

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA INTEGRIDADE DA
MADEIRA DE EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS POR MEIO DE PULSOS
ULTRA-SÔNICOS**

Amanda Rocha Teixeira

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da
Escola de Engenharia da Universidade Federal de
Minas Gerais, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia de Estruturas.

Área de concentração: Estruturas de Madeira
Orientador: Professor Edgar V. Mantilla Carrasco
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA INTEGRIDADE
DA MADEIRA DE EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS POR MEIO DE
PULSOS ULTRA-SÔNICOS"**

Amanda Rocha Teixeira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco
DEES-UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Marco Antônio Penido de Resende
EA-UFMG

Prof. Dr. José Tarcísio Lima
UFLA

Belo Horizonte, 21 de agosto de 2009

Dedico esta obra aos meus pais,
Rosamires Rocha Galvão e Lívio
Teixeira de Andrade Filho, pelo apoio
incondicional, tanto moral quanto
financeiro, em mais este projeto de
minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu amigo Júnior, uma das pessoas mais admiráveis que eu conheci percorrendo este caminho e que, muitas vezes, renunciou a sua atribulada rotina para transmitir o seu conhecimento de maneira muito clara e objetiva.

Ao Luiz Felipe, pelo carinho e compreensão, transmitindo calma nos momentos mais difíceis e sempre apostando na minha capacidade.

Aos meus queridos amigos do mestrado, Everaldo, Maíra e Rodrigo, pelo companheirismo e amizade, incentivando-me sempre a seguir em frente.

À turminha do laboratório, Luciana, Hugo, Luíza, Erick, Frederico e Marcus, pela ajuda nos experimentos e pelas tardes formidáveis de muitas risadas e revelações.

À Aninha que, por muitas vezes, auxiliou-me nas complexas traduções do português para o inglês.

Ao meu estimável orientador, Professor Edgar, que me incentivou a ingressar ao mestrado e contribuiu de forma significativa para a elaboração desta dissertação, além de se mostrar um verdadeiro amigo nas situações extra-acadêmicas.

À Inês e toda a turma do Departamento de Estruturas pelo apoio e atenção.

Ao pessoal do IPHAN que, gentilmente, cederam algumas peças estruturais da cobertura da Igreja do Pilar para a pesquisa

À FAPEMIG pela bolsa de estudos concedida.

A todas as pessoas que de algum modo contribuíram para a realização deste trabalho.

“Não se pode dizer de Ouro Preto
que seja uma cidade morta. (...)
Ouro Preto é a cidade que não mudou,
e nisso reside seu incomparável encanto.”

Manoel Bandeira

SUMÁRIO

RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. A madeira nas construções históricas	5
2.2. Insetos xilófagos	9
2.3. Ensaio não-destrutivos	13
2.4. Ultra-som	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. Materiais e equipamentos	28
3.2. Metodologia	31
4. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS E RESULTADOS	36
4.1. Ensaio 1.....	36
4.2. Ensaio 2.....	42
4.3. Ensaio 3.....	48
4.3.1. Ensaio com transdutores de frequência equivalente a 500 kHz.....	52
4.3.2. Ensaio com transdutores de frequência equivalente a 150 kHz.....	58
5. CONCLUSÕES	65
ANEXO A.....	71
ANEXO B.....	91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Igreja da Ordem Terceira de São Francisco, Salvador, Bahia.	2
FIGURA 1.2 – Ponte histórica: (a) Vista geral da ponte; (b) Viga potencialmente deteriorada.	2
FIGURA 1.3 – Fazenda histórica do período imperial brasileiro.	3
FIGURA 2.1 – Construções históricas: (a) Igreja de Nosso Senhor do Bonfim e (b) Igreja e Convento de São Francisco.	6
FIGURA 2.2 – Aspectos de madeiras atacadas por cupins.	12
FIGURA 2.3 – (a) Aspecto de uma madeira degradada por um anobídio e (b) anobídio.	13
FIGURA 2.4 – Representação esquemática do equipamento medidor de ondas de tensão.	14
FIGURA 2.5 – Instrumento de medição da resistência ao furo: Pilodyn.	15
FIGURA 2.6 – Representação esquemática de uma medição por radiografia.	16
FIGURA 2.7 – Radiografias de uma seção transversal de madeira com vários defeitos.	16
FIGURA 2.8 – Equipamentos utilizados para medir microondas.	17
FIGURA 2.9 – Mapeamento da viga de madeira laminada colada na inspeção ultra-sônica.	20
FIGURA 2.10 – Comparação da condição interna da peça com os valores de tempo de viagem do pulso obtidos pelo ultra-som.	20
FIGURA 2.11 – Emissão normal às fibras.	21
FIGURA 2.12 – Influência dos defeitos na emissão ultra-sônica.	22
FIGURA 2.13 – Galerias de cupins observadas em corpos-de-prova de pinus, expostos por 30, 45 e 60 dias, respectivamente, da esquerda para a direita.	24
FIGURA 2.14 – Transdutores ultra-sônicos e materiais acopladores.	26
FIGURA 2.15 – Representação do transdutor exponencial ultra-sônico usado por Sandoz.	27
FIGURA 3.1 – Viga de madeira laminada colada usada no Ensaio 1.	29
FIGURA 3.2 – Viga de madeira utilizada no Ensaio 2.	29
FIGURA 3.3 – Peça de madeira utilizada no Ensaio 3.	30

FIGURA 3.4 – Aparelhos de ultra-som.	30
FIGURA 3.5 – Transdutores: (a) 150 kHz e (b) 500 kHz.	31
FIGURA 3.6 – Transmissão direta.	32
FIGURA 3.7 – Transmissão indireta.	33
FIGURA 3.8 – Percurso da onda.	35
FIGURA 4.1 – Dimensões da viga de madeira laminada colada.	37
FIGURA 4.2 – Representação esquemática do primeiro mapeamento.	38
FIGURA 4.3 – Representação real do segundo mapeamento.	38
FIGURA 4.4 – Representação esquemática do segundo mapeamento.	39
FIGURA 4.5 – Detalhamento da região 1.	39
FIGURA 4.6 – Detalhamento da região 2.	39
FIGURA 4.7 – Detalhamento da região 3.	40
FIGURA 4.8 – Contornos indicando regiões de mesmos tempos de propagação.	40
FIGURA 4.9 – Localização das deteriorações na viga.	41
FIGURA 4.10 – Defeitos encontrados na inspeção visual.	42
FIGURA 4.11 – Fachada lateral, com o acesso principal ao edifício.	43
FIGURA 4.12 – Detalhe das tesouras da estrutura da cobertura.	43
FIGURA 4.13 – Fachada lateral, com o acesso secundário ao edifício.	43
FIGURA 4.14 – Viga principal e vigas secundárias de suporte do segundo piso.	44
FIGURA 4.15 – Viga principal de suporte do vigamento secundário do segundo piso.	44
FIGURA 4.16 – Viga principal perimetral externa.	45
FIGURA 4.17 – Vigas secundárias (barrotes) de suporte do piso.	45
FIGURA 4.18 – Dimensões da viga do Ensaio 2.	46
FIGURA 4.19 – Molde utilizado no mapeamento da viga.	46
FIGURA 4.20 – Mapeamento da viga no Ensaio 2.	46
FIGURA 4.21 – Defeitos detectados na inspeção visual: (a) pregos, (b) fresta e (c) rachadura.	47
FIGURA 4.22 – Construções Históricas da cidade de Ouro Preto, Minas Gerais.	48
FIGURA 4.23 – Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar.	49
FIGURA 4.24 – Restauração da cobertura da Igreja do Pilar: (a) execução da obra; (b) execução da obra e (c) vista geral da igreja.	50
FIGURA 4.25 – (a) Peças descartadas e (b) peças doadas para o estudo.	50

FIGURA 4.26 – Dimensões da peça para o Ensaio 3.....	51
FIGURA 4.27 – Molde utilizado no mapeamento do Ensaio 3.....	51
FIGURA 4.28 – Mapeamento da peça do Ensaio 3.....	52
FIGURA 4.29 – Corte na peça.....	53
FIGURA 4.30 – Representação esquemática do mapeamento na face anterior e superior.	53
FIGURA 4.31 – Representação real do mapeamento: (a) face anterior e (b) face superior.....	54
FIGURA 4.32 – Representação esquemática do mapeamento na face posterior e inferior.....	54
FIGURA 4.33 – Representação real do mapeamento: (a) face posterior e (b) face inferior.....	55
FIGURA 4.34 – Cortes transversais realizados na peça.....	57
FIGURA 4.35 – Resultados obtidos para a fatia 3, referente à posição 3-4 dos transdutores de frequência de 500 kHz.....	58
FIGURA 4.36 – Corte na peça para o ensaio com o transdutor de 150 kHz.....	59
FIGURA 4.37 – Representação esquemática do mapeamento na face anterior e superior do ensaio com o transdutor de 150 kHz.....	59
FIGURA 4.38 – Representação real do mapeamento para o ensaio com o transdutor de 150 kHz: (a) face anterior e (b) face superior.....	60
FIGURA 4.39 – Representação esquemática do mapeamento na face posterior e inferior do ensaio com o transdutor de 150 kHz.....	60
FIGURA 4.40 – Representação real do mapeamento para o ensaio com o transdutor de 150 kHz: (a) face posterior e (b) face inferior.....	61
FIGURA 4.41 – Cortes transversais realizados na peça do ensaio com o transdutor de 150 kHz.....	63
FIGURA 4.42 – Resultados obtidos para a fatia 2, referente à posição 1-3 dos transdutores de frequência de 150 kHz.....	63
FIGURA B.1 – Resultados obtidos para a fatia 1, referente à posição 1-2 dos transdutores de frequência de 500 kHz.....	92
FIGURA B.2 – Resultados obtidos para a fatia 2, referente à posição 2-3 dos transdutores de frequência de 500 kHz.....	93

FIGURA B.3 – Resultados obtidos para a fatia 3, referente à posição 3-4 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	93
FIGURA B.4 – Resultados obtidos para a fatia 4, referente à posição 4-5 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	94
FIGURA B.5 – Resultados obtidos para a fatia 5, referente à posição 5-6 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	94
FIGURA B.6 – Resultados obtidos para a fatia 6, referente à posição 6-7 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	95
FIGURA B.7 – Resultados obtidos para a fatia 7, referente à posição 7-8 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	95
FIGURA B.8 – Resultados obtidos para a fatia 8, referente à posição 8-9 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	96
FIGURA B.9 – Resultados obtidos para a fatia 9, referente à posição 9-10 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	96
FIGURA B.10 – Resultados obtidos para a fatia 10, referente à posição 10-11 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	97
FIGURA B.11 – Resultados obtidos para a fatia 11, referente à posição 11-12 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	97
FIGURA B.12 – Resultados obtidos para a fatia 12, referente à posição 12-13 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	98
FIGURA B.13 – Resultados obtidos para a fatia 13, referente à posição 13-14 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	98
FIGURA B.14 – Resultados obtidos para a fatia 14, referente à posição 14-15 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	99
FIGURA B.15 – Resultados obtidos para a fatia 15, referente à posição 15-16 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	99
FIGURA B.16 – Resultados obtidos para a fatia 16, referente à posição 16-17 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	100
FIGURA B.17 – Resultados obtidos para a fatia 17, referente à posição 17-18 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	100
FIGURA B.18 – Resultados obtidos para a fatia 18, referente à posição 18-19 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	101

FIGURA B.19 – Resultados obtidos para a fatia 19, referente à posição 19-20 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	101
FIGURA B.20 – Resultados obtidos para a fatia 20, referente à posição 20-21 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	102
FIGURA B.21 – Resultados obtidos para a fatia 21, referente à posição 21-22 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	102
FIGURA B.22 – Resultados obtidos para a fatia 22, referente à posição 22-23 dos transdutores de frequência de 500 kHz.	103
FIGURA B.23 – Resultados obtidos para a fatia 2, referente à posição 1-3 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	103
FIGURA B.24 – Resultados obtidos para a fatia 3, referente à posição 2-4 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	104
FIGURA B.25 – Resultados obtidos para a fatia 4, referente à posição 3-5 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	104
FIGURA B.26 – Resultados obtidos para a fatia 5, referente à posição 4-6 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	105
FIGURA B.27 – Resultados obtidos para a fatia 6, referente à posição 5-7 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	105
FIGURA B.28 – Resultados obtidos para a fatia 7, referente à posição 6-8 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	106
FIGURA B.29 – Resultados obtidos para a fatia 8, referente à posição 7-9 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	106
FIGURA B.30 – Resultados obtidos para a fatia 9, referente à posição 8-10 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	107
FIGURA B.31 – Resultados obtidos para a fatia 10, referente à posição 9-11 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	107
FIGURA B.32 – Resultados obtidos para a fatia 11, referente à posição 10-12 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	108
FIGURA B.33 – Resultados obtidos para a fatia 12, referente à posição 11-13 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	108
FIGURA B.34 – Resultados obtidos para a fatia 13, referente à posição 12-14 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	109

FIGURA B.35 – Resultados obtidos para a fatia 14, referente à posição 13-15 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	109
FIGURA B.36 – Resultados obtidos para a fatia 15, referente à posição 14-16 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	110
FIGURA B.37 – Resultados obtidos para a fatia 16, referente à posição 15-17 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	110
FIGURA B.38 – Resultados obtidos para a fatia 17, referente à posição 16-18 dos transdutores de frequência de 150 kHz.	111

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Medição de referência do tempo de viagem do pulso ultra-sônico.....	37
TABELA 4.2 – Tempos de viagem dos pulsos, distâncias percorridas e velocidades de referência encontradas para a frequência de 500 kHz.....	56
TABELA 4.3 – Tempos de viagem dos pulsos, distâncias percorridas e velocidades de referência encontradas para a frequência de 150 kHz.....	62
TABELA A.1 – Ensaio 1: tempos de propagação dos pulsos no primeiro mapeamento.	72
TABELA A.2 – Ensaio 1: tempos de propagação dos pulsos ultra-sônicos em R1 no segundo mapeamento.	73
TABELA A.3 – Ensaio 1: tempos de propagação dos pulsos ultra-sônicos em C1, C2, C3 e C4 no segundo mapeamento.	74
TABELA A.4 – Resultados obtidos pelo transdutor de 500 kHz – Face Anterior.....	75
TABELA A.5 – Resultados obtidos pelo transdutor de 500 kHz – Face Superior.....	78
TABELA A.6 – Resultados obtidos pelo transdutor de 500 kHz – Face Posterior.....	80
TABELA A.7 – Resultados obtidos pelo transdutor de 500 kHz – Face Inferior.....	83
TABELA A.8 – Resultados obtidos pelo transdutor de 150 kHz – Face Anterior.....	85
TABELA A.9 – Resultados obtidos pelo transdutor de 150 kHz – Face Superior.....	87
TABELA A.10 – Resultados obtidos pelo transdutor de 150 kHz – Face Posterior.....	88
TABELA A.11 – Resultados obtidos pelo transdutor de 150 kHz – Face Inferior.....	90

RESUMO

Atualmente, há uma maior conscientização, por parte da sociedade, da importância das construções históricas, pois o patrimônio arquitetônico é um símbolo marcante na identidade nacional. Esta preocupação reflete na manutenção deste patrimônio e faz com que cada vez mais profissionais busquem técnicas melhores para inspecionar as edificações. Dessa forma, a constante inspeção torna-se vital para a manutenção da construção histórica. Os ensaios não-destrutivos (ENDs) são os mais indicados para essa inspeção, pois não proporcionam qualquer interferência na arquitetura do elemento estrutural, mantendo, assim, a integridade e a originalidade da obra. Entre os diversos ENDs existentes, uma das opções mais difundidas e promissoras é a técnica do ultra-som. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia para inspeção de elementos estruturais de madeira atacados por insetos xilófagos, utilizando pulsos ultrasônicos. Esta metodologia foi aplicada em três elementos estruturais (três ensaios), com a finalidade de se encontrar possíveis deteriorações. Os Ensaios 1 e 2 foram realizados por meio da transmissão direta dos pulsos, ao passo que no Ensaio 3 a análise das peças ocorreu de forma indireta. Com os resultados no Ensaio 1, foi possível mapear no plano, por meio de isocromáticas, as áreas degradadas de uma viga de madeira laminada colada. Os resultados do Ensaio 2, realizado *in locu* em uma estrutura histórica de madeira, auxiliaram na incrementação da metodologia que se mostrou insatisfatória para a peça extremamente deteriorada em ocasião das retrações ocorridas ao longo do tempo. O Ensaio 3, também realizado em um antigo elemento estrutural, foi dividido em duas partes: ensaio com transdutores de frequência de 500 kHz e ensaio com transdutores de frequência de 150 kHz. A metodologia proposta permite encontrar deteriorações internas, em estruturas históricas de madeira, com um alto grau de confiabilidade. Este estudo possibilitará uma avaliação mais precisa e confiável de peças de madeira em estruturas históricas, evitando a troca desnecessária de elementos estruturais sadios supostamente deteriorados ou mesmo, a manutenção de elementos extremamente deteriorados da estrutura, que poderiam comprometer, sensivelmente, a estabilidade global da construção.

Palavras-chaves: ensaios não-destrutivos; integridade da madeira; ultra-som; insetos xilófagos; estruturas históricas de madeira.

ABSTRACT

Nowadays the society is more aware of the importance of historical buildings, as the architectural heritage is a significant symbol in the national identity. This concern reflects the maintenance of this heritage and, consequently, brings a greater number of professionals that search for better inspection techniques in the buildings. Thus, the constant inspection becomes important for the maintenance of the historical buildings. Nondestructive testings (NDTs) are the most suitable methods for this inspection, because they do not provide any interference in the architecture of the structural element, keeping the integrity and originality of the work. Among the various existing NDTs, one of the most widespread and promising is the technique of ultrasound. The objective of this work was to develop a methodology for inspection of structural elements of wood attacked by xylophagous insects, using ultrasonic pulses. This methodology was applied in three structural elements (three tests) with the objective of finding possible deterioration. Testings 1 and 2 were performed by means of direct transmission of pulses, while the analysis of the parts in Testing 3 were made in an indirect way. By the results obtained in Testing 1 it was possible, by using isochromatics, to track in the plan the degraded areas of a glued laminated wood beam. The results of Testing 2, developed *in locu* on a historic wooden structure, helped to improve the methodology that proved to be unsatisfactory for this structure extremely deteriorated because of the retractions that occurred over time. Testing 3, also conducted in an old structural element, was divided in two parts: one test using transducers with frequency of 500 kHz and one test using transducers with frequency of 150 kHz. The proposed methodology allows us to find internal deteriorations to historic wooden structures with a high degree of reliability. This study will enable a more accurate and reliable evaluation of wood elements in historic structures, avoiding the unnecessary exchange of healthy structural elements, supposedly damaged, or even the maintenance of extremely deteriorated elements of the structure, that could impair significantly the global stability of the building .

Keywords: nondestructive testings, wood integrity, ultrasound, xylophagous insects, historic wooden structures.

1

INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma maior conscientização, por parte da sociedade, da importância das construções históricas em madeira, pois este patrimônio arquitetônico é um símbolo marcante na identidade nacional. Esta preocupação reflete na manutenção deste patrimônio e faz com que cada vez mais profissionais da área de estruturas de madeira busquem técnicas melhores para inspecionar as edificações. No Brasil, onde há presença marcante da arquitetura e engenharia européias, existe um grande número de construções históricas em madeiras, como igrejas, fazendas, pontes e casarios que remontam o período colonial e imperial brasileiro, conforme pode ser visto nas FIGs. 1.1, 1.2 e 1.3. Dessa forma, a constante inspeção é de vital importância para a manutenção dessas construções.



FIGURA 1.1 – Igreja da Ordem Terceira de São Francisco, Salvador, Bahia.



(a)



(b)

FIGURA 1.2 – Ponte histórica: (a) Vista geral da ponte; (b) Viga potencialmente deteriorada.



FIGURA 1.3 – Fazenda histórica do período imperial brasileiro.

Existem dois tipos de ensaios para se realizar uma inspeção: ensaios destrutivos e não-destrutivos. Como se tratam de edificações históricas, os ensaios não-destrutivos (ENDs) são os mais indicados, pois não ocorre qualquer interferência na arquitetura e do elemento estrutural, mantendo, assim, a integridade e originalidade da obra.

Entre os diversos ENDs existentes, uma das opções mais difundidas e promissoras é a técnica do ultra-som, devido a facilidade de manuseio, seu custo relativamente baixo, a grande aproximação de seus resultados em relação à realidade e a possibilidade de realizar ensaios *in situ*.

Uma das principais finalidades do ensaio por ultra-som é a detecção de discontinuidades internas nos materiais, através da introdução de um feixe sônico que, quando introduzido numa direção favorável em relação à deterioração, aumentará, consideravelmente, o valor do tempo de viagem em relação ao tempo medido em um material sadio.

Introduzir os métodos de ensaios não destrutivos, mais especificamente o ensaio de ultra-som, na inspeção de elementos estruturais de madeira de edificações históricas

degradadas por insetos xilófagos constitui o objetivo geral a ser atingido pelo presente trabalho.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver uma metodologia para inspeção de peças estruturais de madeira de edificações históricas degradadas.
- Verificar a validade desta metodologia através de ensaios de campo e laboratório.

Buscando atender os objetivos específicos, fez-se necessário iniciar o estudo com uma revisão bibliográfica aprofundada sobre o ensaio de ultra-som, realizada no Capítulo 2. Este capítulo também abordou a madeira como material constituinte de construções históricas e os insetos xilófagos que são um dos maiores causadores de perdas de resistência nas estruturas destas edificações. Além disto, uma breve revisão dos tipos de ensaios não-destrutivos foi descrita introduzindo o ensaio em questão.

O Capítulo 3 descreve os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios e propõe métodos, apresentando, passo-a-passo, as etapas necessárias a obtenção dos pulsos ultra-sônicos.

O Capítulo 4 relata, detalhadamente, o desenvolvimento de todos os ensaios, expondo, analisando e discutindo os resultados obtidos durante a aplicação da metodologia.

O trabalho é finalizado com uma consistente conclusão no Capítulo 5.

2

REVISÃO DE LITERATURA

As pessoas, hoje em dia, estão mais conscientizadas da importância das construções históricas em sua sociedade em decorrência dos recursos disponíveis de informação como, por exemplo, meios de comunicação ou debates direcionados ao tema.

As últimas décadas testemunharam um enorme avanço nos desenvolvimentos de técnicas, métodos e equipamentos de teste, aumentando o nível da análise estrutural, do diagnóstico e da inspeção de construções históricas.

2.1. A madeira nas construções históricas

As madeiras podem ser encontradas em diversas áreas do cotidiano, desde a carcaça de um instrumento musical, até em estruturas de ponte. No âmbito das edificações, as de valor histórico possuem uma extensa quantidade de adornos e estruturas feitas de madeira e merecem um maior destaque, pois seu valor vai além do material, envolvendo toda a história de uma nação. Além disto, a atividade turística, na maioria das vezes, é

explorada como um meio de obter renda pelos moradores diminuindo, assim, a taxa de desemprego da região.

Para uma melhor compreensão sobre a grande importância de um patrimônio histórico para o país, a FIG. 2.1 apresenta dois monumentos que estão intimamente ligados à cultura e a história do Brasil. Na FIG. 2.1(a), pode-se contemplar a Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, localizada na cidade de Salvador, Bahia. Foi erguida a partir de 1745 caracterizando o estilo neoclássico. É uma das mais tradicionais igrejas católicas da cidade, dedicada ao Senhor do Bonfim, padroeiro dos baianos. A fotografia na FIG. 2.1(b) é caracterizada pela Igreja e Convento de São Francisco, construída em 1693, na cidade de São Cristóvão, Sergipe que é a quarta cidade mais antiga do Brasil. As tropas que foram combater os revoltosos de Canudos, em 1897, ficaram hospedadas nesta igreja.



(a)



(b)

FIGURA 2.1 – Construções históricas: (a) Igreja de Nosso Senhor do Bonfim e (b) Igreja e Convento de São Francisco.

Para que suas estruturas permaneçam em boas condições em um grande período de tempo, garantindo a sustentação de toda a edificação, é necessário que alguns procedimentos sejam realizados.

A prática de inspeções periódicas é uma ferramenta indispensável para a conservação de estruturas, possibilitando que medidas reparatórias sejam tomadas em tempo. Segundo TELES (2002), uma inspeção cuidadosa é também um vital estudo preliminar para qualquer obra de restauro de edificação ou de adequação a novos usos ou padrões. No caso das obras em madeira, a inspeção envolverá conhecimentos tanto de Biologia quanto de Engenharia. CRUZ *et al* (2004) afirma que um profissional nesse ramo deve ter domínio sobre: identificação de espécies de madeira, avaliação da durabilidade dos elementos de madeira nas condições presentes (de acordo com espécies de madeira, distribuição de cerne, condições ambientais, etc.), atendimento de qualquer necessidade de tratamento preservativo para assegurar a durabilidade desejada e avaliação do desempenho estrutural das peças de madeira.

De acordo com ARÊDE (2002), as inspeções devem ser acompanhadas de um levantamento histórico que permita datar a estrutura, analisar a sua trajetória, as alterações e outras intervenções sofridas no tempo, de modo a melhor compreender o seu estado atual. Esse levantamento inclui visitas ao local, conversas com os proprietários e/ou pessoas ligadas à edificação, busca de elementos históricos ou fotografos e consultas de especialistas. Nos parágrafos seguintes são descritos e discutidos os aspectos mais relevantes na inspeção e diagnóstico.

- *Definição geométrica da construção existente*, recorrendo a elementos já existentes ou baseada em levantamentos com meios topográficos tradicionais ou com técnicas fotogramétricas. Um estudo geométrico rigoroso permite desde logo detectar eventuais irregularidades, tais como desvios verticais e horizontais.
- *Pesquisa histórica e identificação da funcionalidade* presente e passado da construção. O conhecimento dos critérios de projeto inicial (quando disponíveis) e de eventuais fases de construção ou intervenções estruturais, assim como das técnicas e características dos materiais usados, pode ser de grande utilidade para a interpretação do

comportamento estrutural e para a definição de pesquisas adicionais de maior especificidade.

- *Identificação dos esquemas de funcionamento estrutural* atuais (e eventualmente, também do passado).
- *Definição dos elementos estruturais chave* para o funcionamento da estrutura e *pesquisa da sua constituição material*.
- *Identificação de todas as patologias na estrutura* e elaboração de *registro fotográfico detalhado*. Em particular, o levantamento das fendas observáveis na estrutura, a sua distribuição e abertura são elementos importantes para uma avaliação qualitativa primária do equilíbrio e da segurança estrutural, bem assim como o reconhecimento das possíveis causas da instabilidade. Especial atenção deve ser dada à eventual presença de água no interior das construções, freqüentemente resultante de problemas de infiltrações ou de deficiente drenagem das águas pluviais, que colocam em risco a preservação dos demais elementos construtivos e adornos da construção. Em regra, uma inspeção visual pode já fornecer informações preciosas sobre o estado de conservação e sobre as medidas a adotar na fase de reabilitação. KANDEMIR-YUCEL *et al.* (2007) acrescentou que o estado de preservação de elementos da madeira deve ser avaliado juntamente a compatibilidade entre todos os materiais em contato. A remoção inconsciente de elementos da madeira ou o uso de materiais novos que podem apresentar incompatibilidade com as madeiras antigas apresentariam riscos tanto para a durabilidade quanto para a autenticidade das estruturas históricas.
- *Definição dos eventuais ensaios a realizar* para caracterização dos materiais e da estrutura, incluindo os elementos das fundações. Os ensaios sobre materiais de diversas partes da estrutura e das fundações, através do recolhimento de amostras para análise em laboratório ou mediante ensaios não-destrutivos (ou até ligeiramente destrutivos) realizados *in situ*, destinam-se essencialmente à sua caracterização física e mecânica e, eventualmente à identificação e calibração de relações constitutivas a usar nos modelos estruturais. Os ensaios estáticos ou dinâmicos envolvendo a construção no seu todo ou em partes, são destinados a validar o seu comportamento estrutural quer em termos das suas cargas em serviço (exemplo: prova de carga) quer em termos de resultados comparativos para calibração do modelo estrutural.

