimento específico das partículas no meio de transmissão. Essas ondas são denominadas longitudinais (compressão), transversais (cisalhamento) e de superfície, sendo todas produzidas por transdutores piezoelétricos acoplados à superfície do material. A onda é denominada longitudinal quando a direção de propagação é paralela à direção do movimento das partículas provocado por sua passagem. Nesse caso o movimento da partícula coincide com a direção do transporte de energia. A indução desse tipo de onda é realizado, normalmente, nas medições diretas, quando o transdutor emissor é posicionado frontalmente ao receptor. A onda é denominada transversal ou de cisalhamento quando a direção de propagação é perpendicular à direção do movimento das partículas. Nesse caso o movimento da partícula é perpendicular ao

transporte de energia. Esse tipo de onda normalmente não é utilizada em aplicações de campo, porque as atenuações do sinal são maiores, dificultando a obtenção do tempo de propagação das ondas. As ondas denominadas de superfície são aquelas nas quais as partículas do meio têm movimentação elíptica. As ondas de superfície não são, portanto, nem longitudinais nem transversais. No caso das ondas longitudinais e transversais todas as partículas contidas no volume do meio se movem, ou longitudinalmente ou transversalmente em relação à direção de propagação. Na onda de superfície apenas as partículas da superfície se movem (BUCUR, 2006). Esse tipo de onda é a que ocorre em medições indiretas, muito utilizadas em inspeções porque normalmente não se tem acesso às extremidades da peça para se realizar a medição direta (onda longitudinal).

Esses diferentes tipos de ondas geram propagações com velocidades diferentes. No entanto, o que se observa nos trabalhos que envolvem inspeções, é que as velocidades superficiais são tomadas para gerar conclusões com base em valores de referência de velocidades longitudinais.

Wang *et al.* (2007) definiram a onda superficial como sendo restrita à região adjacente à superfície, o que faz com que o movimento das partículas se dê para cima, para baixo, para frente e para trás, produzindo um traçado elíptico. Segundo os autores esses distúrbios na propagação das ondas afetam a velocidade de tal forma que a onda final gerada é uma mescla desses vários tipos de onda. A Figura 2.8 ilustra os três tipos de ondas gerados a partir de um impulso provocado na superfície de um material elástico.

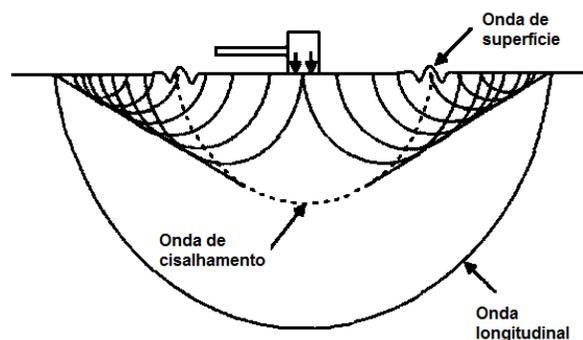


Figura 2.8: Ondas gerados a partir de um impacto na superfície de um material elástico.

Fonte: Adaptada de Wang *et al.* (2007).

As ondas longitudinais e transversais são denominadas de ondas de volume (*bulk waves*) enquanto as ondas de superfície recebem as denominações de Rayleigh, Lamb e Love, dependendo das dimensões do meio de propagação em relação ao comprimento de onda (BUCUR, 2006).

Embora a maior parte da energia resultante de um impacto seja para gerar ondas de cisalhamento e de superfície, a onda longitudinal viaja mais rápido e é mais fácil de ser detectada em aplicações em campo (MAYERS, 1994 apud WANG *et al.*, 2007).

Segundo Bartholomeu *et al.* (2003) a propagação das ondas de ultrassom em peças de diferentes dimensões é afetada pelo fenômeno da dispersão. Os autores concluíram que o modo de conversão da onda superficial (medição indireta) em longitudinal (medição direta) só ocorre se o comprimento de percurso (L) for pelo menos 5 vezes o comprimento de onda (λ), $L/\lambda > 5$.

Bertoldo *et al.* (2013) mostram que a dispersão da onda é um dos responsáveis pelas diferenças de velocidade longitudinal e superficial. A Figura 2.9 foi obtida considerando um posicionamento fixo do transdutor emissor e as diferentes recepções do sinal obtidas conforme a posição do transdutor receptor é modificada.

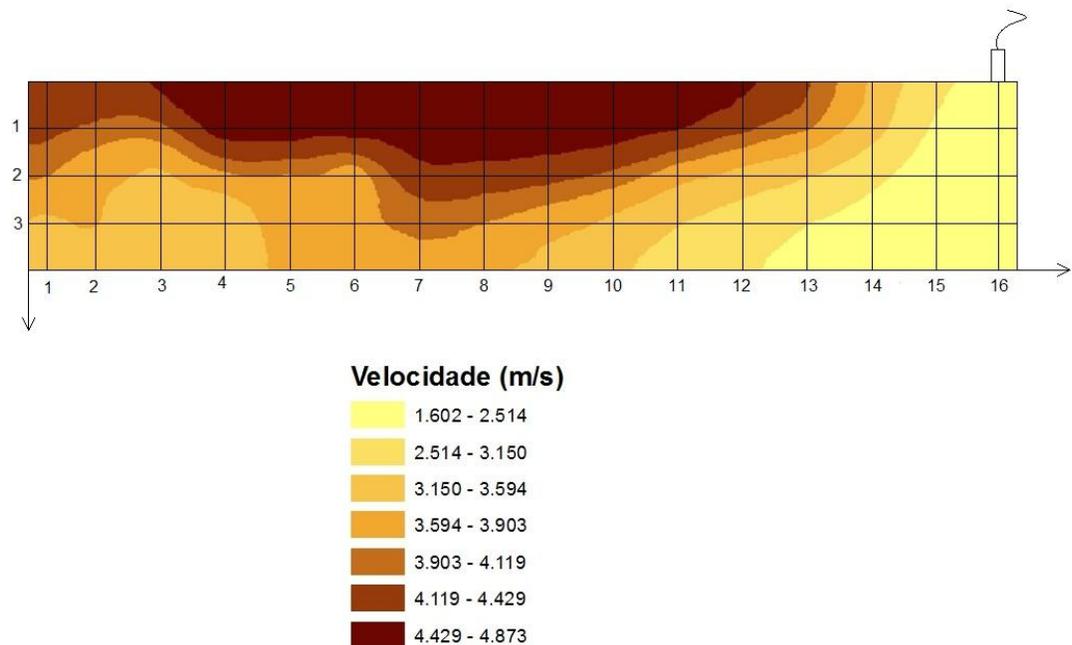


Figura 2.9: Exemplo de dispersão de onda superficial em uma viga de madeira. Fonte: Adaptado de Bertoldo *et al.* (2013).

No caso dos transdutores de faces planas, posicionados a 90° (medição indireta), as velocidades nas proximidades do ponto de captação da onda pelo transdutor receptor vão crescendo até atingirem a velocidade longitudinal (Figura 2.9), que no caso dessa viga era próximo a 4800 m.s^{-1} no trecho que vai da abscissa 12 ($\cong 400 \text{ mm} = 4 \lambda$) a 3 ($\cong 1300 \text{ mm} = 13 \lambda$). Quando as distâncias entre os transdutores começam a ficar muito grandes as velocidades começam novamente a decrescer, provavelmente porque as atenuações começam a ficar maiores e a captação do sinal pelo equipamento vá se tornando mais difícil. Para o caso do transdutor exponencial, a velocidade inicialmente foi muito elevada ($\cong 35\%$ superior à velocidade longitudinal) e foi decrescendo conforme os transdutores se distanciavam até atingir valores próximos do valor da onda longitudinal com distância entre os transdutores por volta de 700 mm (7λ).

Bucur (2005) comenta que a obtenção de imagens representativas da condição da madeira 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. Esse artigo foi elaborado considerando a inspeção de árvores, mas seus conceitos são também adequados para a inspeção de estruturas de madeira. Segundo a autora, 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, elevando a exigência de potencia do equipamento. Além disso, a mesma autora (BUCUR, 2006) demonstra frequências próximas de 1000 kHz já implicam em comprimentos de onda da ordem de grandeza das maiores dimensões dos elementos anatômicos da madeira, o que pode inviabilizar as medições, já que grandes atenuações do sinal serão provocadas por difração das ondas.

Em relação às descontinuidades passíveis de detecção pelo método de propagação de ondas Andreucci (2008) destaca que, se o comprimento de onda for muito maior do que as dimensões das descontinuidades, nenhuma mudança sensível ocorrerá com as frentes de ondas, e a onda se propagará indiferente à existência da descontinuidade. Essa condição é ruim para a inspeção porque a medição não apresentará sensibilidade para detectar a descontinuidade no material. Por outro lado, se o comprimento de onda for muito próximo da dimensão da descontinuidade, além da reflexão das ondas nas interfaces da descontinuidades, a onda poderá

sofrer espalhamento conhecido como difração da onda. Segundo Andreucci (2008) defeitos visíveis nesse tipo de ensaio são aqueles da ordem de $\lambda/2$.

2.8 Considerações Finais

Por meio da revisão bibliográfica ficou evidente que as técnicas de propagação de ondas e de resistência a perfuração são ferramentas importantes para a inspeção de estruturas de madeira. Além disso, não há dúvidas de que o estudo de técnicas que contribuam para o avanço tecnológico de inspeções de estruturas de madeira em nosso país justificam uma pesquisa científica.

Adicionalmente, verifica-se que a potencialidade do ultrassom está em identificar zonas com diferentes velocidades, as quais, associadas a diferentes estados de degradação, podem fornecer resultados importantes para a inspeção. No entanto há questionamento em relação ao nível de deterioração que essa metodologia tem sensibilidade para indicar. Além disso, nem sempre é possível determinar, por métodos de propagação de onda, a dimensão ou localização mais exata da deterioração, mesmo utilizando imagem.

A metodologia utilizando a resistência a perfuração permite indicar, com mais precisão, a dimensão do defeito. Por outro lado esse tipo de inspeção envolve a necessidade de furar as peças. Esse procedimento, em quantidade significativa, pode interferir na função do elemento, seja arquitetônica ou estruturalmente, além de gerar portas de entrada de umidade ou de insetos.

Também pode ser constatado pela Revisão Bibliográfica, que há muitos trabalhos com a finalidade de associar métodos de inspeção, principalmente nos últimos 4 anos. Os resultados dessas pesquisas vêm sendo apresentados e discutidos em eventos científicos específicos da área de ensaios não destrutivos aplicados à madeira, mas ainda poucos são encontrados em periódicos. Essa constatação evidencia a novidade do tema e a falta de resultados científicos conclusivos. A proposta desta pesquisa foi elaborada de forma a complementar resultados que já vêm sendo pesquisados por autores de todo o mundo, bem como preencher lacunas verificadas nas pesquisas citadas neste capítulo.

3. Material e Métodos

O material objeto de estudo foi constituído de 4 peças de pilares, provenientes de demolição, com seção de 240 mm x 240 mm e de comprimentos iniciais de 1420 mm, 1090 mm, 1060 mm e 1310 mm, com diferentes níveis de deterioração em seu comprimento (Figura 3.1)



Figura 3.1: Exemplos de seções sem degradação (a), parcialmente degradada (b) e com grande degradação (c).

Cada uma das peças recebeu uma numeração, de 1 a 4. Cada face das peças foi então numerada, de A a D. As faces transversais ao comprimento não receberam numeração, pois foram utilizadas somente para os ensaios longitudinais, como será descrito posteriormente. Em cada face foram feitos grids de medição: No comprimento da peça as linhas paralelas foram espaçadas de 100 mm. Na largura da peça (240 mm) foram consideradas 6 linhas paralelas, a primeira a 20 mm da borda superior, a última a 20 mm da borda inferior e as demais a cada 40 mm. A Figura 3.2 apresenta o grid utilizado. Esse grid permitiu a realização de ensaios indiretos de propagação de ondas com diferentes espaçamentos, permitindo análise da variação da velocidade com o aumento do espaçamento entre os transdutores nas medições indiretas (modo de conversão de onda). A distância entre a borda da peça e o início do grid foi a mínima possível para garantir o acoplamento do transdutor plano.

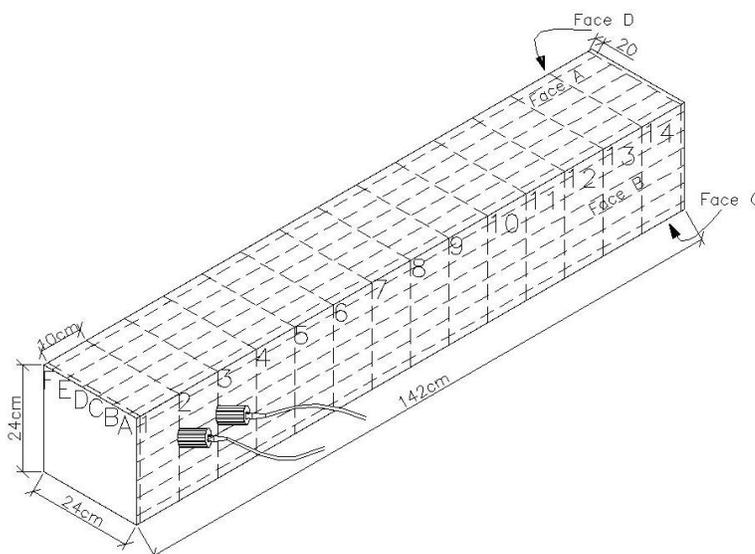


Figura 3.2: Grid de medição

A primeira etapa dos ensaios foi a avaliação visual das peças, com base nos aspectos indicados na revisão bibliográfica. Nessa análise se verificaram evidências de ataques de fungos ou insetos, tais como coloração, aspecto (amolecido, quebradiço), afundamentos, galerias de insetos etc. Também foram avaliados outros parâmetros tais como rachaduras e nós.

As peças passaram nessa etapa por medição de umidade, utilizando-se medidor (PM1-E, Merlin, Brasil) sem pinos ou eletrodos com faixa de densidade de $0,3$ a $1,1 \text{ g.cm}^{-3}$ com regulagem a cada $0,01 \text{ g.cm}^{-3}$ e faixa de medição de 1 a 100%.

Utilizou-se o grid para efetuar a indicação e extensão dos defeitos.

3.1 Ensaios utilizando o ultrassom

Após a análise visual as peças passaram por medições utilizando equipamento de ultrassom (USLab, AGRICEF, Brasil), com transdutores de faces planas e de faces exponenciais (Figura 3.3), de três frequências: 25 kHz, 45 kHz e 80 kHz, nos pontos marcados pelo grid. Para cada ponto as medições foram repetidas três vezes, sendo adotado o valor médio. As repetições foram realizadas para garantir que o valor de tempo lido era o estabilizado. Isso é importante porque o equipamento apresenta 2 leituras de tempo por segundo, mas o operador deve tomar cuidado para aguardar o sinal indicativo de estabilização do valor. Realizando três leituras no mesmo ponto reduz-se a possibilidade de assumir um valor de tempo não estabilizado.



a



b

Figura 3.3: Equipamento de ultrassom com transdutores de faces planas (a) e transdutores de faces exponenciais (b)

Foram efetuadas medições de 4 tipos: direta perpendicular à grã (Figura 3.4 a), direta paralela à grã (Figura 3.4b), semidireta (Figura 3.4c) e indireta (Figura 3.4d), as quais são a seguir detalhadas.



a



b



c



d

Figura 3.4: Formas de medição utilizada, (a) direta perpendicular a grã, (b) direta paralela a grã, (c) semidireta, (d) indireta fixa e variável.

- **Diretas paralelas à grã:** que, conforme observado na revisão bibliográfica, são mais bem correlacionadas com propriedades mecânicas. Neste ensaio utilizaram-se como pontos de medição (posicionamento dos transdutores) aqueles definidos nas faces transversais, assim, o grid

de medição consistiu de pontos a cada 40 mm. Os transdutores foram posicionados em faces opostas da peça (Figura 3.4b). Nas peças mais deterioradas nas bordas, como a representada pela Figura 1c, não foi possível efetuar a medição de todos os pontos do grid, uma vez que o acoplamento não pode ser feito. A utilização do transdutor exponencial colaborou com mais medições na região mais deteriorada, mas mesmo com esse transdutor houve pontos que não puderam ser utilizados nas medições.

Dos ensaios com medição direta paralela à grã o que se tem em termos de resultado é a velocidade por faixa de medição e a velocidade média na peça. As variações da velocidade nas faixas de medição podem indicar a presença de deteriorações, já que se espera a redução dos valores de velocidade nas zonas deterioradas. Conforme apresentado na revisão bibliográfica, a literatura internacional indica valores de velocidade na faixa de 5000 m.s^{-1} e 6000 m.s^{-1} para a direção paralela à grã na madeira sã. No entanto, resultados do grupo de pesquisa mostram que algumas espécies tropicais apresentam velocidades inferiores (4000 m.s^{-1}). Dessa forma, foi adotado como referência o valor de velocidade obtido para zonas aparentemente sãs da própria peça sob inspeção.

Além da análise das variações de velocidade nas diferentes faixas de medição, esse resultado também foi correlacionado com a resistência à compressão dos corpos de prova retirados das peças.

Os resultados de velocidades obtidos neste ensaio serviram como referência para os demais, e, também, para geração de mapas de velocidades (tomografia ultrassônica) em cada peça, a partir do software ArcGIS (Esri, EUA), que utiliza os valores de velocidade obtidos em cada ponto da malha e, por meio de interpolação (neste trabalho utilizou-se o método da Krigagem, em função de experiências anteriores do grupo de pesquisa), infere a velocidade em toda a peça, associando a cada velocidade uma cor. Os valores dos extremos dos intervalos de classificação foram definidos de forma que se pudesse efetuar comparação entre todas as peças, para todas as frequências utilizadas. Os intervalos de velocidade foram dados de modo a permitir:

- 1- A visualização de zonas muito deterioradas (ocos, rachaduras, etc)
- 2- A visualização de zonas com madeira integra
- 3- A comparação entre as diferentes peças, utilizando intervalos de velocidade equivalentes.

- **Diretas perpendiculares à grã:** Neste tipo de medição os transdutores foram posicionados em faces opostas da peça (como as faces B e D, e A e C Figura 3.2) e de forma que a onda se propagação na direção perpendicular à grã.

Considerando também resultados apresentados nas referências bibliográficas, o ensaio direto na direção perpendicular à grã é mais adequado em inspeções. O comprimento de percurso (L) nesse caso é de 240 mm e o comprimento de onda (considerando um valor médio das velocidades radial e tangencial como referência $\cong 2000 \text{ m.s}^{-1}$) de aproximadamente 80 mm para o transdutor de 25 kHz, 44 mm para o transdutor de 45 kHz e 25 mm para o transdutor de 80 kHz. Com esses valores, a mínima relação L/λ foi 3,0 e o máximo vazão que se esperou detectar (se houvesse) foi de 12,5 mm (metade do menor comprimento de onda). Apenas analisando as bases teóricas do ensaio esperou-se maior sensibilidade de detecção de descontinuidades com as medições perpendiculares à grã do que com medições paralelas.

Novamente os resultados de velocidades obtidos nestes dois ensaios diretos foram utilizados para gerar mapa de velocidades (tomografia ultrassônica) em cada peça, utilizando a mesma metodologia descrita anteriormente.

- **Indiretas variáveis:** Neste tipo de medição os transdutores foram posicionados na mesma face da peça. O transdutor emissor foi mantido fixo no primeiro ponto das linhas de medição e o transdutor receptor foi sendo afastado ao longo da linha de medição. Finalizada a linha, passava-se o transdutor emissor para a próxima linha de medição e repetia-se o procedimento. Este ensaio foi realizado com a intenção de se avaliar a distância mínima necessária para que a onda superficial passe a ter velocidade semelhante a onda longitudinal paralela a grã.

- **Indiretas fixas:** Neste tipo de medição os transdutores foram posicionados na mesma face da peça, para todas as faces. O espaçamento entre os transdutores foi definido pela largura do grid, ou seja, espaçamento de 100 mm. As leituras foram feitas por faixas, linha a linha. Por exemplo: A partir da linha 1 (Figura 3.2) efetuou-se a medição do tempo de propagação entre os pontos que correspondiam as colunas 1 e 2, seguido do tempo entre as colunas 2 e 3 e assim sucessivamente. Esta medição teve como objetivo avaliar a possibilidade de se localizar a presença de defeitos por faixa de medição.

- **Medições semidiretas:** Para esses ensaios foram utilizadas as mesmas faces do ensaio direto perpendicular à grã, mas nesse caso os transdutores não foram posicionados frente a frente. Um dos transdutores é posicionado, por exemplo, na Face D ponto 14 enquanto o outro na Face B ponto 1 (grid da Figura 3.2). Conforme esses pontos de posicionamento dos transdutores se aproximam, o ângulo de propagação em relação à grã aumenta, provocando maiores interferências na velocidade. Arriaga *et al.* (2009) e Esteban *et al.* (2009) trabalharam com ângulos pequenos e, mesmo assim, aplicaram correções na velocidade. Para ser possível estudar esse tipo de medição e a interferência do ângulo de propagação da onda, as medições foram realizadas iniciando da maior distância entre os transdutores (Ex: Face D ponto 14 e Face B ponto 1 no grid da Figura 3.2) implicando em menor ângulo, até a menor distância entre os transdutores, quando a medição foi quase perpendicular à grã.

Conforme visto na revisão bibliográfica, as medições diretas face a face na direção paralela à grã não são viáveis na maioria das vezes em inspeções, por não se ter acesso às extremidades. Dessa forma os pesquisadores estão buscando outros tipos de medição que se aproximem da medição longitudinal direta, sendo uma delas a medição semidireta. Por essa razão nas peças também foi efetuado este tipo de medição.

3.2 Ensaio utilizando equipamento de resistência à perfuração

Após a realização dos ensaios utilizando o equipamento de ultrassom as peças foram ensaiadas utilizando-se equipamento de resistência à perfuração (F500-SX, IML, EUA). As medições foram feitas utilizando-se o modo *Hardwood*, com baixa velocidade de rotação (maior resolução). As medições foram feitas utilizando-se o mesmo grid de medição do ensaio de ultrassom (Figura 3.2) porém somente se efetuou as medições na direção A para C (Figura 3.2), pois uma medição adicional, utilizando-se a direção B para D (Figura 3.2), seria influenciada pelas medições previamente realizadas (a nova medição poderia passar sobre os furos das seis medições anteriores).

As Figura 3.5 e 3.6 ilustram os ensaios efetuados com o equipamento de medição da resistência a perfuração.



Figura 3.5: Ensaio Resistógrafo



Figura 3.6: Detalhe ensaio resistógrafo

3.3 Corte das amostras de pilar e determinação da área deteriorada da seção

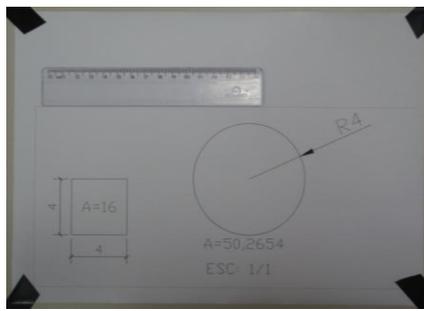
Após os ensaios utilizando o Resistógrafo as peças foram submetidas ao corte nas seções determinadas pelo grid da Figura 3.2. Para esta etapa utilizou-se serra de fita (Figura 3.7). Esta etapa teve como objetivo a visualização da condição interna real de degradação das peças, bem como a confecção dos corpos de prova para os ensaios de compressão.



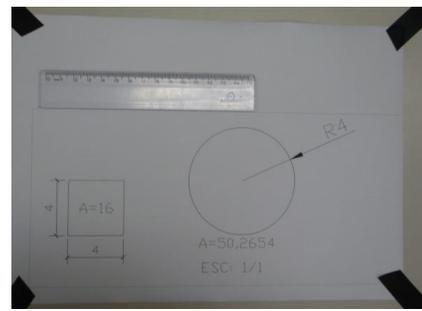
Figura 3.7: Corte das amostras de pilar

3.4 Determinação da área degradada das seções

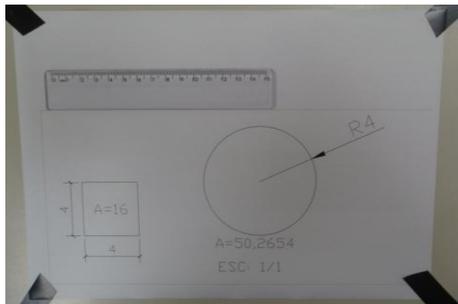
A primeira etapa da determinação da área degradada foi a verificação do eventual erro cometido ao se tomarem as fotos a serem utilizadas pelo software. Para avaliar a influência do ângulo da foto, bem como erro na passagem de escala no software, inicialmente duas áreas de tamanho conhecido foram fotografadas em diferentes inclinações, passando de pouca (Figura 3.8, a), a muita inclinação, (Figura 3.8, b, c), além de terem sido escaneadas (Figura 3.8, d).



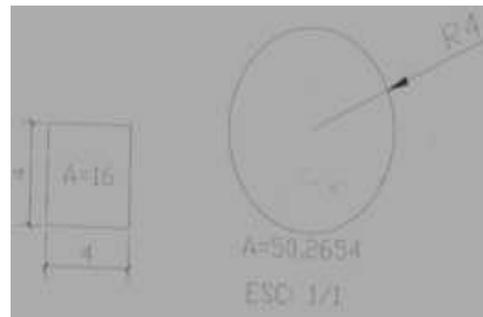
a



b



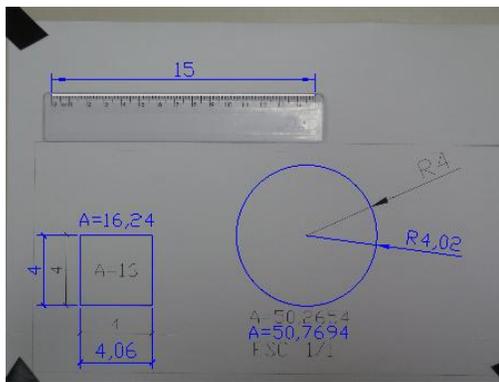
c



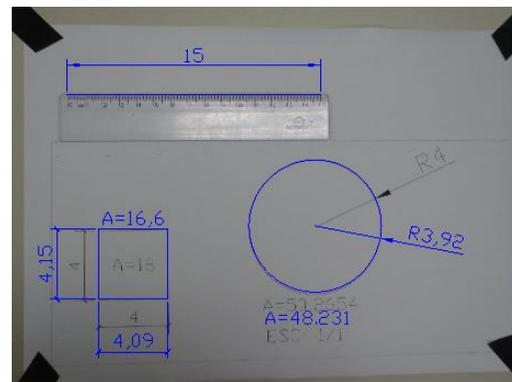
d

Figura 3.8: Fotos tiradas sem inclinação (a) com inclinação lateral (b) com inclinação para frente (c) e escaneada (d)

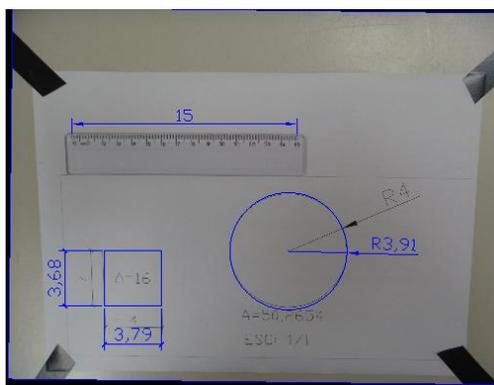
Após a passagem para o ambiente do software, pode-se obter as áreas das figuras, como apresentado na Figura 3.9.



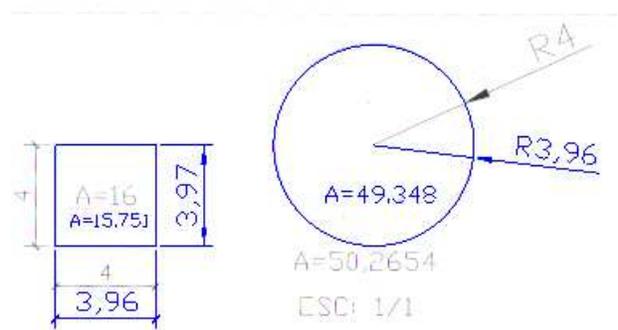
a



b



c



d

Figura 3.9: Obtenção das áreas para as fotos aproximadamente de frente (a) com inclinação lateral (b) com inclinação para frente (c) e escaneada (d)

Após definido o erro na determinação da área por cada um dos métodos, utilizou-se aquele com a melhor previsão de área e melhor aplicabilidade para se determinar a degradação de cada uma das seções.

Utilizando-se o método adotado na etapa anterior, procedeu-se à determinação da área deteriorada das seções. Para esta etapa utilizou-se o software AutoCad (Autodesk, EUA). As seções com deterioração foram fotografadas e enviadas ao software, no qual, após serem vetorizadas, tiveram a área determinada. Afim de se manter o tamanho adequado da foto, (deixa-la em escala 1:1) uma régua foi fotografada junto das mesmas, para servir de padrão no ambiente do software.

3.5 Corpos de prova para os ensaios de compressão paralela às fibras

De forma a fornecer dados indicativos da classe de resistência da madeira ensaiada e comparar com a velocidade de propagação obtida nos ensaios de ultrassom na direção paralela às fibras (ondas de compressão), foram definidos 19 pontos de retirada de corpos de prova, todos correspondentes a regiões com madeira íntegra. Para cada ponto foram ensaiados três corpos de prova (repetições), totalizando 57 corpos de prova. As peças, em geral, apresentavam apenas duas condições de integridade – ou boa ou com oco. Havia apenas algumas poucas regiões com madeira deteriorada, sempre em torno de um oco e com dimensão muito pequena para ser viável a retirada de corpo de prova. Por essa razão não houve como fazer a retirada de corpos de prova de zonas deterioradas, mas apenas de zonas íntegras. As peças escolhidas para a retirada dos corpos de prova foram a Peça 1 e a Peça 4. Para a Peça 4 os corpos de prova foram retirados dos pontos de coordenadas (2,6) a (9,6) e de (1,2) a (1,6), referentes, portanto, a todas as faixas de velocidade obtidas nesta peça (Figura 3.10).

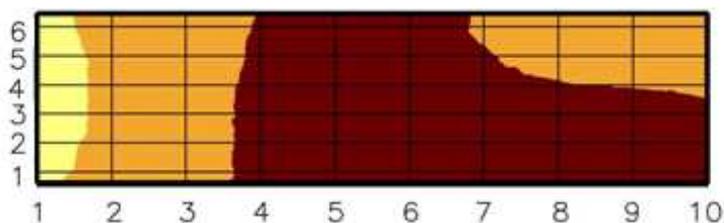


Figura 3.10: Medição perpendicular grã, direção AC, transdutor de 45 kHz, peça 4.

Da Peça 1 (Figura 3.11) os corpos de prova foram retirados dos pontos de coordenadas (1,5), (2,5), (2,6), (3,5), (3,6), (4,5) e (4,6).

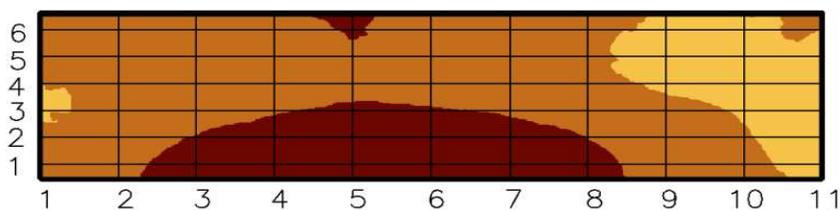


Figura 3.11: Medição perpendicular grã, direção AC, transdutor de 45kHz, peça 1

Os corpos de prova foram confeccionados com dimensões 30 mm x 30 mm x 90 mm, seguindo as proporções propostas pela NBR 7190 (1997).

Primeiramente as seções (produtos do corte apresentado no item 3.3 Corte das amostras de pilar e determinação da área deteriorada da seção) foram cortadas ao longo das linhas de medição (Figura 3.10 (a) a (d)), sendo estas, por sua vez, cortadas na dimensão final do corpo de prova (Figura 3.10 (e) e (f)).



a



b



c



d



e



f

Figura 3.10: Confeção dos corpos de prova para ensaio de compressão paralela às fibras.

A nomenclatura dos corpos de prova foi feita baseada na posição do grid (Figura 3.2) como apresentado na Figura 3.11.

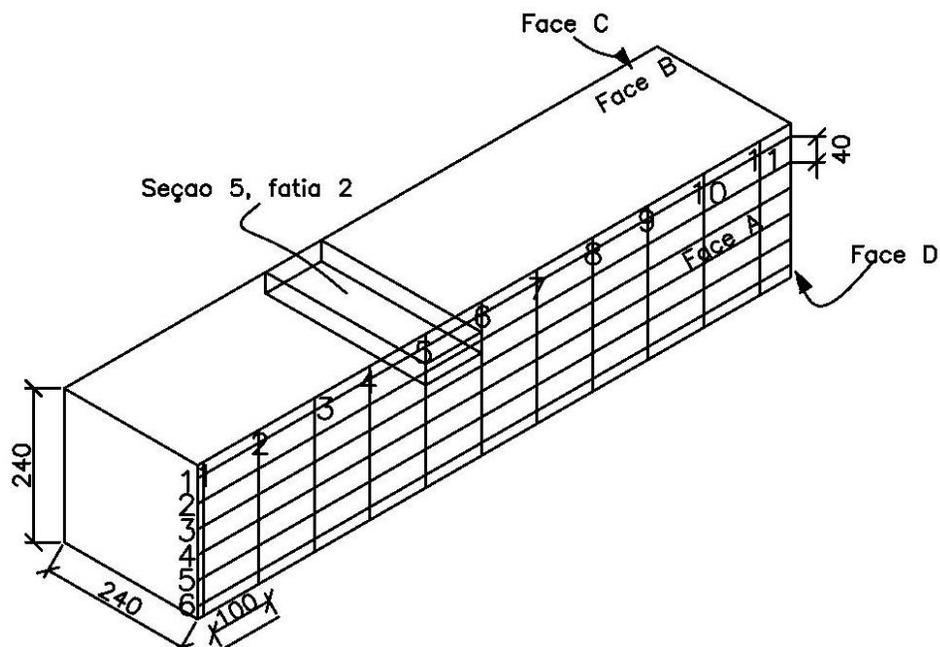
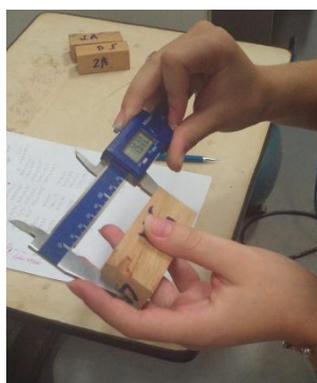


Figura 3.11: Nomenclatura dos corpos de prova a compressão.

Os corpos de prova passaram por pesagem, medição das dimensões e ensaio de compressão paralela às fibras (Figura 3.14). Com os resultados foram determinados a densidade aparente, a resistência à compressão (f_{c0}) e o módulo de elasticidade (E_{c0}) na direção paralela às fibras.



a



b

Figura 3.12: Determinação das dimensões e ensaio de compressão.

4. Resultados e Discussão

4.1 Análise Visual

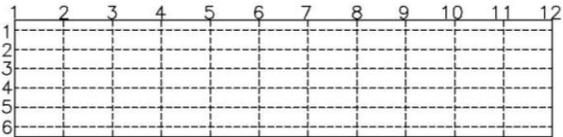
Na análise visual das peças foram detectados defeitos denominados de fendas, furos, trincas, ressaltos, afundamentos e lascas (Tabelas 4.1 a 4.4). Para facilitar o entendimento dos termos adotados foram apresentadas fotos das peças, onde se pode visualizar os defeitos (Figuras 4.1 a 4.9). Os furos são, provavelmente, provenientes de pregos retirados das peças. O defeito proveniente, provavelmente, do desprendimento da camada superficial de verniz foi denominado de “ressalto”. O defeito nomeado de “afundamento” foi dado para partes da peça que cederam, provavelmente por apresentarem algum oco.

A umidade das peças estava em torno de 9%, com pouca variação entre elas (de 8,63% a 9,97%) e também pouca variação dentro da peça (Tabelas 4.1 a 4.4). Em uma inspeção este resultado indicaria pouca probabilidade da peça estar sob ataque de fungos, pois geralmente peças sob ataque de fungos apresenta regiões com umidades elevadas (entre 30% e 60%) – Montana (2012).