- *Identificação e estabelecimento de modelos estruturais adequados*, baseados em premissas coerentes com a observação da estrutura e com os resultados dos ensaios experimentais. Neste processo assume particular importância a calibração de tais modelos e o ajuste criterioso dos parâmetros de comportamentos (eventualmente sustentado por análises de sensibilidade), de forma a reproduzir a melhor resposta estrutural obtida dos ensaios experimentais. Na definição dos modelos estruturais convém ainda ter em conta o objetivo da modelação, já que tal poderá influenciar na configuração dos modelos. Estes podem ser concebidos com o objetivo de reproduzir e interpretar os danos estruturais encontrados ou de prever a resposta estrutural sob condições ainda não experimentadas ou ainda de simular os efeitos resultantes de intervenções de reabilitação e/ou reforço.

A degradação biológica na madeira é um problema corrente em construções históricas. O próximo tópico é totalmente dedicado aos insetos xilófagos, seres que provocam este tipo de degradação.

2.2. Insetos xilófagos

A madeira possui várias características que a classificam como um excelente material para a construção civil, porém possui a suscetibilidade aos ataques de agentes de biodeterioração, como fungos e insetos xilófagos. Embora esta biodeterioração seja totalmente necessária no meio natural das árvores, além de contribuir para a preservação do ciclo de vida de vários seres, ela é nociva quando se trata da madeira usada para contemplar as necessidades humanas.

RODRIGUES (2004) destacou os organismos xilófagos como os principais causadores de degradação biológica e os dividiu em fungos e insetos. As pesquisas já realizadas sobre ultra-som abordam, em sua grande maioria, a deterioração ocasionada por fungos, talvez pela enorme ocorrência destes ataques à quase todos os locais do mundo. O presente trabalho abordará somente aspectos de degradação causada por insetos xilófagos.

RODRIGUES (2004) acrescentou que os insetos xilófagos são aqueles que iniciam a infestação, pois procuram alimento e, além disto, necessitam de proteção contra ações mecânicas para os ovos e condições ambientais favoráveis quando estes eclodirem. As larvas podem permanecer no interior da madeira por umas semanas ou durante 10 anos, dependendo das condições da madeira e da sua espécie. Podem diminuir a resistência e a seção útil da madeira. Os principais são os cupins, brocas e xilófagos marinhos, porém, serão enfocados apenas os cupins e as brocas por se tratarem de estruturas localizadas fora do circuito de cidades litorâneas.

Em “*Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Cobertura de Edificações Históricas em Florianópolis, Santa Catarina*”, REGINATTO *et al.* (2004) divide os cupins em dois grupos: cupins subterrâneos e cupins de madeira seca. Para identificação do tipo de cupim que está atacando a estrutura, deve-se, antes, conhecer um pouco sobre cada grupo.

Os *cupins subterrâneos* são assim denominados por construírem seus ninhos no solo, para obter umidade, independentes da madeira atacada, mas eles também se aninham em madeiras que estão frequentemente molhadas. De fato, também podem construir seus ninhos em peças estruturais. Um ninho pode buscar comida em um raio de 30 metros, sempre escondidos da luz, pelo subsolo, por vazios na estrutura, rachaduras, tubulações, acabamentos ou em pequenos dutos por eles construídos com terra e celulose digerida. São mais destrutivos e causam um impacto mais rápido que os cupins de madeira seca e atacam, facilmente, qualquer madeira em contato com o solo. Caso esta não esteja em contato com o solo, eles podem construir túneis com lama para alcançar a madeira. Estes cupins, não são muito encontrados em estruturas históricas, pois as madeiras destes tipos de estruturas possuem pouca umidade.

Os *cupins de madeira seca* são cupins que vivem com relativamente baixo teor de umidade. A própria madeira e o ambiente em que vivem proporcionam a umidade que necessitam para sobreviver. Estes cupins não têm a capacidade de passar de uma madeira infestada para a outra, a não ser que efetivamente exista um ponto de contato entre ambas. Neste caso, a colônia pode se estender e infestar todo o madeiramento em

contato, o que dificulta achar seu ninho. Assim, os cupins de madeira seca normalmente apresentam sociedades pequenas. O pequeno tamanho da sociedade é, entretanto, compensado pelo grande número de sociedades que podem ser encontradas em uma determinada estrutura. Por serem protegidos de predadores durante a revoada, não dependerem de contato com o solo e sobreviverem em madeiras com pouca umidade, muitos alados podem sobreviver por ocasião da revoada e formar novas colônias.

Estes cupins são sensíveis à umidade e, portanto, à perda de água. Esta sensibilidade é tamanha que suas fezes são formadas por pelotas fecais secas, comprimidas durante o processo de excreção, a fim de não perder água no processo de eliminação de impurezas orgânicas.

REGINATTO *et al.* (2004) ainda acrescenta que as fezes se acumulam logo abaixo do orifício de eliminação, ao longo da peça atacada, são grânulos secos e duros, de coloração clara a avermelhada e até escura. Este é o mais típico sinal de infestação por cupins de madeira seca. A coloração das fezes pode variar conforme a cor da madeira. Fezes escuras sugerem uma atividade ocorrida há alguns anos e que revoadas de cupins alados (reprodutores) já devem ter ocorrido. Nesta fase não são encontrados mais insetos e somente os danos ocasionados. Após a eliminação das fezes, o orifício formado é, então, novamente fechado. Em madeiras submetidas a infestações por um tempo prolongado, restará apenas uma fina superfície externa intacta, quebradiça e outras poucas divisórias internas, separando câmaras espaçosas.

De acordo com TELES (2002), as estruturas de madeira podem suportar os ataques de cupins durante anos, ainda cumprindo sua função. Uma vez controlados os cupins, uma estrutura poderá continuar desempenhando sua função mesmo tendo sido parcialmente degradada, desde que se possa obter dados confiáveis para uso nos cálculos estruturais e revitalização. A FIG. 2.2 apresenta os aspectos de madeiras atacadas por cupins.

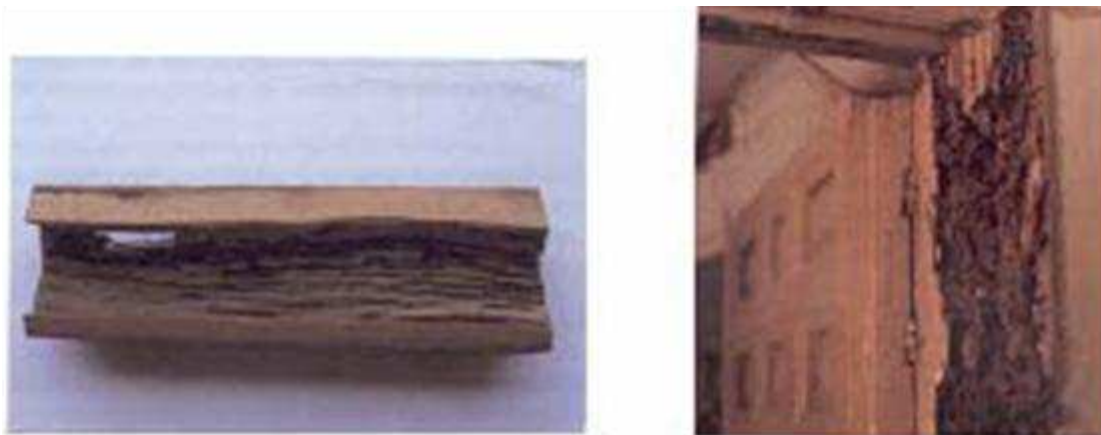


FIGURA 2.2 – Aspectos de madeiras atacadas por cupins.

Fonte: Rodrigues (2004).

TELES (2002) afirma que os biodeterioradores de madeira, como as conhecidas brocas ou os anobídios, possuem algo em comum: apesar de serem conhecidos por sua forma adulta de besouro o estrago que causam é feito por suas larvas. Os besouros (insetos perfeitos) destes xilófagos têm sua utilidade limitada à reprodução sexual e nem mesmo se alimentam durante sua vida de algumas semanas. Depois da cópula, o inseto perfeito porá ovos nos cortes perpendiculares às fibras das madeiras, em pequenos furos ou rachaduras. As larvas emergem dos ovos e se alimentarão da madeira durante sua vida, que pode durar de alguns meses a alguns anos.

Segundo SARAIVA (1957), os anobídios segregam enzimas que lhes permitem digerir e absorver amido e celuloses simples, quando não as celuloses complexas, aproveitando tanto os produtos de reserva das células do lenho, como os componentes da parede celular. As galerias abertas pelas larvas, conforme FIG. 2.3, se cruzam em todas as direções e o resíduo que as enche é solto e granuloso ao tato e possui a aparência de farelo mais ou menos grosso.

TELES (2002) ainda acrescenta que depois do último estágio, quando as larvas metamorfoseiam-se em um inseto perfeito, um furo de saída será feito. Algumas vezes este será o único vestígio de ataque, quando a larva já tiver causado o estrago. Este inseto perfeito poderá re-infestar a madeira.



(a)



(b)

FIGURA 2.3 – (a) Aspecto de uma madeira degradada por um anobídeo e (b) anobídeo.

Fonte: Rodrigues (2004).

2.3. Ensaios não-destrutivos

São várias as etapas para a recuperação de uma edificação histórica, mas a partir da inspeção é possível adotar um tratamento adequado às peças estruturais danificadas. Nessa etapa, pode-se usar dois tipos de ensaios: destrutivo e não-destrutivo. O ensaio destrutivo não seria muito adequado a construções históricas, pois, muitas vezes, inviabilizam a utilização futura do material. EMERSON *et al.* (1998) descreveu uma variedade de técnicas não-destrutivas, objetivando encontrar deteriorações em peças de madeira em estruturas de ponte, a fim de manter o desempenho estrutural. Os autores apontaram as vantagens e as desvantagens na utilização de cada técnica, orientando, assim, os profissionais de inspeção na escolha da técnica mais adequada para uma análise estrutural de madeira. Os ensaios não-destrutivos de maior relevância foram divididos em: inspeção visual, onda de tensão, resistência ao furo, radiografia, microondas e ultra-som.

A inspeção visual é o primeiro passo na análise de um elemento estrutural de madeira. Segundo AZEVEDO JÚNIOR (2002), usando a inspeção visual o técnico pode, rapidamente, desenvolver uma avaliação qualitativa da integridade estrutural relativa de elementos individuais. Algumas deficiências podem ser facilmente identificadas,

incluindo danos externos, deterioração, esmagamento das fibras nos apoios, fendas ou rachaduras. Embora esta técnica seja muito útil, ela apresenta certas limitações: variações nos resultados entre os inspetores (treinamento/experiência); componentes com acesso limitado podem gerar imprecisão na interpretação dos resultados; e o conhecimento é limitado à superfície externa da madeira. Os resultados obtidos através da inspeção visual podem ser empregados como um guia adicional de avaliação não destrutiva.

De acordo com EMERSON *et al.* (1998), a onda de tensão é geralmente obtida por impacto na superfície do material sobre investigação. As ondas de tensão propagam na velocidade do som através do material e refletem nas superfícies externas. O método mais simples para utilizar as ondas de tensão é determinar o tempo que esta onda leva para viajar em uma determinada distância. Se as dimensões do material são conhecidas, o tempo da onda de tensão pode ser usado para localizar áreas degradadas em peças de madeira. Visto que as ondas de tensão viajam mais lentamente através da madeira deteriorada do que na madeira sadia, a condição de uma determinada peça pode ser determinada através da medida do tempo de propagação da onda em várias regiões ao longo da peça. Regiões que apresentam elevados valores de tempo de propagação são regiões potencialmente deterioradas. As ondas de tensão são comumente usadas para determinar o módulo de elasticidade de peças estruturais. A FIG. 2.4 demonstra como é feita a medição.

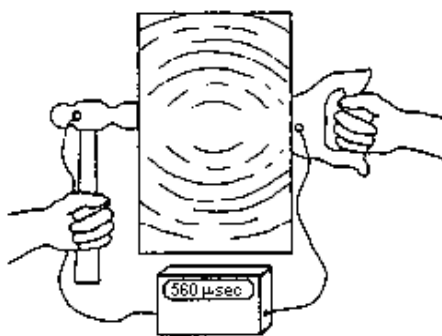


FIGURA 2.4 – Representação esquemática do equipamento medidor de ondas de tensão.

Fonte: Ross *et al.* (1996).

BODIG (2000) classifica o instrumento que mede a resistência ao furo de uma pequena broca de 3 mm de largura na madeira como um método pseudo-destrutivo, já que é necessária a execução de um pequeno furo ao longo da madeira. O alcance de perfuração é de 10 mm. O equipamento de resistência ao furo, apresentado na FIG. 2.5, pode ajudar no estabelecimento da extensão de uma porção degradada. É indicado o auxílio da inspeção visual para a delimitação dos pontos em que se pretende utilizar o aparelho.



FIGURA 2.5 – Instrumento de medição da resistência ao furo: Pilodyn.

A radiografia, para AZEVEDO JÚNIOR (2002), envolve o posicionamento de uma fonte de energia radiográfica em um dos lados do material e um meio de gravação, como por exemplo, um filme, do lado oposto, conforme a representação da FIG. 2.6. A radiação percorre o material e expõe o filme. A densidade local do material controla o quanto de radiação passa através dele, resultando numa figura da variação da densidade do material sob inspeção, como apresentado na FIG. 2.7. A principal desvantagem do uso de técnicas radiográficas convencionais para a inspeção de membros estruturais é que elas utilizam a absorção fotoelétrica para produzir uma imagem interna da peça. A absorção fotoelétrica propriamente requer acesso aos múltiplos lados da peça sob inspeção. Vários artifícios têm sido desenvolvidos para que se tenha acesso apenas a um

lado da peça, realizando-se as medidas de densidade através do emprego do espalhamento Compton em lugar da absorção fotoelétrica.

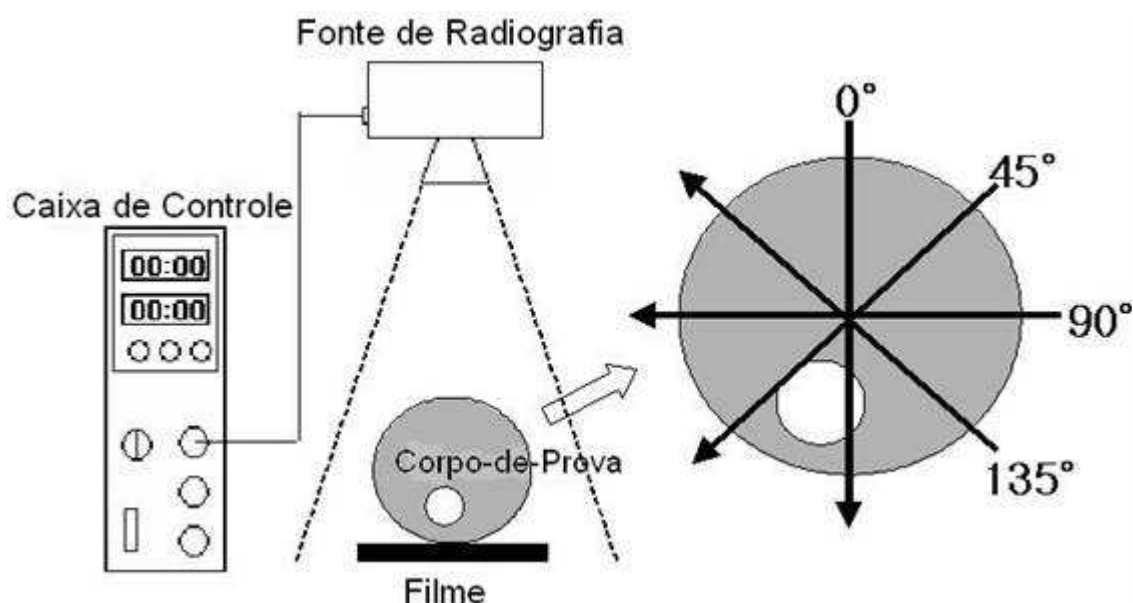


FIGURA 2.6 – Representação esquemática de uma medição por radiografia.

Fonte: Lee *et al.* (2004). Nota: dados adaptados pela autora.

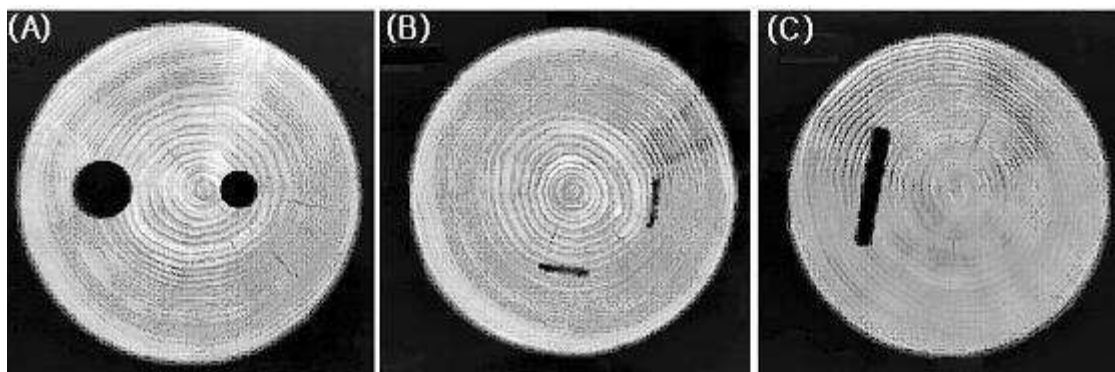


FIGURA 2.7 – Radiografias de uma seção transversal de madeira com vários defeitos.

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

Ainda AZEVEDO JÚNIOR (2002) afirma que os ensaios por microondas baseiam-se nos princípios gerais de propagação de ondas eletromagnéticas em materiais dielétricos (isto é, materiais isolantes). Estas ondas são produzidas por sondas (antenas típicas) em frequências que variam de 300 MHz a 300 GHz. A inspeção de madeiras por microondas tem sido utilizada na avaliação da densidade e conteúdo de umidade. Uma

vez que as ondas eletromagnéticas são sensíveis à presença de umidade, a técnica de inspeção por microondas tem se demonstrado promissora na detecção de zonas de deterioração em estruturas de madeira envelhecidas. A FIG. 2.8 apresenta os equipamentos utilizados para medir microondas.



FIGURA 2.8 – Equipamentos utilizados para medir microondas.

Fonte: MECHANICAL INTEGRITY INC.

Dentre todos os métodos não destrutivos, merece destaque a técnica de emissão de pulsos ultra-sônicos, uma vez que várias pesquisas têm sido desenvolvidas com esta técnica.

2.4. Ultra-som

JAYNE (1959) iniciou a hipótese fundamental para a avaliação não-destrutiva da madeira, propondo que a armazenagem de energia e as propriedades de dissipação da madeira, que podem ser medidas por meio não-destrutivo, são controladas pelos

mesmos mecanismos que determinam o comportamento deste material. A nível microscópico, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a elasticidade estática. Tais propriedades são observáveis como frequência de oscilação na vibração ou transmissão da velocidade do som. Desse modo, as medidas das taxas de deterioração de vibrações livres ou atenuação de ondas acústicas são usadas para observar a propriedade de dissipação de energia na madeira.

Segundo TELES (2002), dentre os ensaios não-destrutivos aplicáveis para madeira, os ensaios utilizando pulsos ultra-sônicos encontram-se entre os mais desenvolvidos, tendo inclusive atingido o conhecimento crítico para o lançamento de equipamentos específicos para a madeira no mercado. Seu emprego e a maioria dos trabalhos já realizados se dão na avaliação da madeira sã, havendo potencial para o estudo de madeira degradada.

No entanto, a técnica requer um operador experiente e um acoplamento eficaz dos transdutores no material. Acompanhada de um exame visual prévio, esta técnica pode fornecer informações sobre as condições internas dos elementos de madeira e sobre a sua capacidade resistente residual, como é afirmado por FEIO (2005).

SANYAL e GULATI (1979) foram alguns dos pioneiros a utilizar a técnica do ultra-som na madeira, propondo um método baseado na medição da velocidade do pulso ultra-sônico paralelo às fibras da madeira.

Uma das principais pesquisadoras neste campo do ultra-som é Voichita Bucur, que em seu livro “*Acoustics of wood*”, publicado em 1995, foi capaz de determinar as equações fundamentais da propagação das ondas de ultra-som na madeira, o que significou um avanço importante nessa área.

Muitos autores se aventuraram nesta área e vários avanços foram alcançados, possibilitando uma maior aplicabilidade da técnica. SANDOZ (1996a) abordou a técnica ultra-sônica para a inspeção e detecção de defeitos no interior de árvores,

objetivando a confiabilidade e a valorização de produtos em madeira, além de garantir uma avaliação da integridade das árvores de parques e jardins públicos.

Já em “*NDE of historic structures – USS Constitution*”, ROSS *et al.* (1996) elaborou uma metodologia para inspeção da madeira constituinte da estrutura de navios, porém utilizando a técnica de ensaio não-destrutivo de ondas de tensão, com a finalidade de localizar as deteriorações. Apesar de empregar a técnica de ondas de tensão, este trabalho contribuiu na elaboração da metodologia presente, uma vez que se adotou um mapeamento para encontrar as áreas possivelmente degradadas.

Um mapeamento da peça também foi realizado por EMERSON *et al.* em 2001 e 2002. O primeiro trabalho, utilizou lâminas perfuradas, simulando defeitos na madeira, para realizar ensaios de ultra-som através de um mapeamento, conforme FIG. 2.9, em uma viga de madeira laminada colada. O resultado consistiu em uma representação dos furos no interior da viga que puderam ser comparados com a realidade da peça. Já o segundo estudo, provou que pulsos ultra-sônicos podem auxiliar na avaliação da integridade de estruturas de pontes de madeira quando atacadas por fungos xilófagos. Pulsos ultra-sônicos foram transmitidos e coletados em cada ponto do mapeamento dos elementos de madeira e, analisando sua velocidade, foram identificadas as localizações das decomposições, categorizando sua dimensão. Em seguida, as peças de madeira foram abertas e a condição interna foi visualmente comparada com os valores de tempo de viagem do pulso obtidos pelo ultra-som, como apresentado na FIG. 2.10.

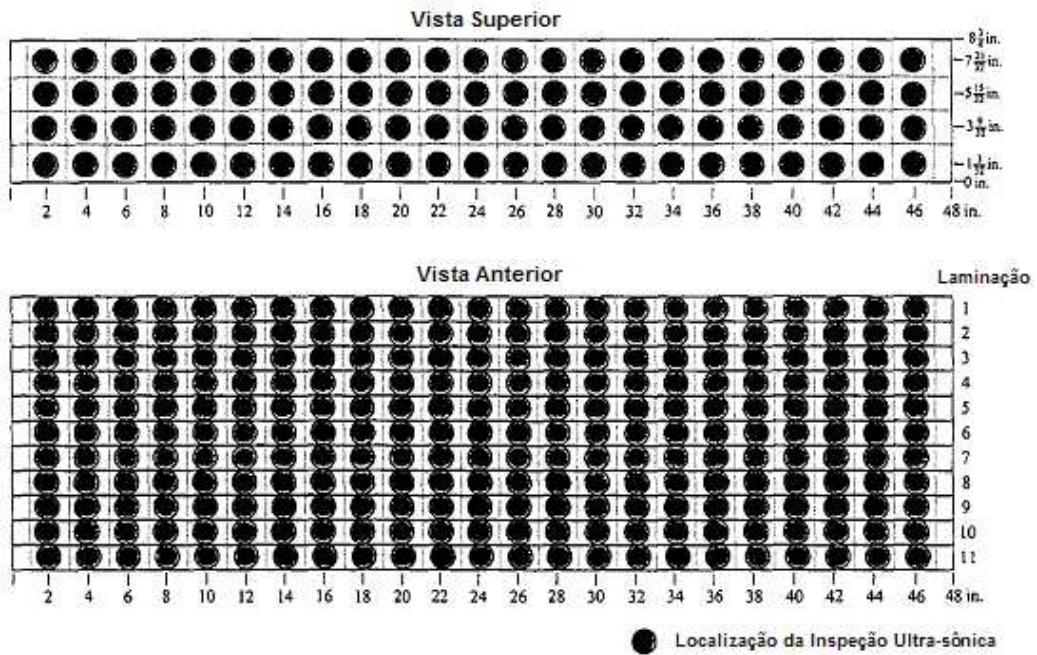


FIGURA 2.9 – Mapeamento da viga de madeira laminada colada na inspeção ultra-sônica.

Fonte: Emerson *et al.* (2001). Nota: dados adaptados pela autora.

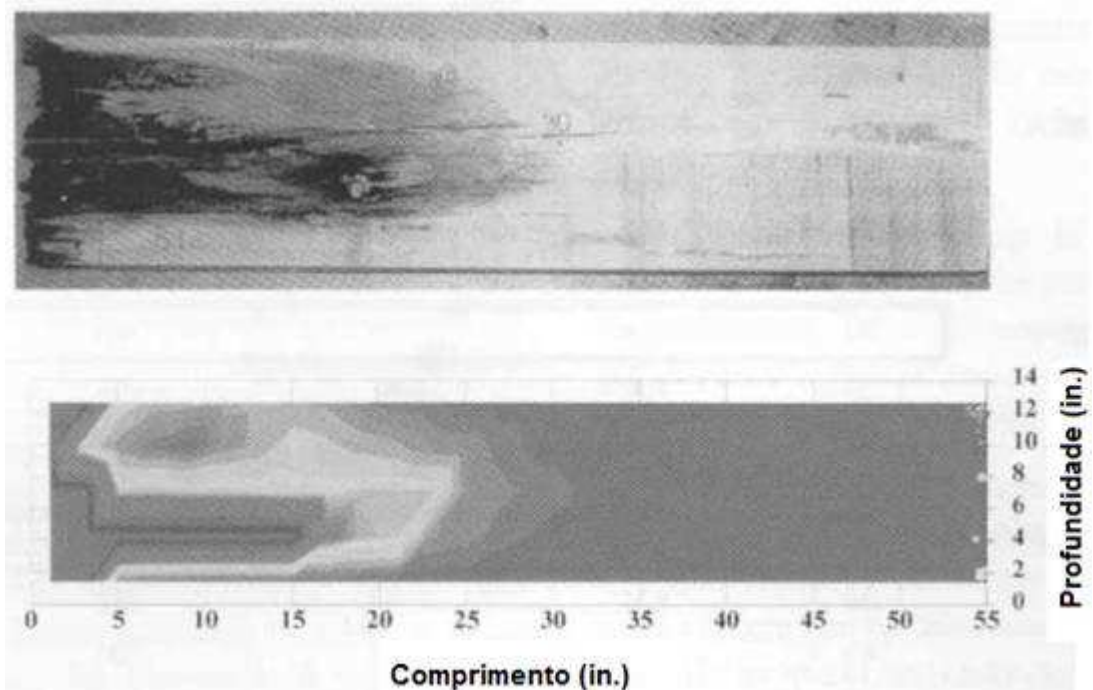


FIGURA 2.10 – Comparação da condição interna da peça com os valores de tempo de viagem do pulso obtidos pelo ultra-som.

Fonte: Emerson *et al.* (2002). Nota: dados adaptados pela autora.

Para uma melhor compreensão de como é caracterizada uma avaliação de elementos estruturais através de pulsos ultra-sônicos, ZOMBORI (2001) descreveu os métodos mais utilizados: método de transmissão direta e método do pulso-eco.

A medição utilizando o método de transmissão direta emprega dois transdutores piezelétricos (cristais de quartzo) localizados em cada lado da peça a ser ensaiada. Um gerador de pulsos elétricos envia um sinal através do transdutor transmissor. Este pulso atravessa o corpo-de-prova e é recebido pelo transdutor receptor, onde é novamente transformado em sinal elétrico. A contagem do tempo de viagem deste pulso, em microssegundos, é realizada pelo próprio instrumento de ultra-som, conforme mostrado na FIG. 2.11.