De maneira geral, as Peças 1 e 3 foram as que apresentaram a maior quantidade de defeitos nas faces (Tabelas 4.1 e 4.3), enquanto as Peças 2 e 4 foram as que aparentemente estavam mais íntegras (Tabelas 4.2 e 4.4). A Peça 1 apresentou grande número de defeitos espalhados na peça, mas com pequenas dimensões e, aparentemente, superficiais. A peça 2 apresenta poucos defeitos e concentrado mais nas bordas. A Peça 3 apresenta defeitos com maior profundidade e abrangência na peça, principalmente vistos na face D. A Peça 4 aparentemente é a mais íntegra com poucos defeitos superficiais.

A Peça 1 foi a única que apresentou defeitos visuais em todas as faces. Nas demais os defeitos eram visíveis somente em duas faces (Peças 2 e 3) e uma face (Peça 4). Essa questão é importante, já que em inspeções nem sempre todas as faces da peça estão visíveis. A Peça 3 foi a única que apresentou afundamento, indicativo de que havia um oco que fez com que a peça cedesse (Figura 4.4). Se fosse possível o acesso a todas as faces durante uma inspeção, a Peça 3 seria detectada como totalmente deteriorada em função do afundamento na face D, que permitia detectar o oco. No entanto, no caso de não se ter acesso à face D, a análise visual não seria conclusiva.

Tabela 4.1: Resultados da Análise Visual da peça 1 com posicionamento (linha, coluna) (X, Y) do grid de medição.

Umidade: 9,97 % (CV= 8,04 %)											
Face	n° defeito	Defeito	Largura (mm)	(X,Y)							
				inicial	final						
A	1	fenda	1,24	1,4	2,4						
	2	fenda	2,76	2,4	3,4						
	3	furo	1,67	4,1	4,1						
	4	furo	2,66	5,3	5,3						
	5	fenda	3,61	5,4	11,5						
	6	fenda	1,09	7,4	8,4						
	7	fenda	1,48	4,10	4,11						
B	1	fenda	2,23	10,2	11,2						
C	1	furo	0,86	8,4	8,4						
D	1	furo	1,75	5,1	5,1						
	2	furo	1,49	8,1	8,1						
	3	fenda	2,63	10,4	11,4						



Face A



Face B



Face C

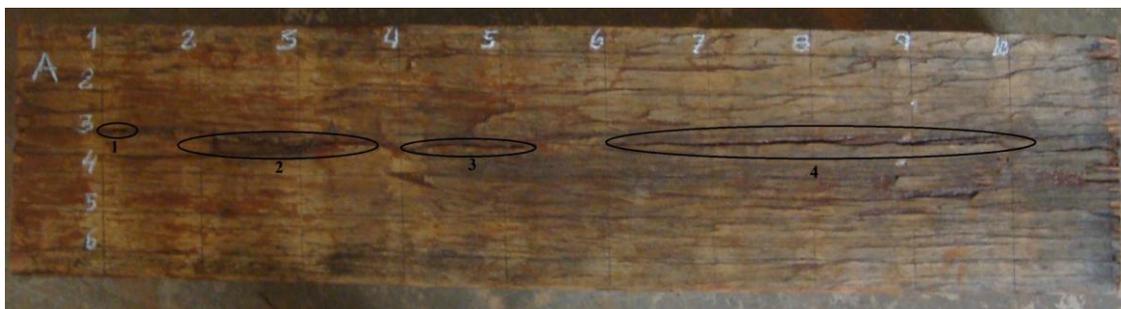


Face D

Figura 4.1: Defeitos visuais nas faces da Peça 1.

Tabela 4.2: Resultados da Análise Visual da peça 2 com posicionamento (linha, coluna) (X, Y) do grid de medição.

Umidade: 9,2 % (CV= 3,09 %)		<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1												2												3												4												5												6											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																																																						
1																																																																																																	
2																																																																																																	
3																																																																																																	
4																																																																																																	
5																																																																																																	
6																																																																																																	
face	n° defeito	Defeito	Largura (mm)	(X,Y) inicial	(X,Y) final																																																																																												
A	1	fenda	2,56	1,3	1,3																																																																																												
	2	lasca	16,78	2,3	3,3																																																																																												
	3	trinca	2,35	4,3	5,3																																																																																												
	4	fenda	3,65	6,3	10,3																																																																																												
B	1	fenda	1,98	8,4	10,4																																																																																												



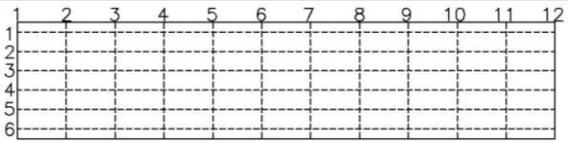
Face A



Face B

Figura 4.2: Defeitos visuais nas faces da Peça 2.

Tabela 4.3: Resultados da Análise Visual da peça 3 com posicionamento (linha, coluna) (X, Y) do grid de medição.

Umidade: 8,63 % (CV= 9,36 %)													
Face	n° defeito	Defeito	Largura(mm)	(X,Y) inicial	(X,Y) final								
C	1	fenda	7,26	1,3	7,3								
	2	furo	4,42	11,3	11,3								
	3	furo	2,96	12,4	12,4								
	4	ressalto	-	2,2	3,2								
D	1	afundamento	-	1,3	2,3								
	2	fenda	46,25	2,3	12,3								
	3	furo	2,95	12,1	12,1								
	4	furo	2,12	12,6	12,6								



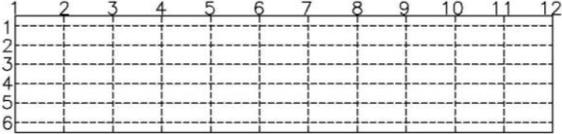
Face C



Face D

Figura 4.3: Defeitos visuais nas faces da Peça 3.

Tabela 4.4 Resultados da Análise Visual da peça 4 com posicionamento (linha, coluna) (X, Y) do grid de medição.

Umidade: 8,73 % (CV= 1,7 %)																	
face	n° defeito	Defeito	Largura (mm)	(X,Y) inicial	(X,Y) final												
C	1	fenda	1,76	1,4	2,4												
	2	ressalto*	-	4,4	8,4												
	3	lasca	7,64	5,4	5,4												
	4	lasca	3,71	5,3	5,3												
	5	lasca	9,05	8,3	8,3												
	6	ressalto	-	8,3	9,3												

*continha resina, provavelmente proveniente de restauração anterior.

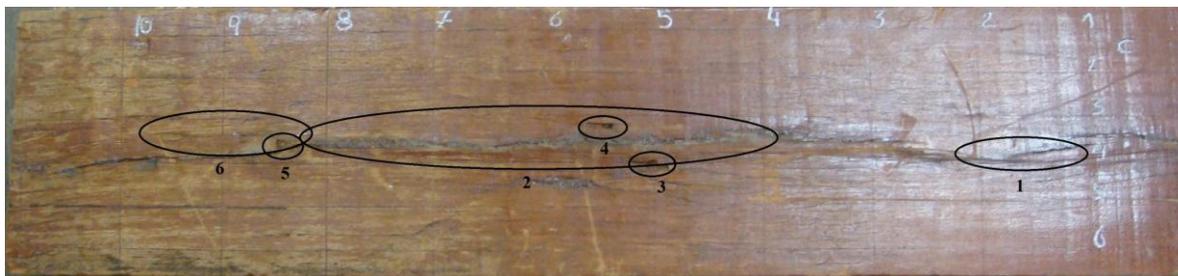


Figura 4.4: Defeitos visuais nas faces da Peça 4.

4.2 Inspeção utilizando o Ultrassom

4.2.1. Medições diretas paralelas a grã

De posse dos resultados de tempo de propagação das ondas e do comprimento de percurso (comprimento da peça), foram calculadas as velocidades (Tabela 4.5) obtidas de forma direta na direção da fibra.

De acordo com as bases teóricas do ensaio de ultrassom, as velocidades na direção paralela às fibras são as mais adequadas para se realizar inferências ou correlações com a rigidez e a resistência.

Tendo em vista a necessidade de acoplamento dos transdutores nas faces das peças, onde havia a maior quantidade de regiões deterioradas, em muitos pontos não foi possível efetuar as medições. Essa restrição de medição interferiu no resultado e, portanto, na análise das velocidades, pois os resultados médios de velocidade na peça (Tabela 4.5) não incluíram todas as regiões, provavelmente justamente as mais deterioradas. Os resultados médios de velocidade nas peças (Tabela 4.5) refletiram, portanto, somente as medições nas zonas mais íntegras.

Tabela 4.5: Resultados médios e coeficiente de variação (CV) da velocidade de propagação das ondas de ultrassom em medições diretas na direção paralela à grã

Peças	frequência/tipo de transdutor (kHz)	Propagação paralela à grã		
		Média (μ s)	CV (%)	Observações
PEÇA 1	25/plano	6024	3,42	3 pontos sem leitura
	45/plano	6032	3,13	3 pontos sem leitura
	45/exponencial	5705	3,29	5 pontos sem leitura
	80/plano	5928	3,47	3 pontos sem leitura
PEÇA 2	25/plano	5823	3,40	8 pontos sem leitura
	45/plano	5831	3,49	8 pontos sem leitura
	45/exponencial	5672	8,95	8 pontos sem leitura
	80/plano	5822	3,56	8 pontos sem leitura
PEÇA 3	25/plano	5922	2,33	19 pontos sem leitura
	45/plano	5126	2,07	19 pontos sem leitura
	45/exponencial	4720	3,29	13 pontos sem leitura
	80/plano	5912	2,27	19 pontos sem leitura
PEÇA 4	25/plano	5929	3,51	Nenhum ponto sem leitura*
	45/plano	5953	3,44	Nenhum ponto sem leitura
	45/exponencial	5751	4,54	Nenhum ponto sem leitura
	80/plano	5943	3,56	Nenhum ponto sem leitura

*36 pontos de leitura no total

Como pode ser observado na Tabela 4.5, todas as velocidades médias nas peças foram elevadas, compatíveis com madeira com boa resistência residual. Esse resultado não poderia ser utilizado em uma inspeção, porque até mesmo a análise visual indica que há peças com grandes zonas de degradação, como a Peça 3, por exemplo, as quais não puderam ser mensuradas por ultrassom. Os coeficientes de variação foram baixos, comprovando que as medições foram realizadas somente em madeira de condições semelhantes e, neste caso, em melhores condições.

Apenas os transdutores de 45 kHz (plano e exponencial) mostraram redução de velocidade na peça 3 (Figura 4.5), mesmo assim o nível de velocidade média (cerca de $4700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) não corresponde à madeira com alto grau de degradação, estando muito próxima da faixa de valores de madeira em boas condições (de 5000 a $6000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

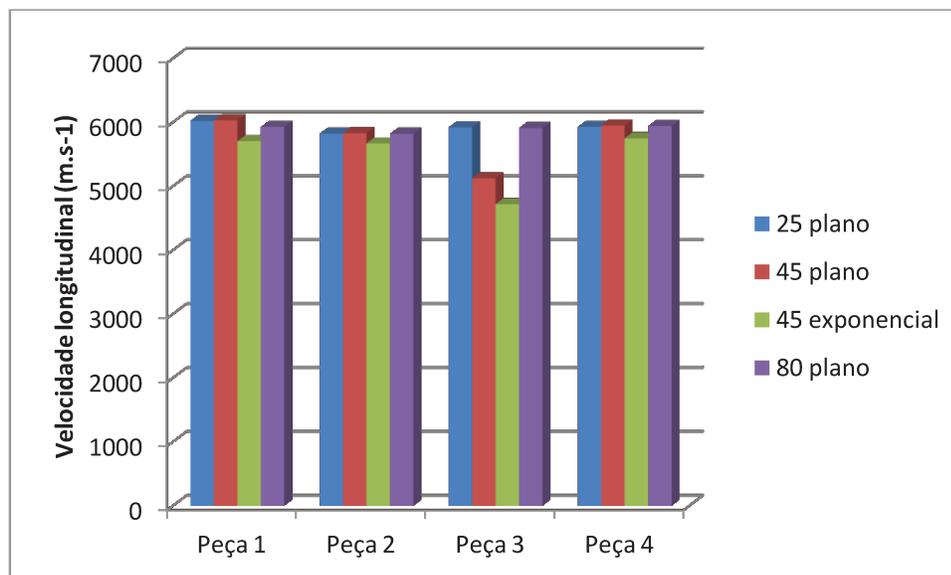


Figura 4.5: Velocidades longitudinais médias em medições diretas paralelas a fibra

Tendo em vista que, da mesma forma que os ensaios de ultrassom com medições diretas na direção paralela às fibras, os corpos de prova também foram retirados somente das regiões íntegras, os resultados de resistência e de rigidez da madeira (Tabela 4.6) forneceram bons indicativos do nível de resistência correspondente aos níveis de velocidade obtidos nas partes íntegras das peças. Os níveis elevados de velocidade (Tabela 4.5) foram coerentes com os níveis de resistência da madeira (Tabela 4.6), compatíveis com madeira da classe C 40 (NBR 7190, 1997).

Tabela 4.6: Valores médios de densidade aparente (ρ), resistência (f_{c0}) e módulo de elasticidade (E_{c0}) obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras.

Peça	f_{c0} (MPa)	CV (%)	ρ (kg.m^{-3})	CV (%)	E_{c0} (MPa)	CV (%)
1	70,9	6,87	880	1,61	20448	4,93
4	67,7	8,37	793	5,16	18465	8,93

Imagem de tomografia ultrassônica utilizando as velocidades obtidas nos ensaios diretos paralelo à fibra não representaria a condição real da peça, uma vez que dos 36 pontos de medição

do grid muitos não puderam ser utilizados nas medições em função da existência de superfícies deterioradas em uma ou duas faces de posicionamento dos transdutores (Figuras 4.6 a 4.8). Tendo em vista que o processo de elaboração da imagem utiliza a interpolação de resultados vizinhos, a grade teria muitas falhas, tornando a imagem sem representatividade.

A única peça que teve todos os pontos de medição com leitura foi a Peça 4, que apresentava ambas faces em condições adequadas para o acoplamento do transdutor (Figura 4.9).



a



b

Figura 4.6: Faces de acoplamento dos transdutores para a realização dos ensaios longitudinais paralelos a grã, Peça 1.



a



b

Figura 4.7: Faces de acoplamento dos transdutores para a realização do ensaio longitudinal paralelo a grã, peça 2.



a



b

Figura 4.8: Faces de acoplamento dos transdutores para a realização do ensaio longitudinal paralelo a grã, peça 3.



a



b

Figura 4.9: Faces de acoplamento dos transdutores para a realização do ensaio longitudinal paralelo a grã, peça 4.

Para a Peça 4 a imagem de tomografia ultrassônica (Figura 4.10) indica variações de velocidade na peça. Essas variações são provenientes de variabilidade natural do material e/ou presença de outras singularidades tais como medula, pequenas rachaduras etc. No entanto, o nível destas velocidades (acima de 5500 m.s.^{-1}) é indicativo, em uma inspeção, de que a peça estaria em boas condições internas. Esse resultado é compatível com a análise visual desta peça (Tabela 4.4 e Figura 4.4).

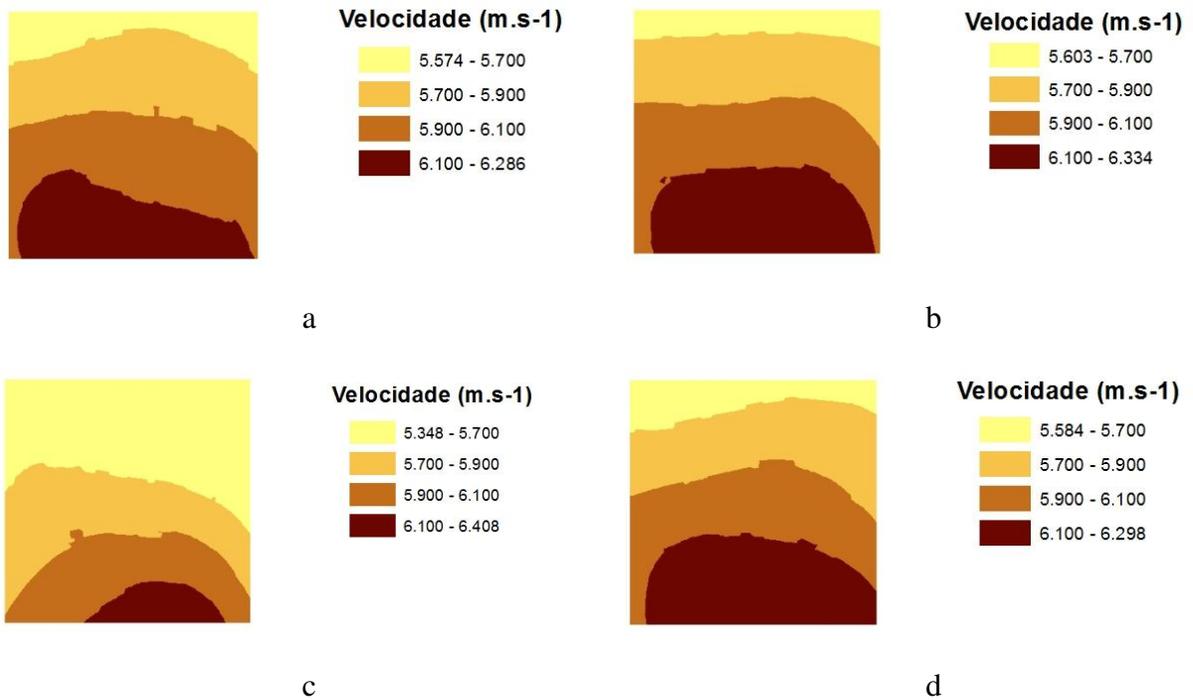


Figura 4.10: Ensaio direto paralelo a grã, peça 4, diferentes frequências; (a) 25kHz – face plana, (b) 45kHz – face plana, (c) 45kHz – face exponencial, (d) 80kHz – face plana.

De forma geral foi possível concluir que, em função das deteriorações nas bordas das peças, o ensaio direto paralelo às fibras não foi adequado para avaliar a integridade. Adicionalmente é importante lembrar que em inspeções de campo, quando as peças fazem parte da estrutura, dificilmente se tem acesso às extremidades para utilizar esse tipo de medição. As velocidades longitudinais nas zonas de madeira íntegra foram compatíveis com madeira de elevada resistência, indicando que no caso de não serem detectados defeitos graves a madeira apresenta resistência residual compatível com uso em estruturas.

4.2.2 Ensaio direto perpendiculares à grã

De posse dos resultados de tempo de propagação das ondas e do comprimento de percurso (largura da peça), foram calculadas as velocidades (Tabela 4.5) obtidas de forma direta na direção perpendicular à fibra. As velocidades obtidas de forma direta na direção perpendicular às fibras

têm sido indicadas, pelos pesquisadores, como as mais adequadas para se detectar degradações na madeira. Conforme detalhado na metodologia, as medições diretas perpendiculares às fibras foram realizadas considerando duas condições: propagação na direção da face A para a face C e propagação da face B para a face D (Figura 3.2).

Considerando a revisão bibliográfica e a experiência do grupo de pesquisa do LabEND, velocidades superiores a 1500 m.s^{-1} indicam madeira sem degradação e velocidades inferiores a 750 m.s^{-1} grandes degradações ou a provável influência de ocos. No caso de regiões com presença de ocos as velocidades de propagação de ondas de ultrassom diminuem em função do aumento do percurso, porque a onda se desvia do oco (Secco *et al.*, 2012). Assim, essa variação dependerá da dimensão e da quantidade de ocos na região analisada. A propagação da onda em região de madeira degradada também reduz a velocidade, neste caso porque a degradação provoca modificações na estrutura anatômica da madeira. Adicionalmente, a perda de rigidez e de resistência da madeira ocasionam, também, redução da velocidade de propagação das ondas de ultrassom. Estas questões dificultam a interpretação de valores de velocidade, principalmente em faixas intermediárias (de 750 m.s^{-1} a 1500 m.s^{-1}).

Considerando a média geral dos valores de velocidades (Tabela 4.7), somente as Peças 1 e 3 indicariam possíveis áreas degradadas. Esse resultado foi obtido para ambas faces de medição (AC e BD). É importante salientar que essa média geral, obtida na peça toda, é utilizada apenas como uma referência rápida para destacar as peças com possíveis problemas, pois as velocidades obtidas por faixas do grid são mais adequadas para evidenciar e localizar as quedas de velocidade. Outro ponto importante para se destacar é o coeficiente de variação das velocidades. No caso das velocidades obtidas na direção longitudinal, nas quais as medições só foram possíveis em zonas de madeira íntegra, a variabilidade foi muito pequena, com CV da ordem de 3% (Tabela 4.5). Para as velocidades obtidas com medições perpendiculares às fibras foi possível passar por regiões em diferentes estados de degradação, fazendo com que as médias apresentassem coeficientes de variação maiores que 50% na peça 3, por exemplo (Tabela 4.7).

Tabela 4.7: Resultados médios e coeficientes de variação (CV) da velocidade de propagação das ondas de ultrassom em medições diretas na direção perpendicular às fibras nas duas direções de medição (AC e BD)

Peças	frequência/ tipo de transdutor (kHz)	Direção AC		Direção BD	
		Média (μ s)	CV (%)	Média (μ s)	CV (%)
PEÇA 1	25/plano	1335	30,3	1604	25,7
	45/plano	1294	33,0	1597	25,9
	45 exponencial	804	46,8	877	57,2
	80/plano	1103	44,6	1378	40,2
PEÇA 2	25/plano	2012	3,91	1922	7,44
	45/plano	2020	3,72	1900	7,16
	45 exponencial	1742	22,3	1493	16,8
	80/plano	1972	10,0	1841	7,41
PEÇA 3	25/plano	1014	56,7	1093***	26,1
	45/plano	945	65,2	954***	38,4
	45 exponencial	623*	76,0	432*****	53,6
	80/plano	850**	67,6	804***	43,2

Tabela 4.7 - Continuação

PEÇA 4	25/plano	1985	10,1	1968	7,15
	45/plano	1989	8,87	1962	18,6
	45/exponencial	1848	21,6	1690	18,6
	80/plano	1889	17,7	1946	8,82

Em 66 pontos totais de medição *3 pontos sem medição; **5 pontos sem medição; ***10 pontos sem medição; ****14 pontos sem medição em 66 pontos no total

No caso das medições diretas perpendiculares à fibras apenas para a Peça 3 ocorreram os mesmos problemas evidenciados para as medições na direção paralela às fibras, com impedimento do acoplamento do transdutor na face em função de deterioração na superfície. Esses problemas também impediram que, em alguns pontos, as medições fossem realizadas. No entanto, para esse tipo de ensaio o grid tinha 66 pontos, abrangendo todo o comprimento, e o número máximo de pontos com problema de acoplamento foi de 14 (cerca de 20%), de forma que se espera que a imagem de tomografia ultrassônica seja pouco afetada.

Para a elaboração das imagens de tomografia ultrassônica sempre que possível manteve-se os mesmos intervalos de velocidade para as diferentes peças, visando facilitar a comparação de resultados. As faixas fixadas foram: inferiores a 750 m.s^{-1} , de 750 a 1000 m.s^{-1} , de 1000 a 1500 m.s^{-1} e de 1500 m.s^{-1} até o valor máximo de velocidade obtido na peça. Nas peças que apresentaram velocidades altas na maior parte da seção (Peças 2 e 4) esses intervalos não foram utilizados, pois fariam com que a imagem tivesse uma única cor, não indicando as pequenas variações de resistência na peça.

4.2.2.1. Peça 1

Considerando os intervalos de velocidade indicados anteriormente, as imagens tomográficas dessa peça indicam que a madeira apresenta condições de integridade (velocidades superiores a 1500 m.s^{-1}) em apenas algumas partes (Figura 4.11). Há variação de resposta entre as diferentes frequências, sendo a frequência de 25 kHz e de 45 kHz exponencial as que indicam maior e

menor volume de madeira íntegra, respectivamente. Há também variação de respostas nas medições das faces A para C e B para D.

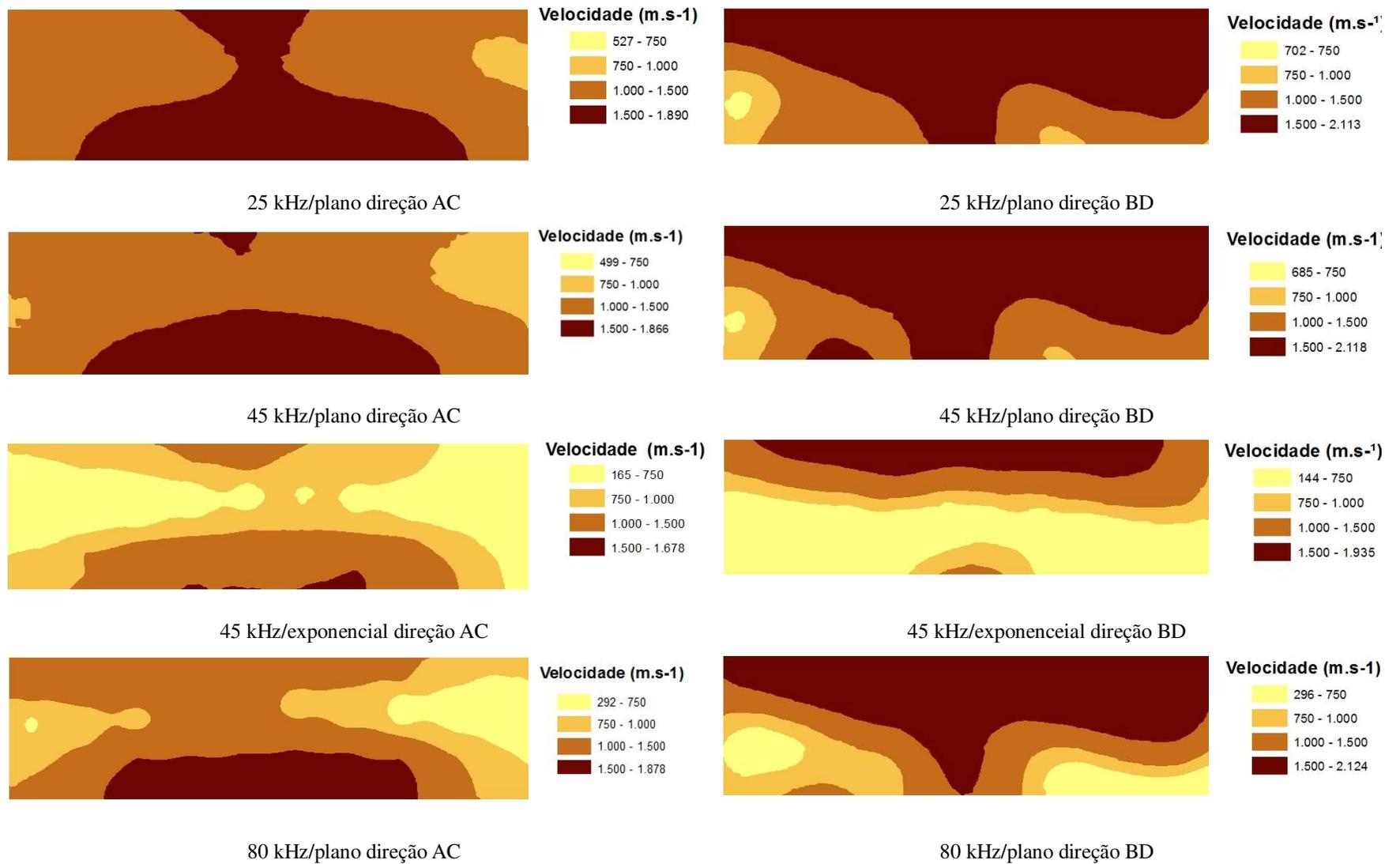


Figura 4.11: Tomografia ultrassônica do ensaio direto perpendicular a fibra da Peça 1.

Por meio das imagens é possível concluir que grande parte da seção parece não estar íntegra, mas o nível de redução da velocidade nas diferentes partes da peça foi dependente da frequência do transdutor.

Para avaliar a coerência das imagens foram utilizados os resultados das fotos proveniente do corte das seções e do cálculo das áreas/perímetros das partes com ocos/degradações (itens 3.3 e 3.4).

Para não interromper a discussão, no Anexo I são apresentados os resultados da análise do erro percentual de determinação da área utilizando as diferentes formas de obtenção da imagem (item 3.4), bem como todo o detalhamento do cálculo, ficando para este item apenas a utilização do resultado na análise da precisão da tomografia ultrassônica.

O corte das 11 seções da Peça 1 mostrou que toda a extensão da peça apresentava uma parte ocada ou com degradação (Figura 4.12). Esse resultado é mais consistente com a imagem gerada pelo transdutor de 45 kHz de faces exponenciais e de 80kHz de faces planas.

Verifica-se que para várias seções a região apresenta-se deteriorada, mas não há efetivamente um oco (Tabela 4.8), o que pode ter contribuído para resultados não tão baixos de velocidade obtidos para algumas das frequências de transdutores de faces planas.



Figura 4.12: Fotos das 11 seções cortadas longitudinalmente da Peça 1.

Tabela 4.8: Área e Perímetro das regiões degradadas e ocadas na Peça 1 para cada seção

Seção	Área (mm ²)	Perímetro (mm)	Observação
1	7630,5	959,95	Região ocada
2*	11872,9	1268,34	Região deteriorada
3	10735,9	1389,73	Região ocada
4*	11135,8	1040,41	Região deteriorada
5*	10719,8	1202,04	Região deteriorada
6*	8724,9	1066,75	Região deteriorada
7*	9513,9	938,62	Região deteriorada
8*	6948,6	1120,88	Região deteriorada
9	7187,9	1261,31	Região ocada
10	3761,5	1452,03	Região ocada
11	5140,3	1538,21	Região ocada
Média	8488,36	1203,48	
CV (%)	30,71	16,57	

4.2.2.2. Peça 2

As imagens tomográficas geradas por ultrassom nesta peça utilizando as medições AC indicam, em geral, velocidades superiores a 1500 m.s^{-1} (Figura 4.13). Apenas os transdutores de 45 kHz de faces exponenciais e o de 80 kHz de faces planas indicam velocidades mais baixas (menores do que 1000 m.s^{-1} para o transdutor de faces exponenciais) na extremidade direita da peça.

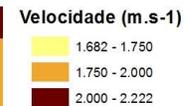
As imagens de tomografia ultrassônica nesta peça não sugerem a existência de ocos nem de grandes comprometimentos em termos de deteriorações na extensão da peça, mas considerando as velocidades mais baixas apontadas na extremidade direita poderia ser esperada a existência de um oco ou deterioração nessa região.

O corte das 10 seções desta peça indicam que o resultado das imagens geradas pelo

ultrassom foram consistentes, pois a única zona com oco foi a seção 10 (Área de 5512 mm² e perímetro de 767,65 mm), justamente na borda direita da peça (Figura 4.14).



25 kHz/plano direção AC



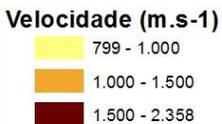
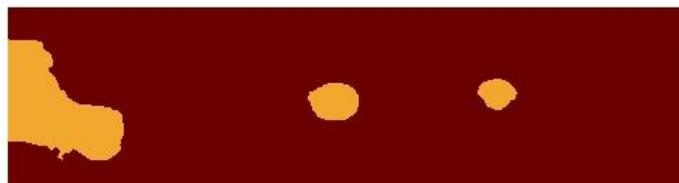
25 kHz/plano direção BD



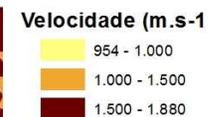
45 kHz/plano direção AC



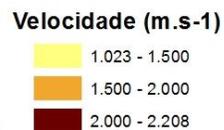
45 kHz/plano direção BD



45 kHz/exponencial direção AC



45 kHz/exponencial direção BD



80 kHz/plano direção AC



80 kHz/plano direção BD

Figura 4.13: Tomografia ultrassônica do ensaio direto perpendicular à fibras da Peça 2.

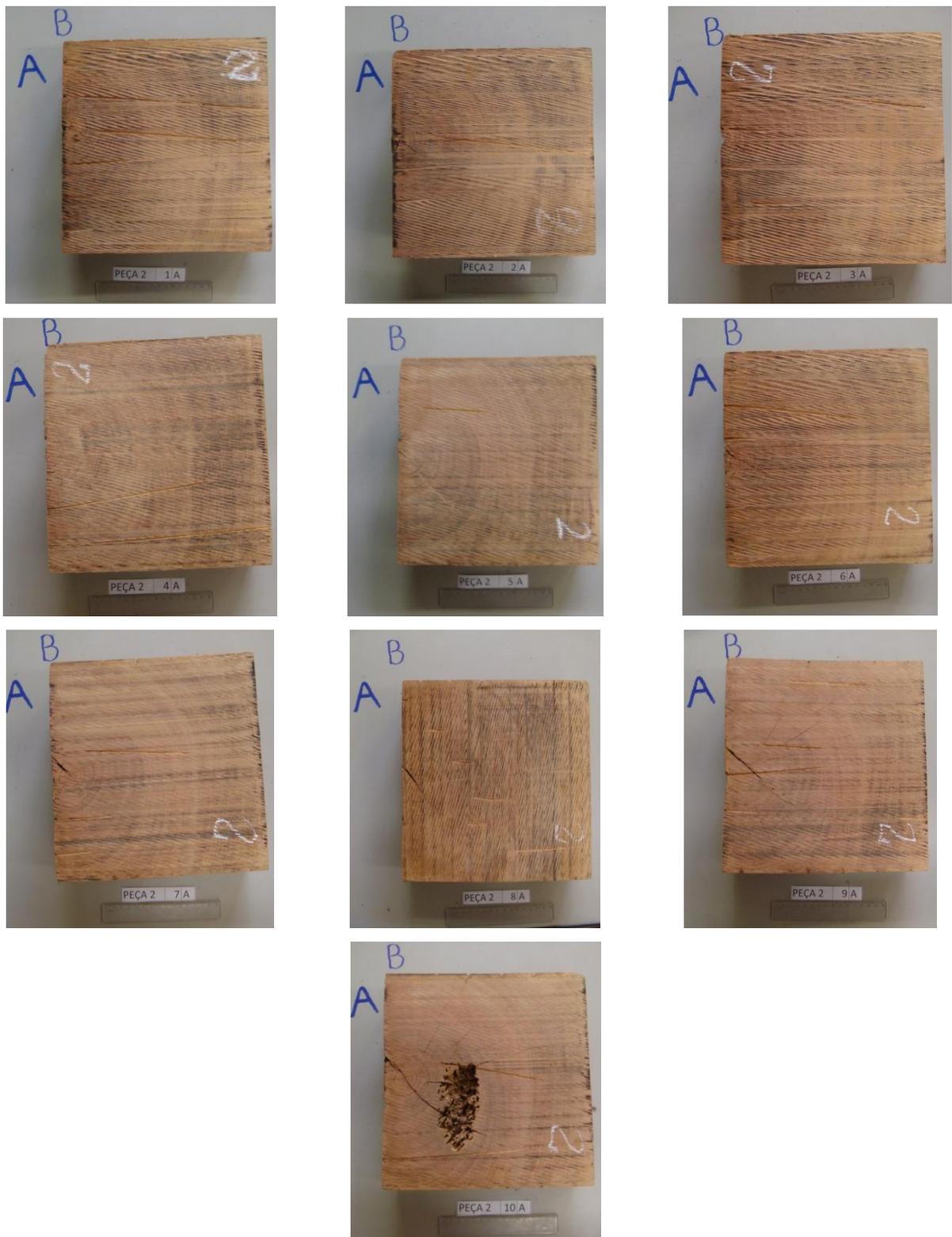


Figura 4.14: Fotos das 10 seções cortadas longitudinalmente da Peça 2.

4.2.2.3. Peça 3

As imagens geradas pelas medições perpendiculares à grã da Peça 3 indicam haver deteriorações significativas em toda a extensão da peça, pois verifica-se faixas de velocidades inferiores aos valores considerados normais para a madeira em boas condições (Figura 4.15). Todos os transdutores apontam que as zonas mais afetadas estão situadas na borda inferior da peça.

É interessante notar, também, o comportamento de diminuição da velocidade, tanto a mínima quanto a máxima, com o aumento da frequência, apontando para a maior sensibilidade de detecção de deteriorações em frequências mais elevadas. Este comportamento é evidenciado pela diminuição crescente da faixa de velocidade de maior valor (cor mais escura).

O mesmo comprometimento geral da peça é mostrado nas imagens geradas pelas medições das faces BD (Figura 4.15). No entanto, para os ensaios realizados nesta face a peça parece estar menos afetada na borda superior direita. Verifica-se, também, que o transdutor de face exponencial indicou maior nível de deterioração na medição BD do que na medição AC (Figura 4.15). Esse resultado pode ser entendido a partir da análise da Figura 4.16, que mostra o histograma das velocidades obtidas neste ensaio, no qual apenas 6 valores de velocidade foram superiores a 750 m.s^{-1} . Estes valores foram suplantados pelos demais, muitos deles iguais a zero, que correspondem a locais onde não foi possível efetuar medição.

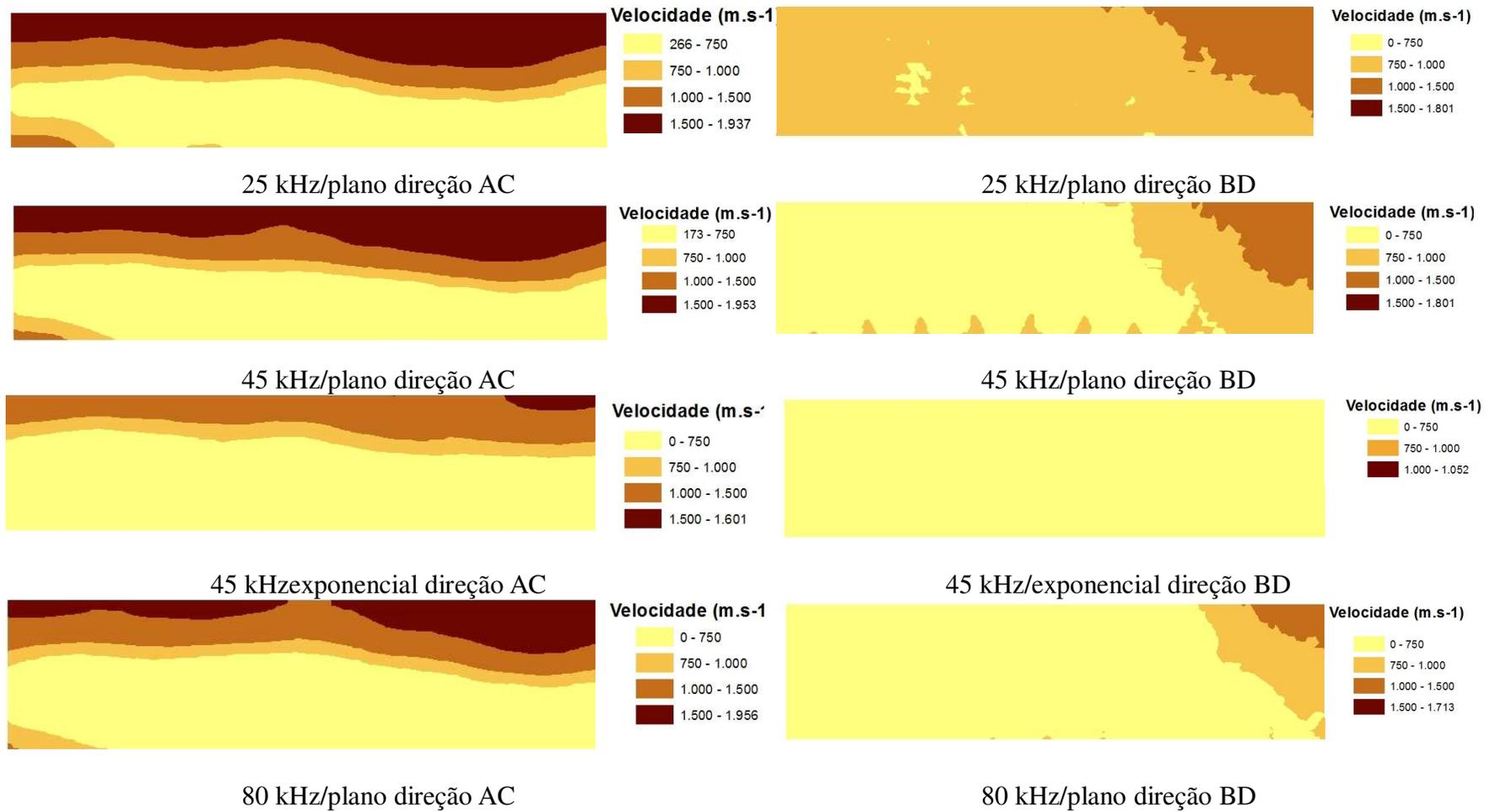


Figura 4.15: Tomografia ultrassônica do ensaio direto perpendicular a fibra da Peça 3.

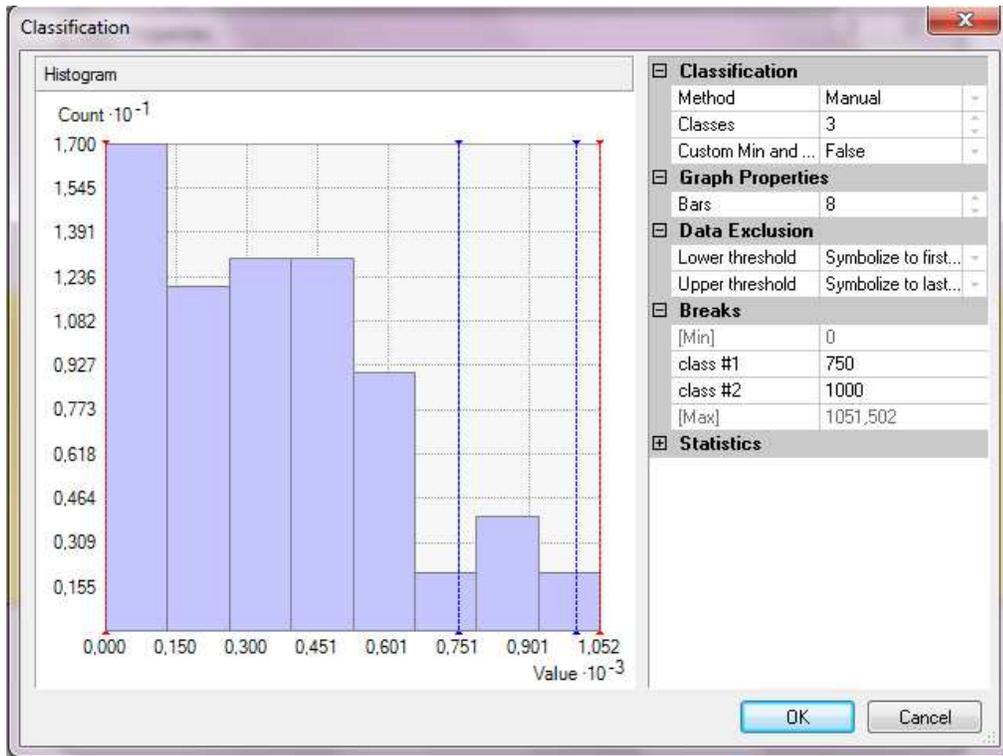


Figura 4.16: Histograma das velocidades obtidas na medição direta perpendicular a grã, direção AC, peça 3, com transdutor de 45 kHz de faces exponenciais.

Apesar das variações de velocidade obtidas nas diferentes frequências de transdutores, a interpretação de qualquer das imagens indicaria que a peça está comprometida em toda a sua extensão, não sendo viável sua manutenção na estrutura. Não seria necessário avaliar com outro método se a parte superior ou superior direita estaria em boas condições, já que a área comprometida seria muito grande para permitir intervenção na peça.

As imagens das seções (Figura 4.17) e as dimensões das deteriorações (Tabela 4.9) confirmam os resultados da tomografia ultrassônica. As seções 8, 9 e 10 apresentam o oco parcialmente coberto, o que pode ter contribuído para o aumento da faixa de velocidade nas faixas da extremidade direita da peça.



Figura 4.17: Fotos das 11 seções cortadas longitudinalmente da Peça 3.

Tabela 4.9: Área e Perímetro das regiões degradadas e ocadas na Peça 3 para cada seção.

Seção	Área (mm ²)	Perímetro (mm)	Observação
1	22965	765,16	Região ocada
2	29192	954,61	Região ocada
3	29920,8	807,36	Região ocada
4	24722,6	972,21	Região ocada
5	25092	792,88	Região ocada
6	28651,1	996,78	Região ocada
7	22427,1	993,88	Região ocada
8*	20775,7	811,21	Oco parcialmente coberto
9*	18016,5	824,13	Oco parcialmente coberto
10*	16027,9	1031,1	Oco parcialmente coberto
11	15673,8	1451,17	Região ocada
Média	23042,23	945,50	
CV (%)	22,04	20,52	

4.2.2.4. Peça 4

As imagens geradas pelas diferentes frequências de transdutores e nas diferentes direções de medição (AC e BD) nesta peça (Figura 4.18), indicam, em geral, velocidades superiores à 1500 m.s^{-1} . Velocidades da ordem de 1000 m.s^{-1} aparecem nas imagens utilizando o transdutor exponencial (Figuras 4.18), principalmente na borda esquerda.

O uso das imagens de tomografia ultrassônica indicam que esta peça é a mais íntegra dentre as inspecionadas, resultado compatível com a análise visual.

As imagens das seções (Figura 4.19) também confirmam os resultados da tomografia ultrassônica, evidenciando que a peça está íntegra. Os valores um pouco mais baixos de

velocidade apontados pelo transdutor exponencial podem ter sido causados pela presença da medula na seção 1 (Figura 4.19).

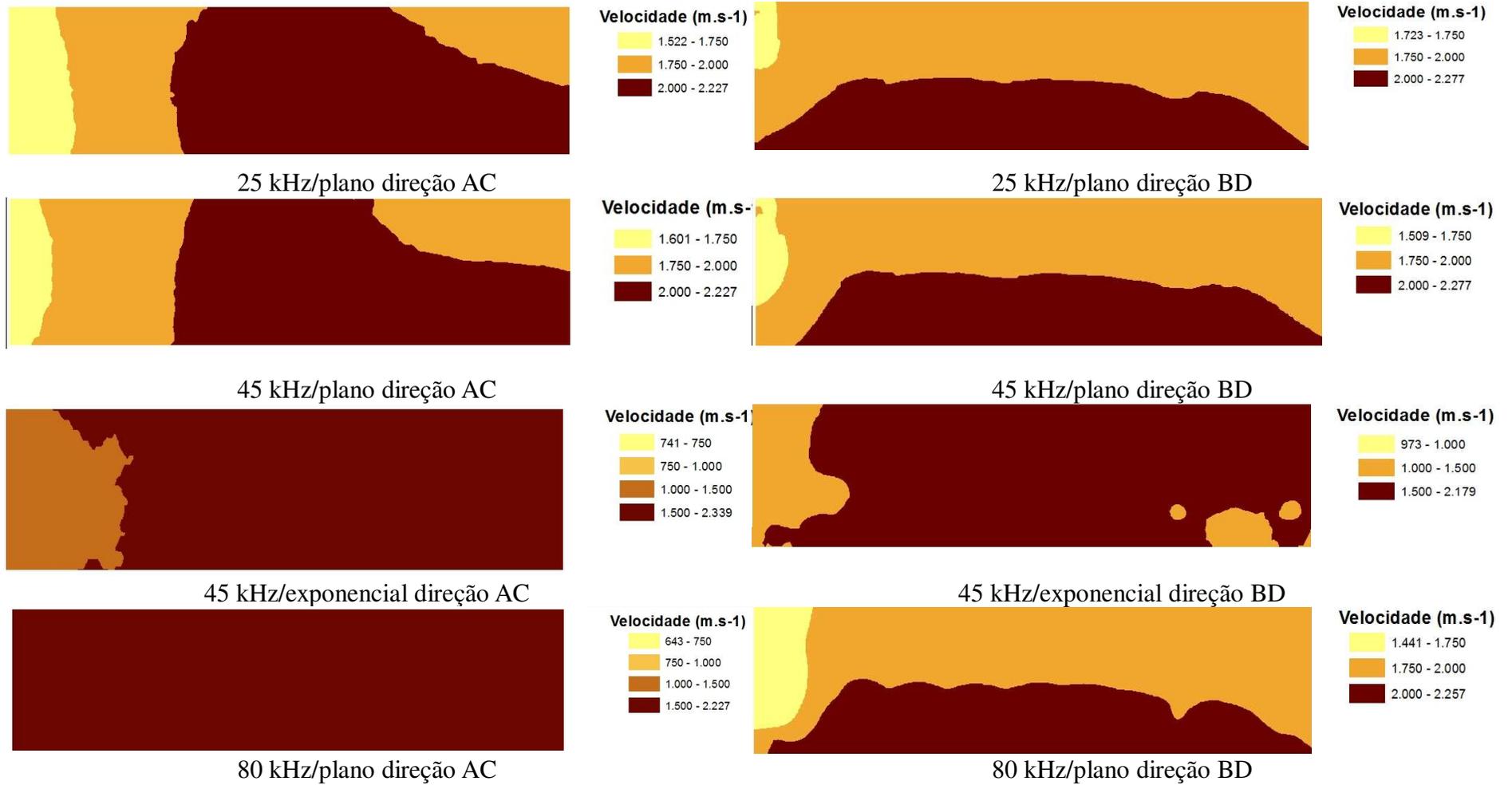


Figura 4.18: Tomografia ultrassônica do ensaio direto perpendicular a fibra da Peça 4.

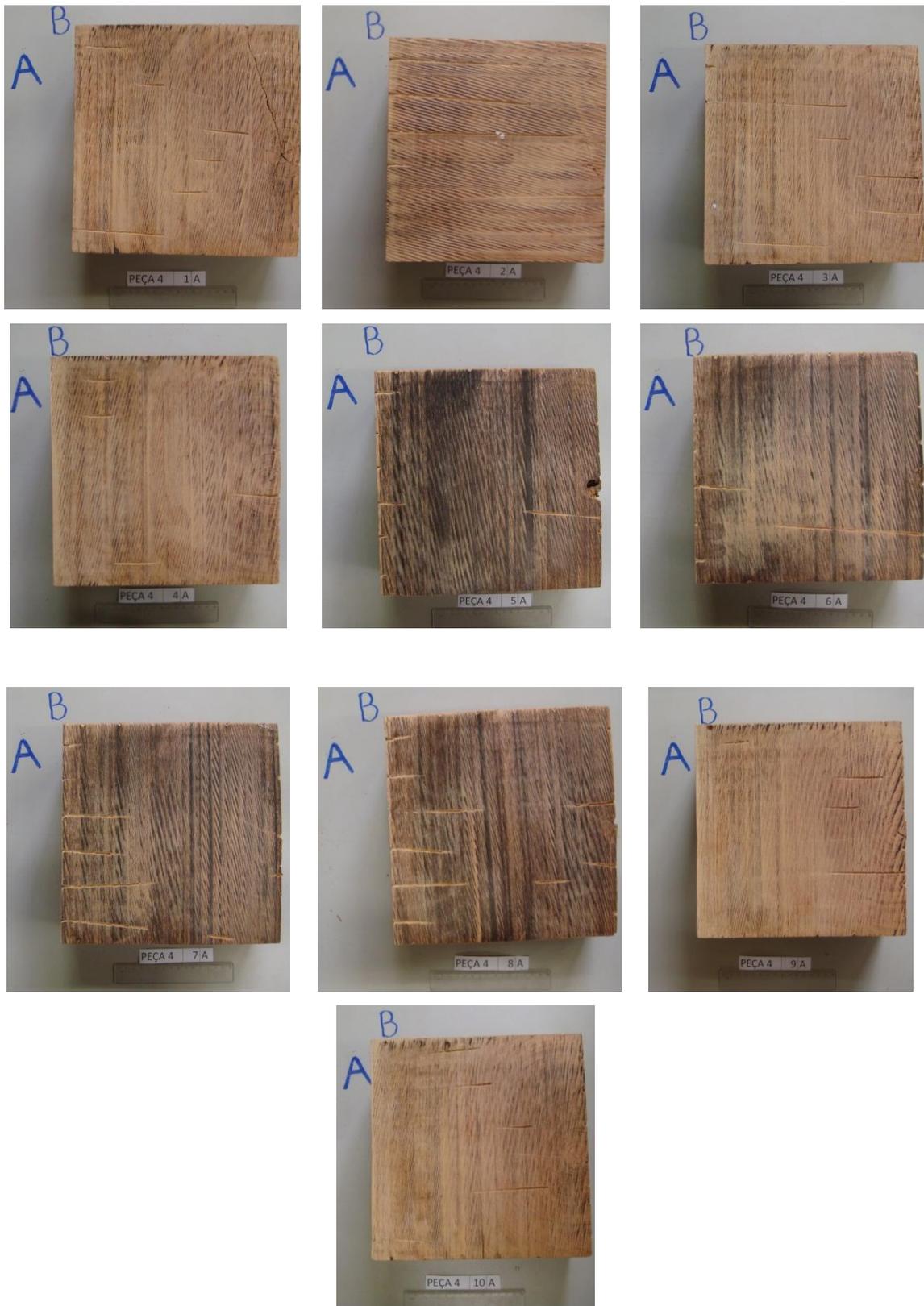


Figura 4.19: Fotos das 11 seções cortadas longitudinalmente da Peça 4.

4.2.3 Medições Indiretas variando a distância entre os transdutores

4.2.3.1 Análise da conversão da onda

Conforme foi visto na revisão bibliográfica, medições indiretas são muito utilizadas em inspeções de estruturas. No caso deste tipo de medição o objetivo não é a construção da imagem da peça (tomografia ultrassônica), mas sim a inspeção por meio da análise da velocidade. A análise dos resultados deste tipo de medição é, muitas vezes, realizada utilizando velocidades padrão adotadas para ensaios diretos, como por exemplo a faixa de valores de velocidades longitudinais (paralelas à grã) indicativa de madeira em boas condições (5000 a 6000 m.s⁻¹). No entanto, na medição indireta a onda é superficial, com propagação diferente da onda longitudinal (Wang, 2007) e a conversão da onda superficial em longitudinal (Bartholomeu *et al.*, 2003) é dependente da relação entre o comprimento de percurso (L) e o comprimento de onda (λ). Além disso, quando os transdutores estão muito espaçados um do outro pode haver a dispersão da onda (Bertoldo *et al.*, 2013).

Desta forma, a discussão apresentada neste item teve como objetivo avaliar os resultados do uso de ondas de superfície em inspeção, utilizando para isso a Peça 4. Esta peça foi adotada para que não fossem introduzidas variáveis adicionais (variação da velocidade em função de deteriorações) na discussão. A análise foi realizada com os resultados dos ensaios realizados nas 4 faces (A, B, C e D – Figura 3.2) da peça.

Para os ensaios realizados na Face A, a velocidade aumenta com o aumento da distância entre os transdutores, mostrando que está sendo afetada pela relação L/λ (Figuras 4.20 a 4.23). Para o transdutor de 80 kHz o comportamento sofreu grandes variações à partir de $L/\lambda \cong 7$ (Figura 4.23). Esse comportamento deve estar relacionado com fenômenos de dispersão da onda. Considerando o comprimento de onda na frequência de 80 kHz (aproximadamente 60 mm), o trecho L/λ de 8 a 10 terá a onda passando pela seção 5 A, que tem um defeito na superfície (Figura 4.19). Esse defeito tem diâmetro de aproximadamente 40 mm, capaz, portanto, de afetar a propagação da onda de forma mais acentuada para o transdutor de 80 kHz do que para as demais frequências, cujos comprimentos de onda são superiores (aproximadamente 100 mm para o transdutor de 45 kHz e 200 mm para o transdutor de 25 kHz).

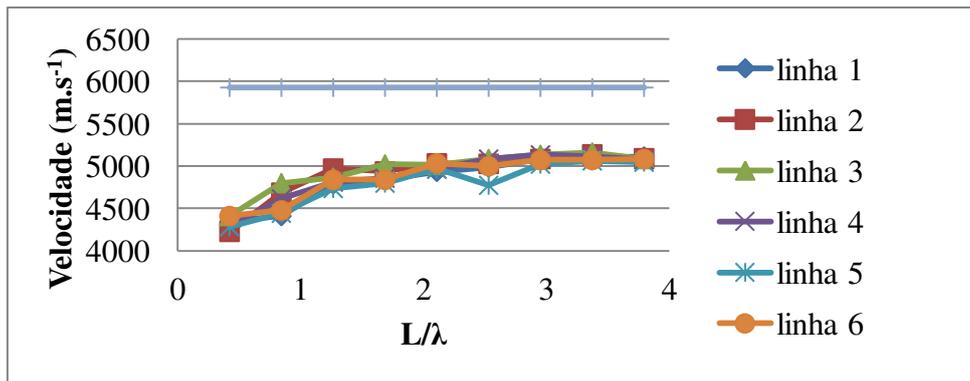


Figura 4.20: Ensaio indireto a distância variável, face A, 25kHz.

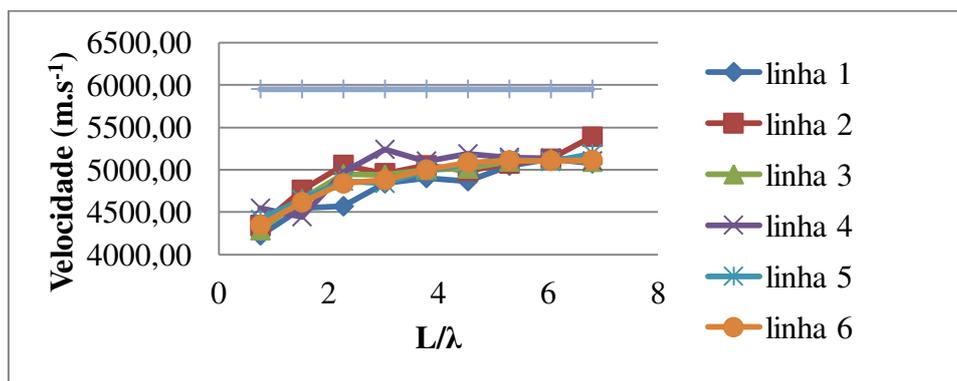


Figura 4.21: Ensaio indireto a distância variável, face A, 45kHz.

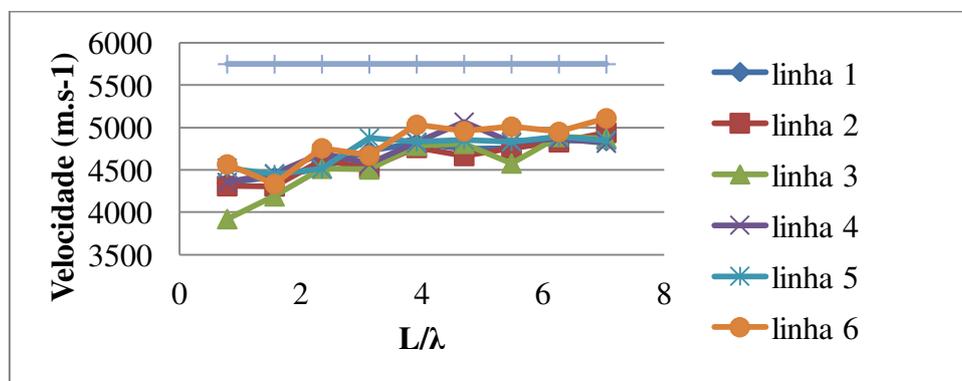


Figura 4.22: Ensaio indireto a distância variável, face A, 45kHz exponencial.

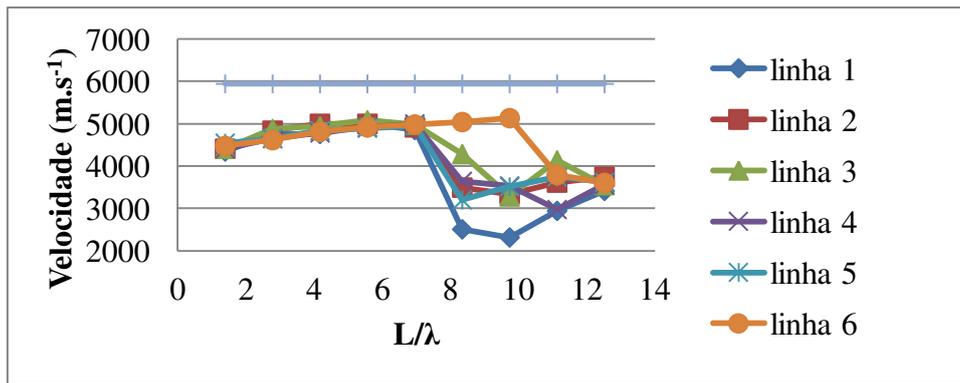


Figura 4.23: Ensaio indireto a distância variável, face A, 80kHz.

A repetição do ensaio na Face B (Figuras 4.24 a 4.27) apresentou resultados aproximadamente iguais aos da Face A, mas as dispersões anteriormente observadas somente para o transdutor de maior frequência, foram também observadas para o transdutor de 45 kHz de faces exponenciais. Para o transdutor exponencial as dispersões ocorreram desde o início da peça e para o transdutor de 80kHz à partir de aproximadamente 4λ . Nesta face há um grande número de pequenas trincas que atingem quase toda a extensão da face (exemplificadas em algumas imagens na Figura 4.28), o que poderia explicar a dispersão para o transdutor exponencial, que tem ação pontual e poderia estar justamente passando por este defeito. Importante salientar que, na Figura 4.28 há marcas deixadas pela agulha do resistógrafo e que podem ser confundidas com as trincas mencionadas. Os ensaios de ultrassom foram realizados antes dos ensaios com o resistógrafo e, portanto, não foram afetados pelo furo da agulha.

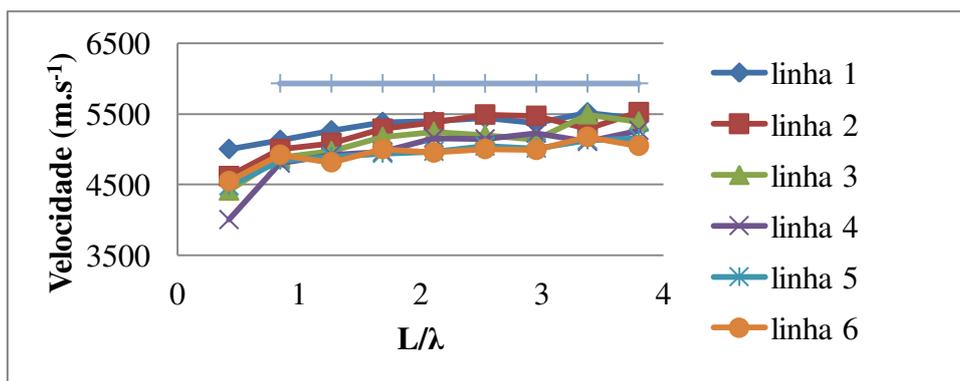


Figura 4.24: Ensaio indireto a distância variável, face B, 25kHz.

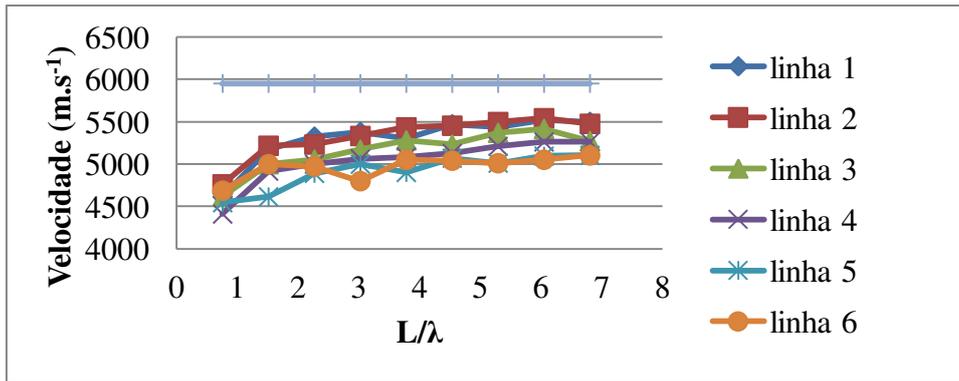


Figura 4.25: Ensaio indireto a distância variável, face B, 45kHz.

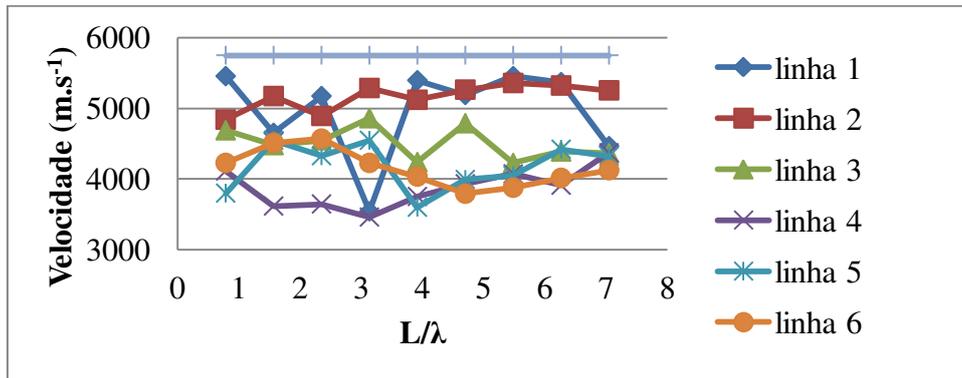


Figura 4.26: Ensaio indireto a distância variável, face B, 45kHz exponencial.

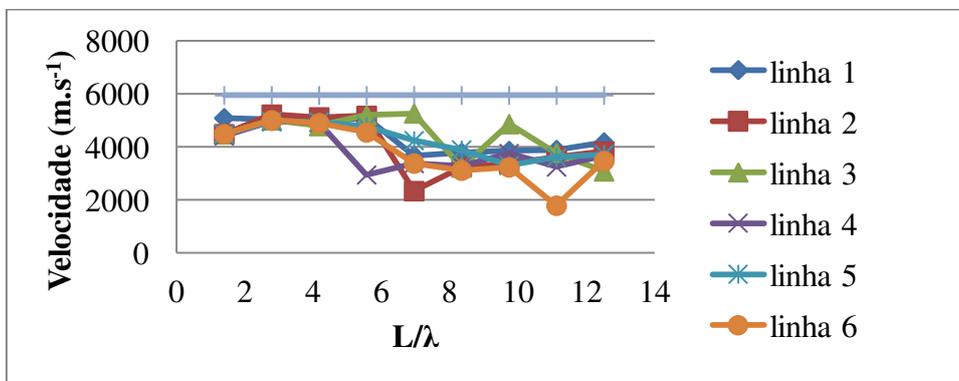


Figura 4.27: Ensaio indireto distância variável, face B, 80 kHz.

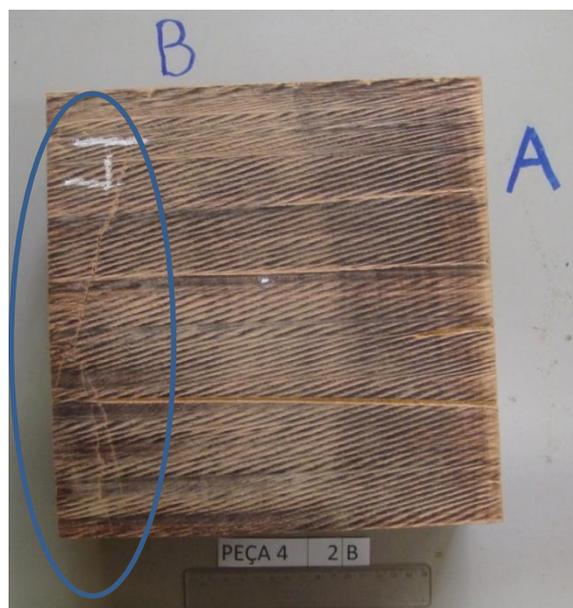
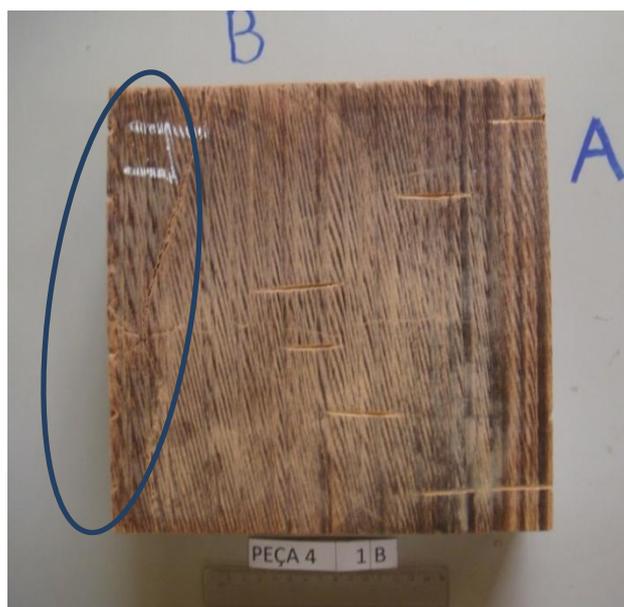


Figura 4.28: Imagens das seções da Peça 4 com presença de trincas superficiais.

Para a Peça 4 a Face C (Figura 3.2) foi a única que apresentou defeitos captados pela análise visual (antes do corte das seções). A maior parte dos defeitos se encontrava ao longo da linha 4 (Figura 4.4). Nos ensaios indiretos (Figuras 4.29 a 4.32) observou-se que, para todas as frequências, a linha 4 apresentou interferências na velocidade, mas as interferências também ocorreram em outras linhas (sem defeitos detectados na análise visual). As linhas 1 e 2 foram as que sofreram as menores interferências para todas as frequências, exceto para 80 kHz cujo comportamento

apresenta interferências em todas as faces. Nestas duas linhas também se observou boa aproximação dos valores da velocidade obtida de forma direta e indireta.

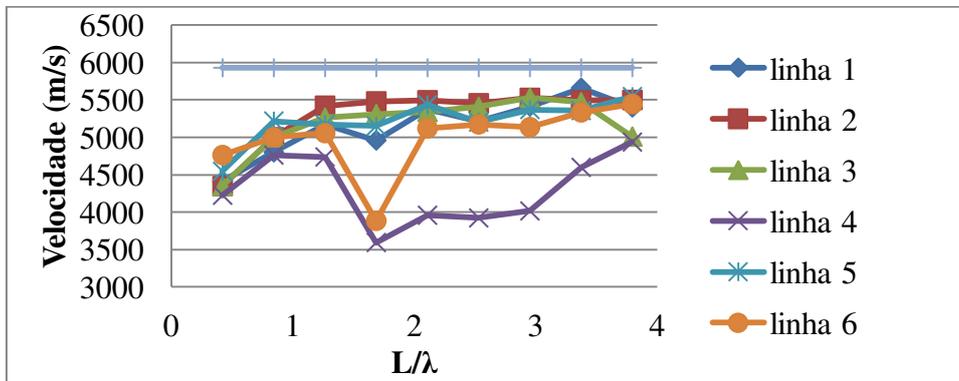


Figura 4.29: Ensaio superficial, a distância variável, face C, 25kHz.

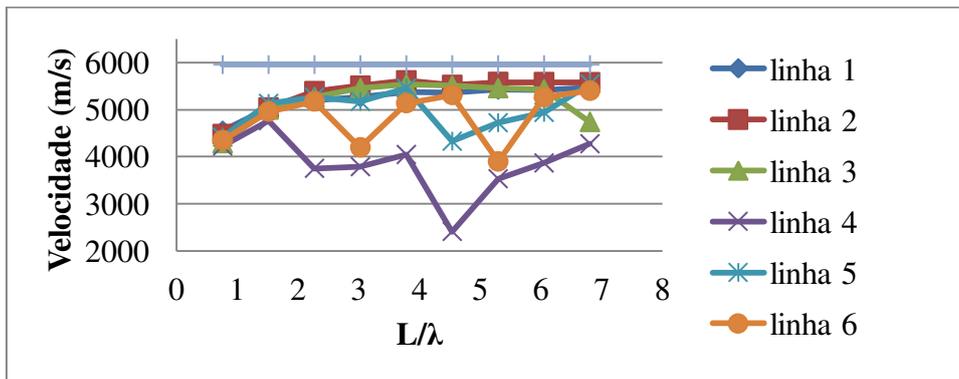


Figura 4.30: Ensaio superficial, a distância variável, face C, 45kHz.

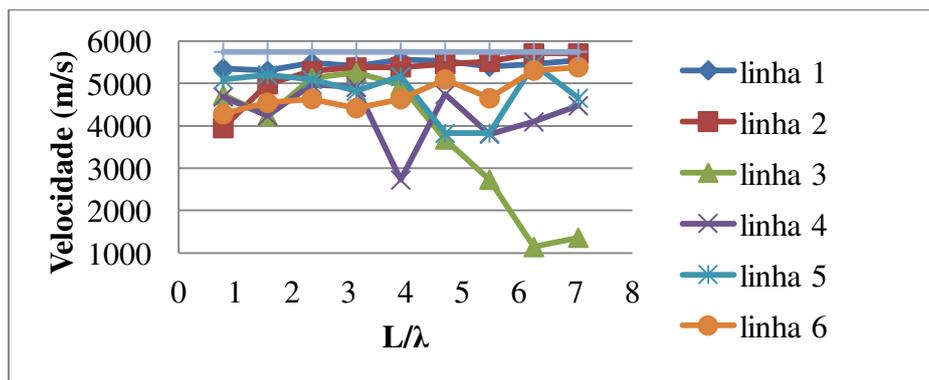


Figura 4.31: Ensaio superficial, a distância variável, face C, 45kHz exponencial.