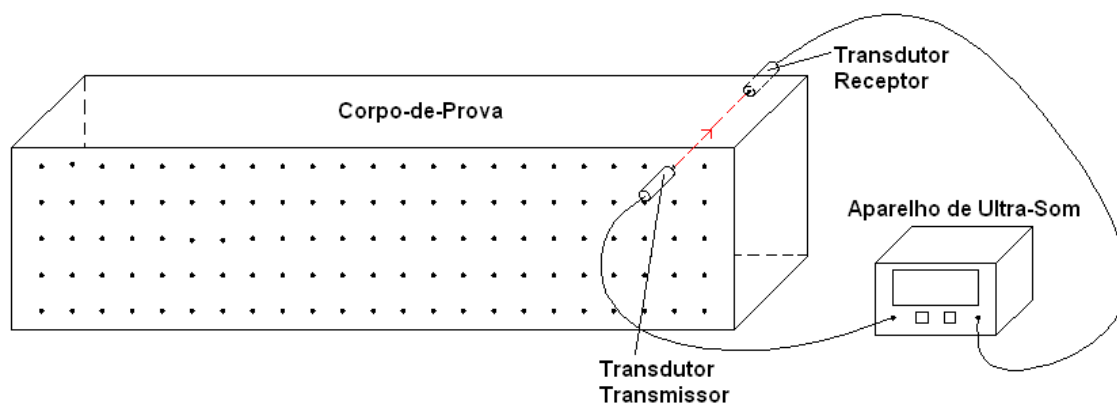


FIGURA 2.11 – Emissão normal às fibras.

No caso do método do pulso-eco, somente um transdutor é utilizado. Dessa forma, o transdutor exerce as funções de emissor e receptor do pulso e, conseqüentemente, apenas o pulso refletido é mensurado. O tempo entre a emissão e recepção do pulso será menor, caso este seja refletido pelos contornos de defeitos internos, do que o tempo de reflexão na extremidade da peça ensaiada.

Para a avaliação de peças “in situ”, já construídas, em que muitas vezes o acesso a todas as faces é restrito, o método do pulso-eco é mais prático que o método de transmissão direta.

De acordo com ZOMBORI (2001) e FEIO (2005), as baixas frequências (20kHz-500kHz) são usadas frequentemente na madeira por causa da atenuação elevada do pulso, isto é, a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico que viaja através de um sólido é dependente de suas propriedades elásticas. Em materiais muito dispersivos como a madeira, a pulso ao viajar dentro do material sofre uma série de reflexões, originando novos pulsos com polarizações diferentes e cada um com uma velocidade característica. A maioria dos equipamentos ultra-sônicos disponíveis considera somente o pulso mais rápido a chegar. Este pulso viaja pelas zonas de qualidade mais elevada contornando as zonas mais fracas (zonas com nós, deterioração, etc.), de acordo com a FIG. 2.12.

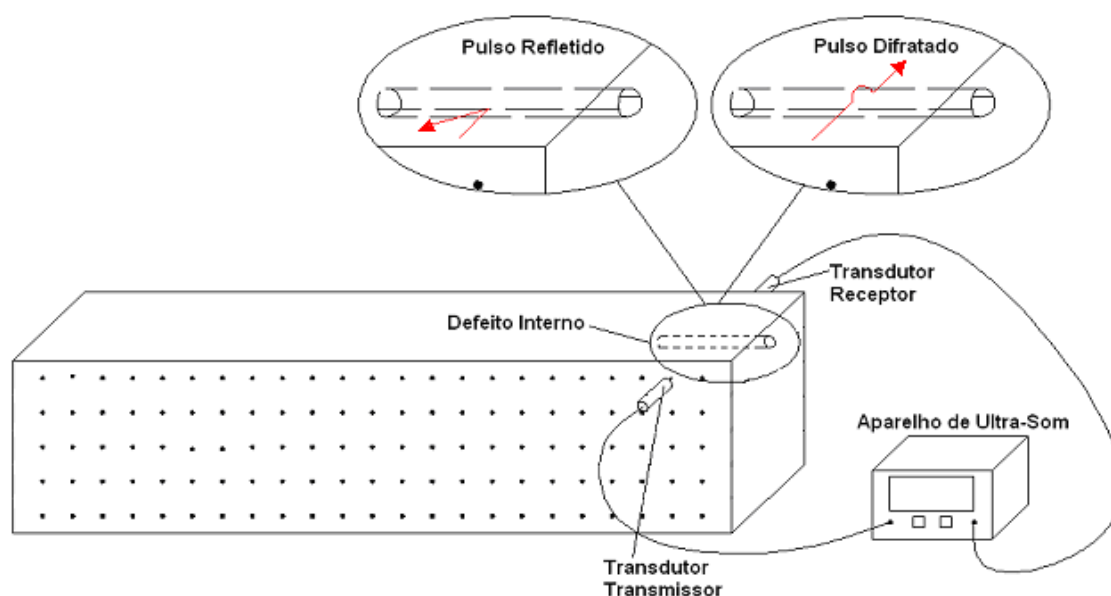


FIGURA 2.12 – Influência dos defeitos na emissão ultra-sônica.

SHAJI *et al.* (2000) utilizou a técnica da velocidade do pulso ultra-sônico para avaliar a integridade estrutural de elementos de madeira em edifícios históricos e por meio de análises laboratoriais em diversas espécies de madeira pôde-se concluir que os defeitos internos, como rachaduras e discontinuidades, reduzem a velocidade. Se o pulso é desviado, o tempo de propagação aumenta, o que, conseqüentemente, acarreta esta redução da velocidade. Levando em conta a heterogeneidade, anisotropia e padrões naturais de variabilidade da madeira, é possível correlacionar a velocidade de propagação com as propriedades físicas e mecânicas da madeira: as velocidades

elevadas estão associadas com resistências mais elevadas e com a ausência de defeitos materiais.

PUCCINI (2002) também avaliou, estatisticamente, a possibilidade de se utilizar o método do ultra-som na detecção de defeitos em peças de madeira serrada. Para isto, foram utilizadas 180 peças, retiradas de vigas de *Pinus sp.* As peças foram ensaiadas na umidade de equilíbrio ao ar. Para a realização dos ensaios utilizou-se o equipamento de emissão de ondas de ultra-som com transdutores de 45 kHz. Inicialmente foi realizada uma análise visual das peças e, posteriormente, a determinação da velocidade de propagação das ondas nas mesmas peças. Com os resultados, realizou-se uma análise exploratória das variáveis e obteve-se um modelo de regressão linear visando verificar a relação entre a presença ou não de defeitos e a velocidade de propagação da onda do ultra-som na madeira. Os resultados demonstram uma forte relação entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som e os defeitos detectados pela análise visual. Outro método para a análise de defeitos em madeiras envolvendo a técnica de ultra-som foi proposta por FULLER *et al.* (1994).

Já TELES (2002), em sua dissertação de mestrado, propôs uma metodologia com o objetivo de explorar o ultra-som como ferramenta para monitorar a degradação das propriedades mecânicas da madeira por cupins. Os corpos-de-prova (CPs) foram expostos a cupins de maneira controlada de forma a provocar vários estágios de degradação para, então, medir as propriedades ultra-sônicas, conforme FIG. 2.13. Em seguida, os CPs foram ensaiados à compressão paralela às fibras. DE GROOT *et al.* (1998) também realizou uma avaliação não-destrutiva da deterioração ocasionada por ataques de cupins na madeira.

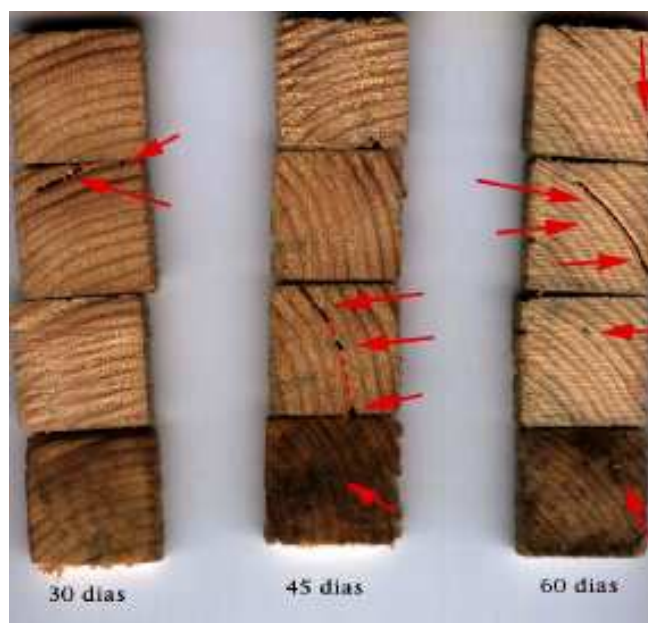


FIGURA 2.13 – Galerias de cupins observadas em corpos-de-prova de pinus, expostos por 30, 45 e 60 dias, respectivamente, da esquerda para a direita.

Fonte: Teles (2002).

FEIO (2005) buscou determinar, por meio de ensaios destrutivos e não-destrutivos (Ultra-sons, Resistógrafo e Pilodyn), as propriedades mecânicas de um lote de madeira recentemente serrada (que estaria disponível no mercado para fins estruturais) e na madeira de castanheira (*Castanea sativa Mill.*), obtida de elementos estruturais pertencentes a edifícios antigos. Foi realizada uma série de ensaios em 342 corpos-de-prova de madeira livres de defeitos, sem aparentes danos químicos, biológicos ou físicos, que incluíram ensaios de compressão, paralelamente e perpendicularmente às fibras, e ensaios de tração, paralelos às fibras. A possibilidade de prever as propriedades da madeira através da aplicação de técnicas e métodos não-destrutivos foi discutida com base em modelos simples de regressão linear. A conclusão do estudo foi que não houve uma diferença significativa entre a madeira antiga e a madeira nova. Os resultados apenas se aplicam às regiões visivelmente isentas de degradações biológicas, químicas e físicas.

AZEVEDO JÚNIOR (2002), com o objetivo de se estabelecer correlações estatísticas entre a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico longitudinalmente às fibras e

parâmetros físicos e mecânicos de madeiras, determinou, experimentalmente, a velocidade de propagação, a umidade, a densidade aparente, as resistências à compressão paralela e normal às fibras, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e os módulos de elasticidade longitudinal e normal às fibras. A escolha das espécies para a realização dos ensaios se baseou no fato de serem madeiras amplamente empregadas nas estruturas correntes. São elas: *Manilkara spp* (Maçaranduba), *Hyminaea spp* (Jatobá) e *Eucalyptus tereticornis* (Eucalipto). De posse das correlações estatísticas, pôde-se estimar e determinar as propriedades mecânicas de madeiras com considerável confiabilidade, sem a necessidade dos laboriosos ensaios destrutivos convencionais.

TEREZO (2004) empregou uma metodologia de pesquisa de cunho experimental para estimar a resistência à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade da madeira, utilizada em estruturas históricas e contemporâneas, por meio da técnica de ultra-som na direção paralela às fibras. O objetivo principal consistiu em obter correlações entre parâmetros mecânicos e a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico, para diferentes espécies. A experimentação foi realizada por ensaios destrutivos de compressão paralela às fibras e por ensaios não destrutivos de medição de pulsos ultra-sônicos para três estados de umidade: seco, em equilíbrio e úmido, com duas espécies de madeira, Peroba e Angelim. As correlações entre velocidade e o módulo foram melhores para o estado seco. No estudo estatístico através de regressão linear, envolvendo os três estados de umidade, os resultados foram melhores para a resistência à compressão.

Segundo EMERSON *et al.* (2002), a transmissão e a recepção dos pulsos ultra-sônicos requerem acoplamento dos transdutores ao material sob inspeção. Este deve ser garantido por lubrificantes (graxa ou gel de medicina) e pressão apropriada, pois a presença do ar é um inibidor da velocidade da transmissão. AZEVEDO JÚNIOR (2002) acrescenta que esta exigência pode dificultar a avaliação de peças com superfícies extensas, tornando-a praticamente inexecutável. Neste caso, a madeira pode ser submersa em um tanque com água, em que dois transdutores próprios são posicionados próximos à peça. A água constitui um bom material acoplante.

No entanto, EMERSON *et al.* (2002) acabou por usar um artifício que diminui os gastos excessivos do acoplante em peças compridas. Em “*Ultrasonic Inspection of Large Bridge Timbers*” ele utilizou uma seca e acoplante membrana que transmitia o pulso efetivamente, conforme apresentado na FIG. 2.14. Ainda assim, esta membrana acoplante seca, composta por elastômero na forma de disco, necessitou de uma fina camada de gel acoplante para aderi-la ao transdutor.

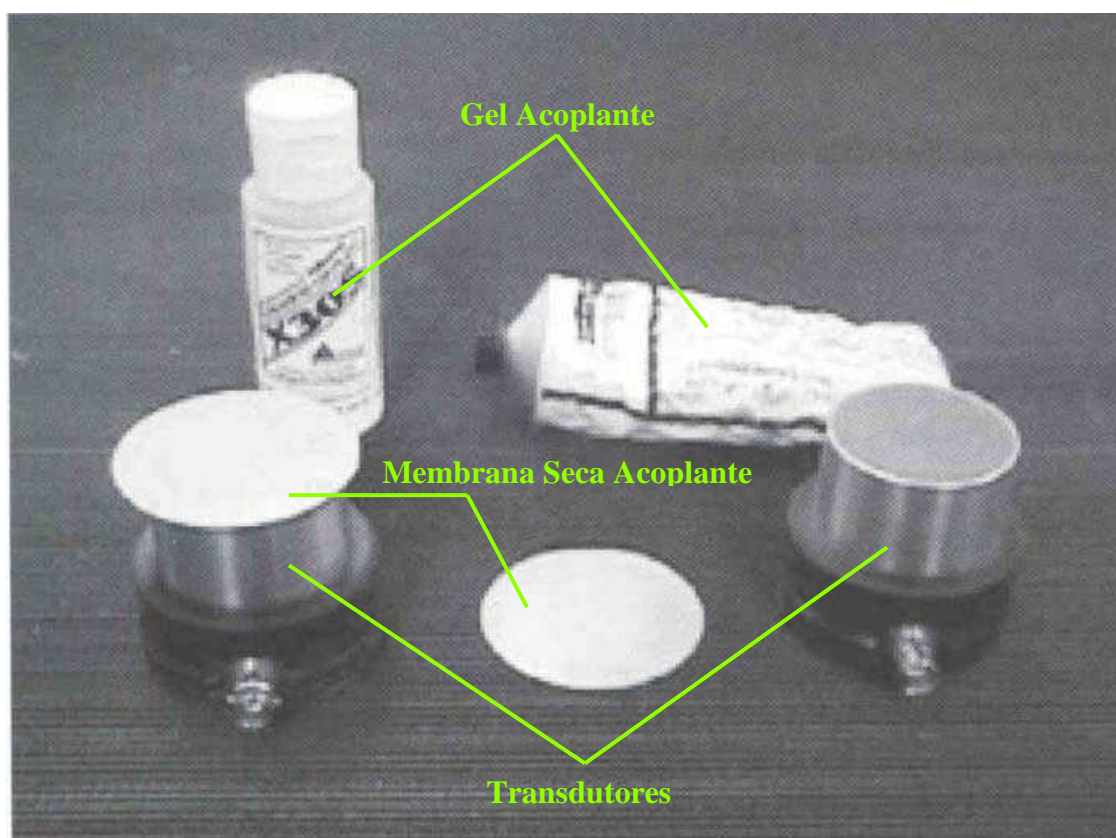


FIGURA 2.14 – Transdutores ultra-sônicos e materiais acopladores.

Fonte: Emerson *et al.*, 2002.

SANDOZ (1996b) propôs uma solução totalmente inovadora onde transdutores não necessitam de material para acoplamento (transdutores exponenciais). Os transdutores piezelétricos foram projetados usando-se baixas frequências (na faixa dos 20 kHz) juntamente com uma alta energia de vibração, obtidas através de um condensador (capacitor). O condensador é progressivamente alimentado, até que se atinja a tensão de 700 V, ocorrendo, então, a excitação das células piezelétricas. Nesta tensão, as células

vibram ao longo do eixo x. Para se obter uma emissão unidirecional, os transdutores são construídos com uma massa de metal na parte traseira. Para concentrar a energia ultra-sônica na peça a ser ensaiada, o transdutor é projetado em forma de cone com a extremidade pontual, o que caracteriza um pequeno contato com a superfície, conforme apresentado na FIG. 2.15. O efeito desta tecnologia nas medidas pôde ser avaliado nas etapas do processo industrial de transformação da madeira.

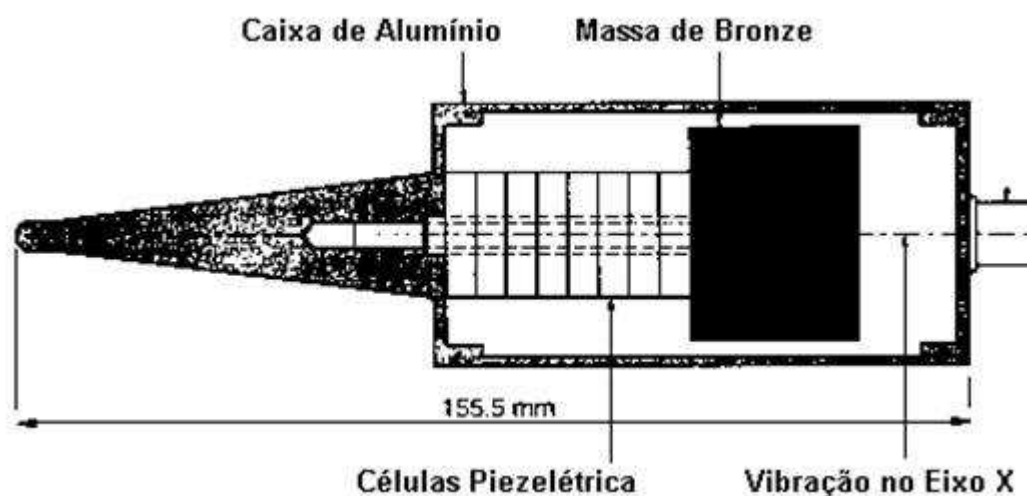


FIGURA 2.15 – Representação do transdutor exponencial ultra-sônico usado por Sandoz.

Fonte: Sandoz (1996b). Nota: dados adaptados pela autora.

Conforme FEIO (2005) e ZOMBORI (2001), a velocidade de propagação do pulso depende da espécie da madeira e de suas propriedades, como por exemplo, a velocidade de propagação aumenta com o teor de umidade. Além disto, a velocidade de propagação é três vezes mais rápida no sentido longitudinal do que no sentido transversal, permitindo detectar defeitos que envolvem mudanças na inclinação da fibra, como, por exemplo, os nós. A velocidade de propagação na madeira deteriorada é mais lenta por causa das alterações anatômicas, que podem incluir furos e perda de massa, provocados por agentes biológicos, principalmente, insetos xilófagos.

3

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a verificação da metodologia a ser proposta, três ensaios foram realizados. O Ensaio 1, simplesmente para apurar o método aplicado, não envolveu nenhum tipo de estrutura histórica. Foi desenvolvido no Laboratório de Ensaio Não-Destrutivos (LEND) do Centro de Pesquisa Avançada de Móveis, Madeiras e Novos Materiais (CPAM³) da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. O Ensaio 2 foi realizado *in situ* em uma estrutura de madeira histórica na sede do Centro Financeiro da mineradora AngloGold Ashanti, localizado em Nova Lima, Minas Gerais. Já no Ensaio 3 foi avaliada uma peça estrutural de madeira da cobertura da Igreja do Pilar em Ouro Preto, também realizado no LEND.

3.1. Materiais e equipamentos

Para avaliação da metodologia proposta, foram utilizados:

- *Ensaio 1*: uma viga de madeira laminada colada da espécie *Eucalyptus grandis*.

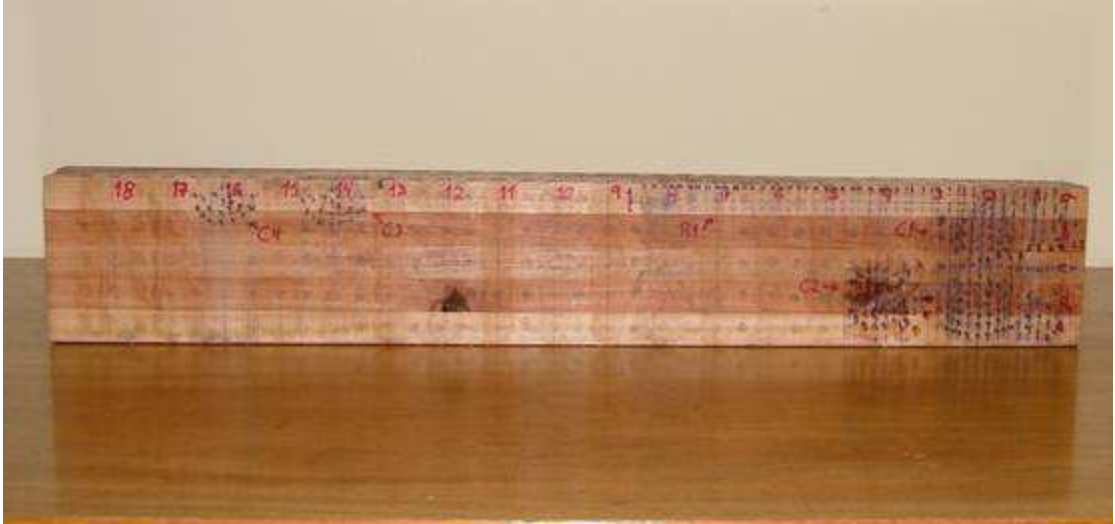


FIGURA 3.1 – Viga de madeira laminada colada usada no Ensaio 1.

- *Ensaio 2*: uma viga de madeira de espécie desconhecida.



FIGURA 3.2 – Viga de madeira utilizada no Ensaio 2.

- *Ensaio 3*: uma peça de madeira, popularmente conhecida por Braúna, utilizada em cobertura.



FIGURA 3.3 – Peça de madeira utilizada no Ensaio 3.

- Aparelho de ultra-som James Mark II.



FIGURA 3.4 – Aparelhos de ultra-som.

- Transdutores de frequências: 150 kHz e 500 kHz.

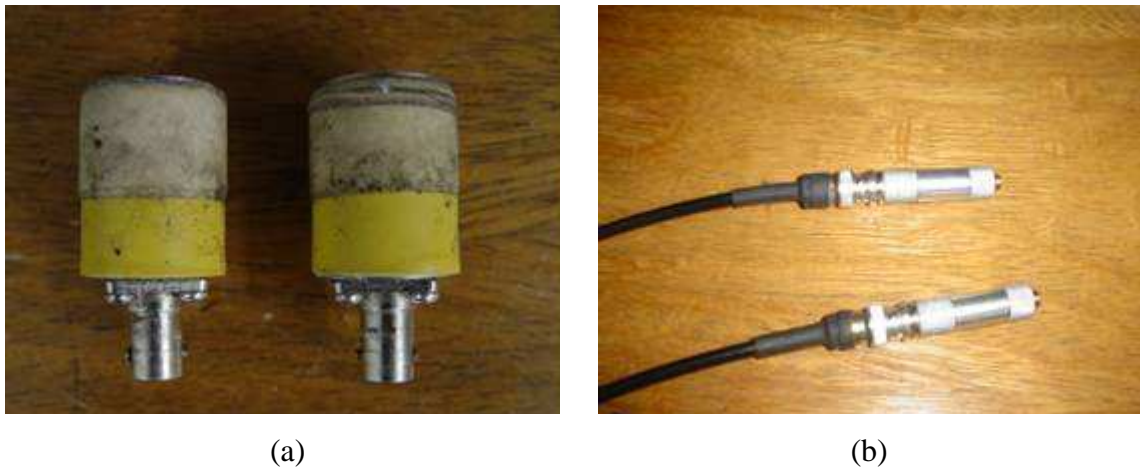


FIGURA 3.5 – Transdutores: (a) 150 kHz e (b) 500 kHz.

- Gel acoplador.
- Diversos acessórios para marcação e medida linear: um compasso próprio para madeira, esquadro, lápis e trena.

3.2. Metodologia

A metodologia proposta e utilizada para a inspeção de elementos estruturais de madeira atacados por insetos xilófagos, utilizando pulsos ultra-sônicos, foi dividida em: Etapa Inicial, Etapa D e Etapa I. A Etapa Inicial refere-se aos 4 passos introdutórios, comuns às Etapas D e I. A Etapa D descreve os passos necessários para a transmissão direta dos pulsos, ao passo que a Etapa I apresenta os passos para a transmissão indireta.

- *ETAPA INICIAL:*

1º Passo - Medição das dimensões.

2º Passo - Inspeção visual: a inspeção visual poderá ajudar na orientação dos locais na viga potencialmente degradados.

3º Passo - Medição de referência do tempo de viagem do pulso: esta medição é feita no sentido de adotar como referência o tempo de viagem em locais não degradados, ou seja, sadios. É necessário adotar mais de um ponto, pois se o valor de um dos pontos for discrepante, ou seja, potencialmente deteriorado, faz-se a exclusão desse valor e, em seguida, a média dos restantes.

4º Passo - Mapeamento da viga: o mapeamento da viga é indispensável, pois é por meio dele que são realizadas as medições dos pulsos ultra-sônicos. Assim, quanto mais refinado ele for, melhor será a caracterização do ataque na madeira.

- *ETAPA D:*

5º Passo - Medição do tempo de viagem do pulso ultra-sônico: esta medição é realizada de acordo com o mapeamento. Os transdutores são posicionados perpendicularmente às fibras da peça de madeira de forma que eles estejam na mesma direção, porém com sentidos diferentes, conforme FIG. 3.6. Este posicionamento dos transdutores é caracterizado por transmissão direta. Caso o mapeamento anterior não seja satisfatório, faz-se necessário um refinamento da malha.



FIGURA 3.6 – Transmissão direta.

6° Passo - *Tratamento dos dados*: os tempos obtidos no passo anterior são comparados com os de referência e se estabelece um tempo limite. Caso seja ultrapassado esse valor, a região é considerada potencialmente atacada.

7° Passo - *Transferência dos dados para o software SigmaPlot, versão 10*: este software traça as isocromáticas dos tempos obtidos anteriormente, evidenciando as regiões possivelmente atacadas na madeira.

Caso os pulsos ultra-sônicos não sejam captados utilizando esta metodologia ou haja a inacessibilidade às faces da peça em estudo, faz-se necessário realizar os procedimentos relacionados na Etapa I, partindo-se da Etapa Inicial.

- *ETAPA I*:

5° Passo - *Medição do tempo de viagem do pulso ultra-sônico*: a medição sofreu modificação, sendo realizada de forma que os transdutores se posicionem perpendicularmente às fibras da peça de madeira, porém dispendo-se paralelamente um em relação ao outro, lado a lado, como representado na FIG. 3.7. Este posicionamento dos transdutores é caracterizado por transmissão indireta.

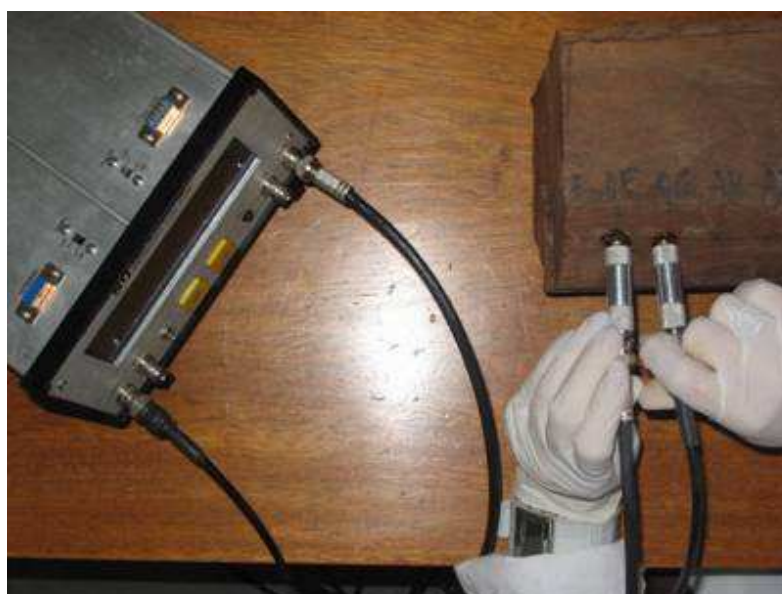


FIGURA 3.7 – Transmissão indireta.