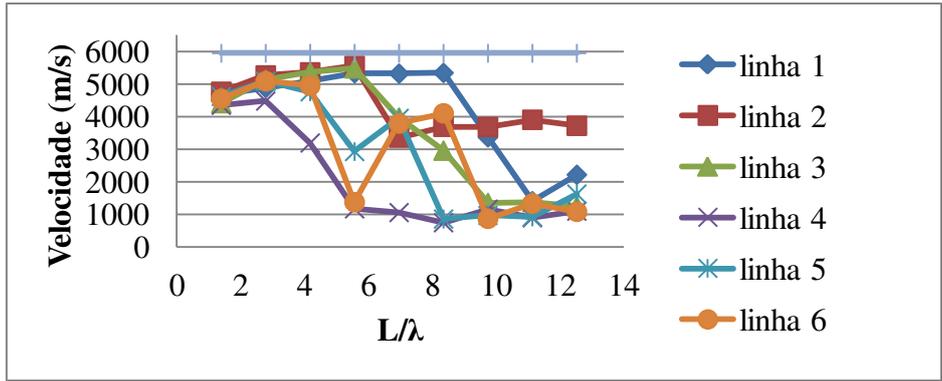


Figura 4.32: Ensaio superficial, a distância variável, face C, 80 kHz.

Os resultados dos ensaios na Face D foram bem próximos aos obtidos na Face A, com aumento da velocidade em função do aumento da relação L/λ e maiores interferências para o transdutor de 80 kHz (Figuras 4.33 a 4.36).

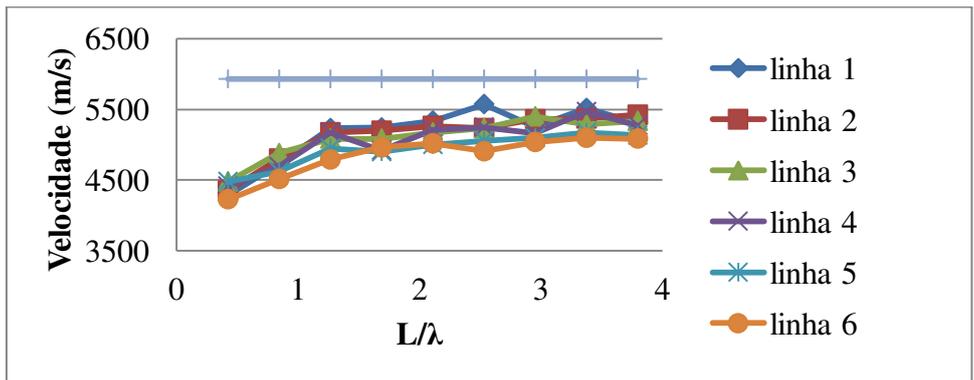


Figura 4.33: Ensaio superficial, a distância variável, face D, 25kHz.

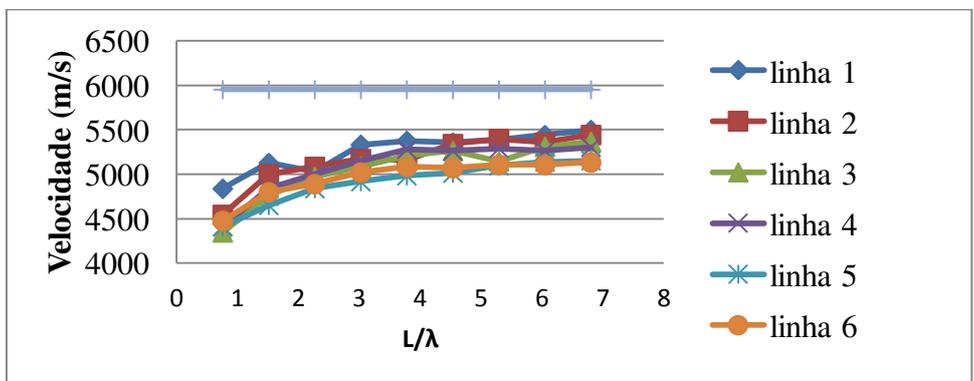


Figura 4.34: Ensaio superficial, a distância variável, face D, 45kHz.

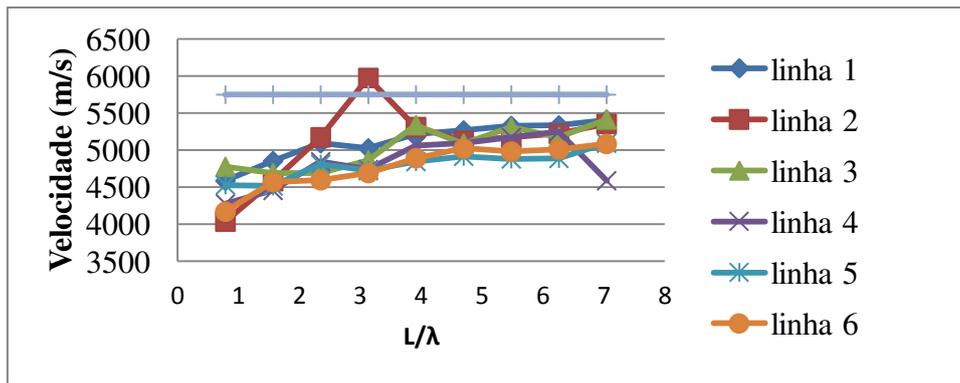


Figura 4.35: Ensaio superficial, a distância variável, face D, 45kHz exponencial.

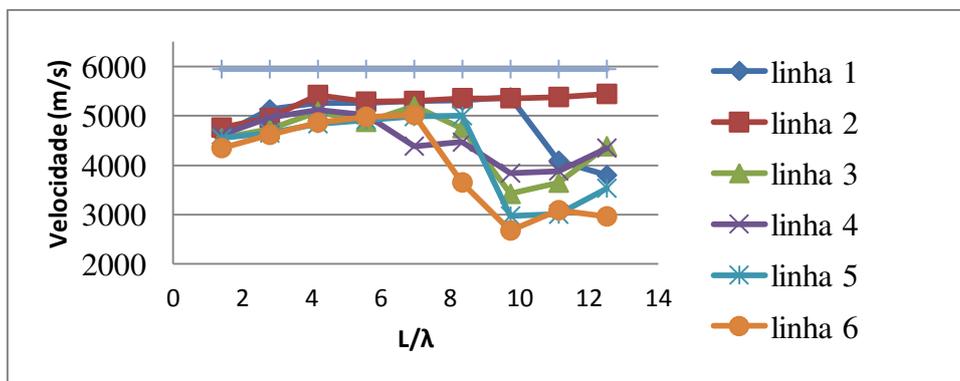


Figura 4.36: Ensaio superficial, a distância variável, face D, 80 kHz.

Os resultados dos ensaios indiretos superficiais com variação da distância entre os transdutores mostrou que, para nenhuma das frequências ou distâncias entre transdutores as velocidades obtidas de forma indireta se aproximaram da velocidade média do ensaio direto paralelo à grã. Esse resultado comprova que é necessário muito cuidado ao realizar ensaios indiretos e usar comparações de velocidade com as obtidas em ensaios diretos para concluir a respeito da condição da madeira.

Se estes resultados estivessem sendo utilizados em uma inspeção, a conclusão correta a respeito da condição da peça, que está íntegra, seria possível somente para distâncias entre transdutores superiores a $\cong 4\lambda$, pois neste caso as velocidades atingiram cerca de 85% do valor da velocidade direta longitudinal, estando por volta de 5000 a 5500 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ que é faixa de velocidade longitudinal paralela às fibras indicativa de madeira íntegra.

4.2.3.2 Medições indiretas com distância variável entre os transdutores em inspeção

De acordo com a discussão anterior, as velocidades mais próximas das obtidas de forma direta, por não estarem afetadas pela distância entre os transdutores, são as obtidas à partir comprimentos de percurso de cerca de 4λ . Distâncias menores podem indicar velocidades menores não pela presença de defeitos, mas pela forma de propagação da onda. Assim, neste item, a avaliação do uso das medições indiretas com distância variável dos transdutores será realizada considerando os resultados para distâncias entre transdutores maiores do que 4λ (Tabela 4.10).

Tabela 4.10: Distância mínima entre transdutores para uso da medição indireta.

Frequência do transdutor	Comprimento de onda	Distância mínima entre
kHz	aproximado	os transdutores
	mm	mm
25	200	800
45	100	400
80	70	300

4.2.3.2.1 Peça 1

Essa peça apresentou, na análise visual, maior número de defeitos na Face A (Tabela 4.1 e Figura 4.1), linhas 3, 4 e 5.

O uso das velocidades obtidas com o transdutor de 25 kHz (Figura 4.37), para espaçamentos maiores que 800 mm, não indicaria problemas com essa peça, já que as velocidades estão na faixa de 5000 a 6000 m.s^{-1} . Na Face A, a queda de velocidade é consistente com os defeitos visuais nas linhas 4 e 5 e, também, com a imagem da seção 9, cujo defeito se aproxima da superfície (Figura 4.12). No entanto, considerando a condição real da Peça 1 (Figura 4.12), o resultado desta inspeção não seria adequado, indicando que o alcance foi apenas superficial, não chegando às zonas internas afetadas.

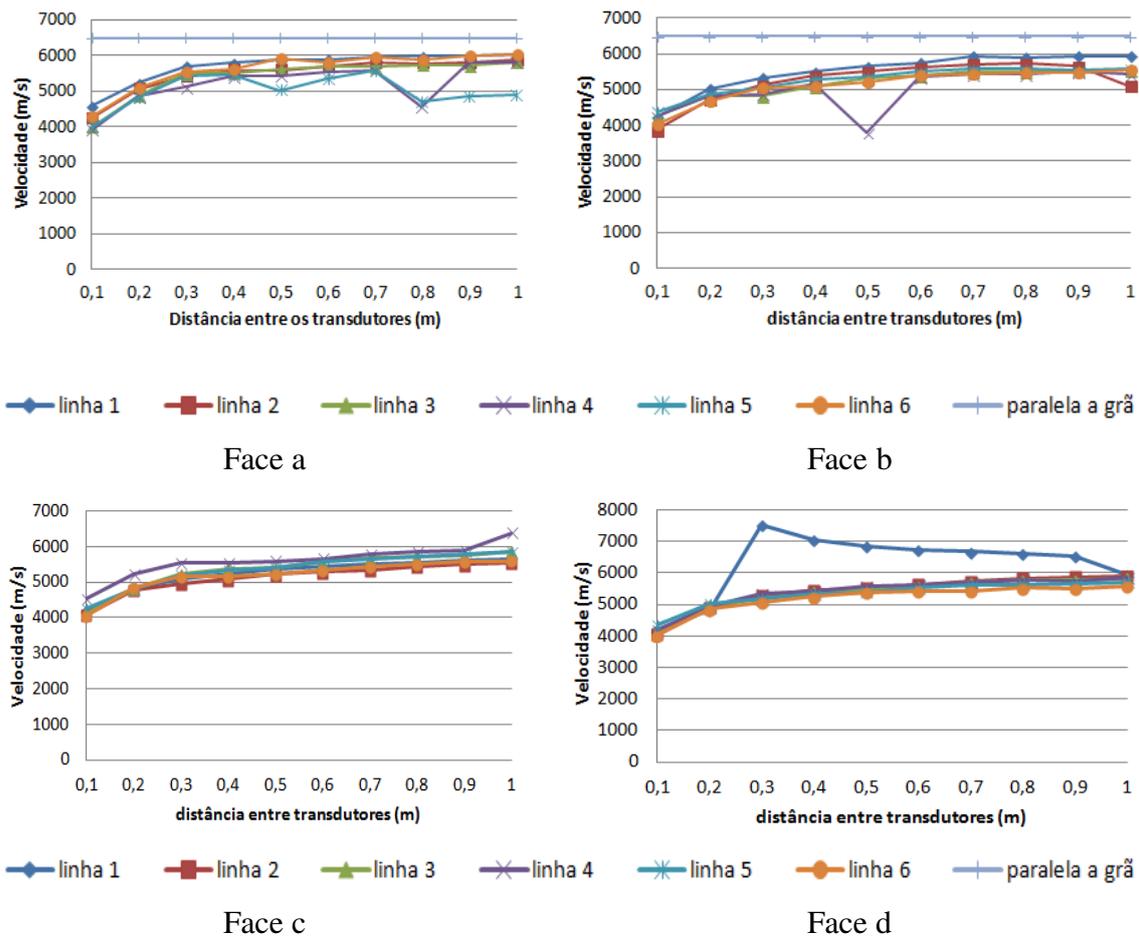


Figura 4.37: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 1 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 25 kHz.

Para o transdutor de 45 kHz os resultados de velocidade (Figura 4.38) também não destacam problemas na peça, repetindo-se a queda de velocidade nas Faces A (linha 9) e B (Linha 6), que nesse caso seria considerada, por estar na zona de distância entre transdutores aceitável para essa frequência (maior que 400 mm). Na imagem da seção 6 (Figura 4.12) se verifica um defeito também próximo da borda. Da mesma forma que para o transdutor de 25 kHz o resultado da inspeção baseado neste ensaio não seria adequado.

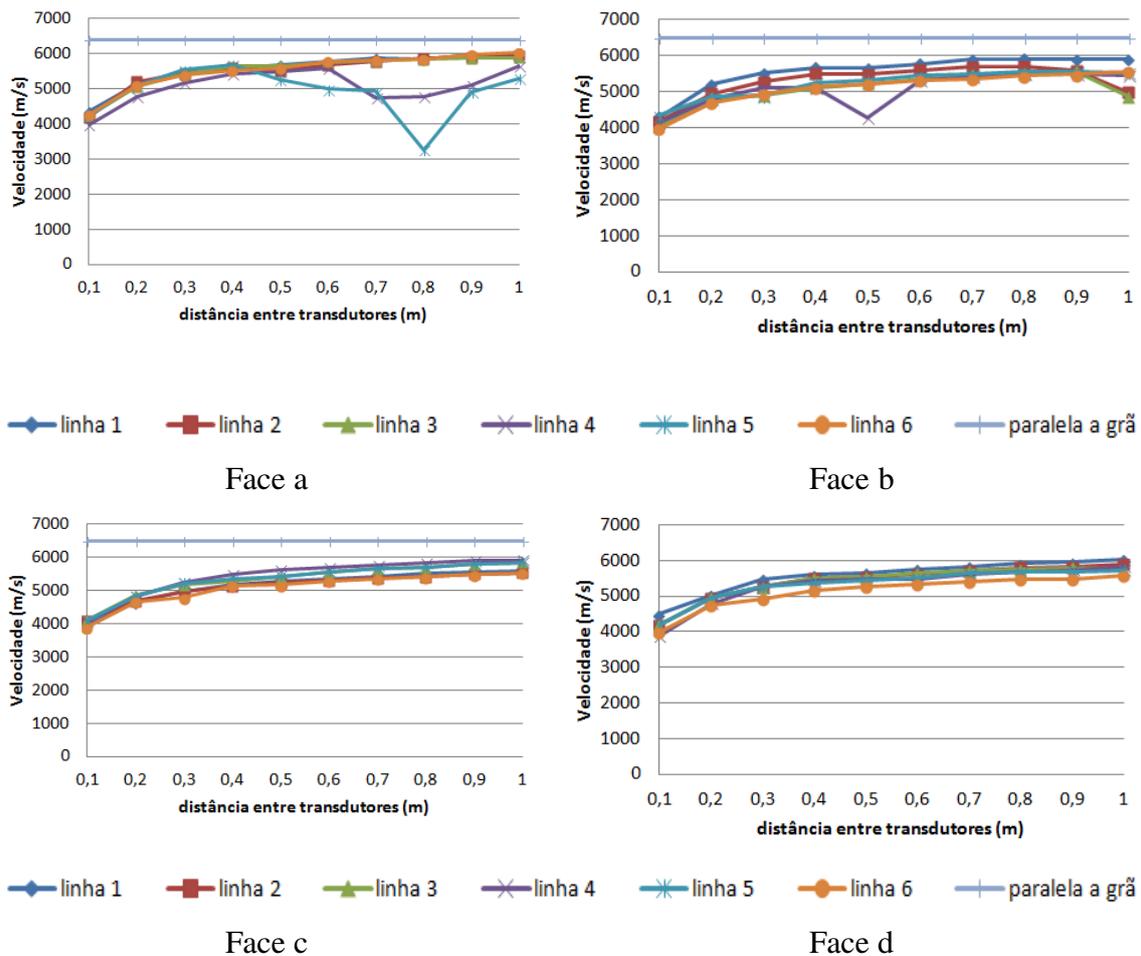


Figura 4.38: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 1 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz.

O transdutor de 45 kHz de faces exponenciais apresenta sensibilidade um pouco maior que os dois anteriores, detectando algumas velocidades (Figura 4.39) baixas em pontos não detectados nas demais frequências. Na Face A, linha 2, há cerca de 600 mm a velocidade caiu para 3000 m.s^{-1} . Nas faces C e D também aparecem velocidades mais baixas (3000 e 4000 m.s^{-1}), as quais não tinham sido detectadas com as frequências anteriormente discutidas. Apesar da maior sensibilidade, os resultados da inspeção não indicam o nível correto de deterioração da peça, mostrando que a varredura foi também somente superficial, não atingindo as zonas internas mais deterioradas.

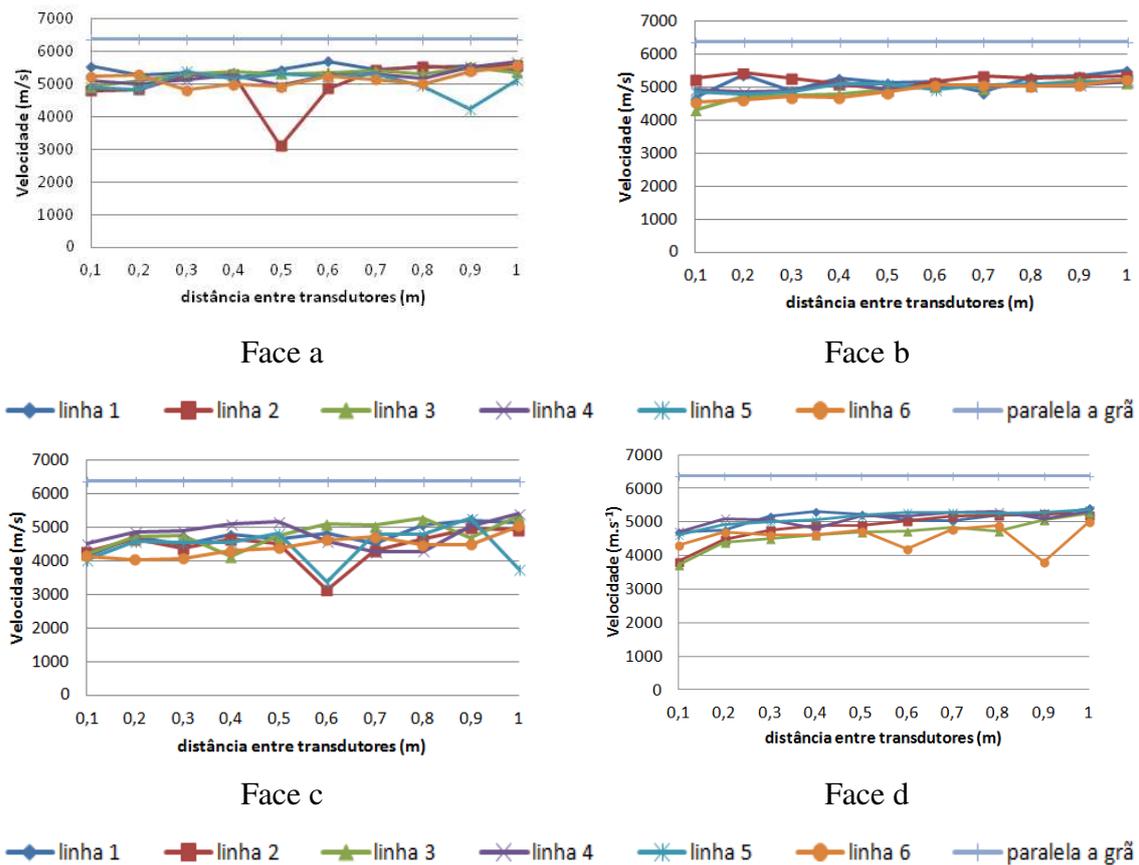


Figura 4.39: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 1 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz face exponencial

O transdutor de 80 kHz foi o único capaz de indicar, por meio das velocidades (Figura 4.40) que a peça não apresentava somente deteriorações pontuais, mas que havia comprometimento em toda a sua extensão. As velocidades atingiram patamares de $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, indicativo de graves deteriorações ou ocos. Na Face C as velocidades foram menos afetadas, sendo este resultado compatível com as imagens das seções (Figura 4.12) que mostra que os ocos/deteriorações estão mais distantes desta face. Esse resultado confirma a fragilidade deste método de medição por atingir apenas camadas superficiais.

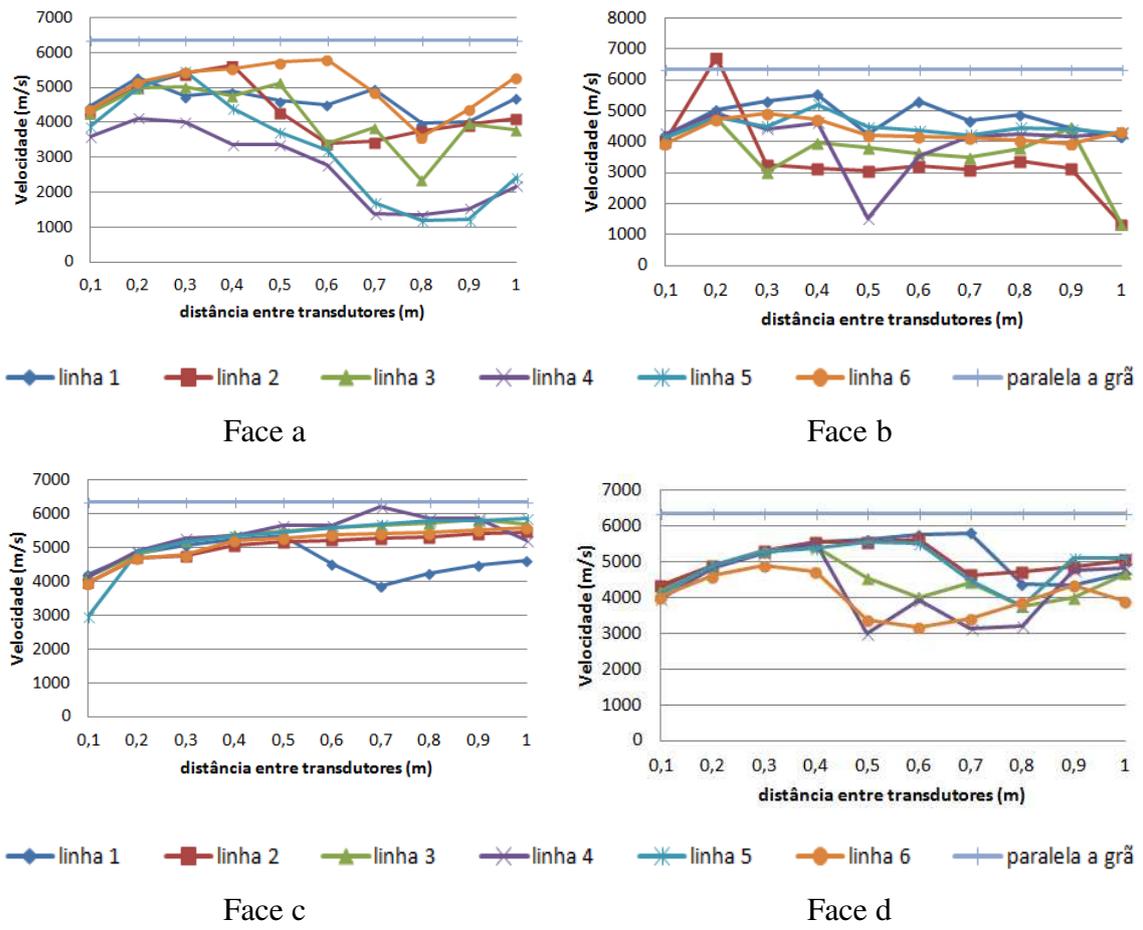


Figura 4.40: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 1 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 80 kHz.

4.2.3.2.2 Peça 2

A exceção de um oco na extremidade, esta peça está íntegra. Os resultados de velocidade na Face A confundiriam a inspeção para todos os transdutores, principalmente na frequência de 80 kHz (Figuras 4.41 a 4.44). Avaliação das fotos das seções (Figura 4.14) mostra que a face A continha a medula, além de pequenas trincas, que provavelmente são responsáveis pela obtenção de valores de velocidade baixos. Por outro lado, na extremidade onde ocorre o oco somente os transdutores de 45 kHz de faces exponenciais e de 80 kHz apresentam redução de velocidade, principalmente na face D, realmente mais próxima do oco. Esse resultado mostra outra grande deficiência do método, pois pequenos defeitos superficiais podem afetar os resultados e confundir a inspeção, possibilitando diagnósticos equivocados.

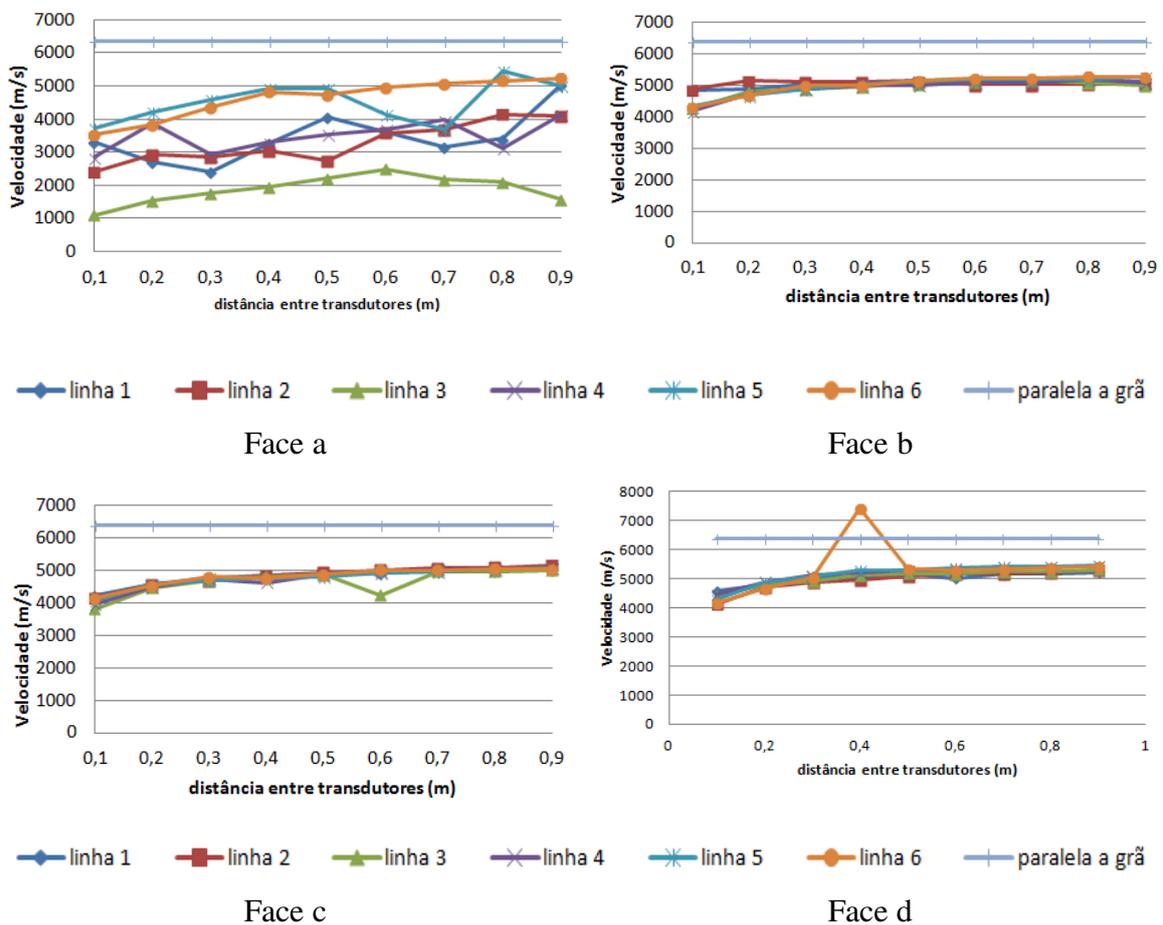


Figura 4.41: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 2 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 25 kHz.

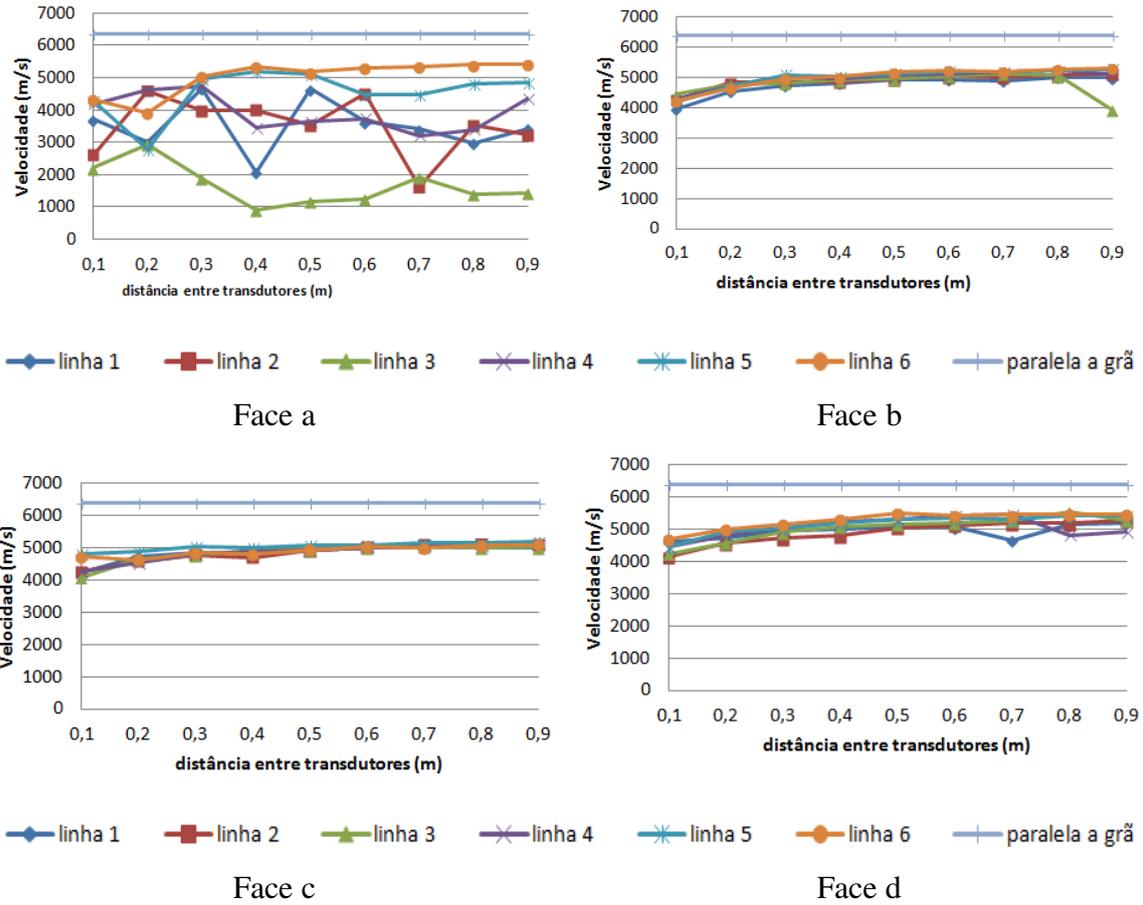


Figura 4.42: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 2 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz.

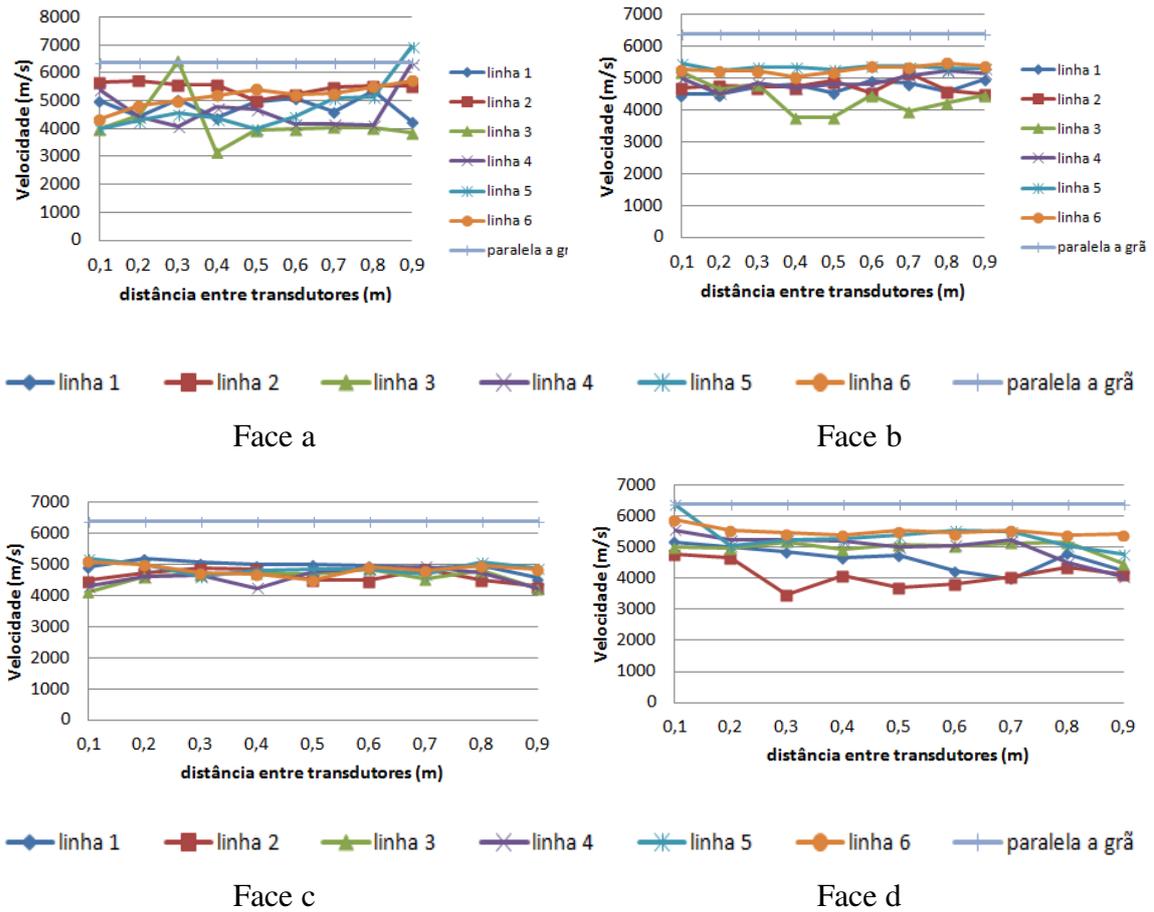


Figura 4.43: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 2 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz face exponencial.

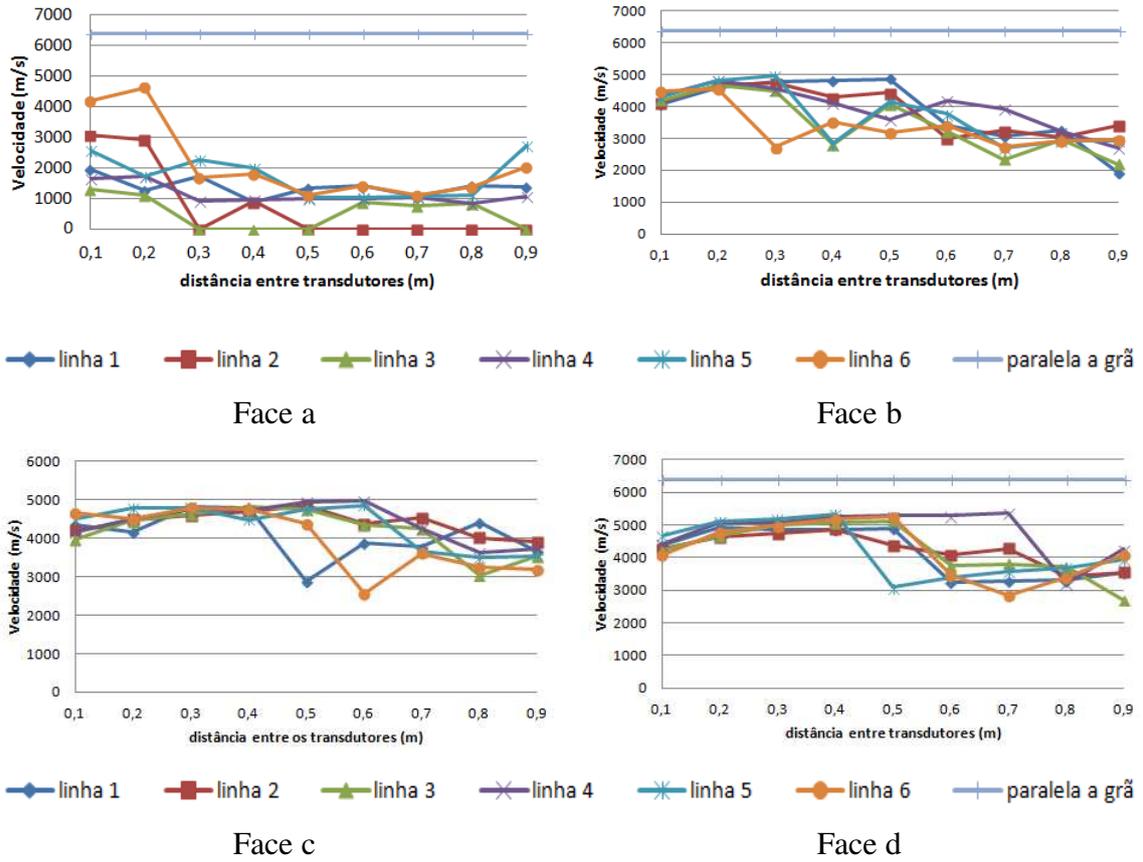


Figura 4.44: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 2 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 80 kHz.

4.2.3.2.3 Peça 3

Para o transdutor de 25 kHz os resultados dos ensaios neste pilar mostram que, nas faces A e B as velocidades estão no intervalo 5000 a 6000 m.s⁻¹, o que indicaria que o pilar está íntegro (Figura 4.45). Para a face C as linhas 1, 5 e 6 também apresentam velocidade no intervalo de peça íntegra, enquanto as demais apresentam redução de velocidade para cerca de 4000 m.s⁻¹. Na face D as velocidades se reduziram (entre 3000 e 4000 m.s⁻¹) apenas na linha 3. Esses resultados mostram que nesta frequência a onda foi bem superficial, não atingindo efetivamente o oco em todas as faces, mas somente naquela onde o oco está mais próximo da superfície como é o caso da face D (Figura 4.17).

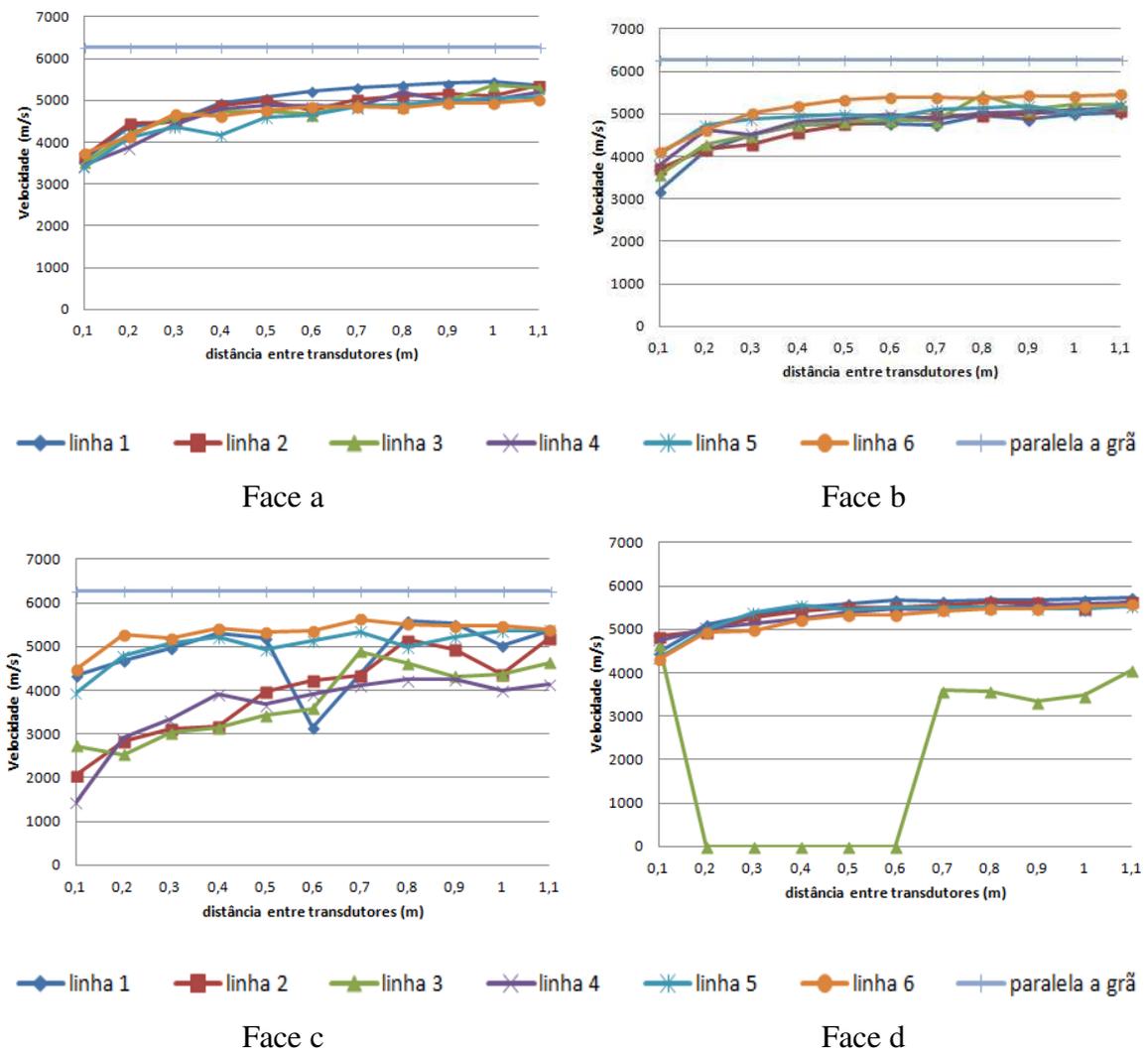


Figura 4.45: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 3 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 25 kHz.

O comportamento da velocidade (a partir de 400 mm) do transdutor de 45 faces

planas foi muito semelhante ao obtido com o transdutor de 25 kHz, mas apresentou mais sensibilidade na detecção de problemas na peça pois, além da queda acentuada na face D - linha 3, e moderada na face C – linhas 2,3 e 4, há várias linhas com velocidades menores do que 5000 m.s^{-1} também nas faces A e B (Figura 4.46).

O transdutor de 45 kHz de faces exponenciais mostrou sensibilidade ainda maior na variação da velocidade, mas como os demais, as maiores variações de velocidade ocorreram nas faces C e D (Figura 4.47).

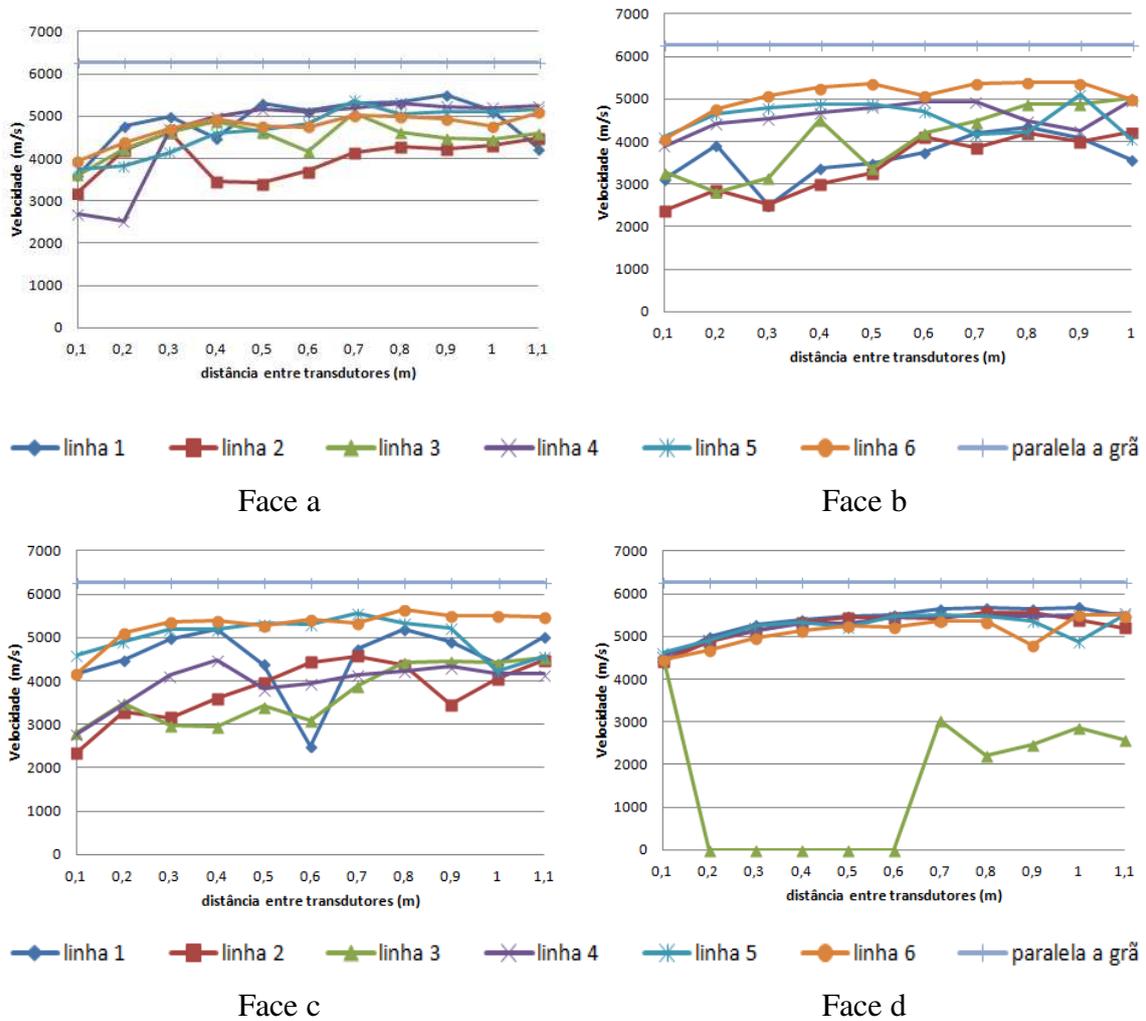


Figura 4.46: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 3 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz – faces planas.

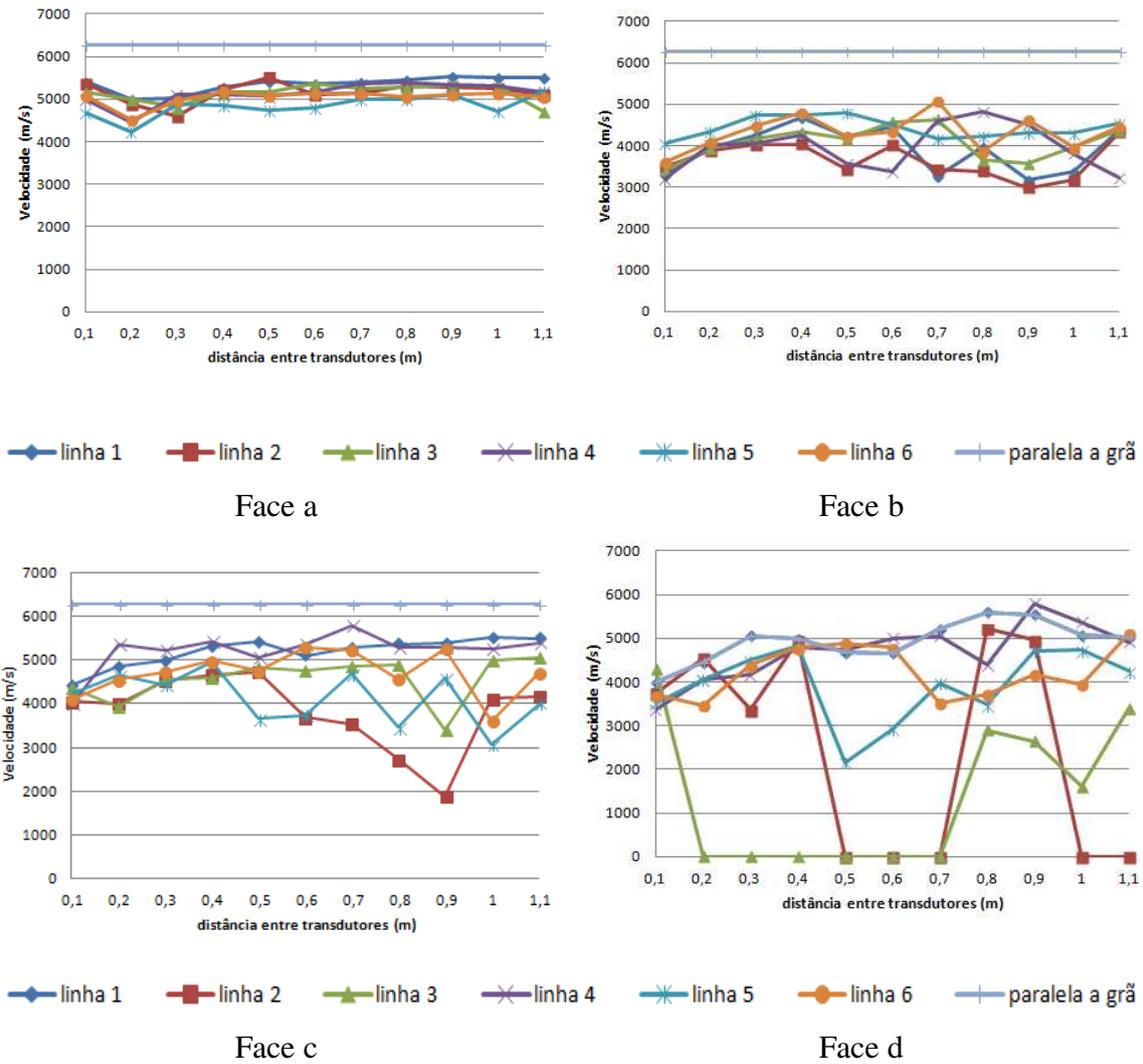


Figura 4.47: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 3 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 45 kHz – faces exponenciais.

Para o transdutor de 80 kHz são esperadas velocidades se propagando de forma mais semelhante com a longitudinal a partir de cerca de 300 mm. Os resultados de velocidade (a partir de 300 mm), embora com grandes variações que dificultam a análise, indicam de forma clara que a peça está toda comprometida por deteriorações ou ocos, já que as velocidades em todas as linhas de medição são inferiores a $5000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 4.48).

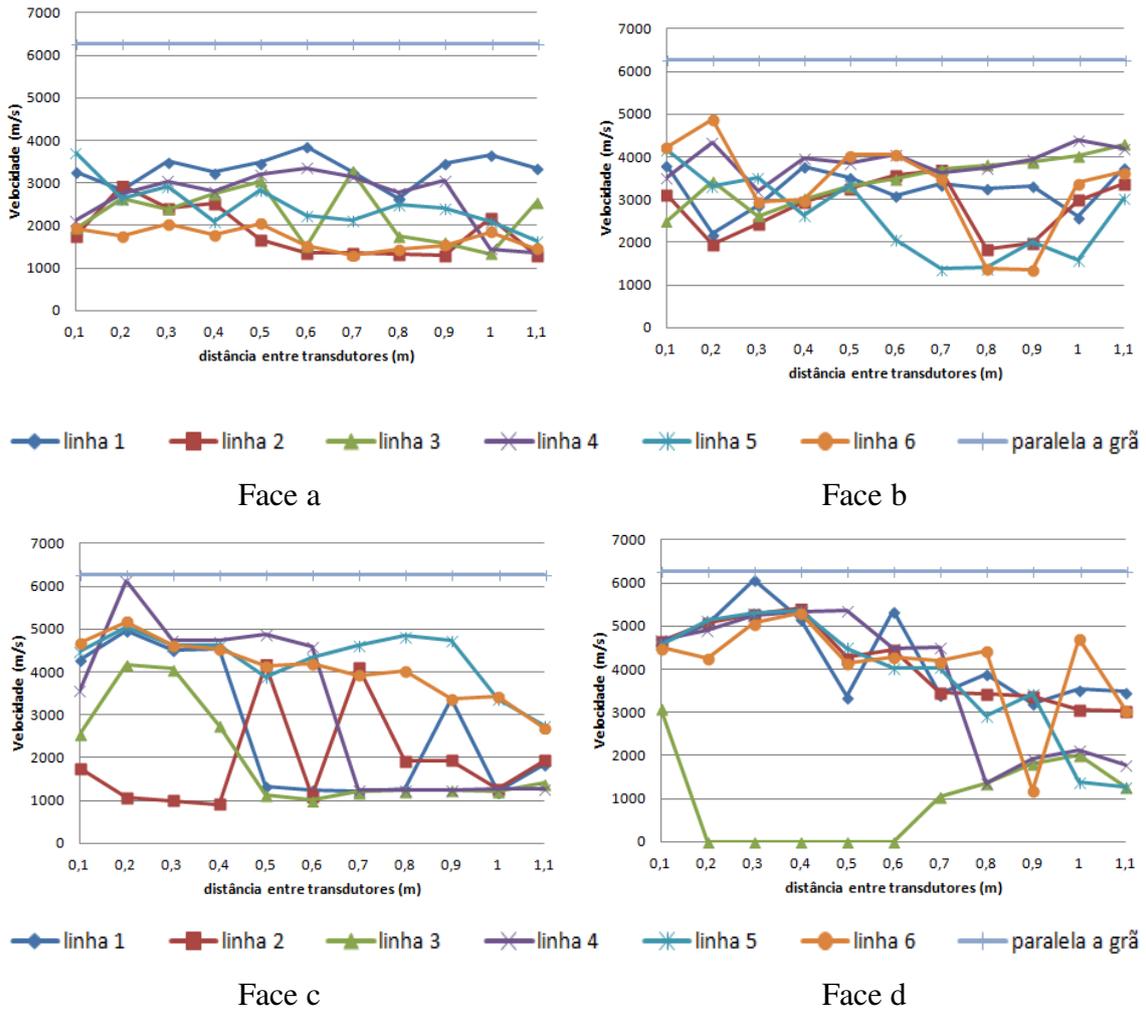


Figura 4.48: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos nas 4 faces da Peça 3 variando-se a distância entre os transdutores. Transdutor de frequência 80 kHz – faces planas.

4.2.3.2.4 Peça 4

A Peça 4, que assim como a Peça 2 está íntegra, já foi tema de discussão no item 4.2.3.1. Embora naquele item o objetivo da discussão tenha sido a comparação da velocidade superficial com a velocidade obtida de forma direta, ambas na direção paralela às fibras, os resultados também mostraram que pequenos defeitos superficiais afetaram os resultados e confundiram a inspeção, como ocorreu na Peça 2.

4.2.4. Medições Indireta a distância fixa entre os transdutores

Neste ensaio foram realizadas, aproximadamente, 11500 medições (4 peças, 4 faces por peça, 4 frequências por face, 60 pontos de medição por face, três medições para cada ponto). Esse ensaio apresenta os mesmos pontos fracos já destacados no item anterior, pois as velocidades podem ser afetadas por pequenos defeitos superficiais e a varredura é, portanto, superficial.

Conforme discutido no item 4.2.3.1 é de se esperar que a proximidade dos transdutores (100 mm) tenha como consequência a obtenção de velocidades mais baixas do que as obtidas de forma direta na direção paralela às fibras, porque o tipo de propagação é de onda superficial e não de onda longitudinal.

O objetivo deste tipo de medição é, usualmente, diagnosticar a posição de um defeito, já que como a distância entre transdutores é fixa, espera-se que na ausência de defeitos no percurso, a velocidade da onda se mantenha constante.

4.2.4.1 Peça 1

Para esta Peça, os defeitos internos estão mais próximos das Faces A e D (Figura 4.12). Além disso pode haver interferências dos defeitos superficiais nas faces propriamente ditos (discutidos na análise visual), afetando o acoplamento do transdutor, por exemplo. Na análise visual desta peça a Face A apresentava maior numero de defeitos superficiais (Tabela 4.1 e Figura 4.10).

Os transdutores de 25 e de 45 kHz não indicam alterações significativas em nenhuma das faces, com velocidades variando de 3400 a 4000 m.s⁻¹ conforme a linha de medição. Os transdutores exponenciais mostraram-se maiores variações de velocidade nas Faces A e D, com velocidade mínima atingindo 2000 m.s⁻¹ na face B. Para o transdutor de 80 kHz as alterações de velocidade também ocorreram nas faces A e D, sendo na face A em todo os pontos da linha 4 e na face D apenas na linha 4, entre as seções 5 a 8, aproximadamente (Figuras 4.49 a 4.52).

O uso destas medições na inspeção não foi adequado, principalmente para os transdutores de 24 kHz e 45 kHz de faces planas, pois a interpretação não indicaria o nível e a distribuição dos ocos reais. Exceto para o transdutor de 80 kHz, em uma das faces, os defeitos foram apontados, mas em apenas algumas seções.

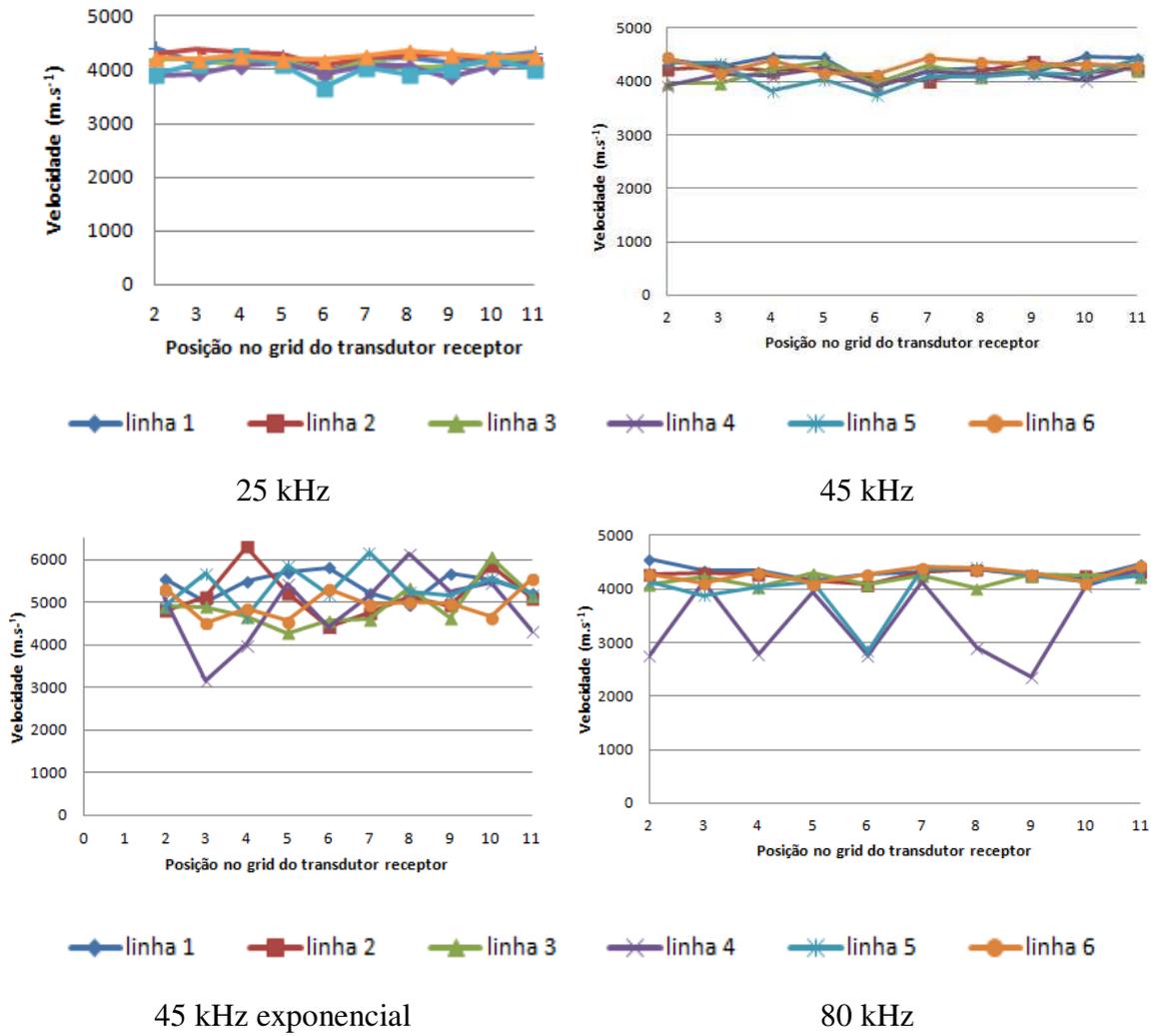
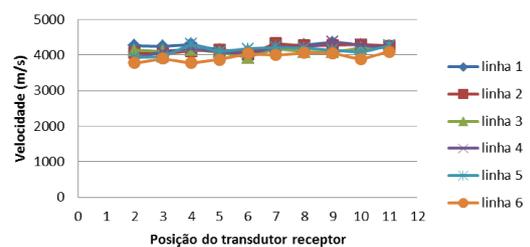
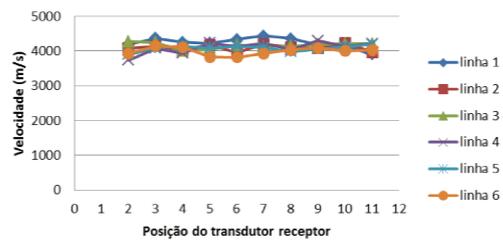
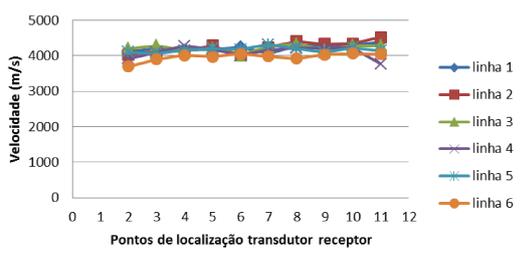
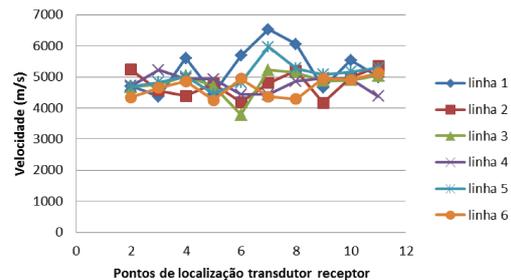


Figura 4.49: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face A da Peça 1 para as diferentes frequências.



25 kHz

45 kHz



45 kHz exponencial

80 kHz

Figura 4.50: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face B da Peça 1 para as diferentes frequências.

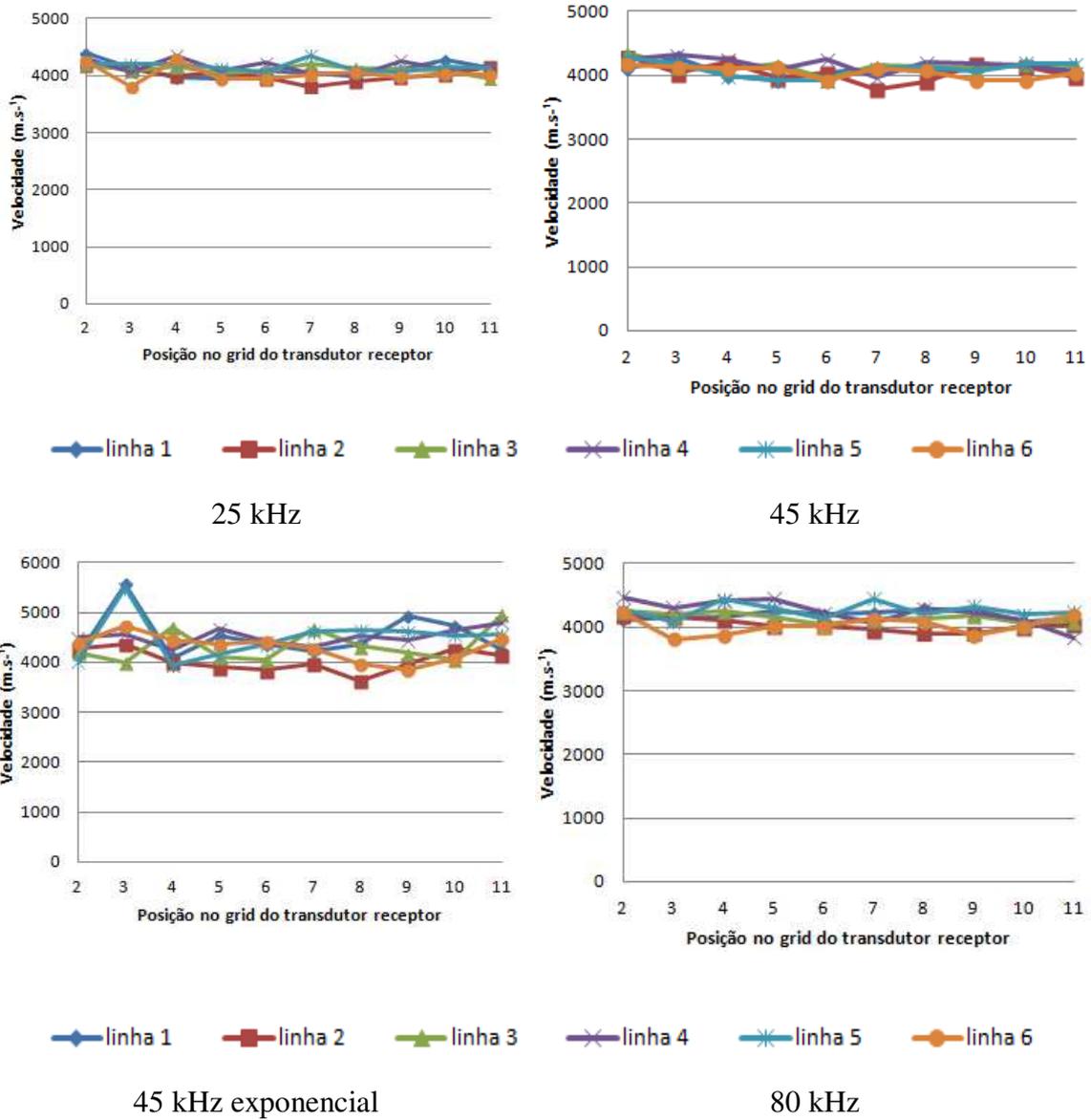


Figura 4.51: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face C da Peça 1 para as diferentes frequências.

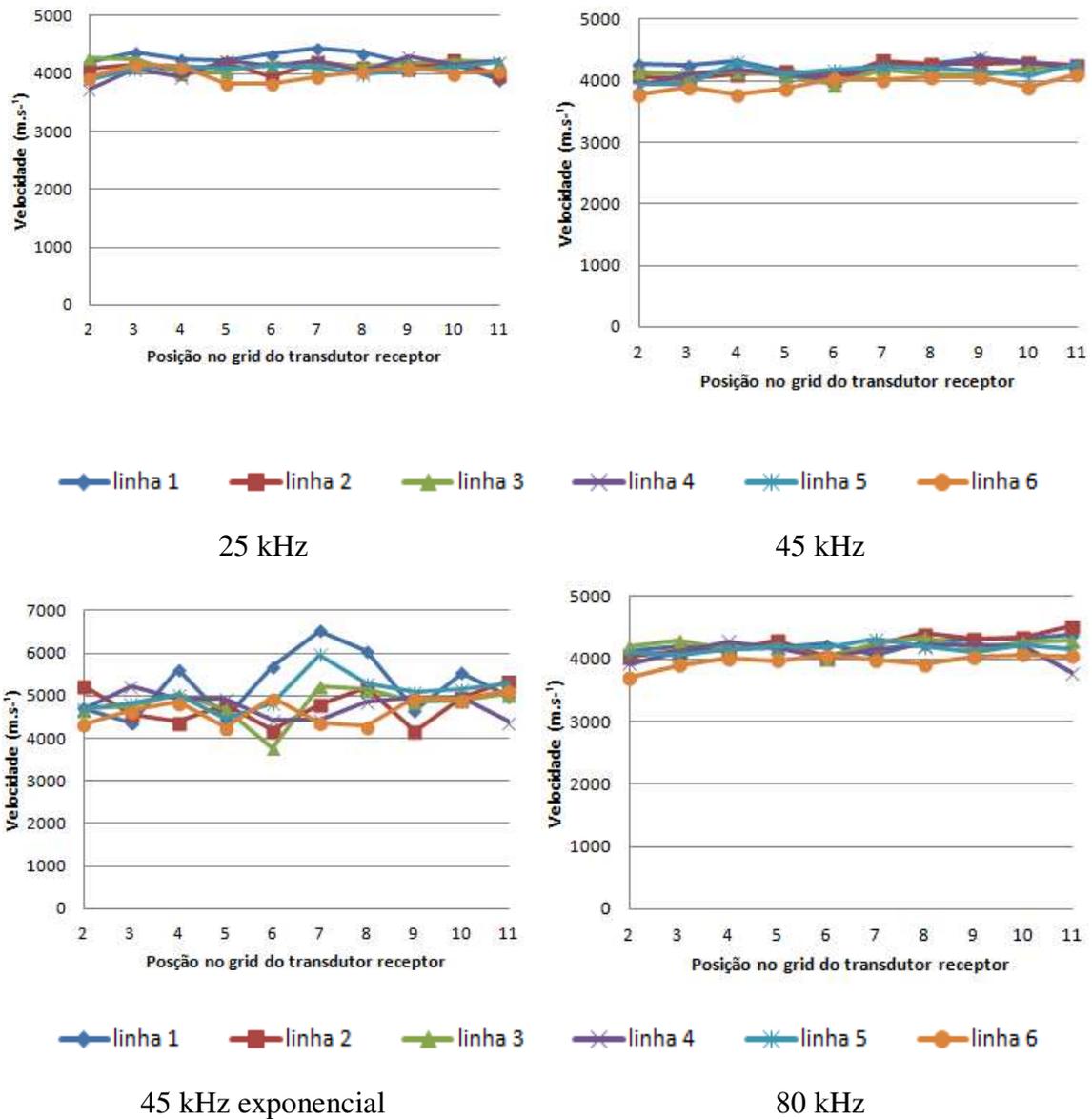


Figura 4.52: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face D da Peça 1 para as diferentes frequências.

4.2.4.2 Peça 2

Essa peça apresentou defeitos superficiais nas faces A e B (Tabela 4.2 e Figura 4.2). Internamente a peça estava íntegra, com oco apenas na extremidade (seção 10 – Figura 4.14). No entanto, como já discutido no item anterior, a medula estava localizada na face A, onde também havia várias trincas (Figura 4.14). A medula e as trincas superficiais afetaram muito os resultados na Face A (Figura 4.53), pois em várias linhas de medição as velocidades foram muito baixas, o que não é condizente com a condição real da peça.

Nas demais faces (Figuras 4.54 a 4.56) há pouca variação de velocidade, que se mantém altas (por volta de 4000 m.s^{-1}). O transdutor de 80 kHz indica queda de velocidade próxima à extremidade da peça nas faces B e D, que seria compatível com o oco existente. No entanto, não é possível afirmar que esta queda de velocidade tenha sido provocada pelo oco, pois ele não está próximo da superfície, principalmente no caso da seção B (Figura 4.14) e esse tipo de medição não se mostrou apta a identificar defeitos mais internos, como foi visto na Peça 1.