6º Passo - Cálculo da velocidade de referência: após a medição do tempo de viagem do pulso ultra-sônico, torna-se necessário o cálculo da velocidade de referência possibilitando, mais adiante, o cálculo da distância de uma possível deterioração no interior da peça de madeira. Havendo a impossibilidade de captação dos pulsos ultra-sônicos, na primeira parte da metodologia, em toda a extensão da madeira, realiza-se a retirada de três pequenos corpos-de-prova da peça visivelmente sadios, a fim de medir o tempo de viagem do pulso em cada um deles. Em seguida, calcula-se a velocidade de referência através da relação cinemática dada pela Eq. (3.1):

$$v_R = \frac{b}{t} \quad (3.1)$$

Sendo:

v_R = velocidade de referência do pulso ultra-sônico;

b = base da seção transversal do corpo-de-prova;

t = tempo de viagem do pulso ultra-sônico.

A velocidade de referência é estabelecida através da média dos resultados obtidos de cada corpo-de-prova.

7º Passo - Cálculo da distância entre a face da madeira e o obstáculo em seu interior: os tempos de viagem de cada ponto do mapeamento determinam os possíveis defeitos internos na madeira, já que um transdutor emite o pulso que percorre a peça até encontrar um obstáculo retornando, em seguida, para o transdutor receptor, conforme representado na FIG. 3.8.

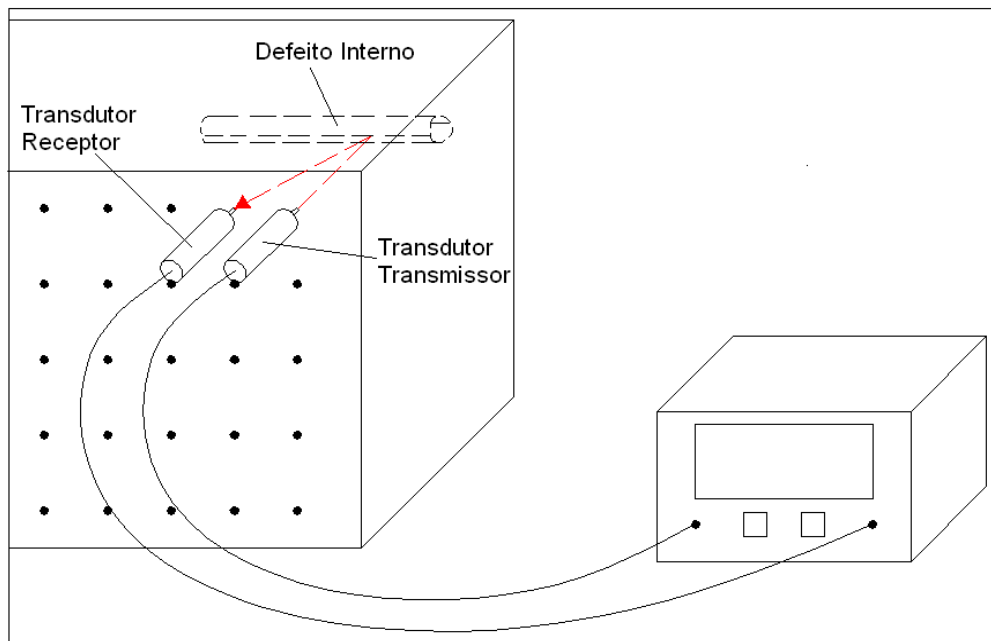


FIGURA 3.8 – Percurso da onda.

O cálculo da distância é realizado através da Eq. (3.2):

$$d = v_R \times t \quad (3.2)$$

em que:

d = distância entre a face da madeira e o obstáculo;

v_R = velocidade de referência do pulso ultra-sônico;

t = tempo de viagem do pulso ultra-sônico no ponto do mapeamento.

8º Passo – Representação dos defeitos na peça através do software AutoCAD: este programa auxilia na representação das possíveis deteriorações na madeira, traçando a distância entre a face da peça em estudo e o defeito em cada porção da peça.

4

DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS E RESULTADOS

Este trabalho é composto por três tipos de ensaios. Cada um deles será apresentado a seguir, descrevendo-se todos os procedimentos adotados e mostrando-se os resultados obtidos.

4.1. Ensaio 1

Com o auxílio de uma trena, foram medidas todas as dimensões da viga de madeira laminada colada (FIG. 4.1). Em seguida, a viga foi submetida a uma inspeção visual. Esta inspeção confirmou, posteriormente, os resultados obtidos pelo ultra-som.



Unidades em cm

FIGURA 4.1 – Dimensões da viga de madeira laminada colada.

Para o tempo de viagem do pulso ultra-sônico de referência, foram medidos aleatoriamente cinco pontos em cada lâmina. Os resultados apresentados na TAB. 4.1 são as médias encontradas em cada lâmina. O posicionamento das lâminas encontra-se na FIG. 4.2.

TABELA 4.1 – Medição de referência do tempo de viagem do pulso ultra-sônico.

Lâmina	Tempo de Propagação (μ s)
A	80,3
B	55,8
C	76,4
D	63,4
E	80,7
Tempo Médio	71,3

Foram realizados dois mapeamentos, sendo o primeiro com mapeamento uniforme em toda a viga e o segundo abrangendo apenas as regiões potencialmente degradadas. As medidas obtidas em ambos são referentes ao uso dos transdutores de frequência equivalente a 500 kHz.

O primeiro mapeamento consistiu em uma discretização preliminar, apenas para encontrar as regiões degradadas. As medidas foram feitas a cada 2,5 cm a partir do início da viga e em todas as cinco lâminas, como apresentado na FIG. 4.2. Em seguida

foram medidos os tempos de viagem dos pulsos ultra-sônicos em todos os pontos deste mapeamento, apresentados na TAB. A.1 do ANEXO A.

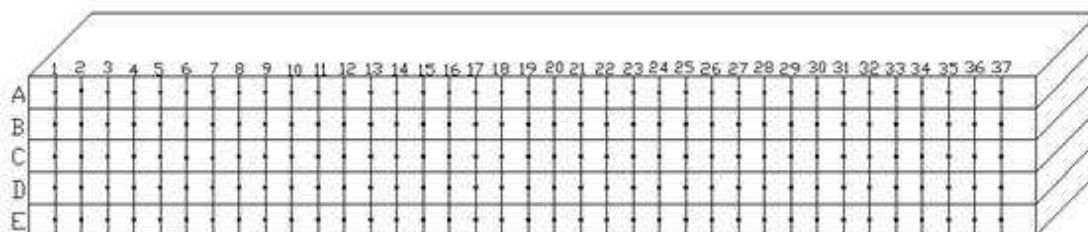


FIGURA 4.2 – Representação esquemática do primeiro mapeamento.

O segundo mapeamento foi realizado baseando-se nos resultados do primeiro mapeamento. Os tempos de viagem dos pulsos obtidos no primeiro mapeamento foram comparados com os tempos de referência de cada lâmina, estabelecendo-se, em seguida, os tempos limites. Caso as medições do primeiro mapeamento ultrapassassem estes valores, a região poderia ser indicada como potencialmente degradada. O segundo mapeamento abrangeu apenas as regiões potencialmente atacadas, como pode ser visto nas FIGs. 4.3 e 4.4. Os detalhamentos dessas regiões estão apresentados nas FIGs. 4.5, 4.6 e 4.7.

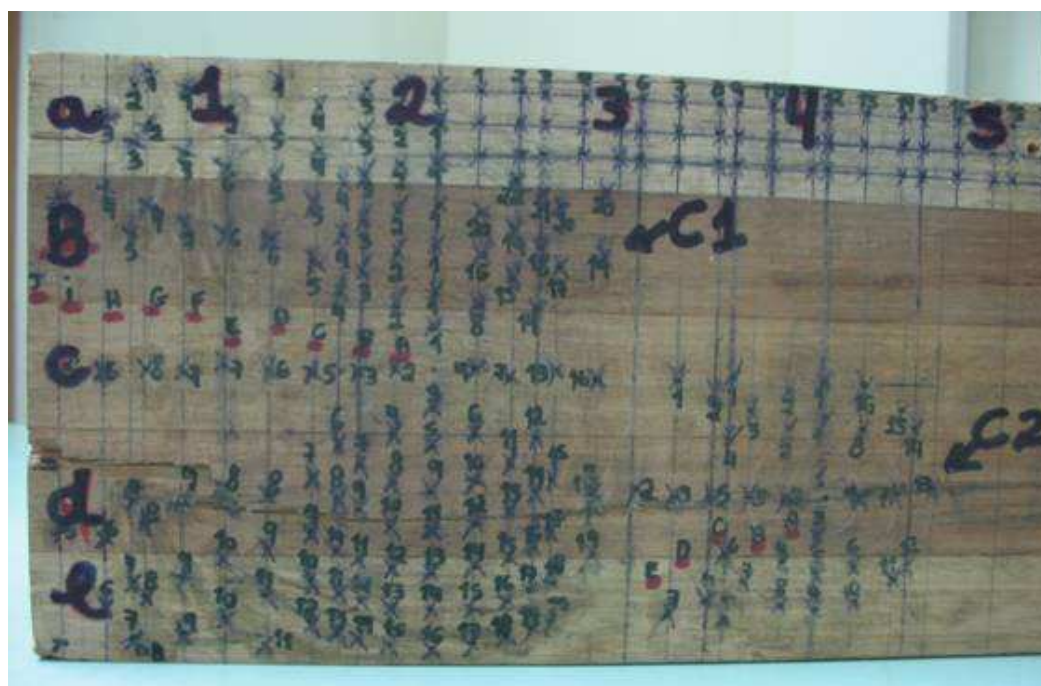


FIGURA 4.3 – Representação real do segundo mapeamento.

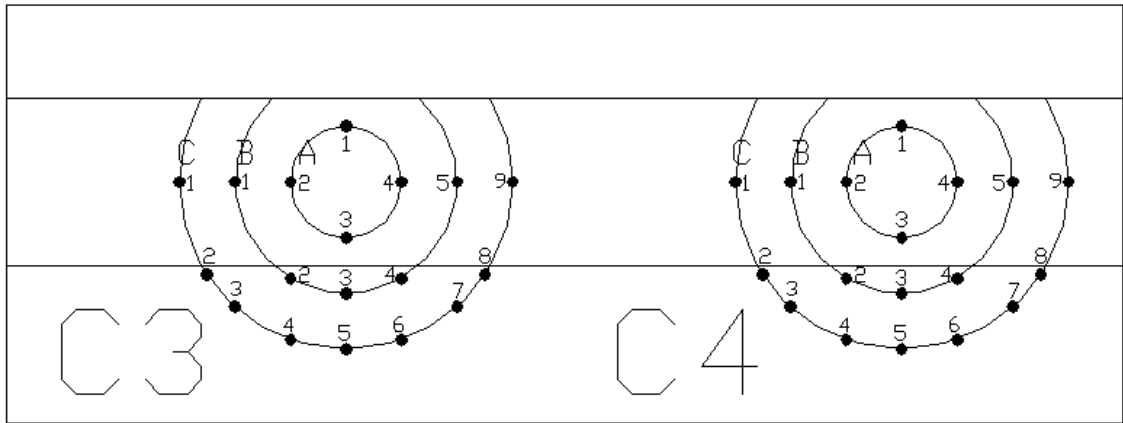


FIGURA 4.7 – Detalhamento da região 3.

Através da medição dos tempos de viagem no segundo mapeamento, apresentados nas TABs. A.2 e A.3 no ANEXO A, pôde-se representar as curvas de mesmos tempos de propagação dos pulsos utilizando o software SigmaPlot, como pode ser visto na FIG. 4.8. Este recurso computacional também possibilitou a transformação destas curvas em isocromáticas para uma melhor visualização das áreas potencialmente degradadas, conforme apresentado na FIG. 4.9.

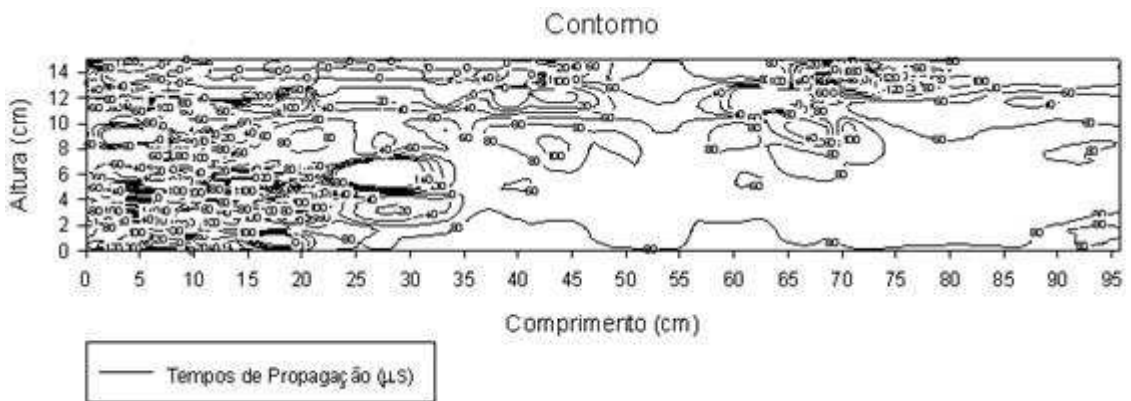


FIGURA 4.8 – Contornos indicando regiões de mesmos tempos de propagação.

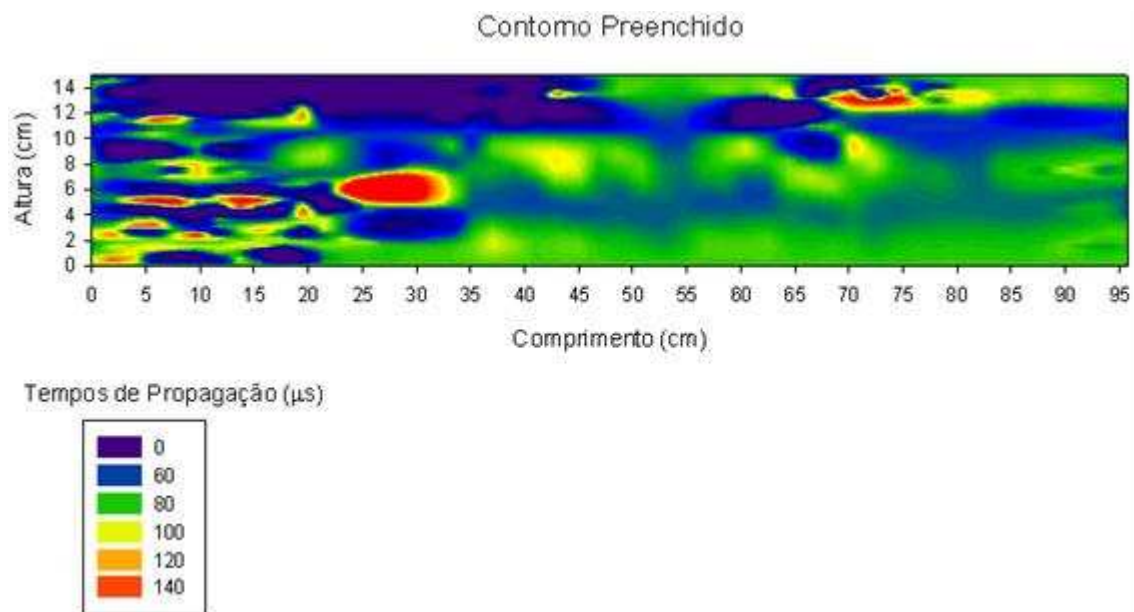


FIGURA 4.9 – Localização das deteriorações na viga.

A legenda da FIG. 4.9 indica os tempos de propagação, em μs , necessários para que um pulso se desloque de uma face a outra da viga. O valor de $0 \mu\text{s}$ no tempo de propagação está relacionado a reflexão do pulso, sendo possível que haja algum obstáculo nesse percurso que esteja impedindo a passagem do mesmo. Dessa forma, levando-se em consideração que um pulso não se propaga em espaços vazios, esses obstáculos podem indicar o ataque por insetos xilófagos. Os valores obtidos acima de $100 \mu\text{s}$, de acordo com os tempos de viagem do pulso ultra-sônico de referência, sugerem a ocorrência de difração dos pulsos devido a fissuras, trincas e rachaduras, muitas vezes, decorrentes da própria natureza da madeira. Se o pulso é desviado, o tempo de propagação aumenta. A FIG. 2.12 representa os fenômenos de difração e reflexão de pulsos.

A partir da inspeção visual, foi possível verificar que algumas regiões estavam realmente danificadas, com pequenas rachaduras, frestas e furos, conforme FIG. 4.10. As deteriorações internas, observadas na análise dos resultados, podem ser associadas aos defeitos de crescimento da madeira ou até mesmo à biodeterioração causada por insetos xilófagos.



FIGURA 4.10 – Defeitos encontrados na inspeção visual.

4.2. Ensaio 2

O Ensaio 2 foi realizado na estrutura do edifício Centro Financeiro, de propriedade da empresa AgloGold, o qual reporta ao período áureo do extrativismo mineral em Minas Gerais e, até mesmo, à própria história da cidade de Nova Lima. O edifício preserva, ainda intactos, traços peculiares da arquitetura, engenharia e carpintaria Inglesas do final do Século XIX e início do Século XX, tanto nas fachadas quanto na estrutura das tesouras da cobertura, conforme pode ser visto nas figuras a seguir. Na FIG. 4.11 é apresentada a fachada lateral com o acesso principal ao edifício, caracterizada pelo grande número de vidraças. Já a FIG. 4.12 detalha as tesouras da estrutura da cobertura, indicando o abaulamento das quinas do pendural central e das diagonais. Na FIG. 4.13 pode-se visualizar a fachada lateral com o acesso secundário ao edifício.



FIGURA 4.11 – Fachada lateral, com o acesso principal ao edifício.



FIGURA 4.12 – Detalhe das tesouras da estrutura da cobertura.



FIGURA 4.13 – Fachada lateral, com o acesso secundário ao edifício.

Na estrutura de sustentação do segundo piso, podem ser vistas vigas falquejadas e serradas bastante robustas, remanescentes, ainda, da época de construção do edifício. Na FIG. 4.14 é mostrada a viga principal com suas respectivas vigas secundárias que oferecem suporte ao segundo piso, notando-se as seções robustas de 22 cm x 22 cm destes vigamentos. A FIG. 4.15 apresenta, em primeiro plano, uma perfuração indicando a infestação e o ataque de cupins de madeira seca em uma viga principal de suporte do vigamento secundário (barrotes) do segundo piso. É possível notar que, assim como na FIG 4.15, a viga principal perimetral externa apontada na FIG. 4.16, de dimensões extremamente robustas de 29 cm x 40 cm, sofreu uma infestação de cupins de madeira seca.



FIGURA 4.14 – Viga principal e vigas secundárias de suporte do segundo piso.



FIGURA 4.15 – Viga principal de suporte do vigamento secundário do segundo piso.



FIGURA 4.16 – Viga principal perimetral externa.



FIGURA 4.17 – Vigas secundárias (barrotes) de suporte do piso.

Além do apelo histórico, a manutenção e preservação deste edifício também se justificam pelo aspecto econômico e de segurança, uma vez que o mesmo ainda é utilizado como sede do centro financeiro da empresa, com diversos escritórios e repartições, por onde circulam, diariamente, dezenas de pessoas.

Iniciando-se o trabalho, todas as dimensões da viga foram medidas, conforme FIG. 4.18.

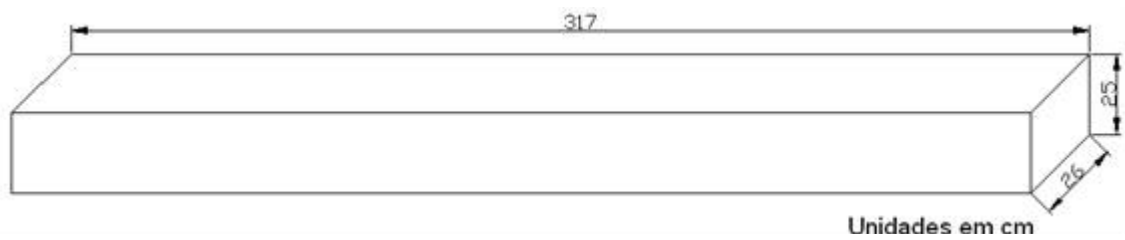


FIGURA 4.18 – Dimensões da viga do Ensaio 2.

Dois moldes foram confeccionados com a finalidade de facilitar a realização do mapeamento na extensa peça de madeira. Consistiram em um papelão de 45 cm x 37 cm, com furos, distanciados de 2,5 cm e diâmetro em torno de 1 cm, como apresentado na FIG. 4.19. O mapeamento uniforme abrangeu toda a extensão da peça e, para isto, houve a necessidade de imobilizar com pregos o molde sete vezes na viga. Os últimos 18 cm da viga não puderam ser mapeados por falta de acessibilidade ao local. A representação de toda a viga mapeada pode ser observada através da FIG. 4.20.



FIGURA 4.19 – Molde utilizado no mapeamento da viga.

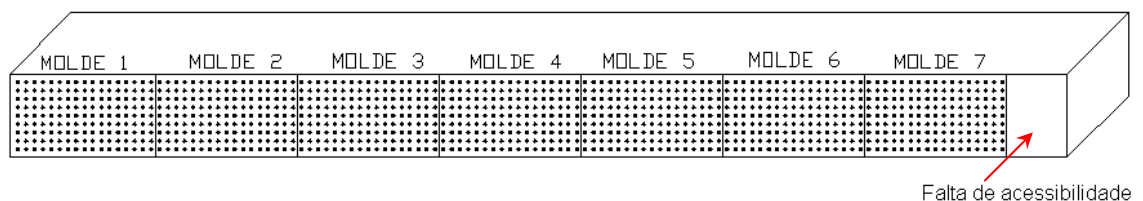


FIGURA 4.20 – Mapeamento da viga no Ensaio 2.

Em seguida foram medidos os tempos de viagem dos pulsos ultra-sônicos em todos os pontos deste mapeamento, manuseando-se transdutores de 500 e 150 kHz. O valor obtido em toda a extensão da viga foi zero. Todos os cabos e equipamentos foram, então, conferidos, observando se havia alguma irregularidade ou até mesmo pane, que pudesse explicar o valor coletado. Mas nenhuma anomalia foi encontrada. Uma explicação coerente a este fato é que, por ser uma madeira antiga, vários processos naturais podem ter ocorrido, como retração, causando pequenas fissuras internas em toda a peça. Sendo assim, o pulso encontra vários obstáculos ao longo do trajeto e acaba por ser refletido e impossibilitado de propagar até a outra face da madeira, impedindo a sua captação pelo transdutor receptor. Além disto, através da inspeção visual, foi possível detectar vários defeitos que puderam ter contribuído para a reflexão dos pulsos, como fissuras, vários pregos cravados ao longo da peça, rachaduras, frestas e buracos preenchidos com massa, como pode ser visto na FIG. 4.21.

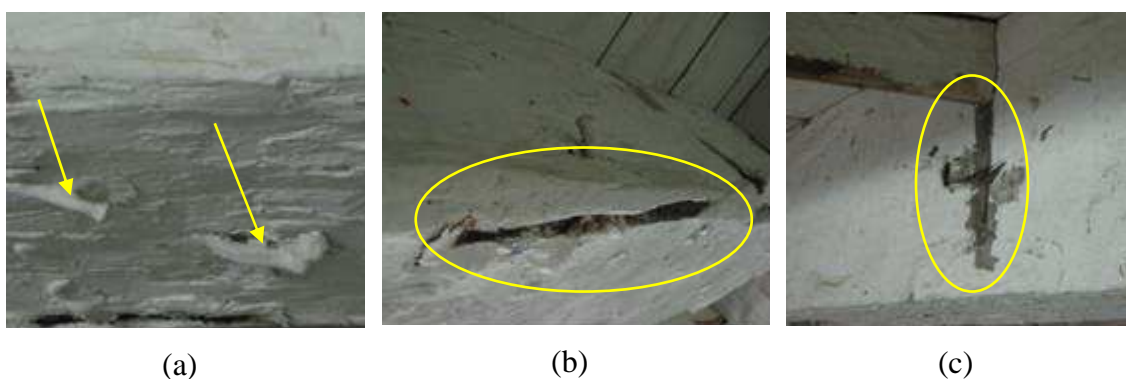


FIGURA 4.21 – Defeitos detectados na inspeção visual: (a) pregos, (b) fresta e (c) rachadura.

Este ensaio pode não ter proporcionado os resultados esperados, mas auxiliou no sentido de incrementar a metodologia, solucionando a questão sobre a impossibilidade de obter resultados plausíveis em algumas peças.

4.3. Ensaio 3

O Ensaio 3 foi realizado em uma peça de madeira da Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar em Ouro Preto. A cidade de Ouro Preto, situada no estado de Minas Gerais, é classificada como Patrimônio Histórico Mundial por possuir edificações históricas de grande importância, podendo ser um excelente local para a realização de pesquisas relacionadas à madeira. Muitos casarões e igrejas, caracterizados pelo barroco mineiro, são datados do século XVII e possuem grande parte de suas estruturas construídas em madeira. A FIG. 4.22 apresenta alguns desses casarões.



FIGURA 4.22 – Construções Históricas da cidade de Ouro Preto, Minas Gerais.

A Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar, localizada na Praça Monsenhor Castilho Barbosa em Ouro Preto, é considerada uma das mais ricas e requintadas do barroco mineiro. Foi construída nos primeiros anos do século XVIII e inaugurada em 1733. Seu interior é ornamentado com talha coberta de ouro e vários anjos esculpidos. Sua riqueza em detalhes e seu douramento excessivo deslumbram os turistas. Sua fachada é exposta na FIG. 4.23.



FIGURA 4.23 – Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar.

Em meados de 2008, a Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar sofreu uma restauração em sua cobertura conduzida pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), conforme FIG. 4.24. Muitas peças estavam sendo descartadas e o órgão pôde doar algumas para este trabalho, apresentadas na FIG. 4.25.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.24 – Restauração da cobertura da Igreja do Pilar: (a) execução da obra; (b) execução da obra e (c) vista geral da igreja.



(a)



(b)

FIGURA 4.25 – (a) Peças descartadas e (b) peças doadas para o estudo.

Partindo-se do princípio de que, mesmo aparentando estar em bom estado, a peça poderia estar totalmente deteriorada internamente, o elemento estrutural escolhido possuía como principal atributo o mínimo de defeitos externos em comparação com as demais peças. Dando início aos procedimentos descritos na Etapa Inicial da metodologia, suas dimensões foram medidas e estão apresentadas na FIG. 4.26.

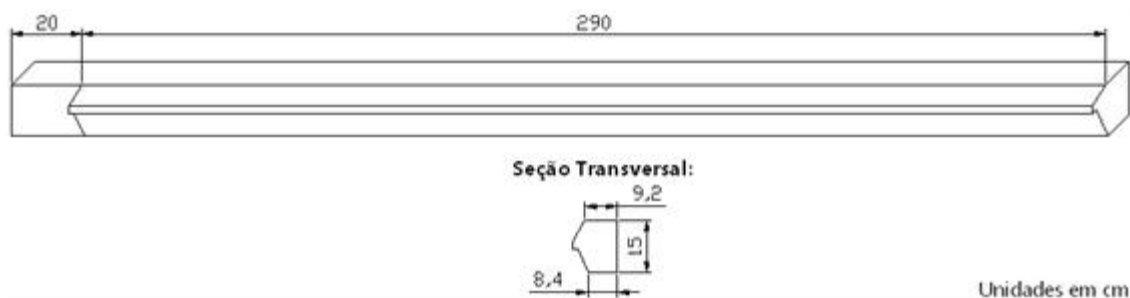


FIGURA 4.26 – Dimensões da peça para o Ensaio 3.

Como no Ensaio 2, um molde foi utilizado na realização do mapeamento da face posterior. O material, espaçamento e diâmetro dos furos foram mantidos, porém suas dimensões foram alteradas para 92,5 cm x 14,5 cm. A FIG. 4.27 exhibe o molde confeccionado para o Ensaio 3.