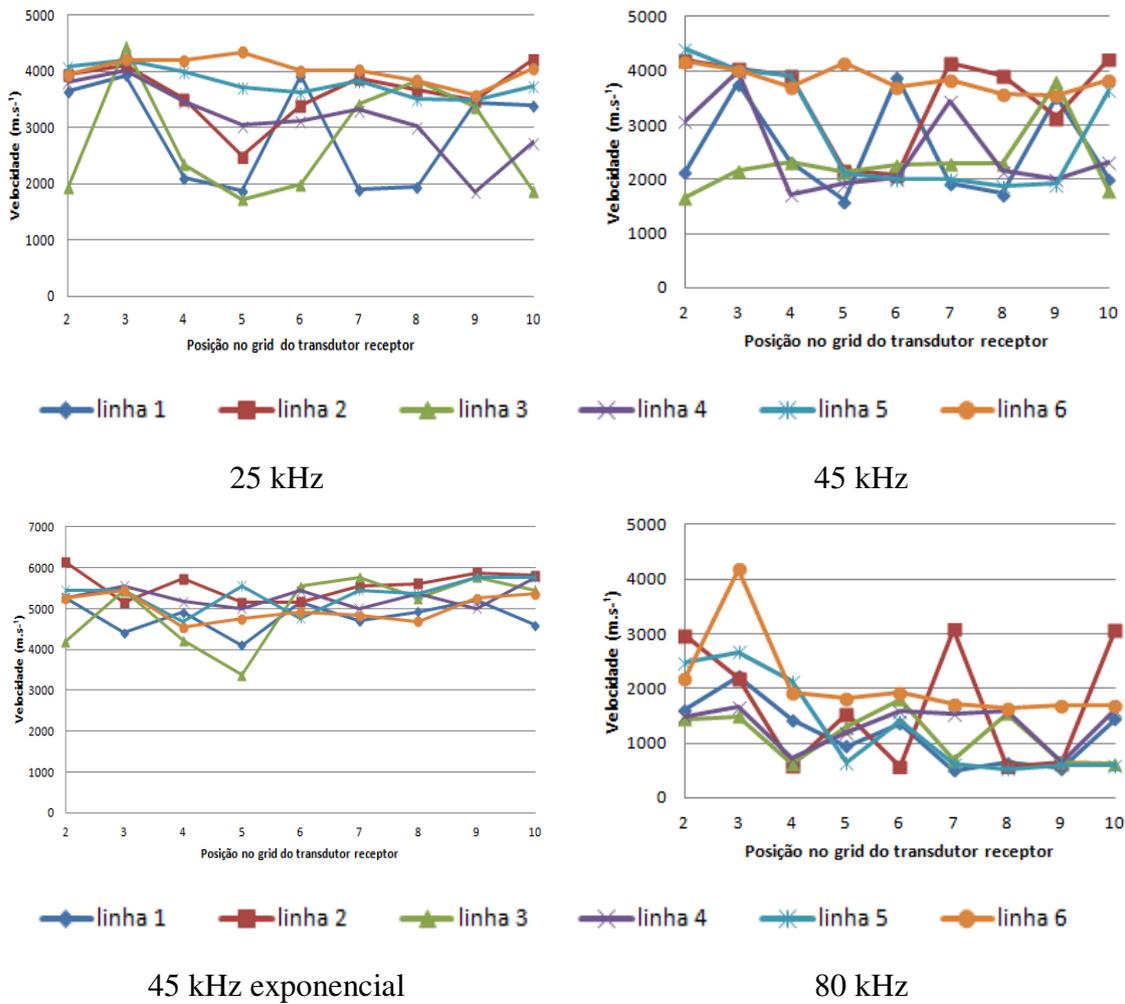


Figura 4.53: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face A da Peça 2 para as diferentes frequências.

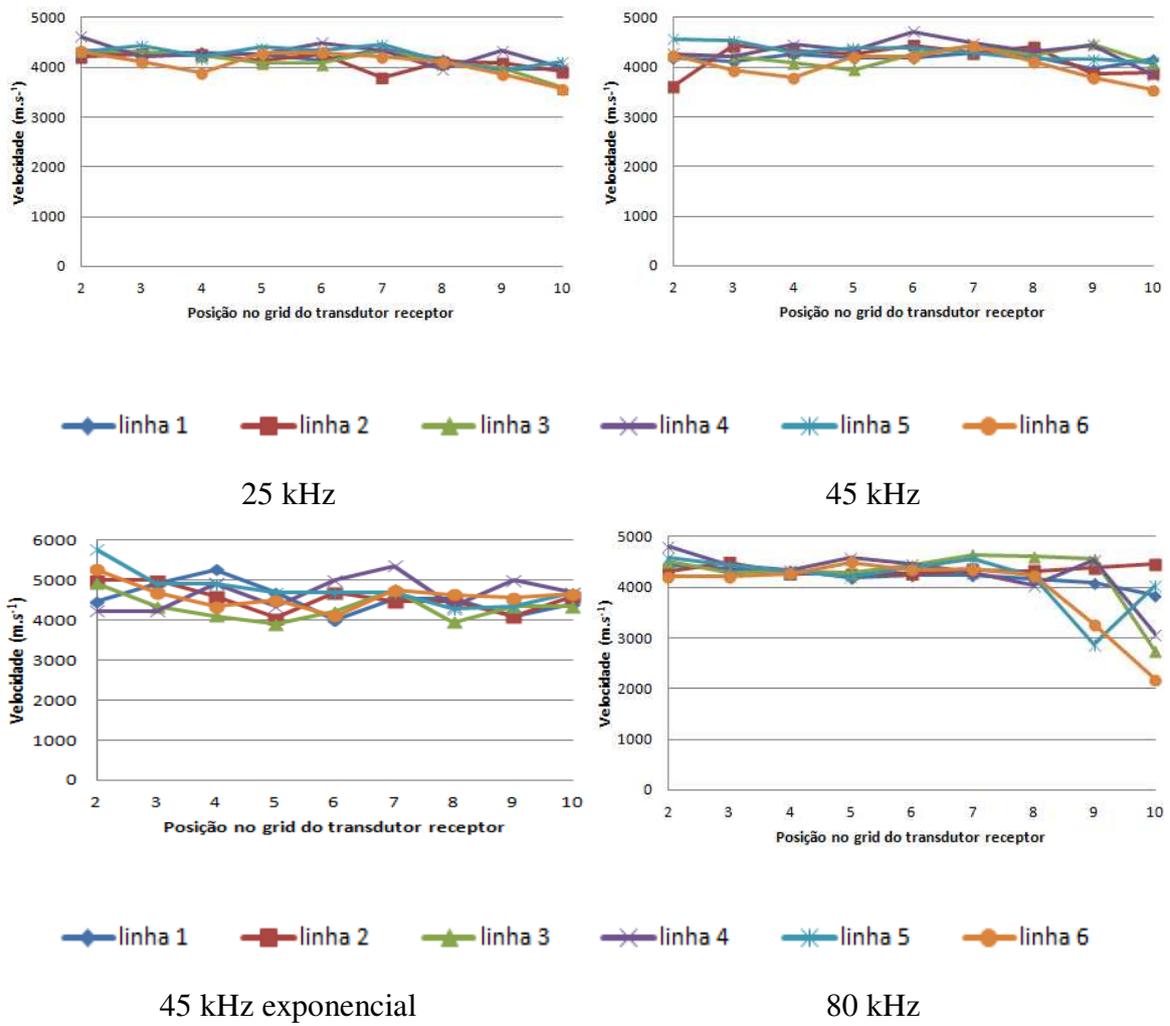


Figura 4.54: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face B da Peça 2 para as diferentes frequências.

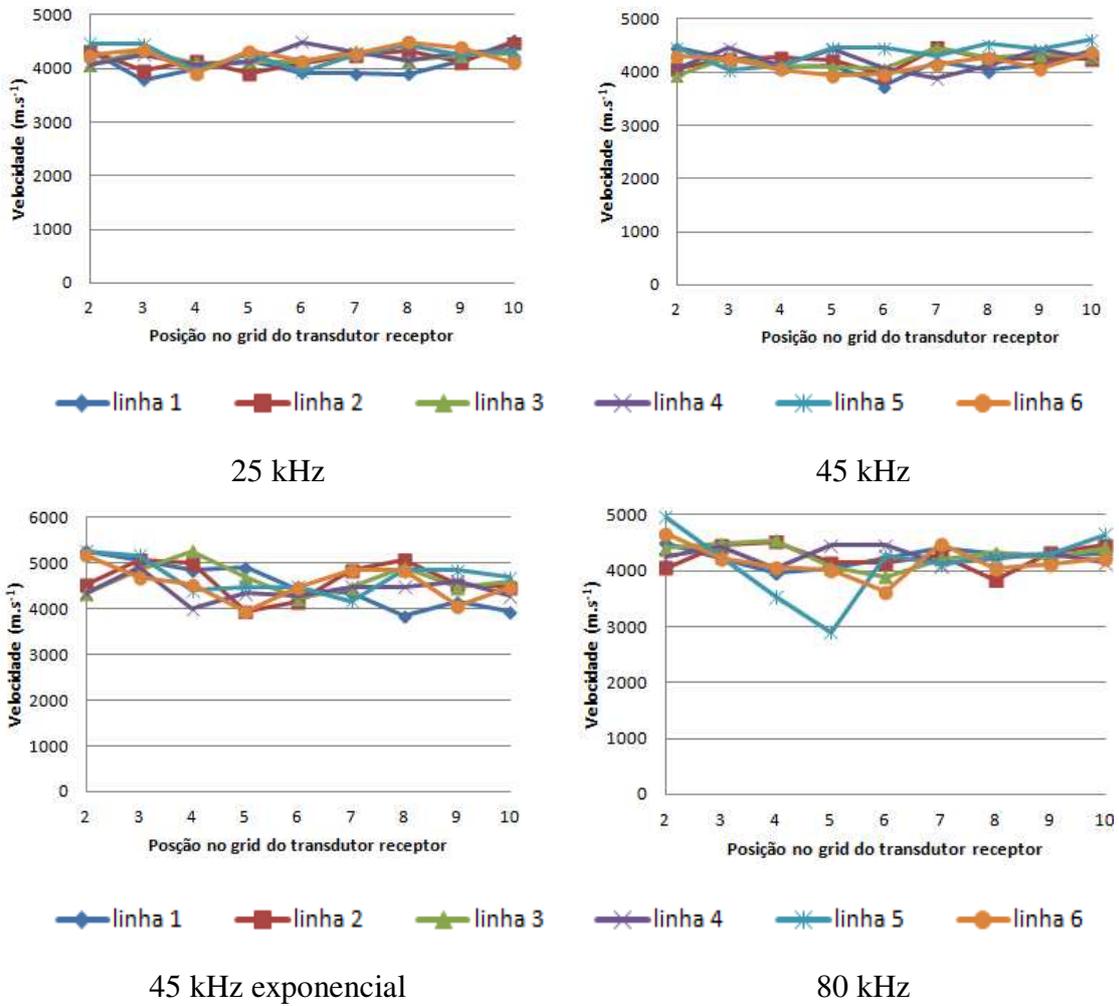


Figura 4.55: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face C da Peça 2 para as diferentes frequências.

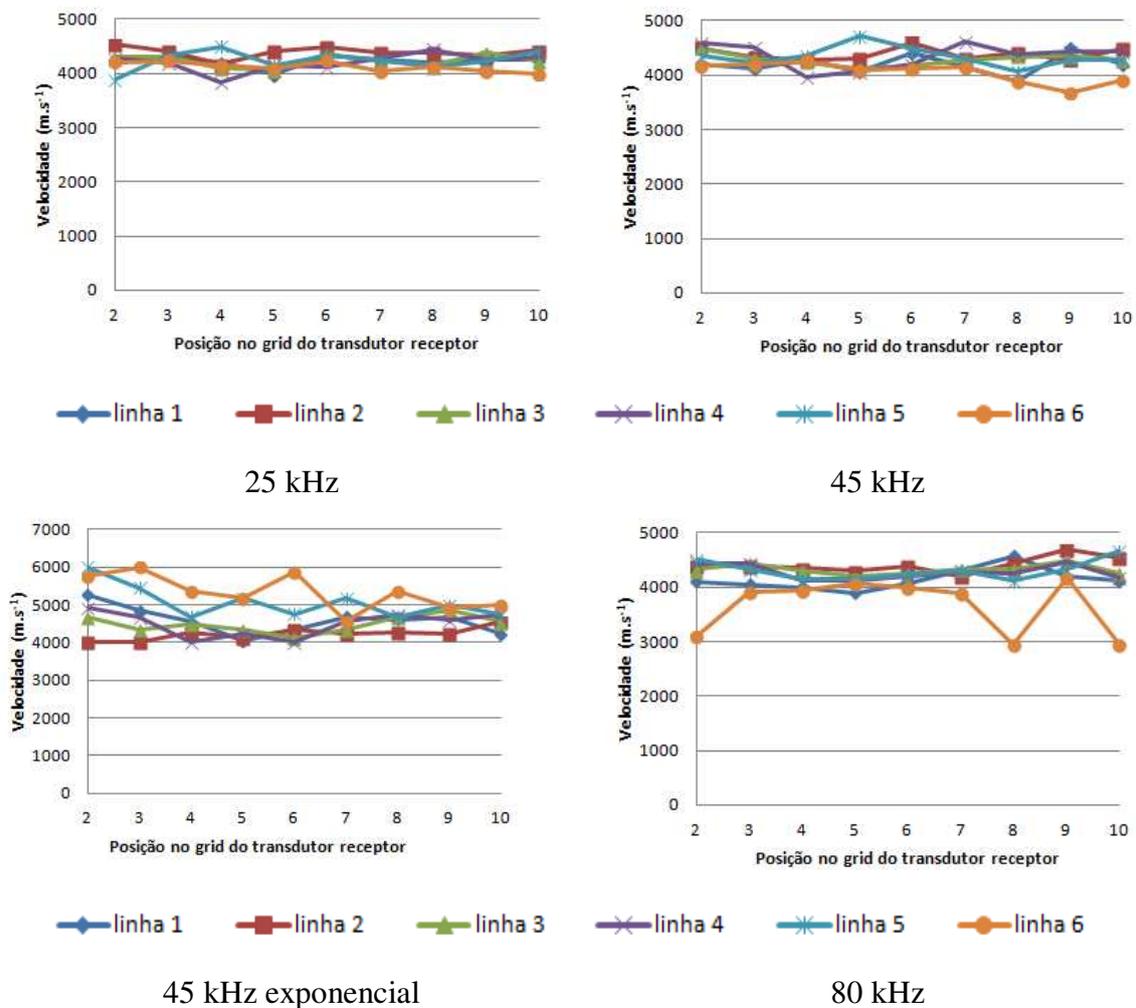


Figura 4.56: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face D da Peça 2 para as diferentes frequências.

4.2.4.3 Peça 3

A peça 3 apresenta defeitos superficiais graves nas Faces C e D (Tabela 4.3 e Figuras 4.3). Na Face D não foi possível realizar grande parte das medições nas linhas 2 e 3, pois o defeito não permitia o acoplamento do transdutor. Além disso esta peça apresenta deteriorações internas em toda sua extensão (Figura 4.17).

Mais uma vez se confirma que neste tipo de medição só é possível detectar deteriorações/ocos que estejam mais próximos da superfície, como é o caso da Face C (Figura 4.59), por exemplo, na qual mesmo as frequências mais baixas indicam velocidades baixas em grande parte da extensão da peça, sugerindo degradações importantes em uma inspeção. No entanto, a peça estava toda deteriorada e os

resultados de velocidade, em geral, não apontaram para essa condição para as demais faces (Figuras 4.57, 4.58 e 4.60). Na face D (Figura 4.60) nas linhas onde foi possível realizar medições não foram obtidas velocidades baixas, indicativas de deteriorações graves, exceto para o transdutor de 80 kHz, mas somente em parte da extensão da peça.

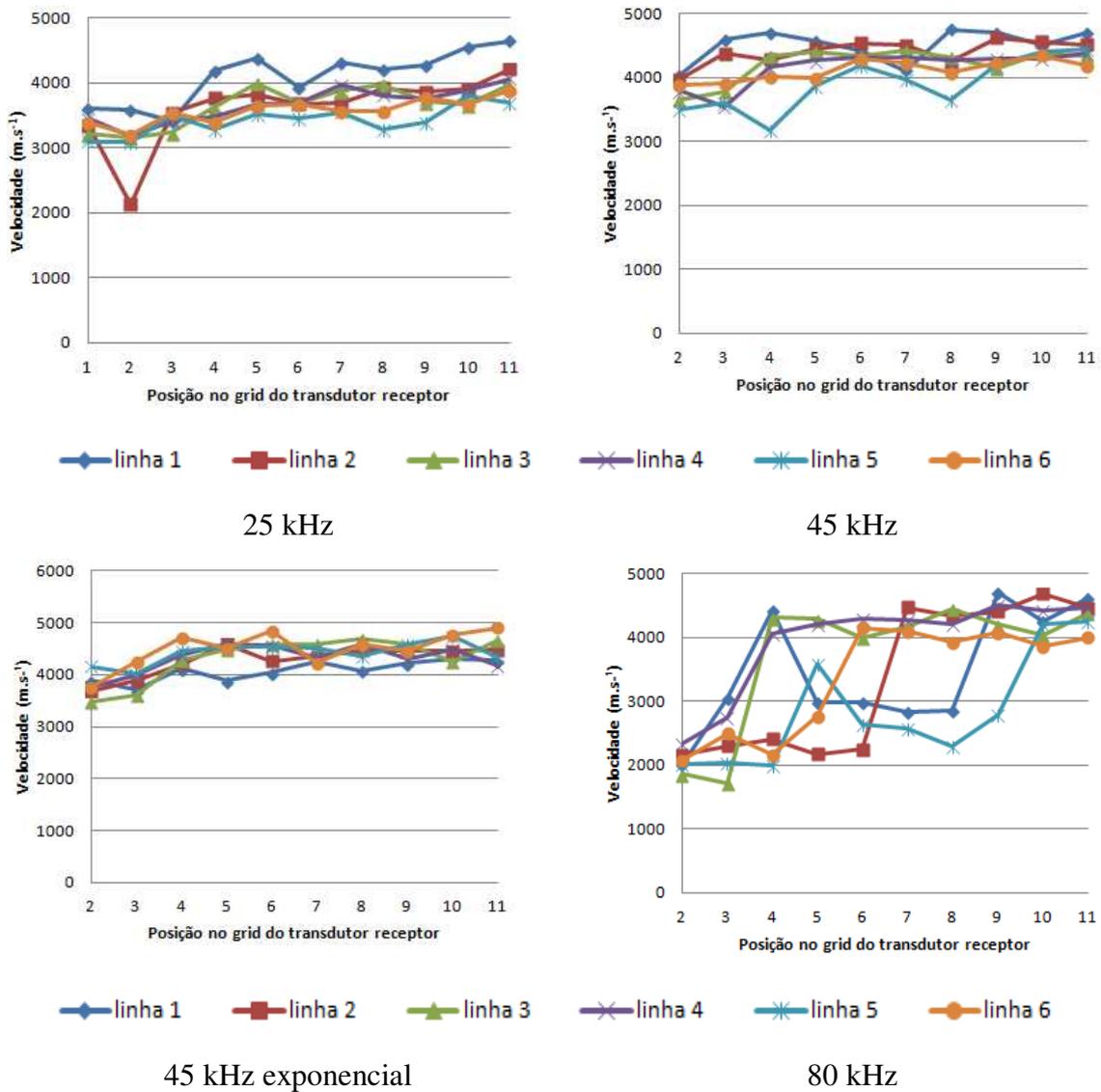


Figura 4.57: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face A da Peça 3 para as diferentes frequências

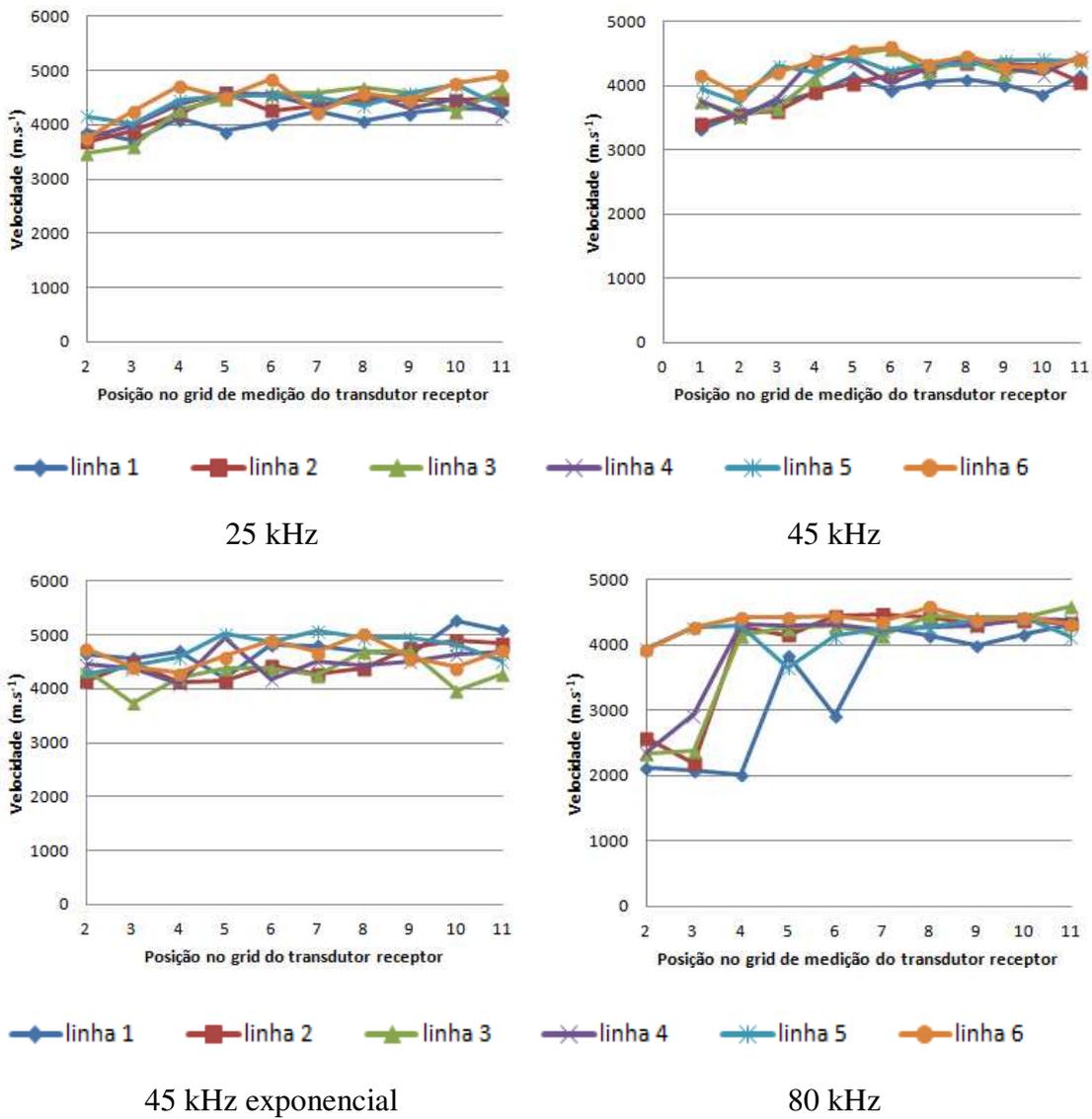
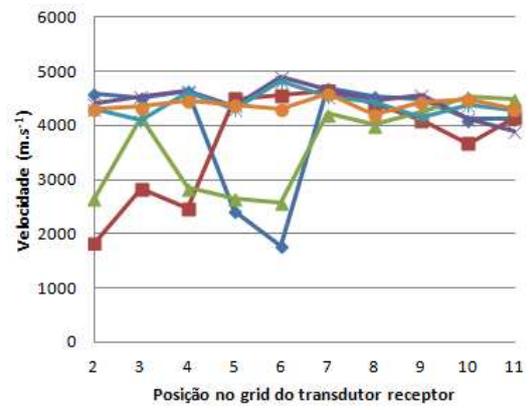
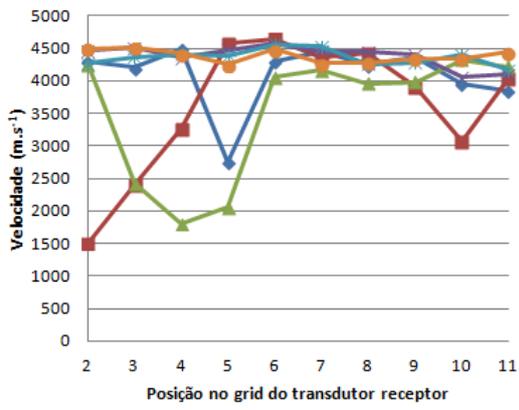


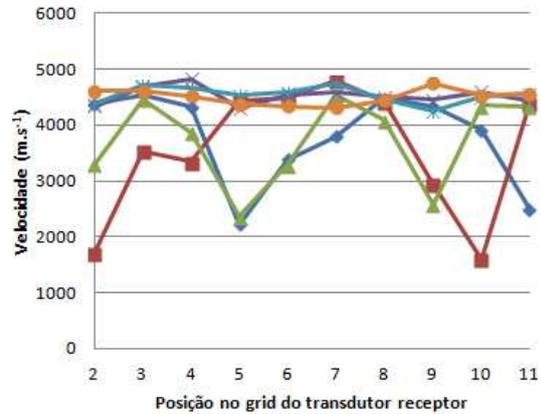
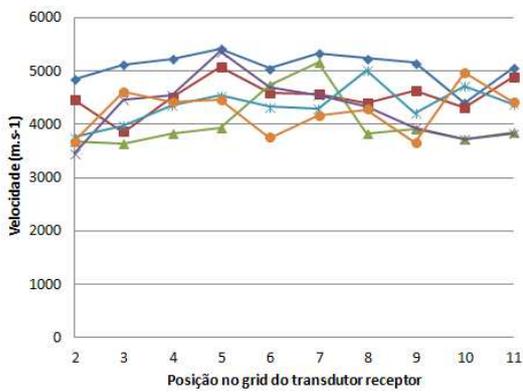
Figura 4.58: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face B da Peça 3 para as diferentes frequências.



linha 1 linha 2 linha 3 linha 4 linha 5 linha 6

25 kHz

45 kHz



linha 1 linha 2 linha 3 linha 4 linha 5 linha 6

45 kHz exponencial

80 kHz

Figura 4.59: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face C da Peça 3 para as diferentes frequências.

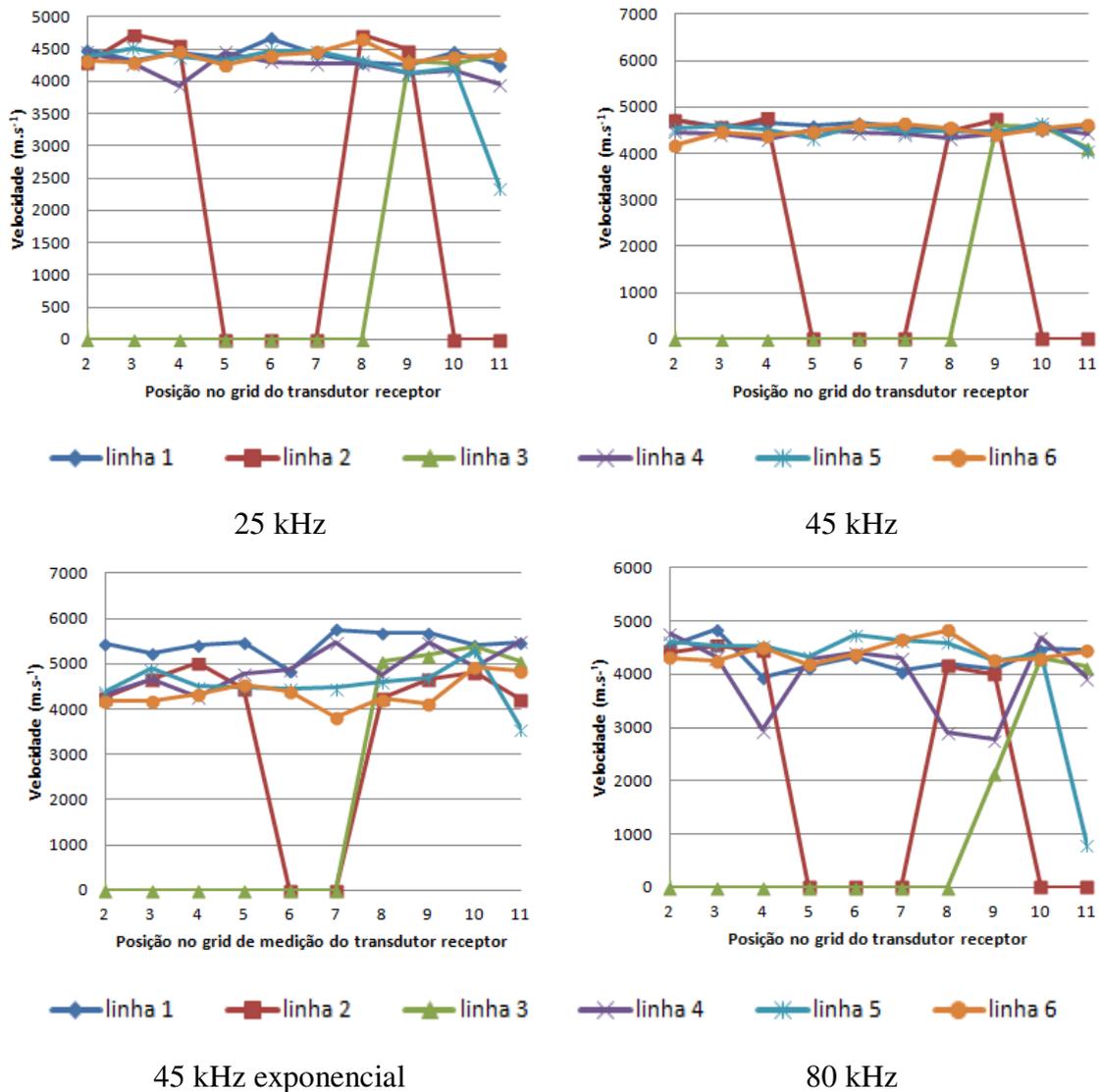


Figura 4.60: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face D da Peça 3 para as diferentes frequências.

4.2.4.4 Peça 4

Apesar de ser a peça mais íntegra internamente, a Peça 4 apresentava vários defeitos na Face C (Tabela 4.4 e Figura 4.4). A inspeção utilizando medições indiretas com espaçamento fixo entre os transdutores indicou a integridade da peça (Figuras 4.61 a 4.64), exceto na Face C, onde houve interferência dos defeitos da própria face (Figura 4.53). Neste caso, no entanto, os defeitos foram detectados na avaliação visual e o inspetor teria condições de saber que os resultados baixos de velocidade na Face C estariam relacionados com estes defeitos.

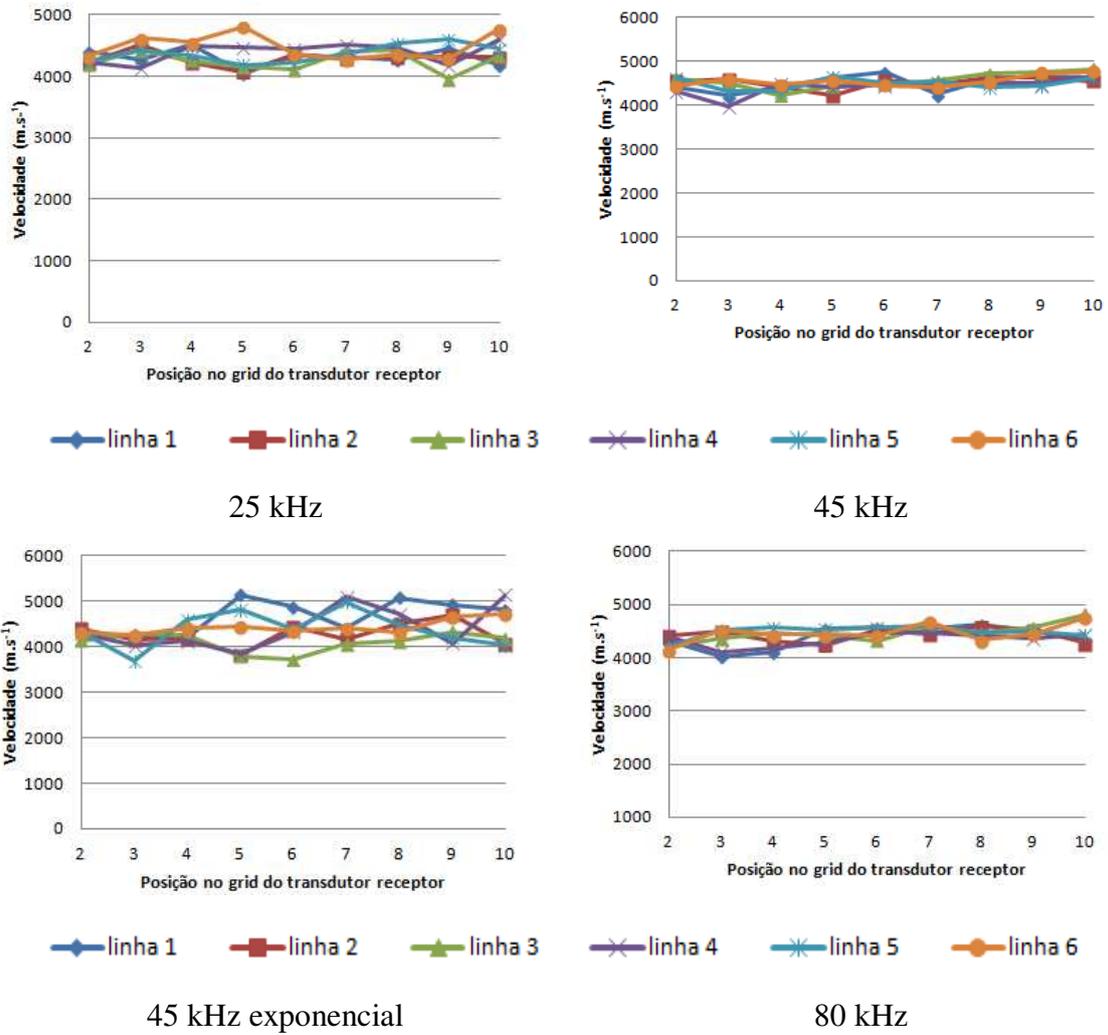
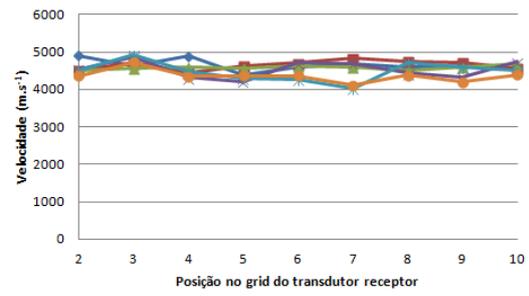
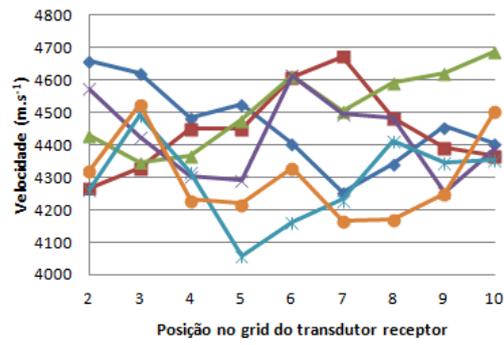


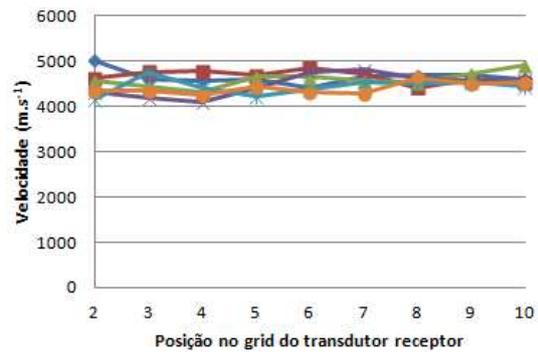
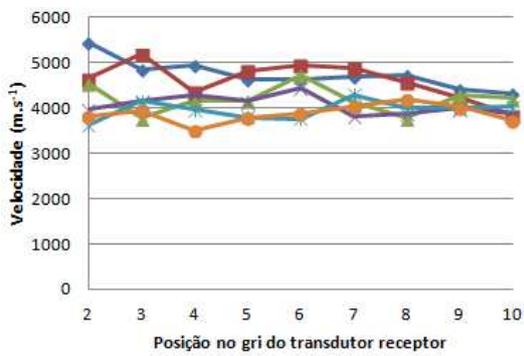
Figura 4.61: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face A da Peça 4 para as diferentes frequência.



—◆— linha 1 —■— linha 2 —▲— linha 3 —×— linha 4 —*— linha 5 —●— linha 6

25 kHz

45 kHz

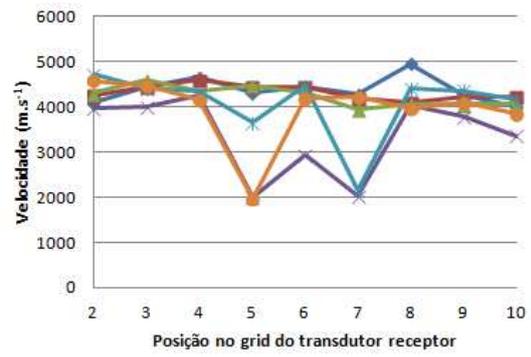
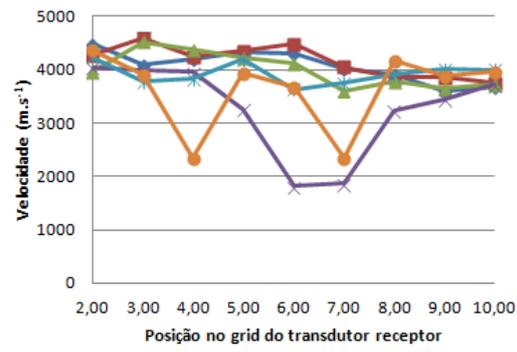


—◆— linha 1 —■— linha 2 —▲— linha 3 —×— linha 4 —*— linha 5 —●— linha 6

45 kHz exponencial

80 kHz

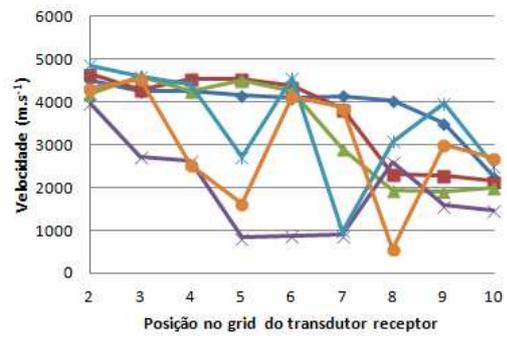
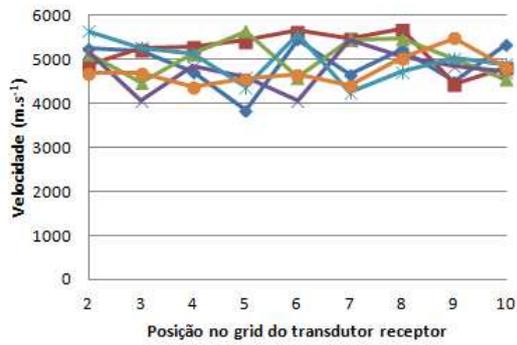
Figura 4.62: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face B da Peça 4 para as diferentes frequências



linha 1 linha 2 linha 3 linha 4 linha 5 linha 6

25 kHz

45 kHz



linha 1 linha 2 linha 3 linha 4 linha 5 linha 6

45 kHz exponencial

80 kHz

Figura 4.63: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face C da Peça 4 para as diferentes frequências.

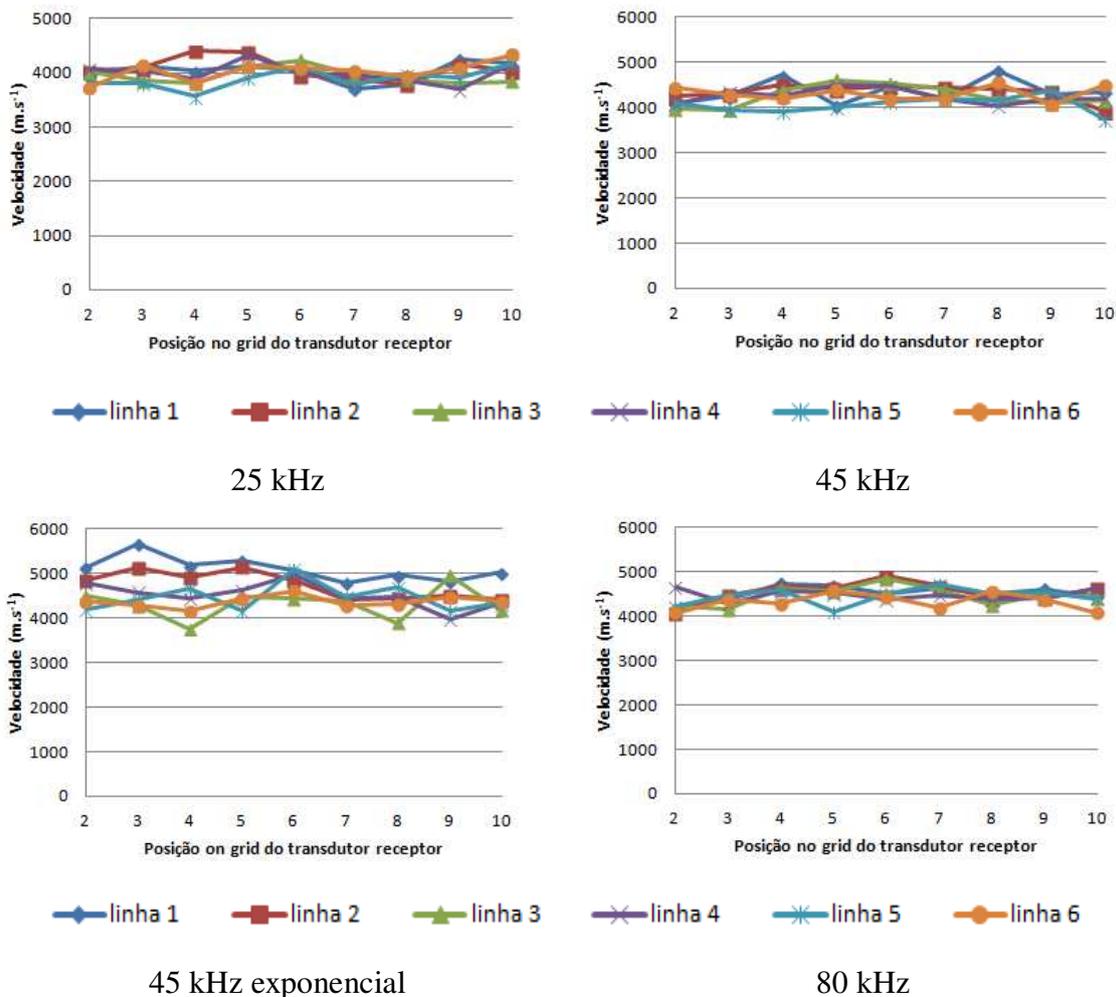


Figura 4.64: Velocidades obtidas nos ensaios indiretos, com distância fixa entre os transdutores, na Face D da Peça 4 para as diferentes frequências.

4.2.4 Ensaios semi-diretos

Conforme discutido nos itens anteriores, medições indiretas, com ondas superficiais, não permitem obter valores de velocidade numericamente iguais as obtidas em medições diretas. Assim, alguns pesquisadores têm proposto medições semidiretas, principalmente para obter velocidades mais próximas das que seriam obtidas em ensaios diretos paralelos à grã, quando não é possível o acesso às extremidades das peças. A obtenção desta velocidade (paralela à grã) é importante, por ser a mais adequada para obter informações da resistência/rigidez da madeira.

Tendo em vista que neste tipo de medição a propagação se dá com ângulo em relação às fibras, sabe-se que a velocidade será menor do que a obtida em medições

diretas paralelas à grã. A proposta, deste item foi, portanto, verificar a variação da velocidade em função da variação do ângulo de propagação da onda em relação às fibras (função da distância entre os transdutores), e a viabilidade de se aplicar a equação proposta por Arriaga *et al.* (2009) para corrigir a velocidade obtida na medição semidireta, de forma a obter aproximação com a velocidade obtida de forma direta. Para que outros parâmetros de variação não tivessem influência sobre os resultados, essa discussão foi realizada utilizando somente os resultados dos ensaios conduzidos na Peça 4 (íntegra), nas faces AC e BD. Apesar da peça estar íntegra, como pode ser visto em itens anteriores, pequenas trincas ou presença de medula, por exemplo, podem provocar a dispersão da onda, principalmente para frequências mais elevadas e para o transdutor exponencial.

Os gráficos das Figuras 4.65 e 4.66 mostram que, para os transdutores de 25 kHz e 45 kHz não houve dispersão da onda, nem para a propagação da face A para a face C, nem da face B para a face D. Por outro lado, o comportamento da onda foi muito disperso para o transdutor de faces exponenciais 45 kHz para as propagações AC e BD e para o transdutor de 80 kHz, na propagação de A para C.

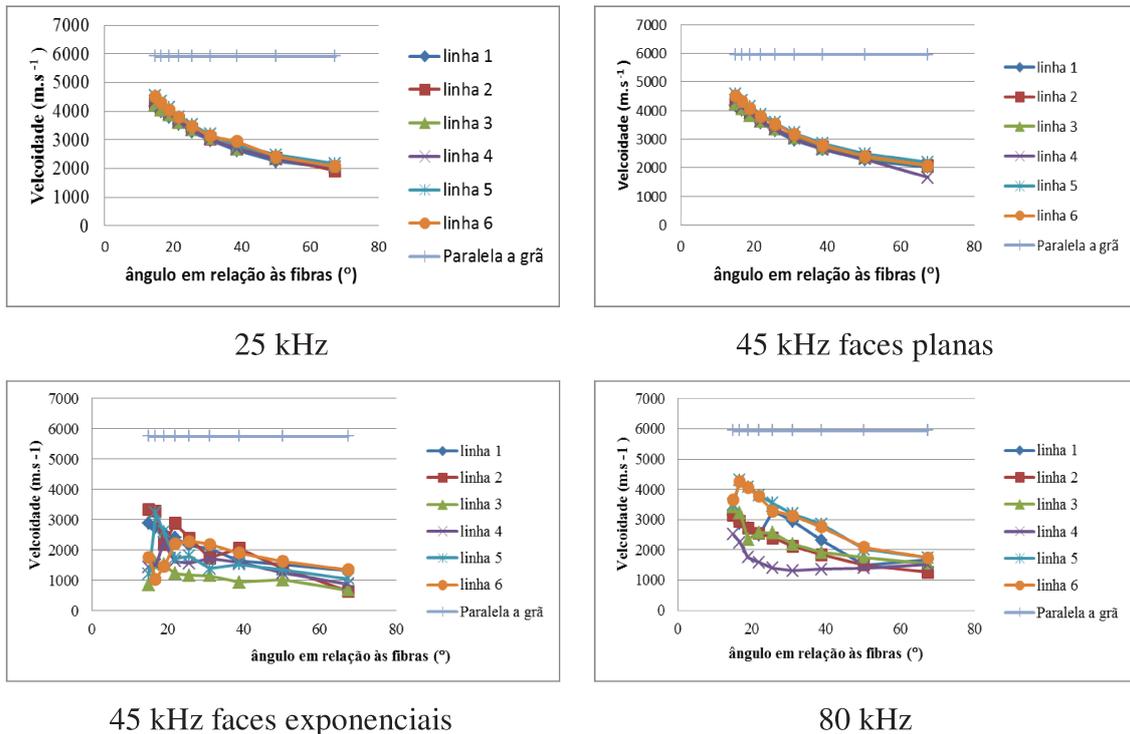


Figura 4.65: Comportamento da velocidade em função do ângulo de propagação das ondas em relação às fibras nas medições semidiretas da Face A para a Face C.

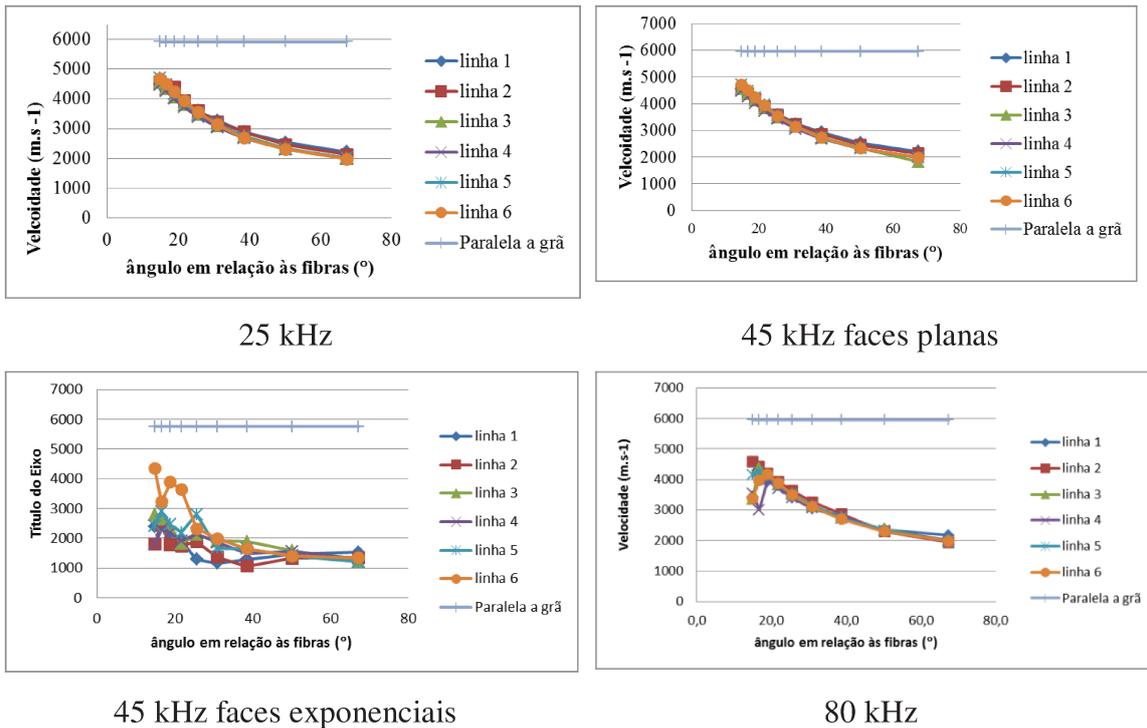


Figura 4.66: Comportamento da velocidade em função do ângulo de propagação das ondas em relação às fibras nas medições semidiretas da Face B para a Face D.

Como esperado, a velocidade aumenta e se aproxima mais do valor da velocidade obtida de forma direta na direção paralela à grã, conforme o ângulo diminui. No entanto, mesmo considerando a velocidade obtida no menor ângulo que as dimensões da Peça 4 permitiu ($14,9^\circ$), as velocidades obtidas de forma indireta foram muito inferiores às obtidas de forma direta e paralela à grã (Tabela 4.11). Como os valores ainda se mostraram crescentes (sem patamar de estabilização), é de se esperar que os valores se aproximem mais em peças maiores, quando é possível afastar mais os transdutores. Arriaga (2009) indica que o ideal é que se tenha distâncias (horizontal) entre transdutores acima de 18 vezes a altura da peça, o que no caso desta pesquisa seria obtido a partir de aproximadamente 4,3 m. Os valores de velocidade que mais se distanciaram dos obtidos de forma direta paralela à grã foram com os transdutores de 45 kHz/faces exponenciais e de 80 kHz, justamente os que apresentaram dispersão de resultados (Tabela 4.11).

Tabela 4.11: Relações entre a velocidade obtida de forma semidireta e direta paralela à grã para a maior distância horizontal entre os transdutores (ângulo de 14,9° em relação às fibras)

Frequência do transdutor	Face A para Face C	Face B para Face D
25/plano	0,73	0,77
45/plano	0,73	0,77
45/exponencial	0,33	0,45
80/plano	0,54	0,63

Arriaga *et al.* (2009) propôs equação de correção da velocidade obtida de forma indireta em função do ângulo de inclinação da propagação em relação à grã: $V_0 = V_\alpha (1 + \alpha K_\alpha)$. Segundo o autor o K_α é função da espécie e, em seu trabalho, o valor foi de 0,01. Utilizando os resultados obtidos nesta pesquisa para as velocidades obtidas de forma direta na direção paralela às fibras (V_0) e com ângulo em relação às fibras (V_α), o valor médio de K_α foi de 0,028 com coeficiente de variação de 6,1%. Salienta-se que para este cálculo não foram utilizados os resultados que apresentaram dispersão (45 kHz faces exponenciais nas medições AC e BD e 80 kHz nas medições AC).

Arriaga *et al.* (2009) obtiveram relação de 0,98 entre a velocidade obtida de forma indireta corrigida e direta, considerando a equação citada. Utilizando-se a equação proposta pro Arriaga *et al.* (2009) e o K_α de 0,028 obtido nesta pesquisa, os valores de velocidade obtidos de forma indireta, corrigidos, se aproximam muito dos valores obtidos de forma indireta para todas as frequências. A relação média entre as velocidades mensuradas de forma indireta (corrigidas) e direta foi de 1,00 com CV de 2,1%, considerando as frequências 25 e 45 kHz transdutor plano nas direções AC e BD e a frequência de 80 kHz na direção BD (Figura 4.67).

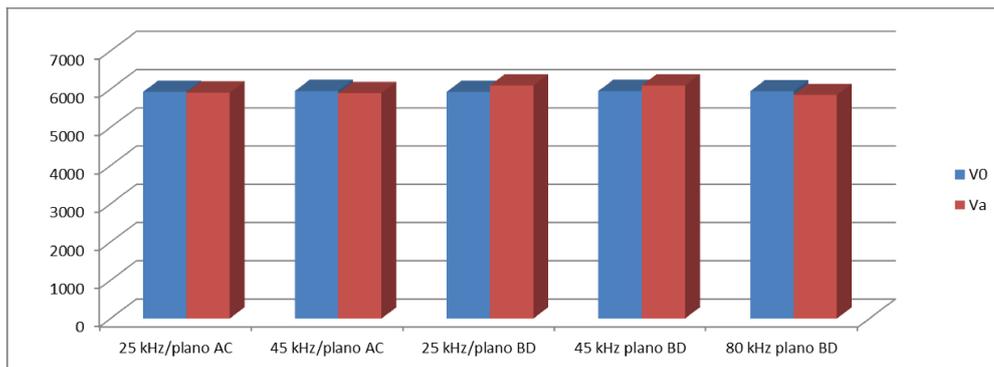


Figura 4.67: Velocidades médias obtidas de forma direta na direção paralela às fibras (V0) e velocidades obtidas de forma semidireta (Va).

4.3 Inspeção utilizando o Resistógrafo

A resistência à perfuração, em geral, não é utilizada de forma isolada, pois trata-se de método de avaliação pontual, sendo portanto restrito a uma região muito pequena. Tendo em vista a proposta de análise deste método sem o uso de outra tecnologia envolvendo equipamento, a análise visual será utilizada como referência. Assim, os pontos selecionados para a discussão neste item correspondem àqueles destacados na inspeção visual (item 4.1 Análise visual).

Ressalta-se que as medições com o Resistógrafo foram feitas somente em uma das direções do grid de medição (Figura 3.2), da face A para a face C, pois uma segunda medição, da face B para a face D, poderia ser influenciada pelo furo da medição executada anteriormente.

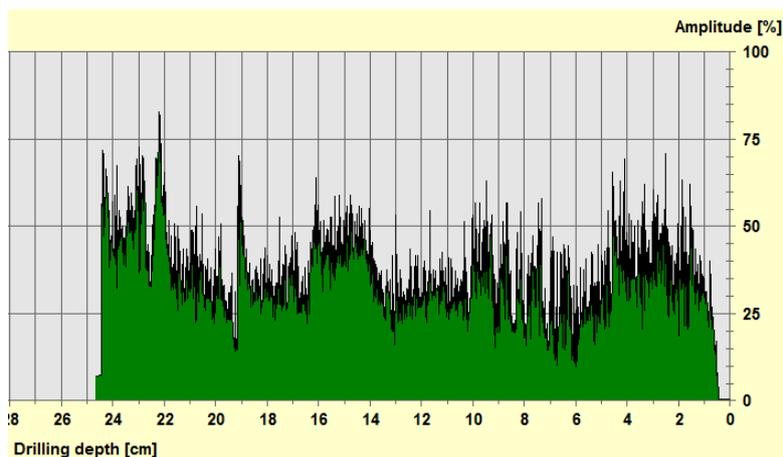
4.3.1 Peça 1

A partir dos defeitos indicados na análise visual (Figura 4.1 e Tabela 4.1), selecionou-se, para discussão inicial, uma região sem indicação de defeitos na análise visual (linha 2, coluna 6) e duas regiões com indicação de defeitos: os defeito número 1 (linha 4 e coluna 1 na Figura 4.1) e número 5 (linha 5 colunas 8 e 9 na Figura 4.1), todos na Face A. A região aparentemente sem defeito foi escolhida para verificar o padrão de comportamento e, assim, poder comparar com as regiões afetadas.

Pode ser observado que nas zonas sem indicação de defeito aparente, apesar da amplitude em geral estar abaixo de 50% não se verificam grandes quedas ou faixas com amplitude zero (Figura 4.68).



a



b

Figura 4.68: Foto da Seção 6 da peça 1, com destaque (linha vermelha) para a posição da agulha na furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).

Por outro lado, na região do defeito 1 (Figura 4.69), que visualmente indica a existência de uma fenda (Figura 4.1), há quedas acentuadas de amplitude (4 cm, 19 cm e 21 cm) e amplitude zero (dos 13 cm aos 17 cm), indicativas de deterioração/fenda e oco, respectivamente. A região do defeito 1 equivale a seção 1, que efetivamente tem um oco (Figura 4.69). A dimensão do oco indicada pelo resistógrafo é menor do que a dimensão real. Como essa peça quebrou ao executar o corte da seção, é possível que quando o

ensaio foi realizado houvesse um fechamento entre o oco maior e o menor, resultando a imagem gerada pelo resistógrafo (Figura 4.69). Visualmente não se observa qualquer deterioração/fenda na região correspondente a 4 cm de medição, com queda acentuada de amplitude.

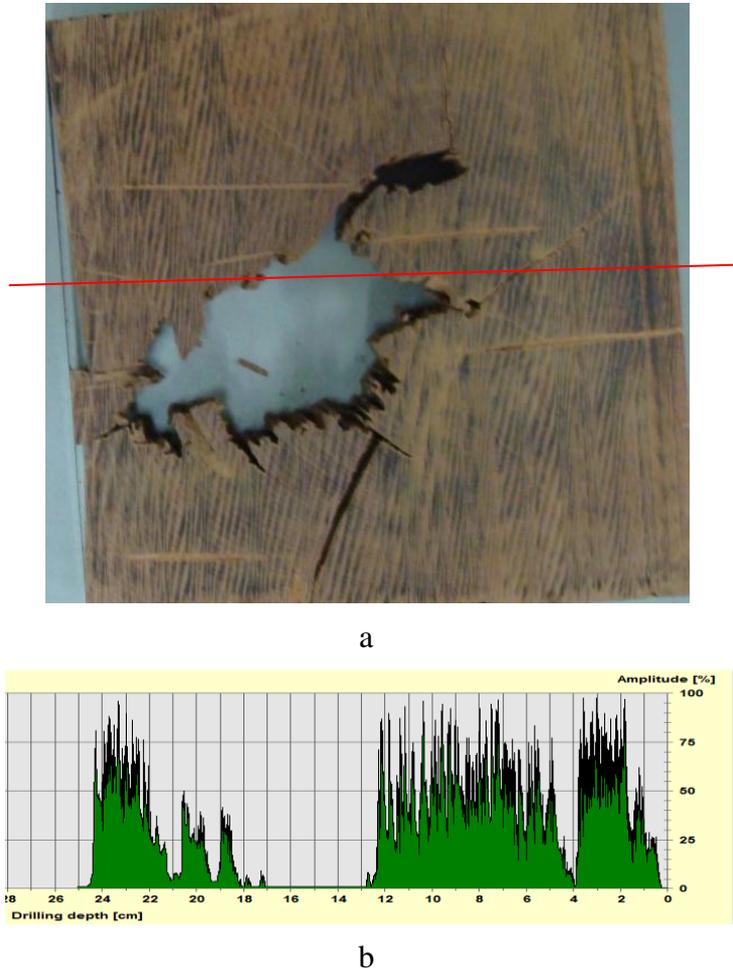
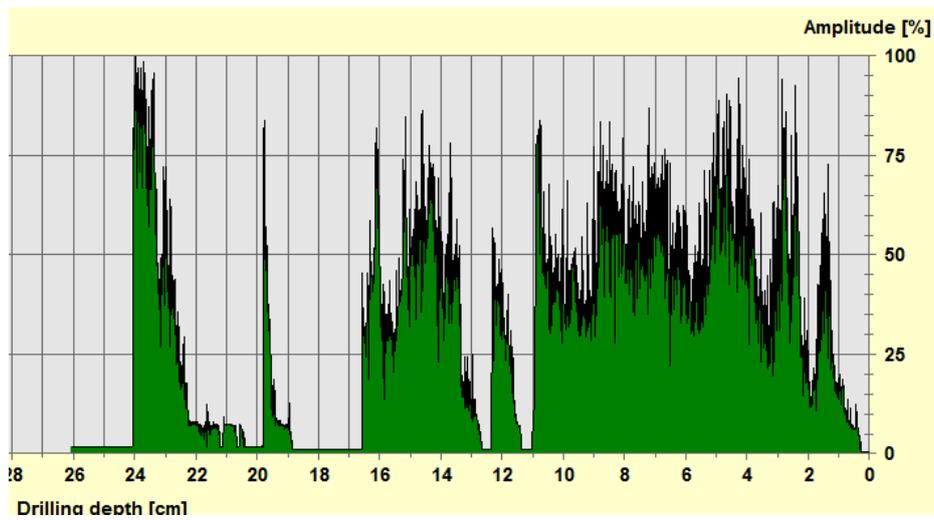


Figura 4.69:Foto da Seção 1 da Peça 1 com destaque (linha vermelha) para a posição da agulha na furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).

No caso do defeito número 5, nas seções 8 e 9 (Figuras 4.70 e 4.71), os ocos podem ser visualizados no gráfico gerado pelo resistógrafo, e as zonas com fendas também apresentaram queda acentuada de amplitude (próximo de zero). Na seção 8 há uma zona deteriorada, mas não ocada, que no gráfico do resistógrafo apresenta-se com aparência semelhante às zonas sem deterioração, tanto quando comparada com a imagem do resistógrafo da própria seção (Figura 4.70) quanto da região fora da zona de defeitos (Figura 4.68). Esse comportamento poderia gerar interpretação errada durante uma inspeção.

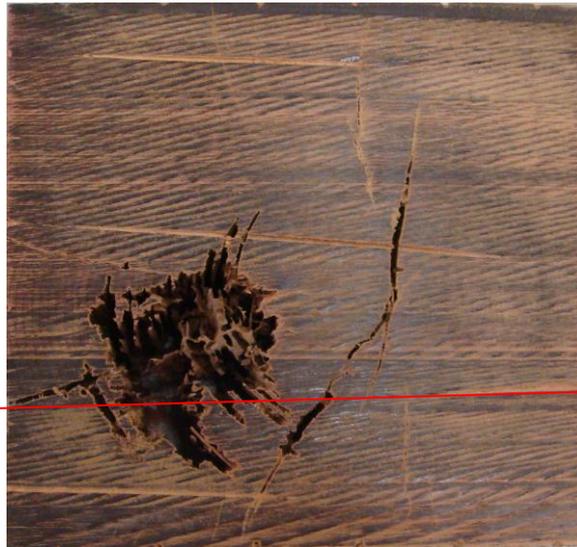


a

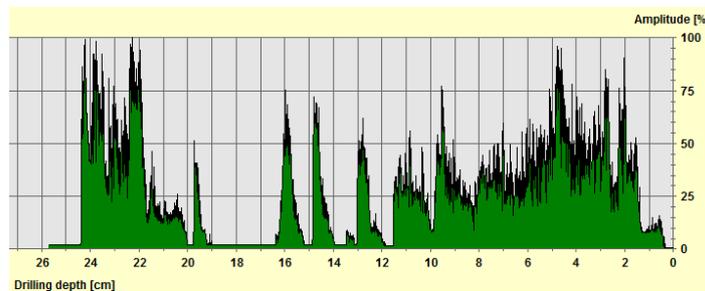


b

Figura 4.70:Foto da Seção 8 com destaque (linha vermelha) para a posição da agulha na furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).



a



b

Figura 4.71: Foto da Seção 9 com destaque (linha vermelha) para a posição da agulha na furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).

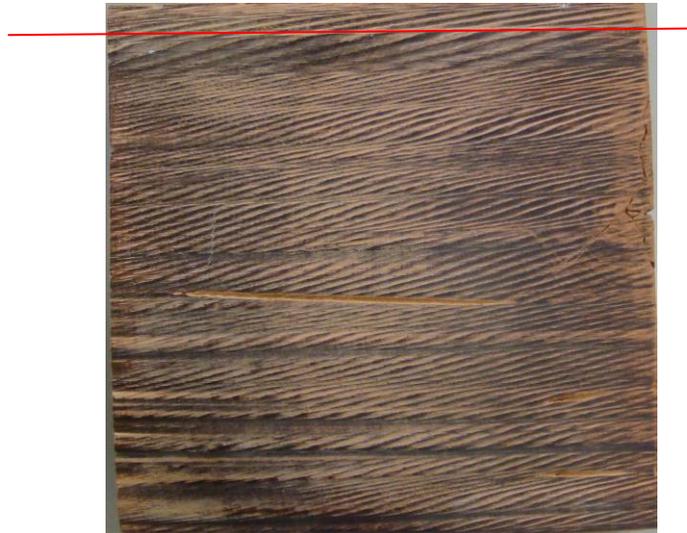
Ressalta-se que houve dificuldade ao se realizar medições em alguns pontos desta peça, pois as fendas, seguidas de partes com madeira em bom estado, faziam com que a agulha se curvasse ao passar da parte oca para madeira sã.

4.3.2 Peça 2

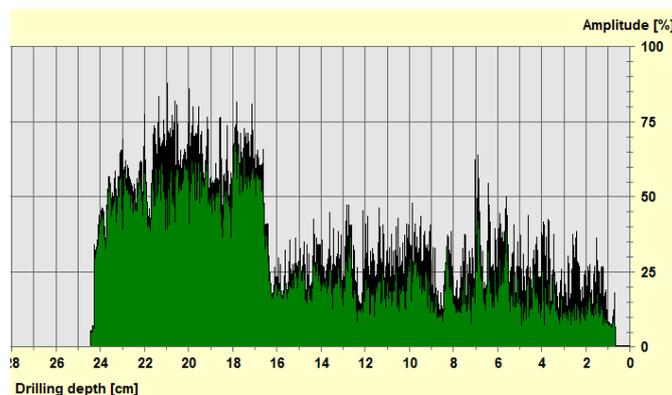
Na análise visual a Peça 2 apresentava alguns defeitos na face A (fendas, lascas e trincas) e apenas um defeito na face B (fenda) – Tabela 4.2 e Figura 4.2. Para esta peça selecionou-se um ponto em zona não aparentemente deteriorada (linha 1 e coluna 1 da Figura 4.2) e dois pontos inseridos nas regiões dos defeitos de números 2 (linha 4, coluna 8) e 4 (linha 3, coluna 8), ambos da face A (Figura 4.2).

Na zona sem deterioração verifica-se que há queda acentuada de amplitude, mas

não se verifica nenhuma zona com valores próximos a zero. Não há nenhum sinal de deterioração na seção 1, correspondente ao ensaio com o resistógrafo, de forma que a queda de amplitude deve ser em razão da medula e da zona em torno dela, com presença de madeira juvenil (Figura 4.72).



a



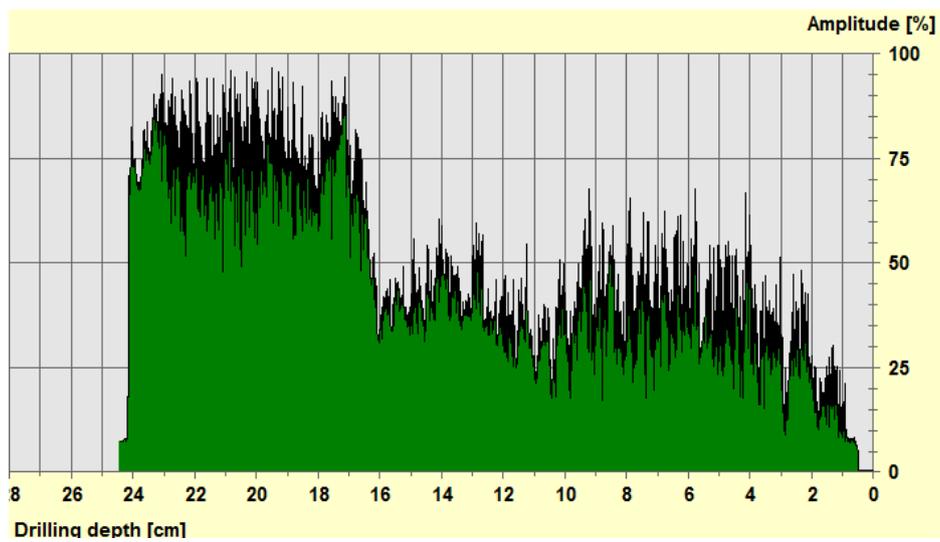
b

Figura 4.72: Foto da Seção 1 da Peça 2 com destaque (linha vermelha) na posição da furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo na mesma posição (b).

Nas regiões com defeitos detectados na análise visual, o resultado do resistógrafo não mostra nenhuma zona com redução drástica de amplitude, nem zonas com amplitude zero, o que indicaria peça em bom estado, confirmando a imagem da seção (Figuras 4.73 e 4.74).

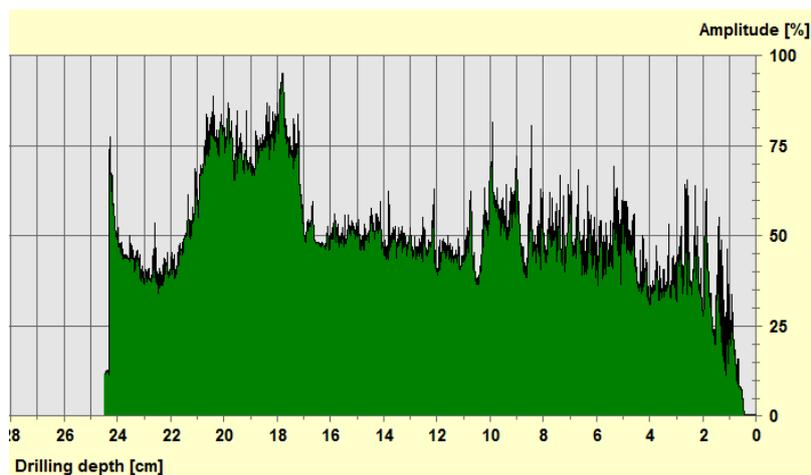


a



b

Figura 4.73: Foto da Seção 2 da Peça 2 com destaque (linha vermelha) na posição de furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo na mesma posição (b).



b

Figura 4.74: Foto da Seção 8 da Peça 2 (a) com destaque (linha vermelha) na linha de furação e gráfico gerado pelo resistógrafo na mesma posição (b).

4.3.3 Peça 3

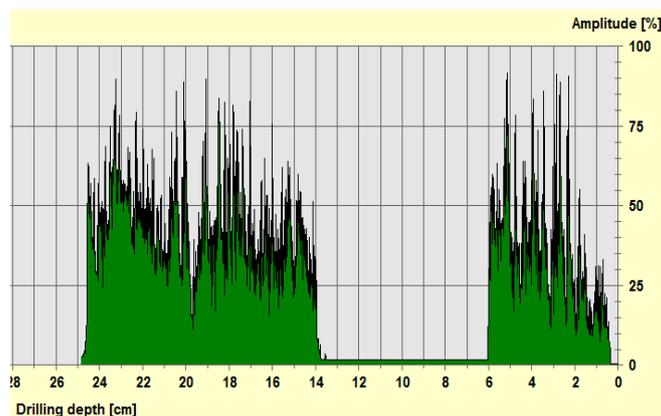
Esta peça apresentou grande região deteriorada, indicada como o defeito número 2, da face D e o defeito número 1 da face C (Tabela 4.3 e Figura 4.3). Caso fosse possível realizar a análise em todas as faces ficaria evidente que os defeitos tinham grande profundidade em toda a peça. No entanto, se as faces aparentes desta peça fossem

apenas as faces A e B, os defeitos não seriam visíveis (Tabela 4.3). Desta forma, as medições do resistógrafo foram feitas da face A para a face C, como se apenas a face A estivesse disponível para a inspeção.