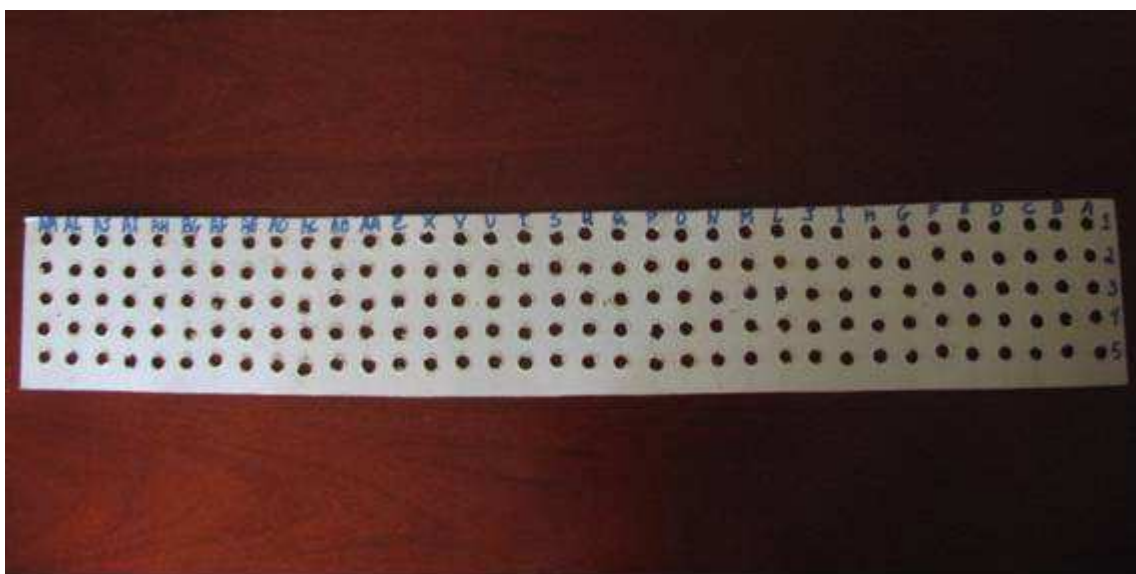


FIGURA 4.27 – Molde utilizado no mapeamento do Ensaio 3.

É visível que a peça possuía uma seção transversal irregular, exceto os vinte centímetros iniciais, proporcionando um certo nível de dificuldade no mapeamento, mas nada que pudesse comprometer o resultado final. O mapeamento uniforme na face irregular da peça pode ser observado na FIG. 4.28. Para que houvesse o mapeamento de toda a extensão da peça, foi necessária a utilização do molde quatro vezes.

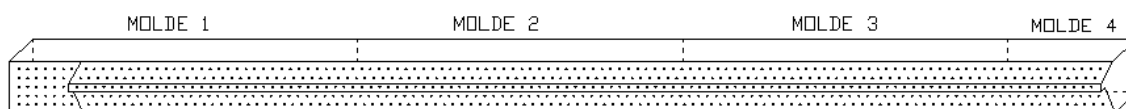


FIGURA 4.28 – Mapeamento da peça do Ensaio 3.

Em seqüência, a medição dos tempos de viagem dos pulsos ultra-sônicos foi realizada de acordo com a Etapa D da metodologia, utilizando os transdutores de 500 e 150 kHz. Os valores coletados na extensão da viga resultaram em 0 μ s e uma possível explicação para isto ter ocorrido, além dos prováveis furos causados por insetos xilófagos, é que os pulsos estão sendo refletidos ao encontrarem fissuras causadas por retração da peça, que possui uma idade estimada de 150 anos.

Em conseqüência disto, foram realizados dois ensaios, o primeiro utilizando transdutores de 500 kHz e o último com transdutores de 150 kHz, seguindo a Etapa I da metodologia proposta. Os procedimentos utilizados para atender todos os seus passos serão descritos a seguir.

4.3.1. Ensaio com transdutores de frequência equivalente a 500 kHz

Para facilitar o manuseio e atenuar os trabalhos relacionados à coleta de dados, a peça foi cortada diminuindo o seu comprimento para aproximadamente 59,7 cm, um pouco mais de $\frac{1}{4}$ da peça, conforme a FIG. 4.29.

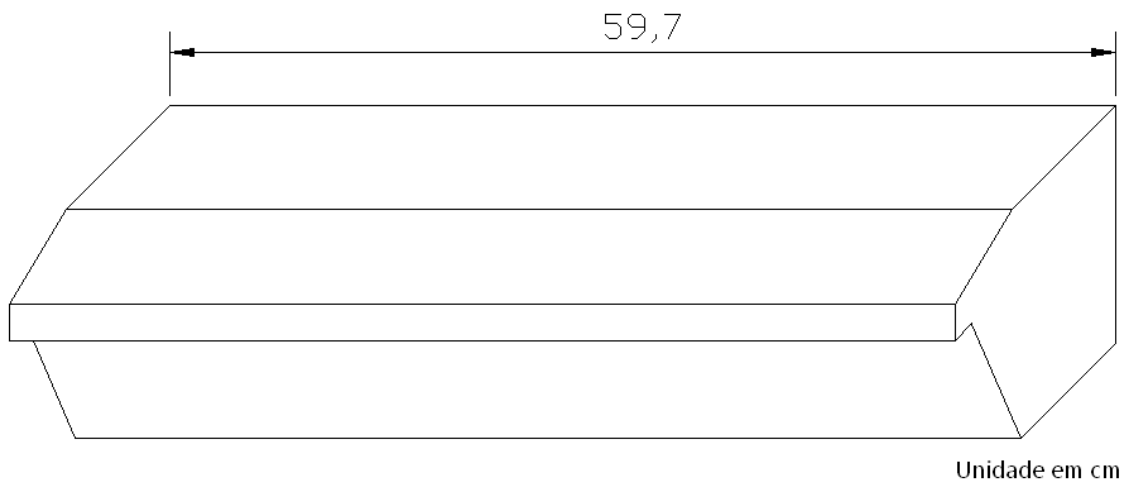


FIGURA 4.29 – Corte na peça.

A face irregular da peça, ou seja, face anterior, estava previamente mapeada em detrimento da realização da primeira parte da metodologia, restando, assim, as faces posterior, superior e inferior. É interessante que todas as faces sejam mapeadas, caso haja acessibilidade a todas elas, aumentando o nível de representação dos defeitos internos na peça. As faces mapeadas estão representadas nas FIGs. 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33.

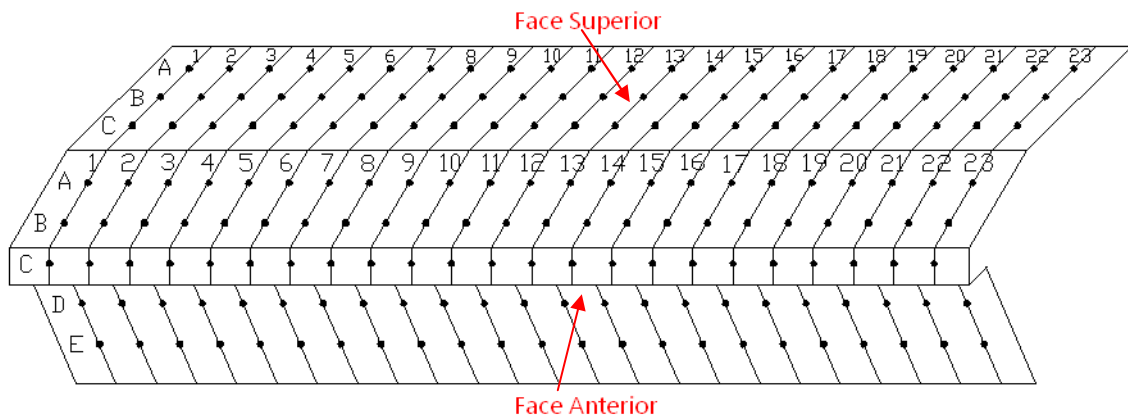


FIGURA 4.30 – Representação esquemática do mapeamento na face anterior e superior.



(a)



(b)

FIGURA 4.31 – Representação real do mapeamento: (a) face anterior e (b) face superior.

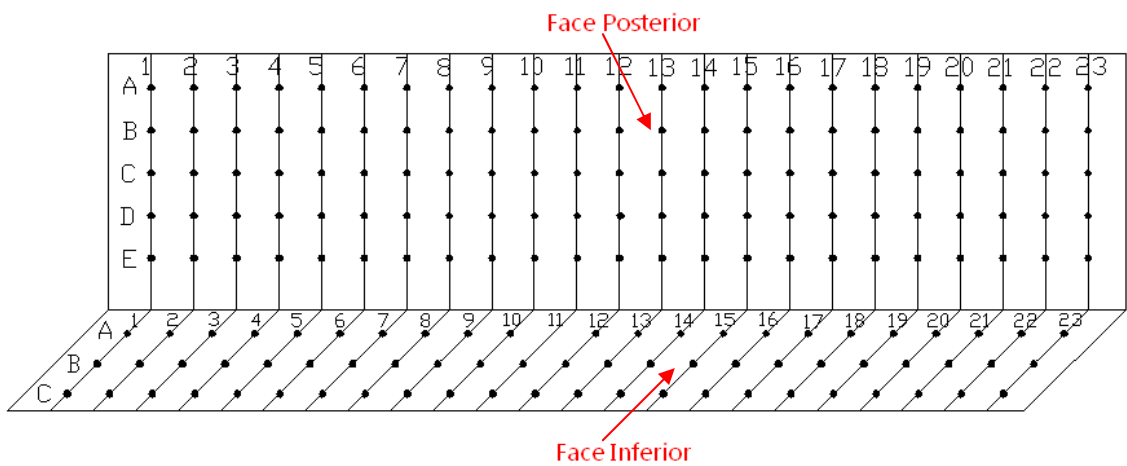
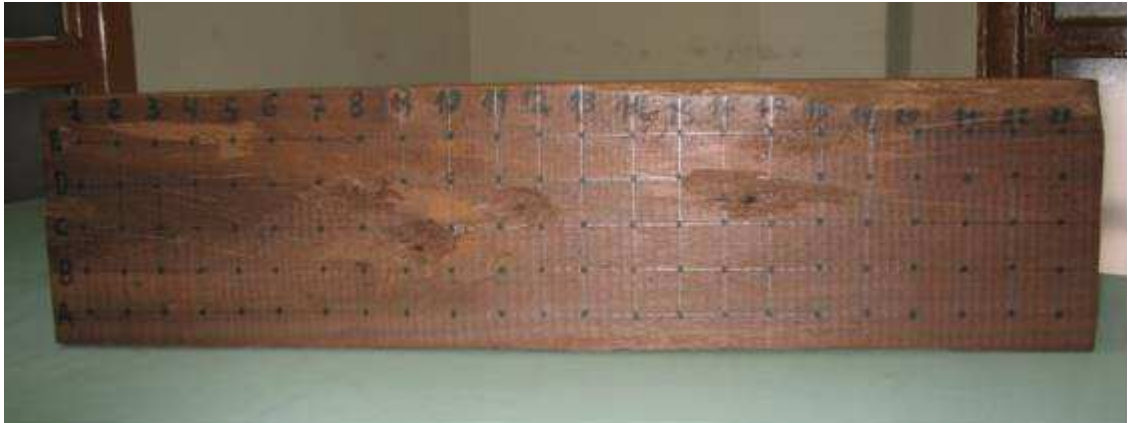


FIGURA 4.32 – Representação esquemática do mapeamento na face posterior e inferior.



(a)



(b)

FIGURA 4.33 – Representação real do mapeamento: (a) face posterior e (b) face inferior.

Em seguida, coletou-se o tempo de viagem do pulso ultra-sônico em cada ponto, conforme FIG. 3.8, de maneira que o pulso, ao encontrar um obstáculo à sua livre propagação, foi refletido por ele, voltando ao aparelho receptor. Medindo-se este tempo decorrido entre a emissão e a recepção do pulso refletido, e conhecendo-se a velocidade de referência daquela peça, determina-se a distância existente entre o transmissor e o obstáculo. Por ser uma etapa determinante no ensaio, a medição deve ser realizada com rigor evitando que a quantidade de gel entre a peça e o transdutor seja deficiente e, além disso, seria interessante que a pessoa encarregada no manuseio dos transdutores cumprisse sua função até o término do ensaio, pois cada indivíduo pressiona de forma diferente o equipamento, mantendo, assim, um padrão nos resultados obtidos.

Com o intuito de calcular a velocidade de referência, lembrando que todos os valores captados na peça seguindo a Etapa D da metodologia resultaram em $0 \mu\text{s}$, coletou-se um

corpo-de-prova visivelmente sadio da peça e mediu-se, em três diferentes pontos da peça, os tempos de viagem dos pulsos, utilizando a transmissão indireta de pulsos ultrassônicos, de forma que a distância entre os transdutores fosse de 2,5 cm. Em seguida, retirou-se 1 cm da peça, diminuindo o percurso atingido pelo pulso, e coletou-se, posteriormente, os tempos de viagem nos pontos equivalentes a medição anterior. Este procedimento foi novamente desempenhado. Procedendo-se desta maneira, garante-se um valor médio de velocidade de referência mais próximo a realidade. A TAB. 4.2 apresenta as informações referentes aos tempos de viagem, as distâncias percorridas pelos pulsos e suas respectivas velocidades, obtidas através da Eq. (3.1), em cada ponto.

TABELA 4.2 – Tempos de viagem dos pulsos, distâncias percorridas e velocidades de referência encontradas para a frequência de 500 kHz.

Ponto	Tempo de Propagação (μs)	Distância (cm)	Velocidade (m/s)
1	13,9	8,9	6402
2	15,2	9,0	5921
3	20,1	9,1	4527
Retirando-se em torno de 1 cm da peça:			
1	12,9	7,7	5969
2	14,4	7,8	5417
3	17,7	7,9	4463
Retirando-se em torno de 1 cm da peça:			
1	12,5	6,7	5360
2	13,4	6,8	5074
3	13,4	6,9	5149

O valor adotado e utilizado no próximo passo foi estabelecido pela média entre os nove valores encontrados:

$$v_R = \frac{6402 \times 5921 \times 4527 \times 5969 \times 5417 \times 4463 \times 5360 \times 5074 \times 5149}{9} = 5364 \text{ m/s}$$

Em seguida, calculou-se para toda a extensão da peça, as distâncias relativas aos defeitos internos nos pontos do mapeamento, através da Eq. (3.2). Os resultados estão organizados nas TABs. A.4 a A.7, encontradas no ANEXO A.

Posteriormente aos cálculos, a peça foi “fatiada”, cortando-se transversalmente sobre cada linha referente aos números no mapeamento, conforme a FIG. 4.34. Mas para garantir a qualidade destes cortes, houve a necessidade da retirada de alguns visíveis cravos na peça.



FIGURA 4.34 – Cortes transversais realizados na peça.

Esta última etapa teve’ por finalidade a comparação entre a condição real interna da peça e os resultados obtidos através da metodologia proposta. Os resultados foram representados pelo software AutoCAD e sobrepostos à fotografia da situação real. Na FIG. 4.35 é apresentado, como exemplo, o resultado obtido para uma fatia.

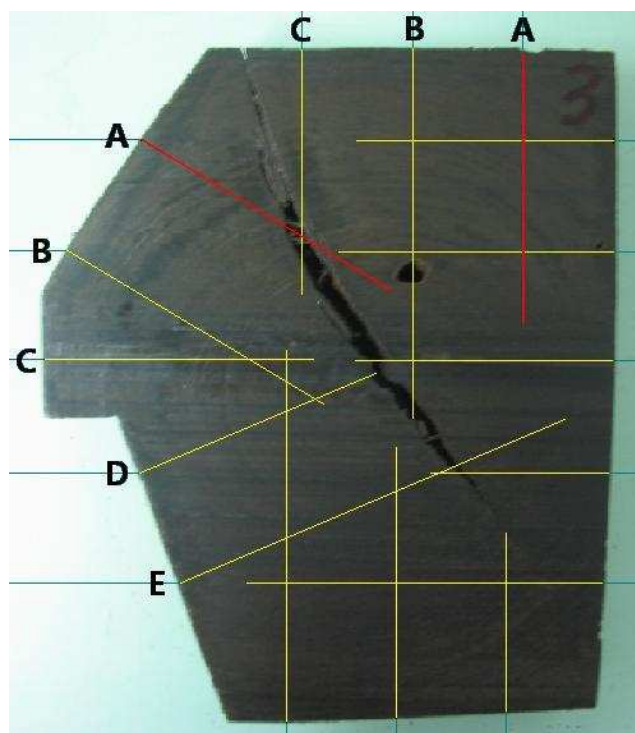


FIGURA 4.35 – Resultados obtidos para a fatia 3, referente à posição 3-4 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

No ANEXO B estão apresentados os resultados de todas as fatias. As distâncias obtidas pelo ultra-som estão representadas nas cores amarelo e vermelho. As destacadas em vermelho, indicam alguma irregularidade na superfície da peça, como a presença de rachadura ou mesmo prego, que pode estar causando algum distúrbio na leitura pelo aparelho de ultra-som, tornando alguns resultados imprecisos.

A metodologia mostrou-se eficiente na maioria das situações, confirmando sua validade para encontrar vazios internos na madeira por meio de ondas ultra-sônica.

4.3.2. Ensaio com transdutores de frequência equivalente a 150 kHz

Assim como no ensaio anterior e com os mesmos propósitos, uma outra parte foi retirada da extensa peça. Suas dimensões estão apresentadas na FIG. 4.35. Com as frequentes irregularidades na peça, conseqüentes da sua idade avançada, tornou-se

necessário um aplainamento da seção, diminuindo, em pequenas proporções, suas dimensões.

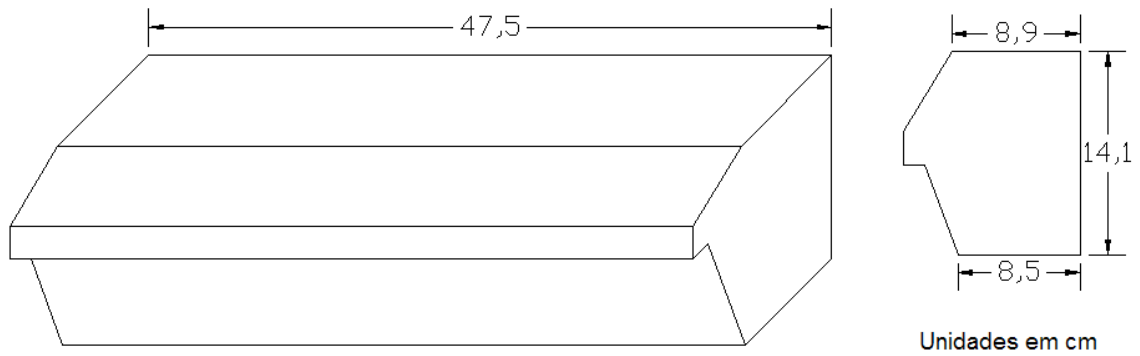


FIGURA 4.36 – Corte na peça para o ensaio com o transdutor de 150 kHz.

As faces posterior, superior e inferior foram mapeadas com espaçamento entre pontos de 2,5 cm, conforme o mapeamento da face anterior estabelecido na marcação da peça sem cortes. Suas representações estão mostradas nas FIGs. 4.37, 4.38, 4.39 e 4.40.

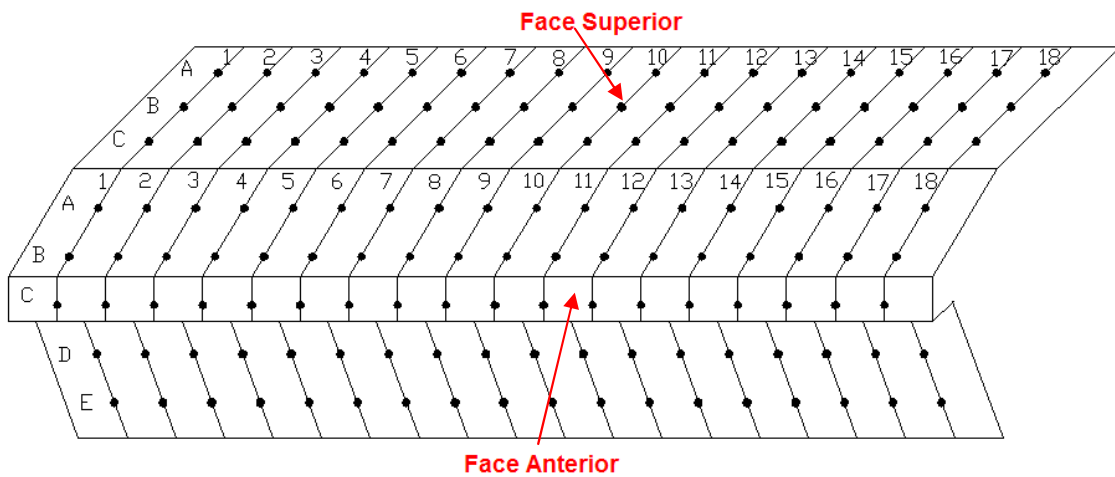


FIGURA 4.37 – Representação esquemática do mapeamento na face anterior e superior do ensaio com o transdutor de 150 kHz.



(a)



(b)

FIGURA 4.38 – Representação real do mapeamento para o ensaio com o transdutor de 150 kHz: (a) face anterior e (b) face superior.

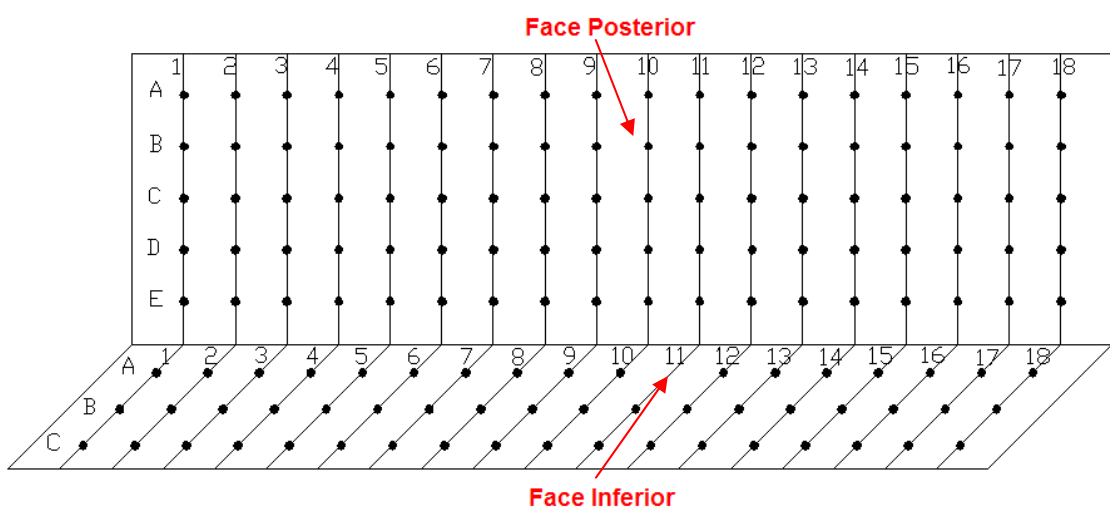
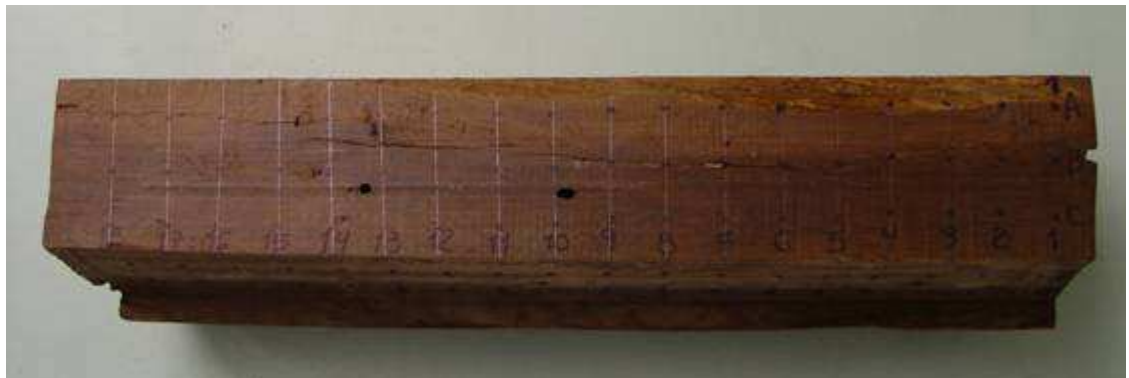


FIGURA 4.39 – Representação esquemática do mapeamento na face posterior e inferior do ensaio com o transdutor de 150 kHz.



(a)



(b)

FIGURA 4.40 – Representação real do mapeamento para o ensaio com o transdutor de 150 kHz: (a) face posterior e (b) face inferior.

A medição foi realizada de forma indireta e, como a seção do transdutor possui um diâmetro de 2,5 cm, podendo causar interferência nas medidas devido a grande proximidade entre ambos, optou-se por pular um ponto na seqüência do mapeamento, como por exemplo, ao se realizar a medição no ponto 1A, o outro transdutor deveria se posicionar no ponto 3A; com o transdutor no ponto 2A seria necessário que o outro se posicionasse no ponto 4A e assim sucessivamente.

Para calcular a velocidade de referência foram realizadas medições indiretas no mesmo corpo-de-prova anteriormente citado de forma que a distância entre os transdutores fosse de 5 cm. Os resultados obtidos estão apresentados na TAB. 4.3.

TABELA 4.3 – Tempos de viagem dos pulsos, distâncias percorridas e velocidades de referência encontradas para a frequência de 150 kHz.

Ponto	Tempo de Propagação (μs)	Distância (cm)	Velocidade (m/s)
1	24,4	9,0	3689
2	23,1	9,1	3939
3	22,7	9,2	4053
Retirando-se em torno de 1 cm da peça:			
1	20,1	7,8	3881
2	19,7	7,9	4010
3	20,2	8,0	3960
Retirando-se em torno de 1 cm da peça:			
1	17,3	6,8	3931
2	17,6	6,9	3920
3	17,3	7,0	4046

O valor adotado para a velocidade de referência é:

$$v_R = \frac{3689 \times 3939 \times 4053 \times 3881 \times 4010 \times 3960 \times 3931 \times 3920 \times 4046}{9} = 3937 \text{ m/s}$$

Concluindo os cálculos, as distâncias relativas aos obstáculos encontrados pelos pulsos ultra-sônicos no mapeamento foram determinadas por meio da Eq. (3.2). Os resultados estão organizados nas TABs. A.8 a A.11, encontradas no ANEXO A.

Analogamente ao ensaio anterior, a peça foi submetida a um “fatiamento”, apresentado na FIG. 4.40.



FIGURA 4.41 – Cortes transversais realizados na peça do ensaio com o transdutor de 150 kHz.

As comparações entre a condição real interna da peça e os resultados obtidos através da metodologia proposta estão sintetizados nas FIGs. B.23 a B.38 do ANEXO B. Como exemplo, apresenta-se o resultado de uma fatia na FIG. 4.42.

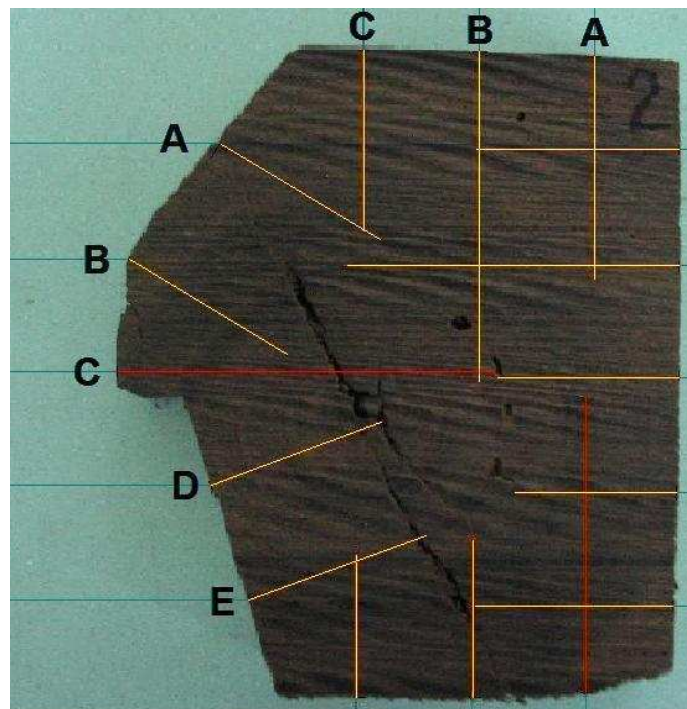


FIGURA 4.42 – Resultados obtidos para a fatia 2, referente à posição 1-3 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

Em conseqüência de haver a necessidade de realizar aberturas para a retirada de cravos, na transposição dos resultados em algumas fotografias (FIGs B.28, B.36, B.37 e B.38) foi preciso simular uma superfície contínua, ou seja, sem orifícios, através de uma linha ligando um ponto ao outro da face, para que houvesse uma representação aproximada da realidade no momento da medição.

A maioria dos resultados obtidos pela metodologia se aproximou da condição real. Os valores que não apresentaram alguma relação com a realidade podem ter sido ocasionados pela quantidade de gel ineficiente, ausência de um suporte com a função de manter os transdutores firmes e capazes de aplicar a mesma pressão ao se posicionarem na peça e irregularidades na superfície, conseqüentes da idade avançada em que o elemento se encontra.

5

CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados do ensaio, pode-se concluir para a determinação da integridade da madeira de edificações históricas por meio de pulsos ultra-sônicos que:

- Caso haja acessibilidade às faces da peça em estudo, aplica-se a metodologia proposta seguindo os passos da Etapa Inicial e da Etapa D, caracterizando a transmissão direta dos pulsos.
- Caso não haja acessibilidade à superfície do elemento ou se o mesmo estiver extremamente deteriorado, aplica-se a metodologia seguindo os passos da Etapa Inicial e da Etapa I, caracterizando a transmissão indireta dos pulsos.

Levando-se em consideração os resultados obtidos em todos os ensaios, pode-se concluir também que a metodologia apresentará resultados satisfatórios para a localização de regiões potencialmente atacadas em estruturas de madeira de edificações históricas, aumentando, assim, sua confiabilidade e segurança.

Finalmente pode-se dizer que este estudo possibilitará uma avaliação mais precisa destas estruturas, evitando a troca desnecessária de elementos estruturais sadios, supostamente deteriorados ou mesmo, a manutenção de elementos extremamente deteriorados no arcabouço estrutural que poderiam comprometer, sensivelmente, a estabilidade global da construção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARÊDE, A.; COSTA, A. Inspeção e diagnóstico estrutural de e construções históricas. In: A INTERVENÇÃO NO PATRIMÓNIO. PRÁTICAS DE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO, 2002, Porto. **Actas do seminário...** Porto: FEUP, 2002.

AZEVEDO JÚNIOR, A. P. **Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através da técnica de ultra-som:** fundamentos físicos e resultados experimentais. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

BODIG, J. The process of NDE research for wood and wood composites. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 12., 2000, Colorado. **Proceedings...** Colorado: CSU, 2000. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/v06n03/bodig/bodig.htm>>. Acesso em: dez. 2008.

BUCUR, V. **Acoustics of wood.** New York: CRC Press, 1995. 336 p.

CRUZ, I. P.; PRESA, E. P.; OLIVEIRA, M. M. de. Restauração em edificações antigas no Centro Histórico de Salvador. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. **Resumos...** Cuiabá: EDUFMT, 2004. v. 1. p. 254.

DE GROOT, R. C.; ROSS, R. J.; NELSON, W. J. Non-destructive assessment of wood decay and termite attack in southern pine sapwood. **Wood Protection**, v. 3, n. 2, p. 25-34, 1998.

EMERSON, R. N. et al. Nonsdestructive evaluation techniques for timber bridges. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 1998, Lausanne. **Proceedings...** Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998.

Disponível em: < <http://www.woodcenter.org/docs/emers98a.pdf>>. Acesso em: nov. 2008.

EMERSON, R. N. et al. Ultrasonic inspection of a glued laminated timber fabricated with defects. In: ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 90., 2001, Washington, USA. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2001/emers01a.pdf>>. Acesso em: set. 2008.

EMERSON, R. N. et al. Ultrasonic inspection of large bridge timbers. **Forest Products Journal**, Madison, US, v. 52, n. 9, p. 88-95, set. 2002.

FEIO, A. J. O. **Inspection and diagnosis of historical timber structures: NDT correlations and structural behavior.** 2005. Tese (Doutorado) - Universidade do Minho, Portugal.

FULLER, J. J.; ROSS, R. J.; DRAMM, J. R. **Honeycomb and surface check detection using ultrasonic nondestructive evaluation.** Washington: United States Department of Agriculture, 1994. Research Note FPL-RN-0261. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrn/fplrn261.pdf>>. Acesso em: out. 2008.

JAYNE, B. A. Vibrational properties of wood as indices of quality. **Forest Products Journal**, Madison, US, v. 9, n. 11, p. 413-416, 1959.

KANDEMIR YUCEL, A.; TAVUKCUOGLU, A.; CANER-SALTIK, E. N. In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity. **Infrared Physics & Technology**, Exeter, GB, v. 49, p. 243-248, 2007.

LEE, Jun-Jae; KIM, Kwang-Mo. Evaluation of structural safety for wooden cultural properties using NDT. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 8., 2004, Lahti. **Proceedings...** Helsinki, Finland: Helsinki University, 2004. Disponível em: <http://www.ewpa.com/Archive/2004/jun/Paper_324.pdf>. Acesso em: dez. 2008.

MECHANICAL INTEGRITY INC. **Automated microwave inspection of dielectric componentes.** Humble, [S.d.]. Disponível em: <<http://www.evisive.com/MII.pdf>>. Acesso em: set. 2008.

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**, Campina Grande, PB, v. 6, n. 3, p. 499-503, 2002.

REGINATTO, G. M. P. et al. Inspeção e diagnóstico de estruturas de cobertura de edificações históricas em Florianópolis, Santa Catarina. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. **Resumos...** Cuiabá: EDUFMT, 2004. v. 1.

RODRIGUES, R. M. S. C. de O. **Construções antigas de madeira:** experiências de obra e reforço estrutural. 2004. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Portugal, 2004.

ROSS, R. J. et al. NDE of historic structures-USS *Constitution*. **Proceedings of SPIE**, Bellingham, USA, v. 2944, p. 266-274, 1996. Disponível em: <<http://www.maritime.org/conf/conf-ross.htm>>. Acesso em: ago. 2008.

SANDOZ, J. L. Structural timber quality assurance using ultrasound. In: INTERNATIONAL WOOD ENGINEERING CONFERENCE, 4., 1996, New Orleans. **Proceedings...** Louisiana: Omni Press, 1996a. v. 3, p. 233-238.

SANDOZ, J. L. Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 10., 1996, Lausanne. **Proceedings...** Lausanne: Rolf Diederichs, 1996b. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/sandoz/sandoz.htm>>. Acesso em: nov. 2008.

SANYAL, S. N.; GULATI, A. S. Compressive strength of timber by ultrasonic pulse technique. **Indian Forester**, Dehra Dun, India, v. 105, n. 2, p. 180–185, 1979.

SARAIVA, A. C. **Insectos da madeira-em-obra e seu combate**. Lisboa: Ministério de Obras Públicas, 1957. 79 p.

SHAJI, T.; SOMAYAJI, S.; MATHEWS, M. S. Ultrasonic pulse velocity technique for inspection and evaluation of timber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York, v. 12, n. 2, p. 180-185, 2000.

TELES, C. D. **Estruturas de madeira**: proposta de metodologia de inspeção e correlação da velocidade ultra-sônica com o dano por cupins. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

TEREZO, R. F. **Propriedades mecânicas de madeiras utilizadas em estruturas históricas e contemporâneas estimadas por meio de ultra-som**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

ZOMBORI, B. In situ non-destructive testing of built in wooden members. **NDT.net**, Kirchwald, Germany, v. 6, n. 03, 2001. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/v06n03/skatter/skatter.htm>>. Acesso em: nov. 2008.

ANEXO A

APRESENTAÇÃO DAS TABELAS DOS ENSAIOS

A relação dos resultados obtidos nos ensaios de ultra-som encontra-se neste item, apresentados nas TABs A.1 a A.11. As TABs A.1-A.3 referem-se aos resultados do Ensaio 1, cujo material de estudo foi uma viga de madeira laminada colada. O Ensaio 2 não resultou em tabelas já que o valor obtido para todos os tempos de viagem dos pulsos ultra-sônicos foi zero. As TABs A.4-A.11 exibem os valores encontrados e calculados para o Ensaio 3.

TABELA A.1 – Ensaio 1: tempos de propagação dos pulsos no primeiro mapeamento.

TEMPO DE PROPAGAÇÃO (μs)					
Coluna	Lâmina				
	A	B	C	D	E
1	0	47,7	46,7	0	78,0
2	0	0	70,4	0	0
3	0	0	0	0	82,6
4	0	41,3	0	0	89,2
5	0	54,4	0	74,4	74,8
6	0	55,5	69,9	86,3	99
7	0	55,8	64,2	72,3	99,7
8	0	55,7	83,8	0	81,8
9	0	56,1	64,5	67,6	76,8
10	0	56,0	61,5	61,2	84,6
11	0	55,2	71,1	61,8	78,7
12	0	56,1	99,8	61,4	78,0
13	0	56,7	72,0	61,4	77,7
14	0	56,7	71,7	61,2	84,6
15	0	56,4	73,1	61,9	97,6
16	0	56,8	73,3	60,8	84,4
17	84,9	56,8	98,2	60,7	83,3
18	87,2	56,5	97,3	60,6	85,4
19	80,3	56,7	71,1	61,8	77,5
20	79,7	55,9	85,6	62,4	76,9
21	75,7	55,5	71,1	62,9	71,8
22	73,7	56,3	66,2	63,4	76,1
23	79,7	55,7	78,2	61,4	83,9
24	80,1	55,3	72,4	62,3	82,0
25	80,2	55,3	72,2	62,0	84,4
26	90,3	55,1	91,3	68,4	77,4
27	94,5	54,5	84,4	64,5	78,3
28	118,0	61,2	79,9	71,8	78,3
29	89,8	55,3	88,5	64,6	72,7
30	86,9	55,6	71,8	64,3	77,6
31	73,8	55,6	71,9	65,9	77,4
32	129,3	56,1	66,0	65,4	78,4
33	80,2	55,7	64,6	64,8	77,8
34	93,0	55,6	77,7	64,3	77,3
35	86,0	57,2	71,2	64,3	78,3
36	92,6	57,4	92,4	70,4	84,1
37	85,4	57,2	70,0	76,3	84,1

TABELA A.2 – Ensaio 1: tempos de propagação dos pulsos ultra-sônicos em R1 no segundo mapeamento.

TEMPO DE PROPAGAÇÃO (μ s)									
Reta	Ponto	A	B	C	Reta	Ponto	A	B	C
	1	0	0	0		20	0	0	0
2	0	0	0	21	0	0	0	0	
3	0	0	0	22	0	0	0	0	
4	0	0	0	23	0	0	0	0	
5	0	0	0	24	0	0	0	0	
6	0	0	0	25	0	0	0	0	
7	0	0	0	26	0	0	0	0	
8	0	0	0	27	0	0	0	0	
9	0	0	0	28	0	0	0	0	
10	0	0	0	29	0	0	148,9	0	
11	0	0	0	30	0	0	0	0	
12	0	0	115,7	31	0	0	0	0	
13	0	0	0	32	0	0	0	0	
14	0	0	0	33	0	131,2	0	0	
15	0	0	0	34	0	0	0	0	
16	0	0	0	35	0	0	0	0	
17	0	0	0	36	0	0	0	0	
18	0	0	0	37	0	0	0	0	
19	0	0	0	38	0	0	0	0	

TABELA A.3 – Ensaio 1: tempos de propagação dos pulsos ultra-sônicos em C1, C2, C3 e C4 no segundo mapeamento.

		TEMPO DE PROPAGAÇÃO (μs)																				
Círculo	Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
C1	A	79,8	83,9	77,2	70,3																	
	B	76,8	94,7	0,0	0,0	0,0	74,4	70,0	0,0													
	C	55,9	63,4	71,9	0,0	126,4	0,0	128,5	111,8	0,0	0,0	129,4	0,0	94,7	0,0	68,1	56,0					
	D	60,6	60,8	67,6	76,2	84,7	77,0	152,7	0,0	0,0	0,0	0,0	68,3	0,0	0,0	118,8	70,2	68,9	54,8	54,4	54,3	
	E	0,0	0,0	0,0	105,3	168,4	88,4	71,1	0,0	82,7	69,3	76,8	91,2	127,7	0,0	82,9	75,2	68,2	114,8	56,4	61,3	
	F	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	54,3	63,2	0,0	139,5	84,7	82,9	82,8	89,1	97,4	93,8	80,6	73,2	66,4	90,2	68,4	
	G	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	57,2	63,5	67,0	0,0	96,1	86,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	84,0	86,8	84,5	
	H	0,0	0,0	0,0	57,5	63,6	62,9	61,0	62,6	94,9	100,0	0,0										
	I	0,0	0,0	0,0	66,5	73,0	71,8	112,1	78,8	113,9												
	J	79,5	0,0	0,0	111,0	82,9	99,4	91,3	134,4													
C2	A	0,0	120,3	102,8	0,																	
	B	87,6	88,7	0,0	0,0	0,0	88,4	0,0	0,0													
	C	70,8	63,4	62,9	62,5	0,0	90,0	72,0	90,0	79,3	84,4	74,8	82,5	0,0	91,3	68,8	64,3					
	D	70,7	63,2	0,0	93,3	0,0																
	E	63,6	0,0	99,1																		
C3	A	0,0	0,0	114,0	143,9																	
	B	107,9	61,3	61,0	61,6	0,0																
	C	0,0	0,0	73,1	81,1	80,8	58,9	55,5	61,2	0,0												
C4	A	78,8	146,6	92,2	91,3																	
	B	115,4	56,4	56,5	67,4	107,5																
	C	0,0	57,5	56,2	56,7	56,0	56,0	56,4	57,8	90,8												

TABELA A.4 – Resultados obtidos pelo transdutor de 500 kHz – Face Anterior.

Face Anterior (Continua)				
Ponto	Tempo (μ s)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-2A	16,5	8,9	10,4	Superfície Irregular
2-3A	16,2	8,7	10,4	Superfície Irregular
3-4A	12,3	6,6	10,4	Superfície Irregular
4-5A	12,2	6,5	10,4	Superfície Irregular
5-6A	33,0	17,7	10,4	Superfície Irregular
6-7A	12,8	6,9	10,4	Superfície Irregular
7-8A	14,1	7,6	10,4	Superfície Irregular
8-9A	20,1	10,8	10,4	Superfície Irregular
9-10A	10,7	5,7	10,4	Superfície Irregular
10-11A	11,8	6,3	10,4	Superfície Irregular
11-12A	5,8	3,1	10,4	Superfície Irregular
12-13A	9,7	5,2	10,4	Rachadura
13-14A	11,1	6,0	10,4	Rachadura
14-15A	11,7	6,3	10,4	Rachadura
15-16A	9,6	5,1	10,4	Rachadura
16-17A	5,8	3,1	10,4	Rachadura
17-18A	12,6	6,8	10,4	Rachadura
18-19A	5,9	3,2	10,4	Rachadura
19-20A	10,7	5,7	10,4	Rachadura
20-21A	13,0	7,0	10,4	Rachadura
21-22A	16,4	8,8	10,4	Rachadura
22-23A	5,8	3,1	10,4	Rachadura
1-2B	12,4	6,7	11,9	---
2-3B	10,4	5,6	11,9	---
3-4B	12,7	6,8	11,9	---
4-5B	16,1	8,6	11,9	---
5-6B	12,9	6,9	11,9	---
6-7B	5,0	2,7	11,9	---
7-8B	16,8	9,0	11,9	---
8-9B	10,3	5,5	11,9	---
9-10B	6,1	3,3	11,9	Superfície Irregular
10-11B	5,5	3,0	11,9	Superfície Irregular
11-12B	10,2	5,5	11,9	---
12-13B	6,0	3,2	11,9	---
13-14B	7,4	4,0	11,9	---
14-15B	10,7	5,7	11,9	---
15-16B	9,6	5,1	11,9	---
16-17B	9,3	5,0	11,9	---
17-18B	9,7	5,2	11,9	---
18-19B	10,2	5,5	11,9	---
19-20B	9,7	5,2	11,9	---
20-21B	6,3	3,4	11,9	---
21-22B	5,0	2,7	11,9	---
22-23B	7,6	4,1	11,9	---

Face Anterior (Continua)				
Ponto	Tempo (μs)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-2C	13,0	7,0	12,8	---
2-3C	11,0	5,9	12,8	---
3-4C	11,4	6,1	12,8	---
4-5C	10,2	5,5	12,8	---
5-6C	10,2	5,5	12,8	---
6-7C	10,8	5,8	12,8	---
7-8C	9,3	5,0	12,8	---
8-9C	9,9	5,3	12,8	---
9-10C	9,0	4,8	12,8	---
10-11C	9,5	5,1	12,8	---
11-12C	5,6	3,0	12,8	---
12-13C	8,9	4,8	12,8	---
13-14C	8,3	4,5	12,8	---
14-15C	9,6	5,1	12,8	---
15-16C	7,4	4,0	12,8	---
16-17C	9,9	5,3	12,8	---
17-18C	6,9	3,7	12,8	---
18-19C	6,5	3,5	12,8	---
19-20C	6,3	3,4	12,8	---
20-21C	6,1	3,3	12,8	---
21-22C	4,0	2,1	12,8	---
22-23C	5,1	2,7	12,8	---
1-2D	10,0	5,4	10,8	---
2-3D	9,9	5,3	10,8	---
3-4D	10,9	5,8	10,8	---
4-5D	9,3	5,0	10,8	---
5-6D	10,4	5,6	10,8	---
6-7D	7,6	4,1	10,8	---
7-8D	7,4	4,0	10,8	---
8-9D	11,3	6,1	10,8	---
9-10D	11,0	5,9	10,8	---
10-11D	8,9	4,8	10,8	---
11-12D	6,1	3,3	10,8	---
12-13D	5,6	3,0	10,8	---
13-14D	5,8	3,1	10,8	---
14-15D	6,1	3,3	10,8	---
15-16D	5,9	3,2	10,8	---
16-17D	5,3	2,8	10,8	---
17-18D	5,4	2,9	10,8	---
18-19D	6,4	3,4	10,8	---
19-20D	6,6	3,5	10,8	---
20-21D	5,9	3,2	10,8	---
21-22D	6,0	3,2	10,8	---
22-23D	5,4	2,9	10,8	---

Face Anterior (Conclusão)				
Ponto	Tempo (μs)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-2E	10,6	5,7	9,7	---
2-3E	18,0	9,7	9,7	---
3-4E	17,5	9,4	9,7	---
4-5E	17,3	9,3	9,7	---
5-6E	16,3	8,7	9,7	---
6-7E	29,6	15,9	9,7	---
7-8E	11,9	6,4	9,7	---
8-9E	11,1	6,0	9,7	---
9-10E	11,6	6,2	9,7	---
10-11E	10,6	5,7	9,7	---
11-12E	10,6	5,7	9,7	---
12-13E	10,5	5,6	9,7	---
13-14E	11,2	6,0	9,7	---
14-15E	10,1	5,4	9,7	---
15-16E	9,3	5,0	9,7	---
16-17E	17,5	9,4	9,7	---
17-18E	17,6	9,4	9,7	---
18-19E	5,5	3,0	9,7	---
19-20E	5,8	3,1	9,7	---
20-21E	5,5	3,0	9,7	---
21-22E	7,3	3,9	9,7	---
22-23E	7,1	3,8	9,7	---

TABELA A.5 – Resultados obtidos pelo transdutor de 500 kHz – Face Superior.

Face Superior (Continua)				
Ponto	Tempo (μ s)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-2A	17,7	9,5	15,0	---
2-3A	15,4	8,3	15,0	---
3-4A	11,3	6,1	15,0	Superfície Irregular
4-5A	10,9	5,8	15,0	Superfície Irregular
5-6A	21,2	11,4	15,0	---
6-7A	21,7	11,6	15,0	---
7-8A	10,9	5,8	15,0	Superfície Irregular
8-9A	11,0	5,9	15,0	Superfície Irregular
9-10A	24,4	13,1	15,0	---
10-11A	11,5	6,2	15,0	Superfície Irregular
11-12A	11,2	6,0	15,0	Superfície Irregular
12-13A	21,8	11,7	15,0	---
13-14A	25,6	13,7	15,0	---
14-15A	24,3	13,0	15,0	---
15-16A	16,0	8,6	15,0	Superfície Irregular
16-17A	25,4	13,6	15,0	Superfície Irregular
17-18A	17,9	9,6	15,0	Superfície Irregular
18-19A	23,9	12,8	15,0	Superfície Irregular
19-20A	16,8	9,0	15,0	Superfície Irregular
20-21A	27,2	14,6	15,0	Superfície Irregular
21-22A	18,2	9,8	15,0	Superfície Irregular
22-23A	11,9	6,4	15,0	Superfície Irregular
1-2B	10,8	5,8	15,0	---
2-3B	11,0	5,9	15,0	---
3-4B	15,5	8,3	15,0	---
4-5B	11,5	6,2	15,0	---
5-6B	15,2	8,2	15,0	---
6-7B	15,4	8,3	15,0	---
7-8B	14,9	8,0	15,0	---
8-9B	15,1	8,1	15,0	---
9-10B	15,9	8,5	15,0	---
10-11B	16,8	9,0	15,0	---
11-12B	16,2	8,7	15,0	---
12-13B	16,2	8,7	15,0	---
13-14B	12,4	6,7	15,0	Superfície Irregular
14-15B	15,9	8,5	15,0	---
15-16B	22,6	12,1	15,0	---
16-17B	21,8	11,7	15,0	---
17-18B	25,1	13,5	15,0	---
18-19B	25,5	13,7	15,0	---
19-20B	22,3	12,0	15,0	---
20-21B	24,7	13,2	15,0	---
21-22B	25,5	13,7	15,0	---
22-23B	16,5	8,9	15,0	---

Face Superior (Conclusão)				
Ponto	Tempo (μs)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-2C	6,1	3,3	15,0	---
2-3C	9,3	5,0	15,0	---
3-4C	10,3	5,5	15,0	---
4-5C	11,0	5,9	15,0	---
5-6C	9,6	5,1	15,0	---
6-7C	10,6	5,7	15,0	---
7-8C	13,0	7,0	15,0	---
8-9C	16,9	9,1	15,0	---
9-10C	16,0	8,6	15,0	---
10-11C	18,2	9,8	15,0	Superfície Irregular
11-12C	16,8	9,0	15,0	---
12-13C	17,0	9,1	15,0	---
13-14C	14,5	7,8	15,0	---
14-15C	15,4	8,3	15,0	---
15-16C	13,5	7,2	15,0	---
16-17C	18,3	9,8	15,0	---
17-18C	17,7	9,5	15,0	---
18-19C	15,8	8,5	15,0	---
19-20C	18,1	9,7	15,0	---
20-21C	18,5	9,9	15,0	---
21-22C	16,7	9,0	15,0	---
22-23C	15,9	8,5	15,0	---

TABELA A.6 – Resultados obtidos pelo transdutor de 500 kHz – Face Posterior.

Face Posterior (Continua)				
Ponto	Tempo (μ s)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-2A	10,7	5,7	10,4	---
2-3A	10,4	5,6	10,4	---
3-4A	10,8	5,8	10,4	---
4-5A	10,4	5,6	10,4	---
5-6A	10,1	5,4	10,4	---
6-7A	11,2	6,0	10,4	---
7-8A	12,1	6,5	10,4	---
8-9A	13,5	7,2	10,4	---
9-10A	13,9	7,5	10,4	---
10-11A	14,7	7,9	10,4	---
11-12A	14,8	7,9	10,4	---
12-13A	15,1	8,1	10,4	---
13-14A	16,9	9,1	10,4	---
14-15A	17,1	9,2	10,4	---
15-16A	16,6	8,9	10,4	---
16-17A	16,6	8,9	10,4	---
17-18A	17,0	9,1	10,4	---
18-19A	17,5	9,4	10,4	---
19-20A	16,4	8,8	10,4	---
20-21A	16,8	9,0	10,4	---
21-22A	16,5	8,9	10,4	---
22-23A	16,9	9,1	10,4	---
1-2B	10,1	5,4	11,9	---
2-3B	10,8	5,8	11,9	---
3-4B	11,5	6,2	11,9	---
4-5B	14,8	7,9	11,9	---
5-6B	15,3	8,2	11,9	---
6-7B	15,6	8,4	11,9	---
7-8B	16,7	9,0	11,9	---
8-9B	15,5	8,3	11,9	---
9-10B	12,0	6,4	11,9	---
10-11B	11,4	6,1	11,9	---
11-12B	12,1	6,5	11,9	---
12-13B	13,0	7,0	11,9	---
13-14B	12,4	6,7	11,9	---
14-15B	13,1	7,0	11,9	---
15-16B	16,1	8,6	11,9	---
16-17B	13,9	7,5	11,9	---
17-18B	14,0	7,5	11,9	---
18-19B	14,5	7,8	11,9	---
19-20B	14,9	8,0	11,9	---
20-21B	15,5	8,3	11,9	---
21-22B	15,9	8,5	11,9	---
22-23B	15,7	8,4	11,9	---

Face Posterior (Continua)				
Ponto	Tempo (μs)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-2C	10,0	5,4	12,8	---
2-3C	10,2	5,5	12,8	---
3-4C	10,9	5,8	12,8	---
4-5C	13,1	7,0	12,8	---
5-6C	11,2	6,0	12,8	---
6-7C	12,8	6,9	12,8	---
7-8C	13,9	7,5	12,8	---
8-9C	14,8	7,9	12,8	---
9-10C	34,2	18,3	12,8	---
10-11C	11,8	6,3	12,8	---
11-12C	11,0	5,9	12,8	---
12-13C	10,0	5,4	12,8	---
13-14C	10,9	5,8	12,8	---
14-15C	11,0	5,9	12,8	---
15-16C	10,9	5,8	12,8	---
16-17C	10,7	5,7	12,8	---
17-18C	11,3	6,1	12,8	---
18-19C	12,4	6,7	12,8	---
19-20C	13,0	7,0	12,8	---
20-21C	12,3	6,6	12,8	---
21-22C	13,4	7,2	12,8	---
22-23C	13,3	7,1	12,8	---
1-2D	11,4	6,1	10,8	Superfície Irregular
2-3D	12,0	6,4	10,8	Superfície Irregular
3-4D	7,5	4,0	10,8	---
4-5D	8,5	4,6	10,8	---
5-6D	8,8	4,7	10,8	---
6-7D	10,1	5,4	10,8	---
7-8D	10,4	5,6	10,8	---
8-9D	18,1	9,7	10,8	Superfície Irregular
9-10D	10,7	5,7	10,8	---
10-11D	10,6	5,7	10,8	---
11-12D	11,1	6,0	10,8	---
12-13D	10,3	5,5	10,8	---
13-14D	11,4	6,1	10,8	---
14-15D	10,5	5,6	10,8	---
15-16D	12,1	6,5	10,8	---
16-17D	19,7	10,6	10,8	Superfície Irregular
17-18D	15,9	8,5	10,8	Superfície Irregular
18-19D	10,4	5,6	10,8	Superfície Irregular
19-20D	11,2	6,0	10,8	---
20-21D	10,4	5,6	10,8	---
21-22D	13,9	7,5	10,8	---
22-23D	13,0	7,0	10,8	---

Face Posterior (Conclusão)				
Ponto	Tempo (μs)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-2E	16,1	8,6	9,7	---
2-3E	16,9	9,1	9,7	---
3-4E	15,0	8,0	9,7	---
4-5E	15,6	8,4	9,7	---
5-6E	15,2	8,2	9,7	---
6-7E	15,1	8,1	9,7	---
7-8E	14,5	7,8	9,7	---
8-9E	16,9	9,1	9,7	---
9-10E	17,0	9,1	9,7	---
10-11E	15,1	8,1	9,7	---
11-12E	16,7	9,0	9,7	---
12-13E	15,6	8,4	9,7	---
13-14E	16,9	9,1	9,7	---
14-15E	16,5	8,9	9,7	---
15-16E	16,4	8,8	9,7	---
16-17E	16,4	8,8	9,7	---
17-18E	16,5	8,9	9,7	---
18-19E	16,8	9,0	9,7	---
19-20E	16,7	9,0	9,7	---
20-21E	10,8	5,8	9,7	---
21-22E	10,4	5,6	9,7	---
22-23E	16,1	8,6	9,7	---

TABELA A.7 – Resultados obtidos pelo transdutor de 500 kHz – Face Inferior.