Para esta peça foram escolhidas as zonas localizadas na linha 2 e coluna 10 e na linha 1 e coluna 7 (Figura 4.3), ambas sem indicativo de defeito na análise visual na face A. Os resultados do resistógrafo são compatíveis com a condição real das peças, visualizadas por meio das seções 10 e 7 (Figuras 4.75 e 4.76).



a

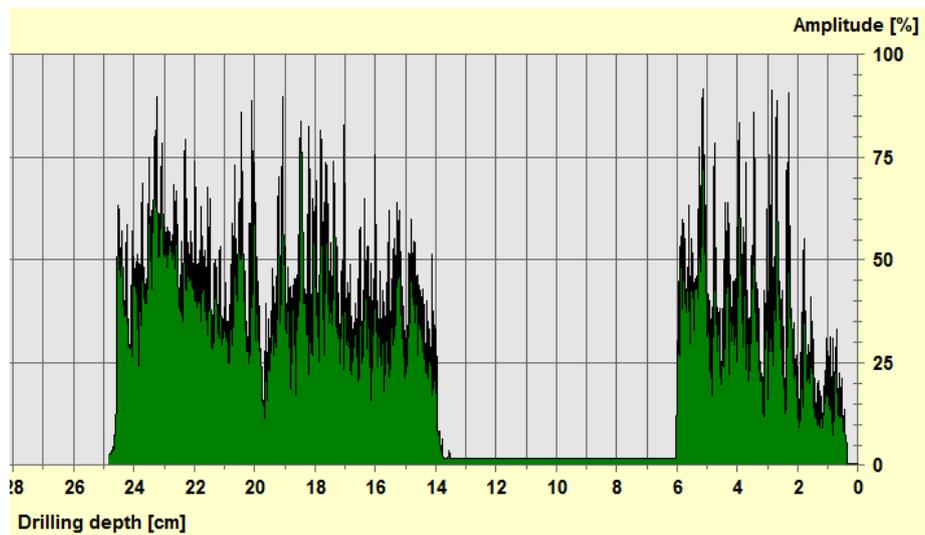


b

Figura 4.75: Foto da Seção 10 da Peça 3 com destaque (linha vermelha) na posição da furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo na mesma posição (b).



a



b

Figura 4.76: Foto da Seção 7 da Peça 3 com destaque (linha vermelha) para a posição na furação (a) e gráfico do resistógrafo na mesma posição (b).

Importante destacar que houve problemas com o resistógrafo quando a inspeção foi

realizada em pontos com a presença de ocos de grande comprimento seguidas de madeira sã. Para essa condição a agulha do resistógrafo apresentou dificuldade para penetrar na zona de madeira íntegra após a passagem pelo oco, provavelmente porque grande comprimento de agulha ficou sem apoio. Tendo em vista que a agulha não consegue penetrar na madeira, mas a rotação continua, a agulha se curva (Figura 4.77).

Para que as medições em zonas como estas fossem realizadas, cumprindo o objetivo da pesquisa, a recomendação do revendedor autorizado (*PDInstrumentos*) foi que a medição fosse realizada em um sentido, até atingir o oco e em seguida fosse realizada no sentido contrário até a profundidade atingida na primeira direção. Esse procedimento resolveu a situação de laboratório, mas em condições de campo o ensaio só seria realizado se não houvesse o conhecimento antecipado da existência do oco, de forma que o uso do resistógrafo nestas condições estaria prejudicado.

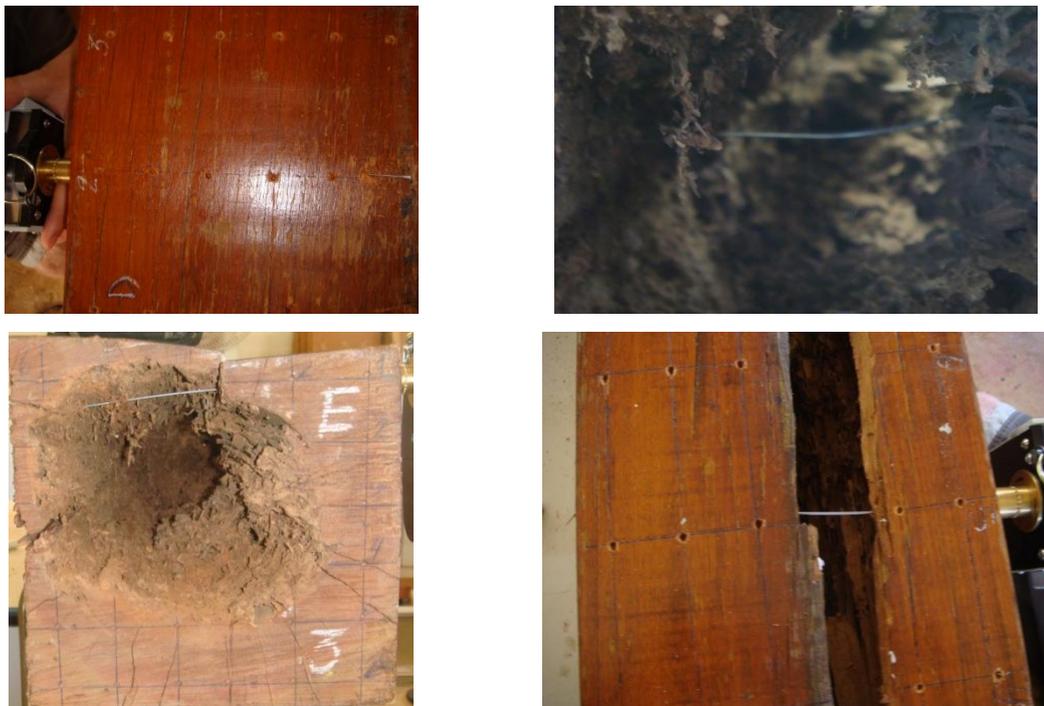


Figura 4.77: Exemplos da deformação da agulha do Resistógrafo durante perfuração.

4.3.4 Peça 4

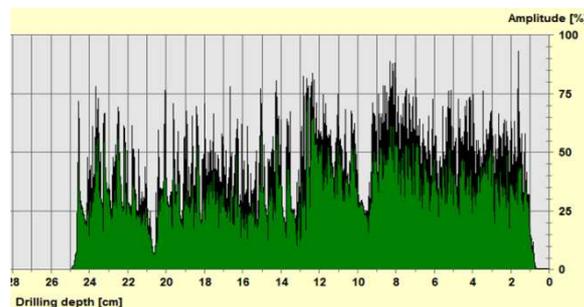
A análise visual da peça 4 só apresentou defeitos na face C (Tabela 4.4 e Figura 4.4). Assim, escolheu-se para a discussão dos resultados do resistógrafo um ponto fora da zona com identificação de defeitos e dois pontos dentro da zona com defeitos. A zona sem defeito foi na linha 2, coluna 1 (Figura 4.4) e as zonas com defeito foram as linha 4, coluna 6, dentro do defeito número 2, e a linha 4, coluna 2, correspondente ao defeito número 1 (Figura 4.4).

Conforme já discutido, a peça 4 estava íntegra (Figura 4.19), e os resultados do resistógrafo confirmaram esta condição.

Na região sem defeito identificado visualmente há uma queda de amplitude a 21 cm da borda A (direita), que é coincidente com uma pequena trinca interna.



a



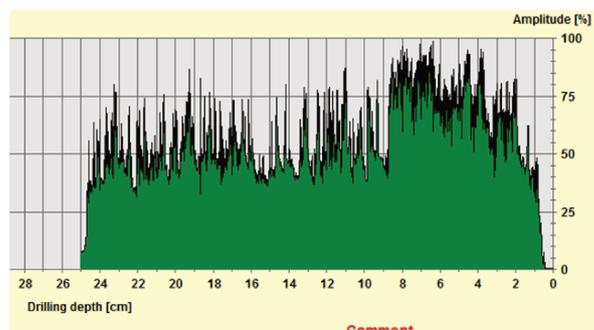
b

Figura 4.78: Foto da Seção 1 da Peça 4 com destaque (linha vermelha) para a posição da perfuração (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).

Nas regiões onde aparentemente havia defeitos (Figura 4.4) as imagens do resistógrafo indicam que a madeira está íntegra (Figura 4.79 e 4.80). Nestes casos (zonas com defeitos detectados na análise visual) o resistógrafo foi bastante útil para mostrar que se tratavam de defeitos apenas superficiais. Mais uma vez, na região da medula (Figura 4.80) a amplitude apresentada pelo resistógrafo apresentou queda.



a

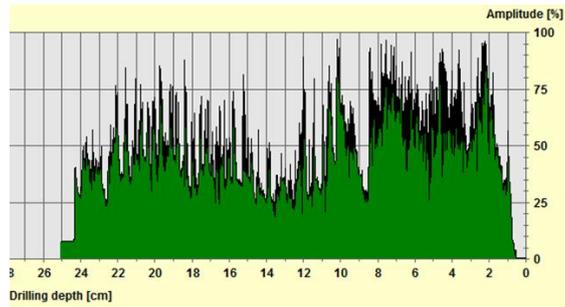


b

Figura 4.79: Foto da Seção 6 na Peça peça 4 com destaque (linha vermelha) para a posição da furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).



a



b

Figura 4.80: Foto da Seção 2 na Peça 4 com destaque (linha vermelha) para a posição de furação (a) e gráfico gerado pelo resistógrafo nesta mesma posição (b).

4.4 Inspeção utilizando a associação dos métodos não destrutivos

Neste item se discute a associação das técnicas – inspeção visual, ultrassom e resistógrafo. No caso do ultrassom foram utilizadas as imagens obtidas por meio da medições diretas perpendiculares a grã (tomografia ultrassônica), que se mostraram mais completas para indicarem as regiões com deterioração.

De forma a facilitar a interpretação conjunta dos resultados do ultrassom e do resistógrafo, as imagens da tomografia ultrassônica foram rerepresentadas indicando-se o grid de medição.

4.4.1 Peça 1

A Figura 4.80 reapresenta um dos resultados da tomografia ultrassônica da peça 1, bem como o grid, com a indicação do eixo y (valores de 1 a 6) e do eixo x (valores de 1 a 11).

A análise visual da Peça 1 daria indícios de deterioração caso se tivesse acesso a face A (Figura 4.1), pois nas demais faces os defeitos foram muito pequenos. Na imagem de tomografia ultrassônica realizada com o transdutor de 80 kHz (direção AC) há indícios de que toda a peça apresenta algum nível de deterioração, pois somente uma região central (aproximadamente do $x = 3$ ao $x = 8$) apresentou velocidades superiores a 1500 m.s^{-1} . Mesmo nessa região central essa velocidade não foi obtida em toda a seção, mas somente aproximadamente de $y = 1$ a $2,5$. Há também regiões com velocidades muito inferiores, que poderiam indicar a existência de ocos ou zonas com alto grau de deterioração. No entanto, não seria possível comprovar o grau da deterioração nem a existência de oco.

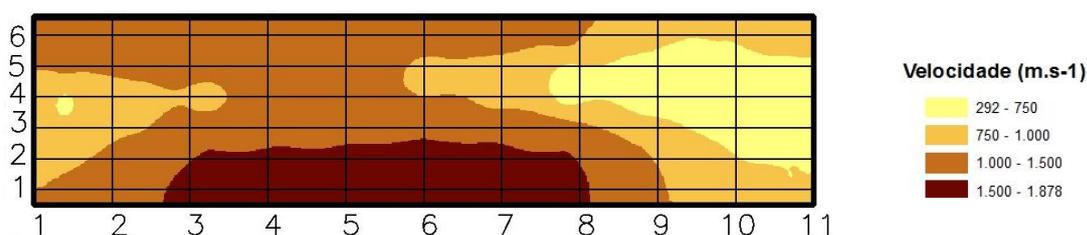


Figura 4.81: Tomografia ultrassônica obtida do ensaio direto perpendicular a grã- Peça 1, direção de medição AC, transdutor de 80kHz , indicação do grid de medição.

Neste caso o uso do resistógrafo poderia ser utilizado para comprovar a necessidade de substituição da peça. No entanto, é necessário evitar a furação em grande número de pontos, bem como em pontos adjacentes.

Considerando esses aspectos escolheu-se o ponto de coordenadas (1,5), com velocidade superior a 1500 m.s^{-1} , o ponto de coordenadas (2,2) com velocidade entre 1000 e 1500 m.s^{-1} ; o ponto de coordenadas (1,10) de velocidade 750 a 1000 m.s^{-1} e o ponto de coordenadas (4,11) com velocidade menor que 750 m.s^{-1} .

O resultado do resistógrafo no ponto de coordenada (1,5) confirma que a madeira com velocidade acima de 1500 m.s^{-1} está íntegra (Figura 4.82). No ponto de coordenada (2,2), cuja velocidade foi de 1000 a 1500 m.s^{-1} , o resistógrafo indica um

trecho com amplitude bem abaixo das demais (Figura 4.83). Para a coluna 10 os resultados do resistógrafo mostram que na coordenada (1,10), correspondente a velocidade na faixa de 750 a 1000 m.s⁻¹, não há a ocorrência de oco, mas apenas 2 pontos com redução de amplitude (90 mm e 150 mm). No ponto de coordenada (4,11), correspondente a velocidades inferiores a 750 m.s⁻¹, há um trecho de cerca de 100 mm com amplitude próxima de zero (Figura 4.85).

Estes resultados seriam indicativos de que, exceto para a faixa de velocidade acima de 1500 m.s⁻¹, há irregularidades apontadas pelo resistógrafo (reduções bruscas de amplitude e amplitudes zero), confirmando que a peça apresenta grande área deteriorada, devendo ser substituída.

As imagens das seções desta peça (Figura 4.12) confirmam este resultado, mostrando que ocos ou áreas deterioradas estão presente em todo o comprimento da peça.

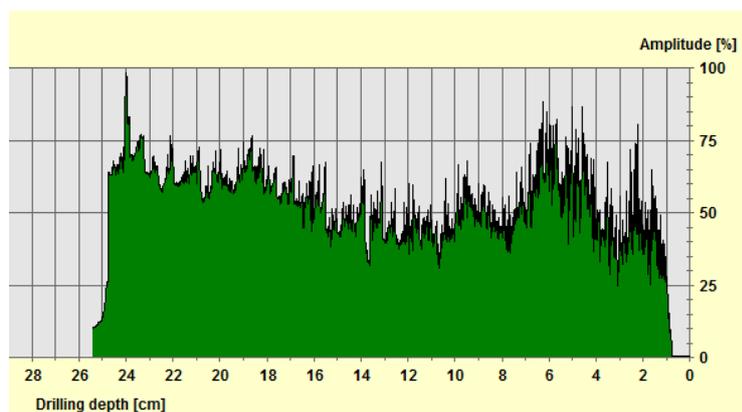


Figura 4.82: Gráfico gerado pelo resistógrafo na região de velocidade superior a 1500 m.s⁻¹, correspondente a medição no ponto de coordenada (1,5) na Peça 1.

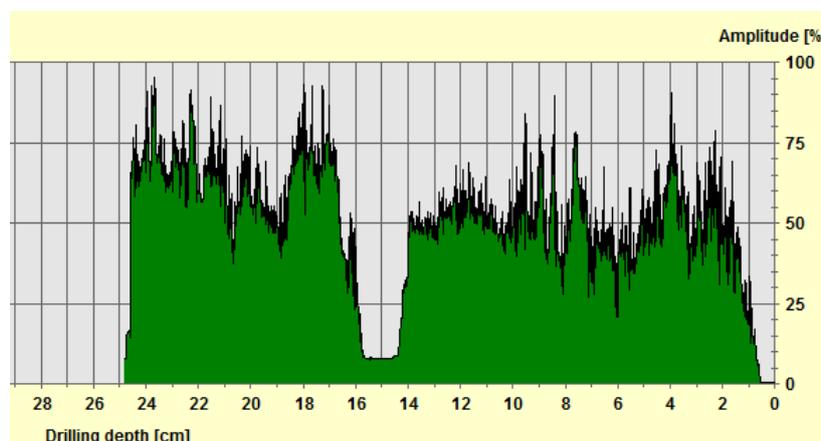


Figura 4.83: Resultado do resistógrafo na região de velocidade entre 1000 e 1500 m.s⁻¹, correspondente a medição no ponto de coordenadas (2,2) na Peça 1.

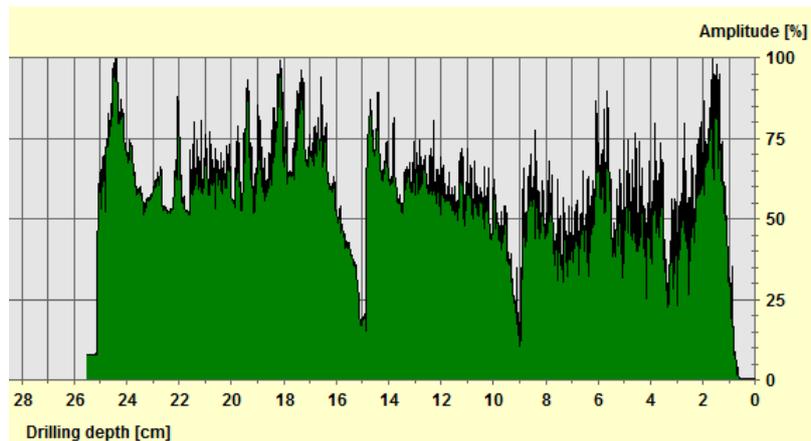


Figura 4.84: Resultado do resistógrafo na região de velocidade entre 750 e 1000 m.s⁻¹, correspondente ao ponto de coordenada (1,10) da Peça 1.

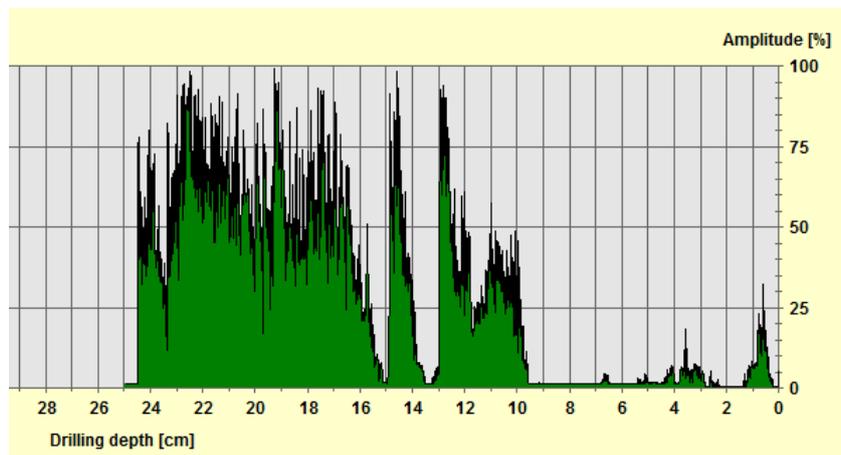


Figura 4.85: Resultado do resistógrafo na região de velocidade menor que 750 m.s⁻¹, correspondente ao ponto de coordenada (4,11) da Peça 1.

4.4.2 Peça 2

Para a peça 2 a análise visual indicou alguns defeitos nas faces A e B (Figura 4.2 e Tabela 4.2). A tomografia ultrassônica que indicou velocidades mais baixas foi a obtida com transdutor de 45 kHz e faces exponenciais (Figura 4.13). Esse transdutor foi o único que indicou velocidades menores do que 1500 m.s⁻¹ distribuída em toda a peça (Figura 4.13). Nos demais casos a peça apresenta-se com velocidades superiores a 1500 m.s⁻¹, exceto para o transdutor de 80 kHz, direção de medição BD, que mostra a extremidade direita com velocidades inferiores a 1500 m.s⁻¹, mas mesmo assim acima de 1200 m.s⁻¹. Assim, o resultado de inspeção visual e por ultrassom dariam indicativo de que esta peça estaria íntegra, mas haveria uma dúvida, principalmente na

extremidade direita.

Da mesma forma que para a Peça 1, para confirmar o resultado do ultrassom foram utilizadas medições com o resistógrafo. Para melhor visualização dos pontos de medição do resistógrafo, se tomou como base o resultado da tomografia obtida com utilização do transdutor de 80 kHz (face B para D), reapresentado com o grid (Figura 4.86). Deste grid a opção foi selecionar um ponto da coluna 10, com velocidades mais baixas. Considerando que a inspeção com o transdutor de faces exponenciais (A para C) apontou, para esta mesma região, uma zona com baixa velocidade mais para a parte superior da peça (Figura 4.13), o ponto adotado foi o de coordenadas (5,10).

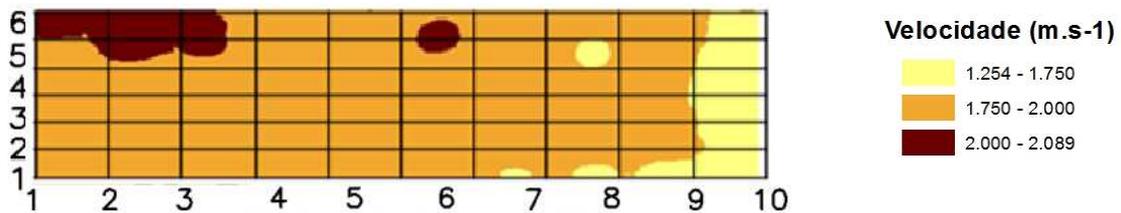


Figura 4.86: Tomografia ultrassônica resultante da medição indireta perpendicular à fibra com transdutor de 80 kHz de frequência na direção de medição BD, com inserção do grid.

O resultado do resistógrafo para o ponto de coordenadas (5,10) aponta para a existência de oco (Figura 4.87). No entanto, caso o ponto escolhido para avaliação fosse o de coordenadas (2,10), por exemplo, há grande redução da amplitude, mas o oco não apareceria (Figura 4.87), podendo alterar o resultado da inspeção.

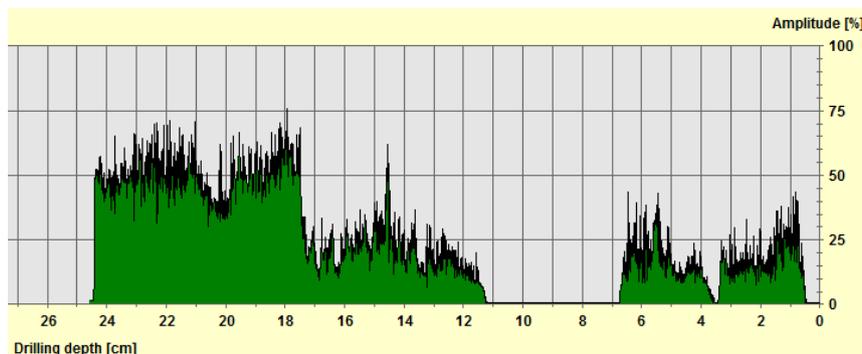


Figura 4.87: Resultado do resistógrafo no ponto de coordenadas (5,10) da Peça 2.

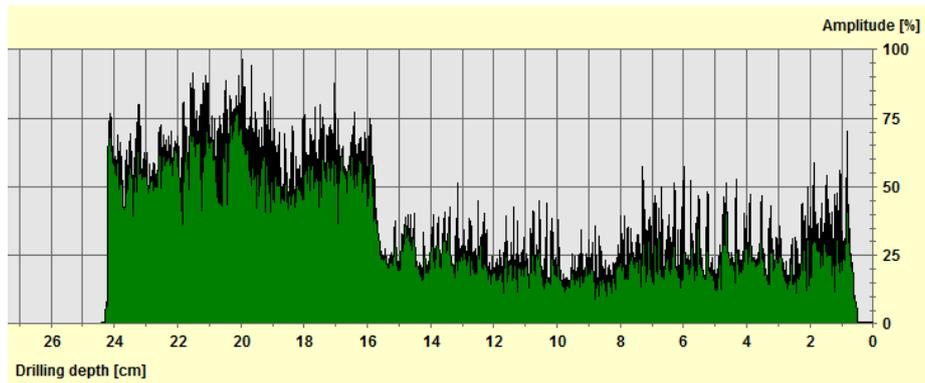


Figura 4.88: Resultado do resistógrafo no ponto de coordenadas (2,10) na Peça 2.

Imagem das seções da Peça 2 (Figura 4.14) mostram que realmente só na seção 10 há o aparecimento do oco, estando o restante da peça íntegra.

4.4.3 Peças 3 e 4

No caso das Peças 3 e 4 não haveria necessidade do uso do resistógrafo, pois somente com a análise visual e com a tomografia ultrassônica se concluiria que a peça 3 está totalmetne deteriorada e a Peça 4 integralmente em bom estado.

5. Conclusões

- Medições de propagação de ondas de ultrassom na forma direta (ondas de compressão) e perpendicular a grã, realizadas com equipamento convencional, possibilitam a construção de imagem (tomografia ultrassônica) representativa da variação da velocidade na peça inspecionada. Com estas imagens é possível identificar regiões com velocidades compatíveis com madeira íntegra e regiões com velocidades indicativas de deterioração ou ocos. Quando em grande parte da peça as velocidades são compatíveis com madeira sã ou com madeira severamente deteriorada, o uso da técnica associado apenas a análise visual permite tomar decisões a respeito da inspeção, evitando a necessidade do uso de equipamento complementar. No entanto, quando há muitas faixas de velocidade, a associação da resistência à perfuração foi necessária para a interpretação correta da inspeção.
- Medições de propagação de ondas de ultrassom na forma direta (ondas de compressão) e paralela à grã nas regiões com madeira íntegra permitem avaliar a condição de rigidez/resistência residual.
- Medições de propagação de ondas de ultrassom na forma semidireta podem ser utilizadas para inferir a velocidade longitudinal quando não se tem acesso às extremidades da peça sob inspeção, mas o valor da velocidade tem que ser corrigido pelo ângulo formado entre a direção de propagação da onda e a direção da grã.
- Medições de propagação de ondas de ultrassom na forma indireta (ondas superficiais) resultaram em velocidades próximas ($\cong 85\%$) das obtidas de forma direta paralelas à grã (longitudinal) apenas quando a distância entre os transdutores foi maior do que 4 vezes o comprimento de onda. Desta forma, é importante que nas inspeções nas quais se pretenda utilizar a velocidade longitudinal como referência, se tenha o cuidado de manter a distância entre os transdutores nestes patamares.
- O uso da resistência a perfuração, associada a propagação de ondas de ultrassom e a análise visual, é adequado para esclarecer dúvidas relativas ao nível e a extensão do comprometimento em relação à dimensão da peça na direção de medição, bem como verificar se o comprometimento é devido à existência de ocos. No entanto, por ser de aplicação localizada, seu uso como único equipamento de END é limitado.

6. Referências bibliográficas

ANDREUCCI, R. Aplicação Industrial do Ensaio por Ultrassom. Apostila. ABENDI, 2008. Disponível em: < <http://www.abendi.org.br>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2013.

ARRIAGA,F.; ÍNIGUEZ,G. ;ESTEBAN,M.;BOBADILLA,I. Proposal of a Methodology for the Assessment of Existing Timber Structures. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 16, 2009. China. **Anais...** China: Beijing Forestry University. p.145-151.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R.; BUCUR, V. Dispersão de ondas de ultrassom em peças de madeira serrada de Eucalyptus em função da geometria. **Scientia Forestalis**, v. 63, p. 235–240, 2003.

BEALL, F. C. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. **Wood Science and Technology**, v. 36, n. 3, p. 197–212, 2002.

BERTOLDO, C.; DIJK, R.V.; GONÇALVES, R.; SORIANO, B. Conversion Mode of the Ultrasound Wave. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 18, 2013. EUA. **Anais...** EUA: Forest Products Laboratory.

BOTELHO JR, J. A. **Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos**, 2006.207p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Porto.

BRASHAW, B. K.; BUCUR, V.; DIVOS, F. *et al.* Nondestructive Testing and Evaluation of Wood : A Worldwide Research Update. **Forest Products Journal**, v. 59, n. 3, p. 7–14, 2009.

BRASHAW, B. K.; VATALARO, R.; ROSS, R. J.; WANG, X.;SCHMIEDING, S.; OKSTAD, W. Historic Log Cabin structural condition assessment and rehabilitation – A case study. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND

EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 17, 2011, Hungria. **Anais...** Hungria: University of West Hungary. Vol 2, p.505-512.

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

BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. 2nd ed. Nova York: CRC Press, 2006.

CALDERONI, C.; DE MATTEIS, G.; GIUBILEO, C.; MAZZOLANI, F. M. Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements. **Engineering Structures**, v. 32, n. 2, p. 442–448, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014102960900323X>>. Acesso em: 16/5/2012.

CAVALLI, A.; TOGNI, M.; Combining NDT and visual strength grading to assess ancient timber beams stiffness to evaluate strengthening interventions suitability. INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 17, 2011, Hungria. **Anais...** Hungria: University of West Hungary. Vol 2, p.505-512

EL-KASSABY, Y. A.; MANSFIELD, S.; ISIK, F.; STOEHR, M. In situ wood quality assessment in Douglas-fir. **Tree Genetics & Genomes**, v. 7, n. 3, p. 553–561, 2011. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11295-010-0355-1>>. Acesso em: 29/4/2012.

EMERSON, R.; POLLOCK, D.; MCLEAN, D. *et al.* Ultrasonic inspection of large bridge timbers. **Forest Products Journal**, v. 52, p. 88, 95, 2002.

ESTEBAN, M.; BOBADILLA, I.; ARRIAGA, F.; ÍÑIGUEZ, G. GARCÍA, H. NDT Applied to Estimate the Mechanical Properties of the Timber of an Ancient Structure in Valsaín, Segovia (Spain) In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 16, 2009. China. **Anais...** China: Beijing Forestry University. p.152-157.

FÁTIMA, A. DE; GOUVÊA, G.; TRUGILHO, P. F. *et al.* Determinação da densidade básica da madeira de eucalyptus por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, v. 35, p. 349–358, 2011.

GONÇALVES, R, TRINCA, A.J. Variation of the velocity and attenuation as a function of the pressure on the transducers. In: PROCEEDINGS OF THE 15TH INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD SYMPOSIUM,15, 2007. Estados Unidos. **Anais...**Duluth, 10–12, p 263

GOIA, F. R. O. et al.. Efeito do comprimento do corpo-de-prova na velocidade ultrassônica em madeiras. **Revista Árvore**, v.30, n.1, p.141-145, 2006.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; FERREIRA, G. C, S. Effect of coupling media on velocity and attenuation of ultrasonic waves in Brazilian wood. **Journal of Wood Science**, 2011.

KUBUS, M. The Evaluation of Using Resistograph when Specifying the Health Condition of a Monumental Tree. **Notuale Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 37, n. 1, p. 157–164, 2009.

LI, H.; ZHANG, X.; YU, Z. ZHANG, S. SHI, Z.; LIU, X. Research on a Field Non-Destructive Wood Component Testing Technology for Ancient Architecture In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 16, 2009. China. **Anais...** China, Beijing Forestry University. p.152-157

MADHOUSHI, M.; EIMANIAN, J.; ANSELL, M. P. Non destructive and laboratory evaluation of strength of decayed wood members in a historic construction located in Gorgan (North of Iran). **Taylor and Francis Group**, p. 469–472, 2008.

MAYERS, M.A. Dynamic behavior of materials. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, 1994 apud WANG, X.; ROSS, R. J.; CARTER, P. Acoustic Evaluation of Wood Quality in Standing Trees . Part I Acoustic Wave Behavior. **Wood and Fiber Science**, v. 1, n. 39, p. 28, 38, 2007

MONTANA QUÍMICA. Disponível em :<<http://www.montana.com.br/Guia-da-Madeira/Tratamento/Agentes-Biodeterioradores>>. Acesso em 21 de janeiro de 2013.

PUCCINI, C. T.; GONÇALVES, R.; MONTEIRO, M. E. A. Avaliação Estatística da variação da velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira em presença de defeitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 499–503, 2002.

RIGGIO, M.; PIAZZA. Stress waves tomography for the analysis INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 17, 2011, Hungria. **Anais...** Hungria: University of West Hungary. Vol 2, p.505-512.

RINN, F. Resistographic Visualizaton of tree-rings density variations. **Radiocarbon**, p. 871–878, 1996.

RINN, F. Practical application of micro-resistance drilling for timber inspection. **Holztechnologie**, v. 54, p. 32-38, 2013.

ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; WANG, X. Assessment of In-Service Wood. **Forest Products Journal**, v. 56, n. June, p. 4–8, 2006.

SECCO, C. B. Detecção de ocos em toras utilizando método de propagação de ondas ultrassônicas, 2011.[s.n.]. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SHAJI, B. T.; SOMAYAJI, S.; MATHEWS, M. S. Ultrasonic Pulse Velocity Technique for inspection and Evaluation of Timber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 12, n. 2, p. 180–186, 2000.

TEDER, M.; PILT, K.; MILJAN, M.; LAINURM, M. KRUUDA, R. Overview of some non-destructive methods for in situ assessment of structural timber. INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 17, 2011, Hungria. **Anais...** Hungria: University of West Hungary. Vol 2, p.583-593.

TRINCA, A. J.; GONÇALVES, R. Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor da velocidade de propagação de onda de ultra-som na madeira. **Revista Árvore**, v. 33, n. 1, p. 177–184, 2009.

YU, Z.; ZHANG, S.; LI, H.; LIU, X. Implulse Stress Tomography for Inspecting Wood Components of Ancient Wood Structures. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 16, 2009. China. **Anais...** China, Beijing Forestry University. p.169-173.

WACKER, J. P.; WANG, Xiping; RAMMER, D. R.; WOODWARD, B. M. NDE investigation of the timber foundation in the historic Kennecott Mine Concentration Mill Building. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 17, 2011,Hungria. **Anais...** Hungria: University of West Hungary. Vol 2, p.583-593.

WANG, X.; ROSS, R. J.; CARTER, P. Acoustic Evaluation of Wood Quality in Standing Trees . Part I Acoustic Wave Behavior. **Wood and Fiber Science**, v. 1, n. 39, p. 28, 38, 2007

WILCOX, W.W. Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. **Wood Fibre** v.9, n.4.252–257, 1978

ZHANG, H; WANG,X.; ZHU, L.; SUN, Y.; ROSS, J.R.; BRASHAW, B. An integrated NDT approach for Determining Residual Strenght of Ancient Wood Structures Members. INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 17, 2011,Hungria. **Anais...** Hungria: University of West Hungary. Vol 2, p.505-512.

ANEXO I

Determinação da área deteriorada da seção

Utilizando a metodologia descrita no item 3.4 Determinação da área degradada das seções, o erro porcentual de determinação da área ((área obtida pelas diferentes metodologias/área real)*100) foi calculado. O cálculo foi realizado utilizando o *AutoCad* e considerando as diferentes formas de obtenção das imagens descritas no item 3.4. Este erro variou entre 1,02% a 12,83% (Tabela I.1), considerando as duas áreas utilizadas como referência (quadrado e circunferência).

Tabela I.1: Erro de estimação da área por foto e por escaneamento

Tipo de imagem	Erro percentual para quadrado (%)	Erro percentual para circunferência (%)
Frontal	1,50	1,02
Inclinada lateralmente	3,75	4,02
Inclinação frontal	12,83	4,43
Escaneada	1,57	1,81
área real do quadrado		16,00 cm ²
área real da circunferência		50,27 cm ²

Os erros na estimativa da área por meio das fotos frontais foram os menores, tanto para o quadrado quanto para a circunferência (Tabela I.1), seguido dos erros obtidos a partir da imagem tirada com o escâner. Esse resultado sugere que a metodologia da foto frontal pode substituir a do escâner, que é mais trabalhosa e demorada. Entretanto, faz-se a ressalva de que pequenas variações na inclinação durante a tomada das fotos, podem acarretar erros de até cerca de 12% considerando para a forma geométrica quadrada e de cerca de 4% para a circunferência. Assim, é importante que as fotos sejam obtidas o mais ortogonal possível em relação ao plano da seção. Adicionalmente, conclui-se que figuras com vértices são mais susceptíveis a variação na área estimada em função da inclinação na tomada da fotografia.

Desta forma, utilizou-se como método de estimação de área a fotografia frontal (Exemplo na Figura I.1). Assim, para as 47 seções efetuou-se a sequência descrita no

item 3.4 Determinação da área degradada das seções para estimar a área deteriorada de cada uma das seções. A Figura I.1: Detalhe da determinação da área degradada exemplifica o resultado obtido para uma destas seções (peça 1, seção 5A)



Figura I.1: Detalhe da determinação da área degradada

Algumas das seções se partiram durante o processo de corte, especialmente aquelas provenientes da amostra de pilar 3, que apresentava grande deterioração ao longo de todo o seu comprimento. Desta forma, para ser possível a obtenção de algumas das fotos foi preciso fazer um “encaixe” das partes soltas. Estes encaixes são indicados, por exemplo, na Figura I.2.



Figura I.2: Recomposição da seção para se estimar a área degradada

Nesta pesquisa se considerou como área degradada aquela na qual a madeira não se encontra totalmente íntegra, e não necessariamente a área de um oco (Figura I.3).

Assim, regiões com degradação moderada adjacentes a regiões totalmente degradadas (“oco”) foram também incluídas no cálculo das áreas, mas nas tabelas que apresentam as áreas e os perímetros se destacou o que correspondia a região ocada ou região degradada mas sem oco (Tabelas 4.8 e 4.9).



Figura I.3: Exemplos de seções com regiões denominadas degradadas