Face Inferior (Continua)				
Ponto	Tempo (μs)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-2A	9,5	5,1	15,0	---
2-3A	8,0	4,3	15,0	---
3-4A	7,4	4,0	15,0	---
4-5A	22,2	11,9	15,0	---
5-6A	21,5	11,5	15,0	---
6-7A	22,7	12,2	15,0	---
7-8A	21,3	11,4	15,0	---
8-9A	21,6	11,6	15,0	---
9-10A	22,0	11,8	15,0	---
10-11A	22,3	12,0	15,0	---
11-12A	22,8	12,2	15,0	---
12-13A	21,8	11,7	15,0	---
13-14A	23,0	12,3	15,0	---
14-15A	22,1	11,9	15,0	---
15-16A	21,6	11,6	15,0	---
16-17A	21,3	11,4	15,0	---
17-18A	22,5	12,1	15,0	---
18-19A	25,5	13,7	15,0	---
19-20A	26,3	14,1	15,0	---
20-21A	21,7	11,6	15,0	---
21-22A	25,7	13,8	15,0	---
22-23A	22,3	12,0	15,0	---
1-2B	12,0	6,4	15,0	---
2-3B	14,0	7,5	15,0	---
3-4B	11,3	6,1	15,0	---
4-5B	10,5	5,6	15,0	---
5-6B	11,9	6,4	15,0	---
6-7B	11,0	5,9	15,0	---
7-8B	10,6	5,7	15,0	---
8-9B	11,1	6,0	15,0	---
9-10B	11,2	6,0	15,0	---
10-11B	10,9	5,8	15,0	---
11-12B	11,4	6,1	15,0	---
12-13B	9,4	5,0	15,0	---
13-14B	10,5	5,6	15,0	---
14-15B	11,3	6,1	15,0	---
15-16B	24,7	13,2	15,0	---
16-17B	21,8	11,7	15,0	---
17-18B	20,5	11,0	15,0	---
18-19B	24,4	13,1	15,0	---
19-20B	21,2	11,4	15,0	---
20-21B	20,5	11,0	15,0	---
21-22B	21,2	11,4	15,0	---
22-23B	21,5	11,5	15,0	---

Face Inferior (Conclusão)				
Ponto	Tempo (μs)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-2C	23,9	12,8	15,0	---
2-3C	15,9	8,5	15,0	---
3-4C	15,6	8,4	15,0	---
4-5C	17,4	9,3	15,0	---
5-6C	11,2	6,0	15,0	Presença de Cravo
6-7C	12,1	6,5	15,0	---
7-8C	15,4	8,3	15,0	---
8-9C	13,1	7,0	15,0	---
9-10C	12,1	6,5	15,0	---
10-11C	15,0	8,0	15,0	---
11-12C	13,2	7,1	15,0	---
12-13C	11,1	6,0	15,0	---
13-14C	11,7	6,3	15,0	---
14-15C	11,7	6,3	15,0	---
15-16C	11,0	5,9	15,0	---
16-17C	10,7	5,7	15,0	---
17-18C	10,4	5,6	15,0	---
18-19C	10,3	5,5	15,0	---
19-20C	12,3	6,6	15,0	---
20-21C	12,0	6,4	15,0	---
21-22C	10,2	5,5	15,0	Presença de Cravo
22-23C	8,6	4,6	15,0	---

TABELA A.8 – Resultados obtidos pelo transdutor de 150 kHz – Face Anterior.

Face Anterior (Continua)				
Ponto	Tempo (μ s)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-3A	10,3	4,1	10,1	---
2-4A	17,1	6,7	10,1	---
3-5A	11,6	4,6	10,1	---
4-6A	10,7	4,2	10,1	---
5-7A	10,6	4,2	10,1	---
6-8A	17,1	6,7	10,1	---
7-9A	17,9	7,0	10,1	---
8-10A	18,2	7,2	10,1	---
9-11A	17,6	6,9	10,1	---
10-12A	10,6	4,2	10,1	Superfície Irregular
11-13A	17,8	7,0	10,1	Superfície Irregular
12-14A	18,3	7,2	10,1	Superfície Irregular
13-15A	10,0	3,9	10,1	Superfície Irregular
14-16A	18,2	7,2	10,1	Rachadura na face
15-17A	17,7	7,0	10,1	Rachadura na face
16-18A	16,0	6,3	10,1	Rachadura na face
1-3B	10,2	4,0	11,6	---
2-4B	11,0	4,3	11,6	---
3-5B	10,8	4,3	11,6	---
4-6B	10,0	3,9	11,6	---
5-7B	9,9	3,9	11,6	---
6-8B	10,3	4,1	11,6	---
7-9B	10,1	4,0	11,6	---
8-10B	10,3	4,1	11,6	---
9-11B	11,0	4,3	11,6	---
10-12B	12,7	5,0	11,6	---
11-13B	10,1	4,0	11,6	---
12-14B	10,2	4,0	11,6	---
13-15B	9,7	3,8	11,6	---
14-16B	9,6	3,8	11,6	---
15-17B	11,1	4,4	11,6	---
16-18B	10,2	4,0	11,6	---
1-3C	28,4	11,2	12,2	Rachadura na face
2-4C	33,0	13,0	12,2	Rachadura na face
3-5C	11,4	4,5	12,2	---
4-6C	10,8	4,3	12,2	---
5-7C	10,2	4,0	12,2	---
6-8C	10,3	4,1	12,2	---
7-9C	9,4	3,7	12,2	---
8-10C	9,6	3,8	12,2	---
9-11C	11,0	4,3	12,2	---
10-12C	10,2	4,0	12,2	---
11-13C	11,5	4,5	12,2	---
12-14C	10,5	4,1	12,2	---
13-15C	9,8	3,9	12,2	---
14-16C	10,1	4,0	12,2	---
15-17C	8,3	3,3	12,2	---
16-18C	9,0	3,5	12,2	---

Face Anterior (Conclusão)				
Ponto	Tempo (μs)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
2-4D	10,5	4,1	10,2	---
3-5D	9,9	3,9	10,2	---
4-6D	9,0	3,5	10,2	---
5-7D	10,8	4,3	10,2	---
6-8D	9,0	3,5	10,2	---
7-9D	11,4	4,5	10,2	---
8-10D	7,6	3,0	10,2	---
9-11D	7,6	3,0	10,2	---
10-12D	7,8	3,1	10,2	---
11-13D	8,9	3,5	10,2	---
12-14D	8,8	3,5	10,2	---
13-15D	9,9	3,9	10,2	---
14-16D	11,4	4,5	10,2	---
15-17D	9,9	3,9	10,2	---
16-18D	10,4	4,1	10,2	---
1-3E	10,4	4,1	9,3	---
2-4E	8,4	3,3	9,3	---
3-5E	8,7	3,4	9,3	---
4-6E	8,3	3,3	9,3	---
5-7E	9,5	3,7	9,3	---
6-8E	10,5	4,1	9,3	---
7-9E	10,5	4,1	9,3	---
8-10E	10,4	4,1	9,3	---
9-11E	10,2	4,0	9,3	---
10-12E	10,5	4,1	9,3	---
11-13E	9,9	3,9	9,3	---
12-14E	10,3	4,1	9,3	---
13-15E	12,7	5,0	9,3	---
14-16E	15,2	6,0	9,3	---
15-17E	15,0	5,9	9,3	---
16-18E	12,7	5,0	9,3	---

TABELA A.9 – Resultados obtidos pelo transdutor de 150 kHz – Face Superior.

Face Superior				
Ponto	Tempo (μ s)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-3A	12,5	4,9	14,1	---
2-4A	11,8	4,6	14,1	---
3-5A	11,5	4,5	14,1	---
4-6A	10,8	4,3	14,1	Presença de Cravo
5-7A	10,5	4,1	14,1	Presença de Cravo
6-8A	10,1	4,0	14,1	---
7-9A	10,3	4,1	14,1	---
8-10A	10,3	4,1	14,1	---
9-11A	10,6	4,2	14,1	---
10-12A	11,1	4,4	14,1	---
11-13A	11,5	4,5	14,1	---
12-14A	11,5	4,5	14,1	---
13-15A	11,1	4,4	14,1	---
14-16A	9,9	3,9	14,1	---
15-17A	9,7	3,8	14,1	---
16-18A	9,6	3,8	14,1	---
1-3B	18,4	7,2	14,1	---
2-4B	18,1	7,1	14,1	---
3-5B	12,2	4,8	14,1	---
4-6B	11,6	4,6	14,1	---
5-7B	10,7	4,2	14,1	---
6-8B	10,8	4,3	14,1	---
7-9B	9,7	3,8	14,1	---
8-10B	9,3	3,7	14,1	---
9-11B	9,8	3,9	14,1	---
10-12B	12,2	4,8	14,1	---
11-13B	10,9	4,3	14,1	---
12-14B	11,3	4,4	14,1	---
13-15B	8,9	3,5	14,1	---
14-16B	9,8	3,9	14,1	---
15-17B	9,6	3,8	14,1	---
16-18B	8,6	3,4	14,1	---
1-3C	9,8	3,9	14,1	---
2-4C	10,6	4,2	14,1	---
3-5C	9,9	3,9	14,1	---
4-6C	9,8	3,9	14,1	---
5-7C	9,8	3,9	14,1	---
6-8C	10,0	3,9	14,1	---
7-9C	10,4	4,1	14,1	---
8-10C	9,4	3,7	14,1	---
9-11C	8,6	3,4	14,1	---
10-12C	10,7	4,2	14,1	---
11-13C	10,5	4,1	14,1	---
12-14C	10,6	4,2	14,1	---
13-15C	10,4	4,1	14,1	---
14-16C	11,1	4,4	14,1	---
15-17C	9,5	3,7	14,1	---
16-18C	8,9	3,5	14,1	---

TABELA A.10 – Resultados obtidos pelo transdutor de 150 kHz – Face Posterior.

Face Posterior (Continua)				
Ponto	Tempo (μ s)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-3A	11,3	4,4	10,1	---
2-4A	11,1	4,4	10,1	---
3-5A	10,6	4,2	10,1	---
4-6A	10,5	4,1	10,1	---
5-7A	11,8	4,6	10,1	---
6-8A	10,9	4,3	10,1	---
7-9A	10,9	4,3	10,1	---
8-10A	11,7	4,6	10,1	---
9-11A	12,1	4,8	10,1	---
10-12A	12,0	4,7	10,1	---
11-13A	10,6	4,2	10,1	---
12-14A	11,5	4,5	10,1	---
13-15A	10,4	4,1	10,1	---
14-16A	10,0	3,9	10,1	---
15-17A	10,6	4,2	10,1	---
16-18A	11,0	4,3	10,1	Rachadura na face
1-3B	18,6	7,3	11,6	---
2-4B	17,5	6,9	11,6	---
3-5B	18,7	7,4	11,6	---
4-6B	17,7	7,0	11,6	---
5-7B	18,6	7,3	11,6	---
6-8B	18,9	7,4	11,6	---
7-9B	18,6	7,3	11,6	---
8-10B	17,7	7,0	11,6	---
9-11B	12,3	4,8	11,6	---
10-12B	17,5	6,9	11,6	---
11-13B	17,6	6,9	11,6	---
12-14B	19,1	7,5	11,6	---
13-15B	17,7	7,0	11,6	---
14-16B	17,6	6,9	11,6	---
15-17B	17,8	7,0	11,6	---
16-18B	18,0	7,1	11,6	---
1-3C	10,2	4,0	12,2	---
2-4C	14,0	5,5	12,2	---
3-5C	15,0	5,9	12,2	---
4-6C	14,9	5,9	12,2	---
5-7C	14,5	5,7	12,2	---
6-8C	14,5	5,7	12,2	---
7-9C	14,4	5,7	12,2	---
8-10C	14,0	5,5	12,2	---
9-11C	16,1	6,3	12,2	---
10-12C	18,5	7,3	12,2	---
11-13C	15,1	5,9	12,2	---
12-14C	18,3	7,2	12,2	---
13-15C	18,5	7,3	12,2	---
14-16C	12,2	4,8	12,2	---
15-17C	15,1	5,9	12,2	---
16-18C	14,8	5,8	12,2	---

Face Posterior (Conclusão)				
Ponto	Tempo (μs)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-3D	8,9	3,5	10,2	---
2-4D	15,2	6,0	10,2	---
3-5D	15,4	6,1	10,2	---
4-6D	9,9	3,9	10,2	---
5-7D	10,9	4,3	10,2	---
6-8D	10,6	4,2	10,2	---
7-9D	16,2	6,4	10,2	---
8-10D	17,5	6,9	10,2	---
9-11D	17,6	6,9	10,2	---
10-12D	16,5	6,5	10,2	---
11-13D	23,1	9,1	10,2	Superfície Irregular
12-14D	12,0	4,7	10,2	---
13-15D	10,0	3,9	10,2	---
14-16D	10,9	4,3	10,2	---
15-17D	11,2	4,4	10,2	---
16-18D	10,6	4,2	10,2	---
1-3E	10,9	4,3	9,3	---
2-4E	10,9	4,3	9,3	---
3-5E	15,2	6,0	9,3	---
4-6E	7,6	3,0	9,3	---
5-7E	10,0	3,9	9,3	---
6-8E	8,9	3,5	9,3	---
7-9E	9,5	3,7	9,3	---
8-10E	8,2	3,2	9,3	---
9-11E	8,6	3,4	9,3	---
10-12E	10,0	3,9	9,3	---
11-13E	11,0	4,3	9,3	---
12-14E	9,6	3,8	9,3	---
13-15E	10,5	4,1	9,3	---
14-16E	11,0	4,3	9,3	---
15-17E	10,5	4,1	9,3	---
16-18E	10,1	4,0	9,3	---

TABELA A.11 – Resultados obtidos pelo transdutor de 150 kHz – Face Inferior.

Face Inferior				
Ponto	Tempo (μ s)	Distância (cm)	Largura total (cm)	Observações
1-3A	16,3	6,4	14,1	Superfície Irregular
2-4A	17,7	7,0	14,1	Superfície Irregular
3-5A	33,8	13,3	14,1	Superfície Irregular
4-6A	16,4	6,5	14,1	Superfície Irregular
5-7A	11,5	4,5	14,1	Superfície Irregular
6-8A	8,5	3,3	14,1	Superfície Irregular
7-9A	8,1	3,2	14,1	Superfície Irregular
8-10A	9,5	3,7	14,1	---
9-11A	8,6	3,4	14,1	---
10-12A	8,6	3,4	14,1	---
11-13A	8,9	3,5	14,1	---
12-14A	8,7	3,4	14,1	---
13-15A	7,9	3,1	14,1	---
14-16A	10,9	4,3	14,1	---
15-17A	10,6	4,2	14,1	---
16-18A	10,3	4,1	14,1	---
1-3B	8,8	3,5	14,1	---
2-4B	10,1	4,0	14,1	---
3-5B	10,7	4,2	14,1	---
4-6B	10,1	4,0	14,1	---
5-7B	9,6	3,8	14,1	---
6-8B	9,7	3,8	14,1	---
7-9B	17,5	6,9	14,1	---
8-10B	10,1	4,0	14,1	Rachadura na face
9-11B	8,9	3,5	14,1	Rachadura na face
10-12B	9,7	3,8	14,1	---
11-13B	10,2	4,0	14,1	---
12-14B	8,9	3,5	14,1	---
13-15B	9,3	3,7	14,1	---
14-16B	9,9	3,9	14,1	---
15-17B	11,1	4,4	14,1	---
16-18B	10,6	4,2	14,1	---
1-3C	8,0	3,1	14,1	---
2-4C	9,8	3,9	14,1	---
3-5C	8,8	3,5	14,1	---
4-6C	8,7	3,4	14,1	---
5-7C	9,0	3,5	14,1	---
6-8C	11,0	4,3	14,1	---
7-9C	9,9	3,9	14,1	---
8-10C	9,2	3,6	14,1	---
9-11C	9,7	3,8	14,1	---
10-12C	9,5	3,7	14,1	---
11-13C	9,7	3,8	14,1	---
12-14C	8,0	3,1	14,1	---
13-15C	8,4	3,3	14,1	---
14-16C	10,0	3,9	14,1	Rachadura na face
15-17C	9,9	3,9	14,1	Rachadura na face
16-18C	10,3	4,1	14,1	Rachadura na face

ANEXO B

APRESENTAÇÃO DAS FIGURAS DOS ENSAIOS

Os resultados experimentais obtidos no Ensaio 3 foram sobrepostos nas fotografias de cada fatia correspondente, buscando uma correlação com a condição real interna das peças. As FIGs B.1-B.22 e B.23-B.38 representam os ensaios realizados com os transdutores de frequência de 500 kHz e 150 kHz, respectivamente.

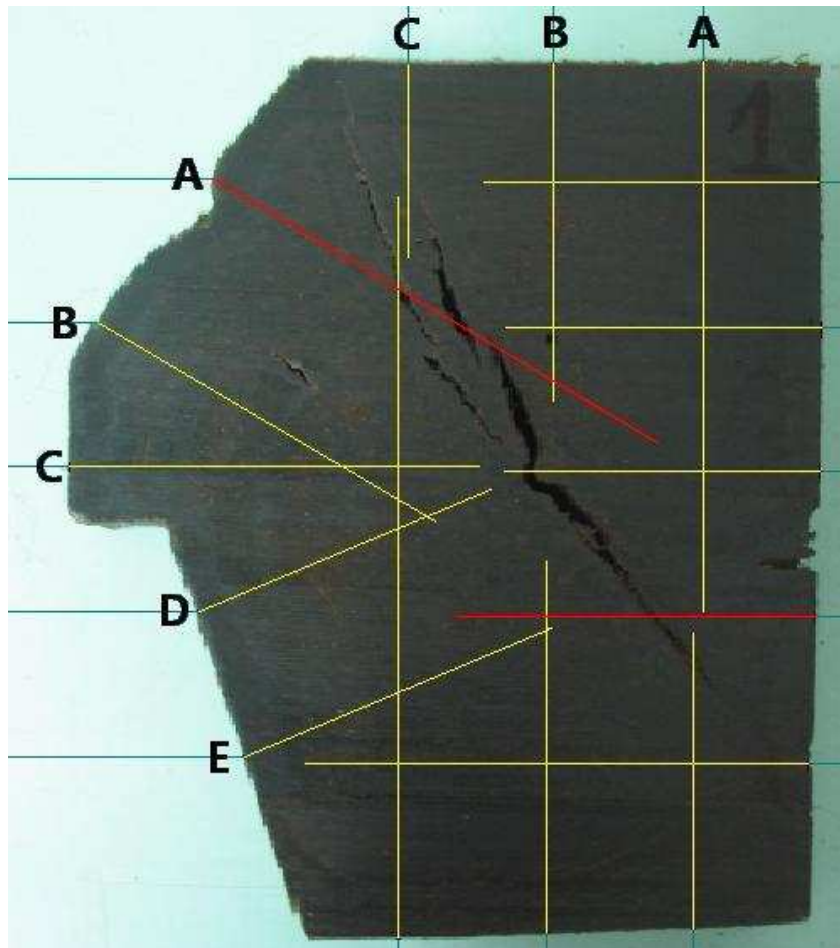


FIGURA B.1 – Resultados obtidos para a fatia 1, referente à posição 1-2 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

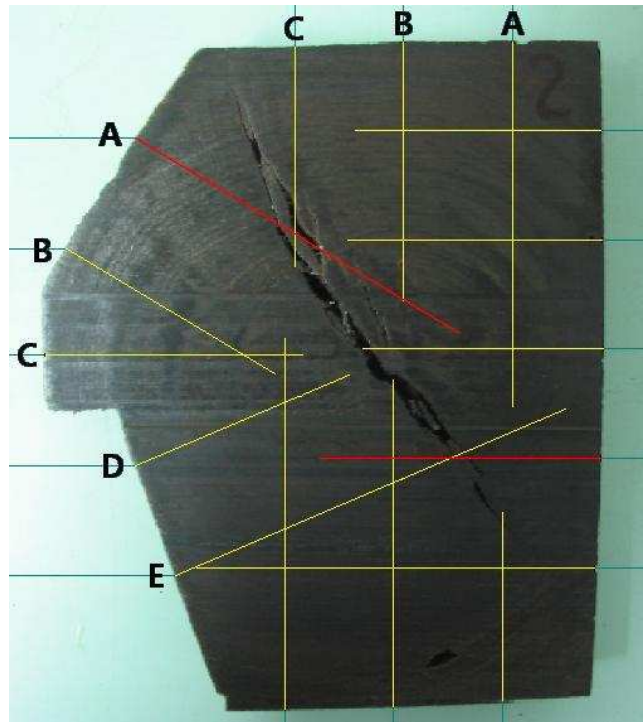


FIGURA B.2 – Resultados obtidos para a fatia 2, referente à posição 2-3 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

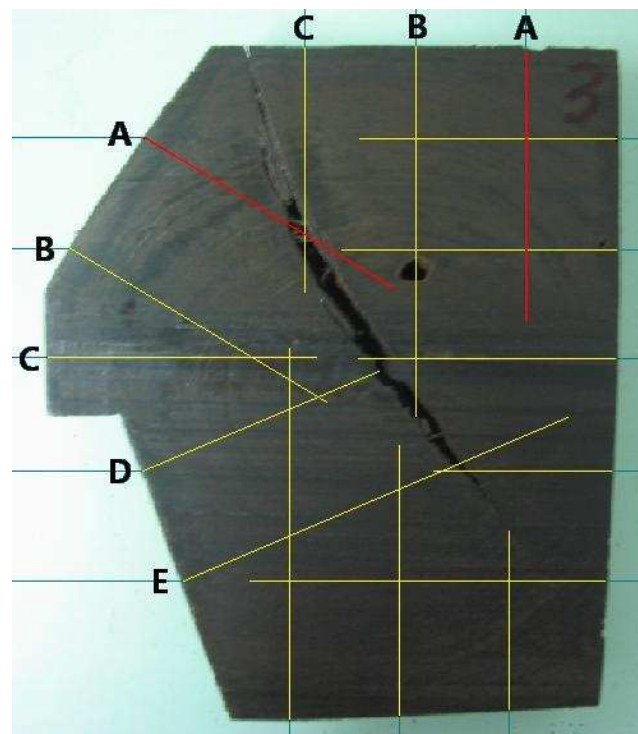


FIGURA B.3 – Resultados obtidos para a fatia 3, referente à posição 3-4 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

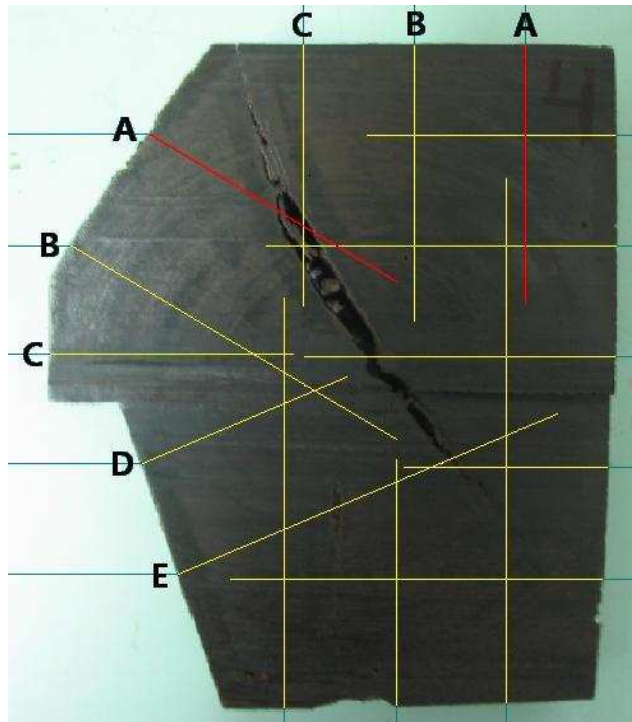


FIGURA B.4 – Resultados obtidos para a fatia 4, referente à posição 4-5 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

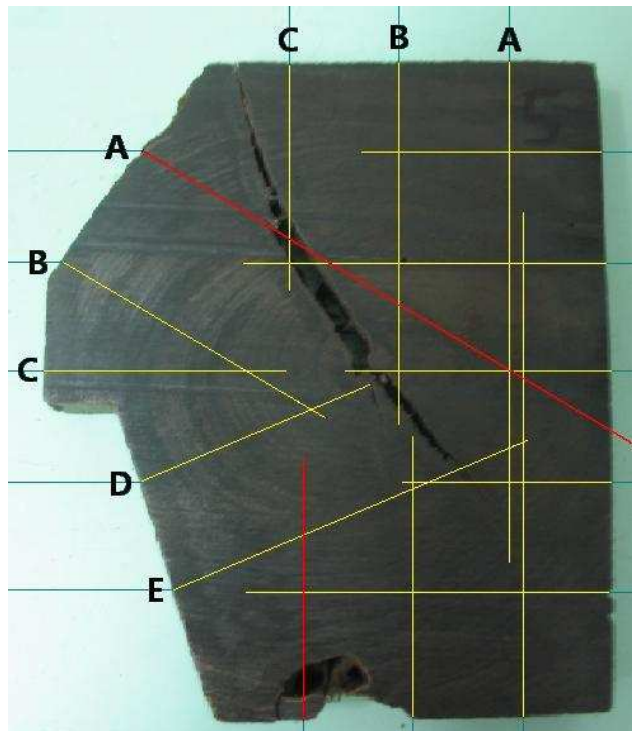


FIGURA B.5 – Resultados obtidos para a fatia 5, referente à posição 5-6 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

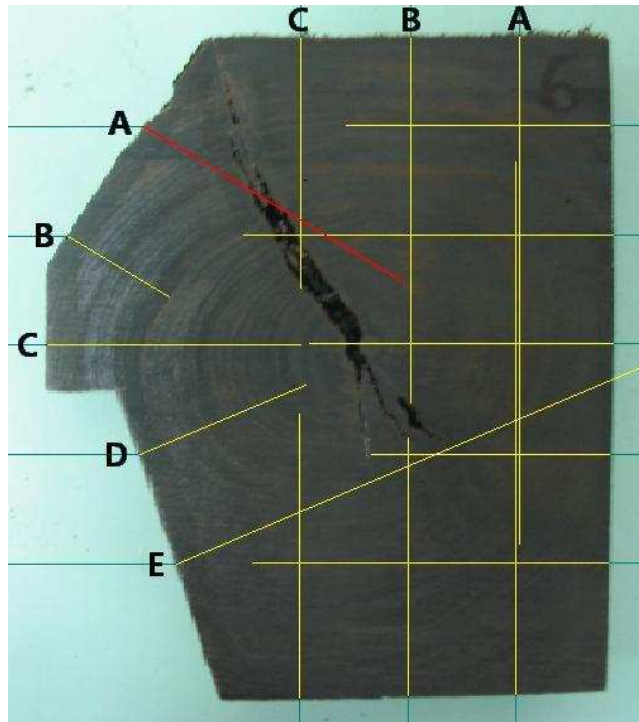


FIGURA B.6 – Resultados obtidos para a fatia 6, referente à posição 6-7 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

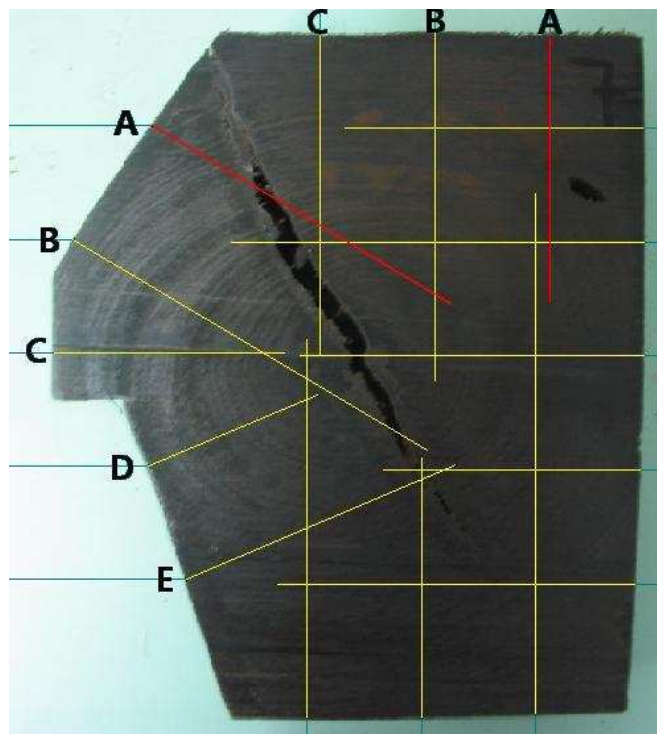


FIGURA B.7 – Resultados obtidos para a fatia 7, referente à posição 7-8 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

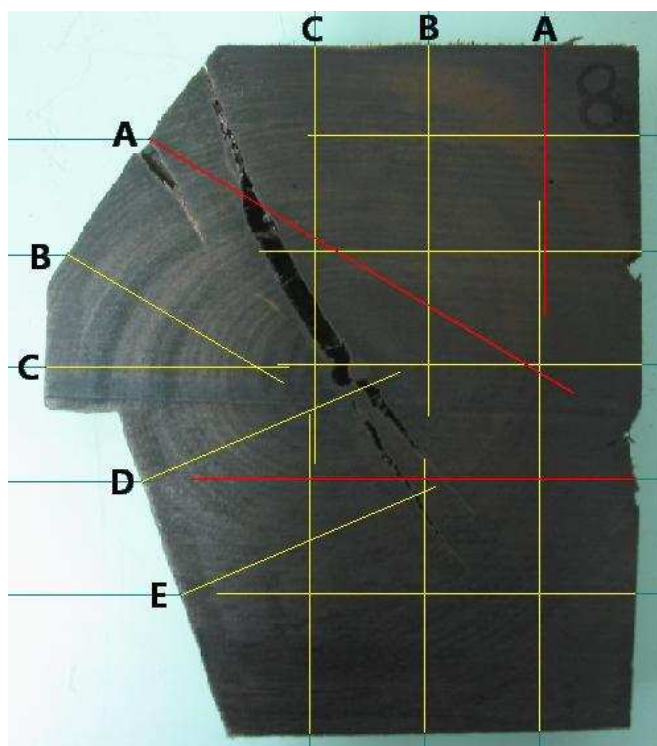


FIGURA B.8 – Resultados obtidos para a fatia 8, referente à posição 8-9 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

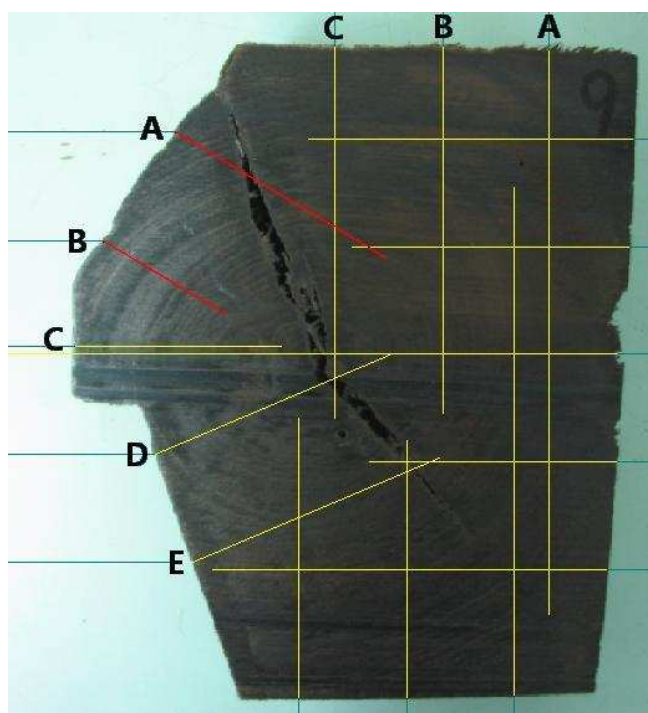


FIGURA B.9 – Resultados obtidos para a fatia 9, referente à posição 9-10 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

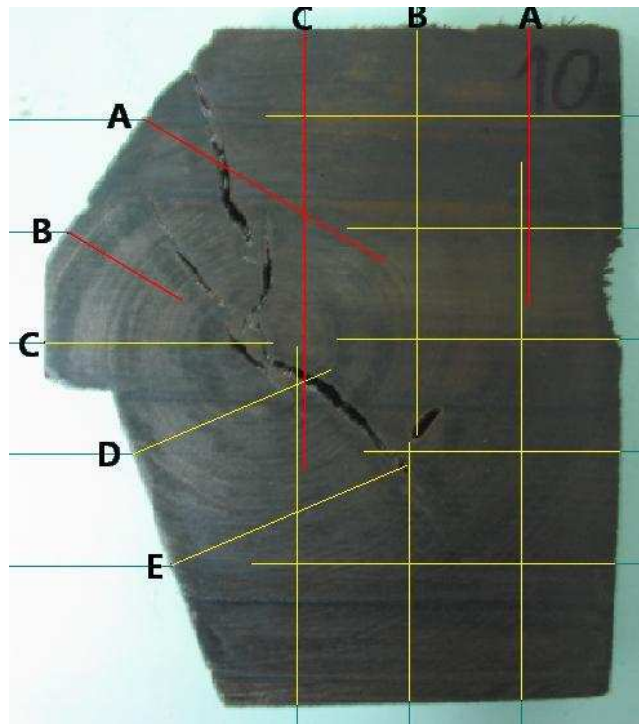


FIGURA B.10 – Resultados obtidos para a fatia 10, referente à posição 10-11 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

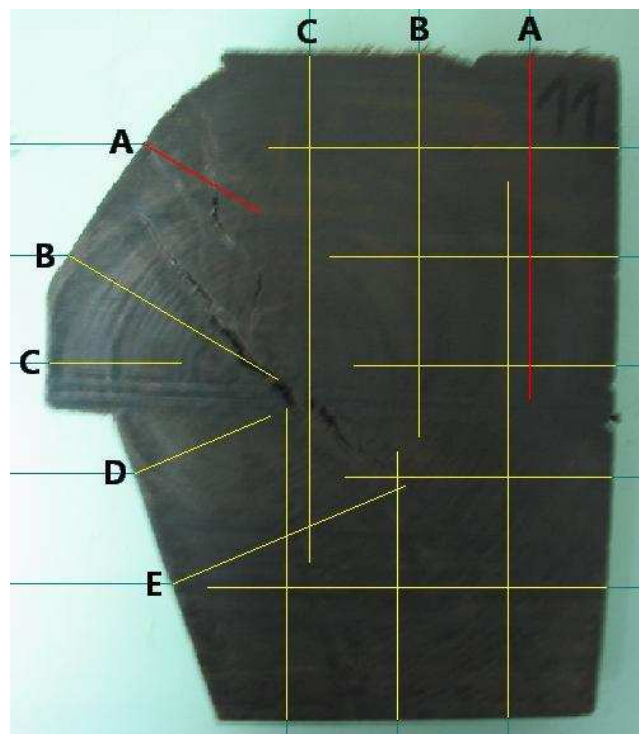


FIGURA B.11 – Resultados obtidos para a fatia 11, referente à posição 11-12 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

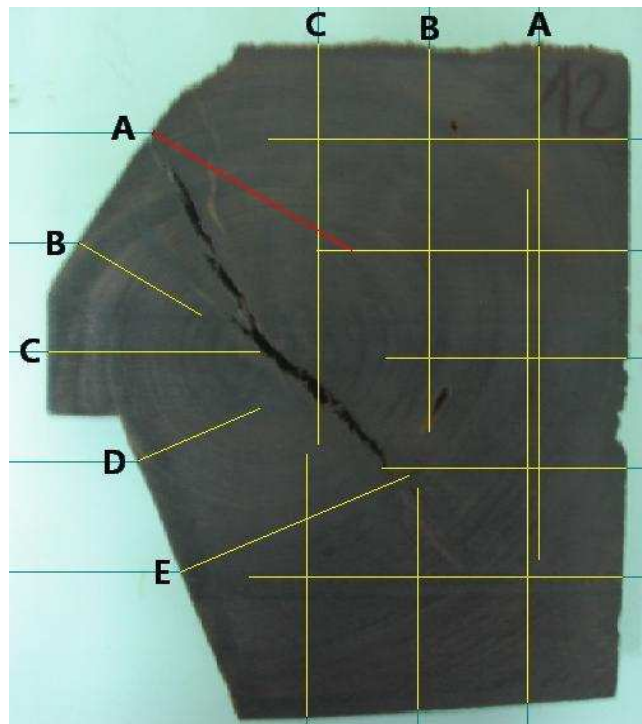


FIGURA B.12 – Resultados obtidos para a fatia 12, referente à posição 12-13 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

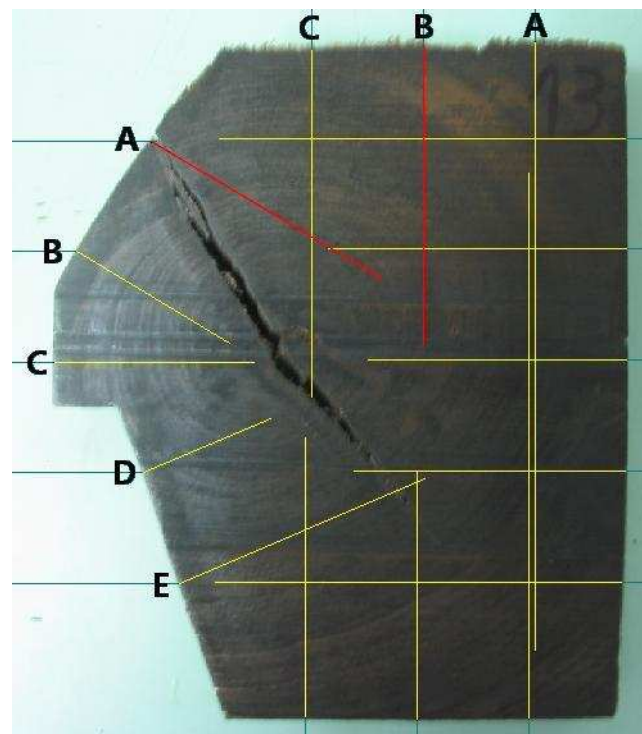


FIGURA B.13 – Resultados obtidos para a fatia 13, referente à posição 13-14 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

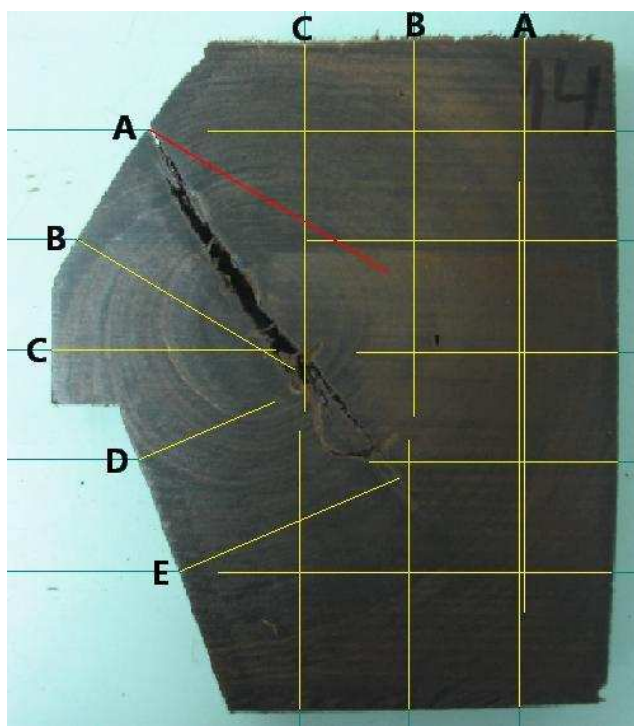


FIGURA B.14 – Resultados obtidos para a fatia 14, referente à posição 14-15 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

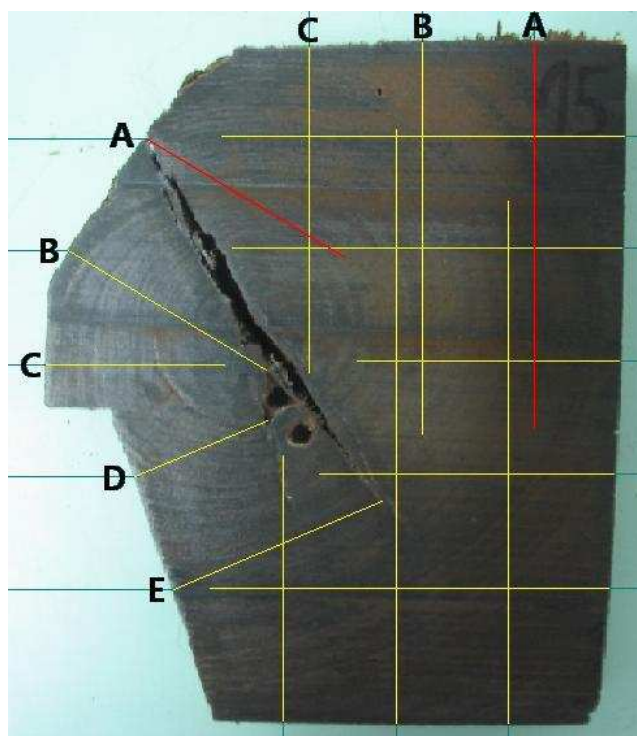


FIGURA B.15 – Resultados obtidos para a fatia 15, referente à posição 15-16 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

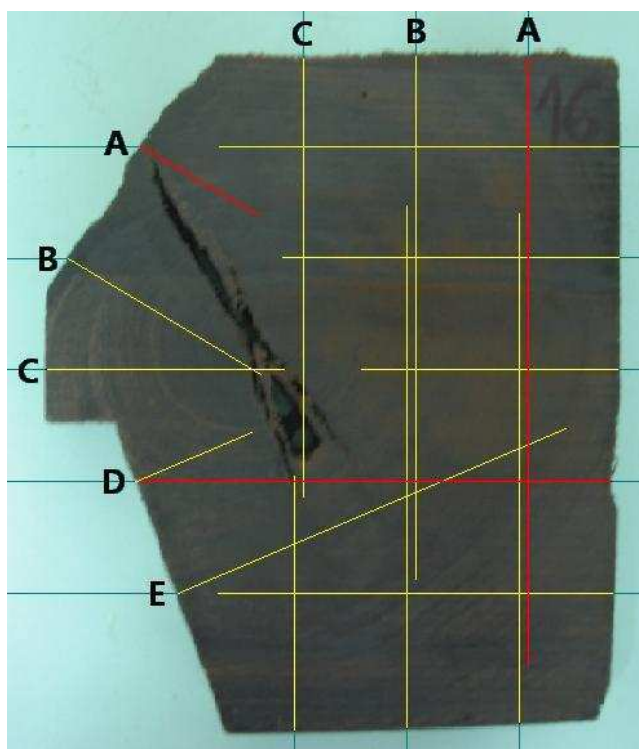


FIGURA B.16 – Resultados obtidos para a fatia 16, referente à posição 16-17 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

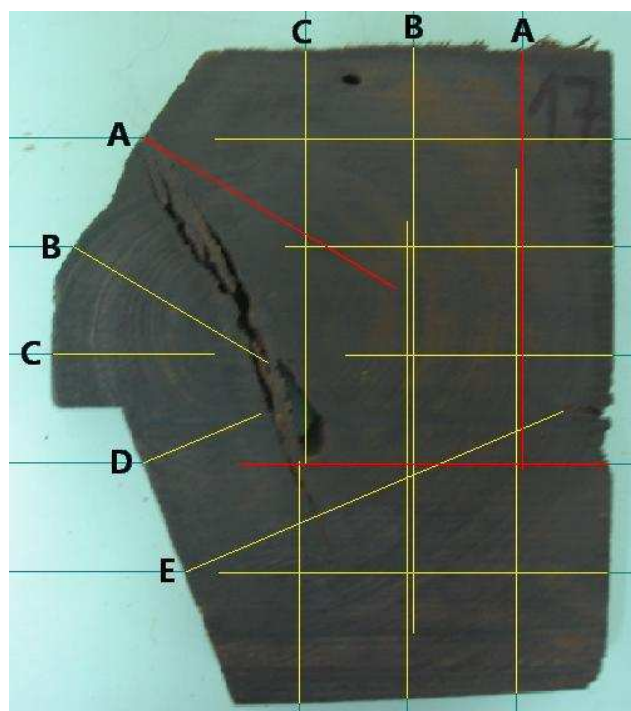


FIGURA B.17 – Resultados obtidos para a fatia 17, referente à posição 17-18 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

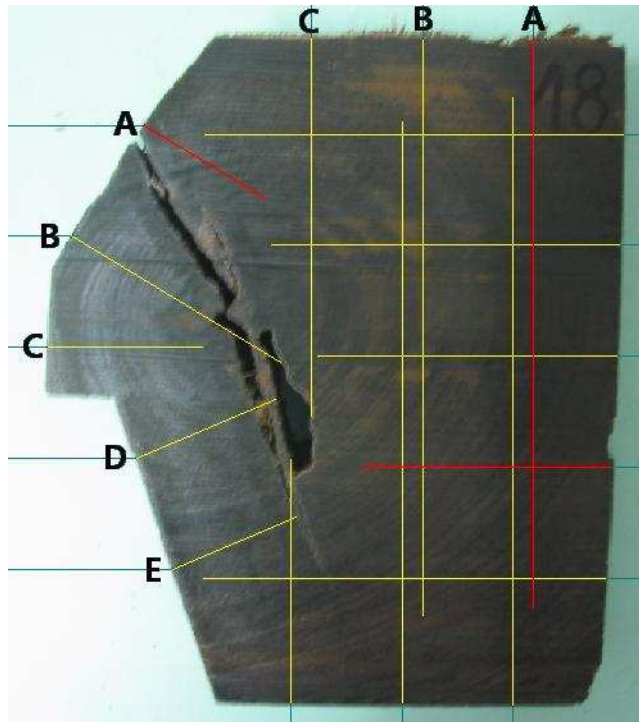


FIGURA B.18 – Resultados obtidos para a fatia 18, referente à posição 18-19 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

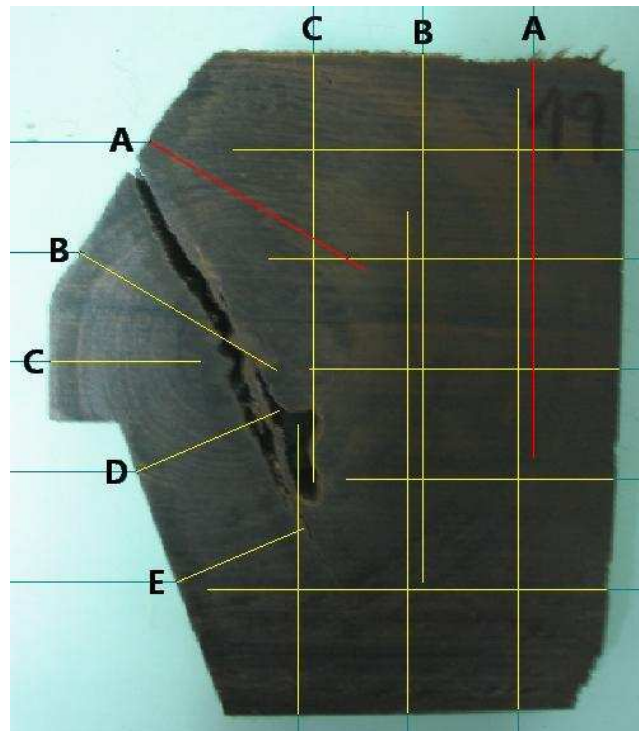


FIGURA B.19 – Resultados obtidos para a fatia 19, referente à posição 19-20 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

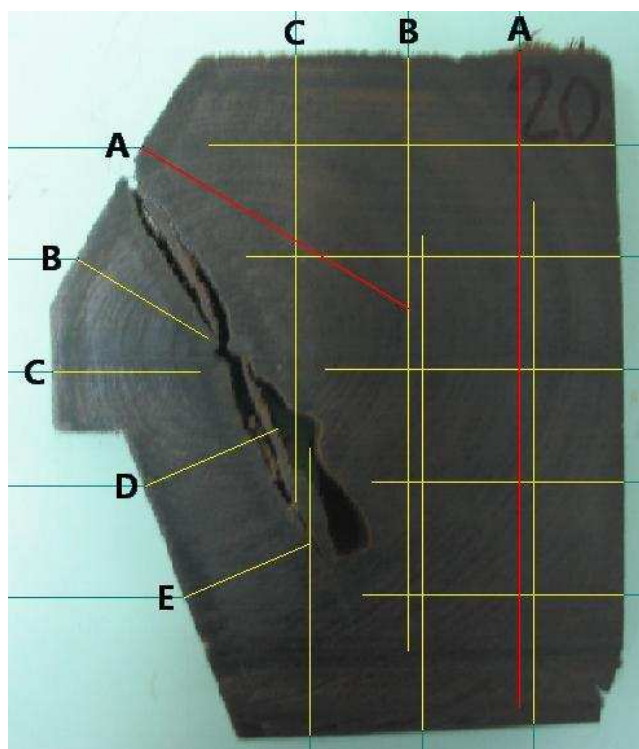


FIGURA B.20 – Resultados obtidos para a fatia 20, referente à posição 20-21 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

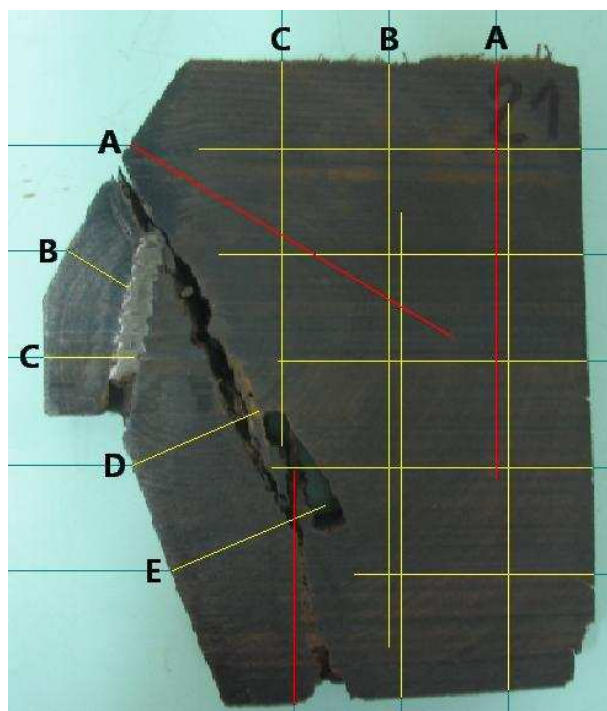


FIGURA B.21 – Resultados obtidos para a fatia 21, referente à posição 21-22 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

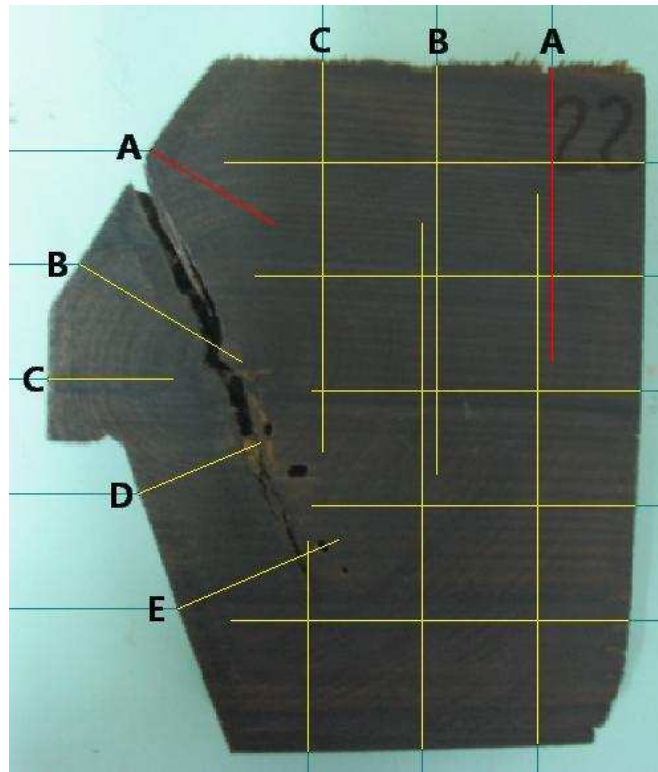


FIGURA B.22 – Resultados obtidos para a fatia 22, referente à posição 22-23 dos transdutores de frequência de 500 kHz.

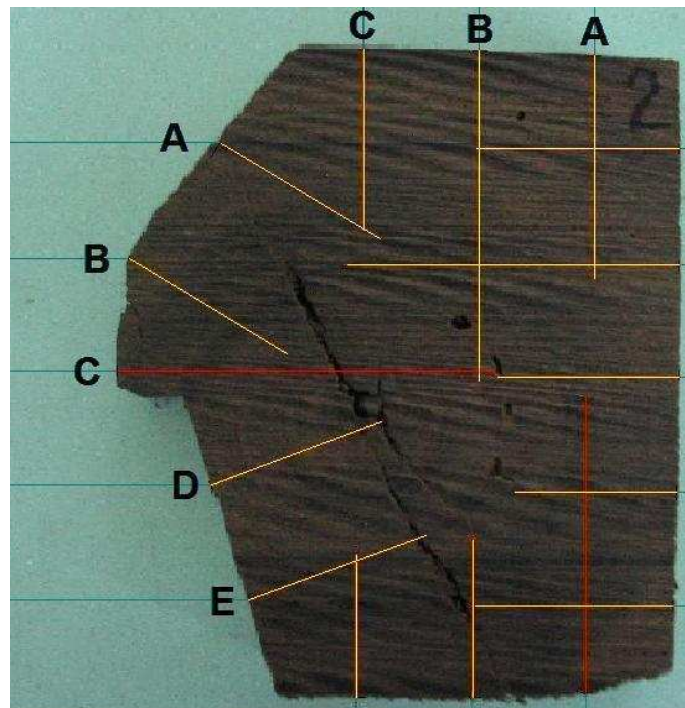


FIGURA B.23 – Resultados obtidos para a fatia 2, referente à posição 1-3 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

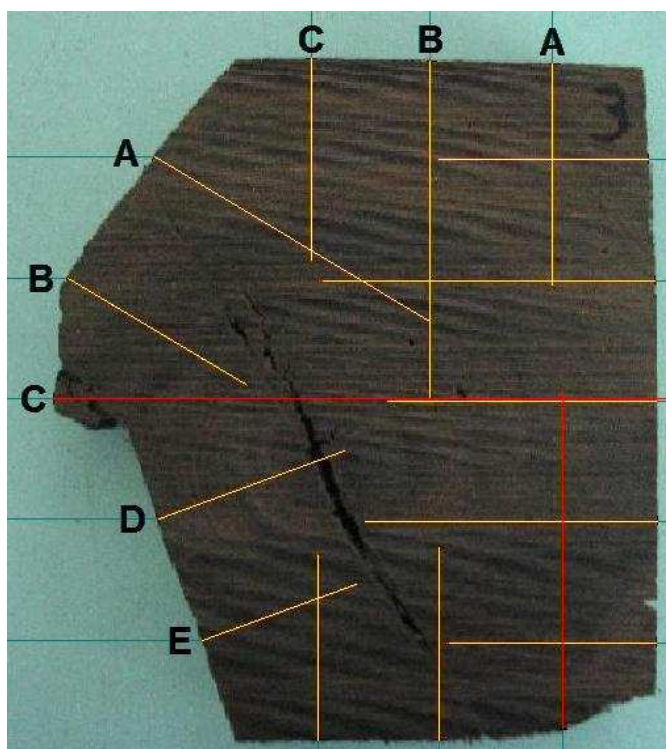


FIGURA B.24 – Resultados obtidos para a fatia 3, referente à posição 2-4 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

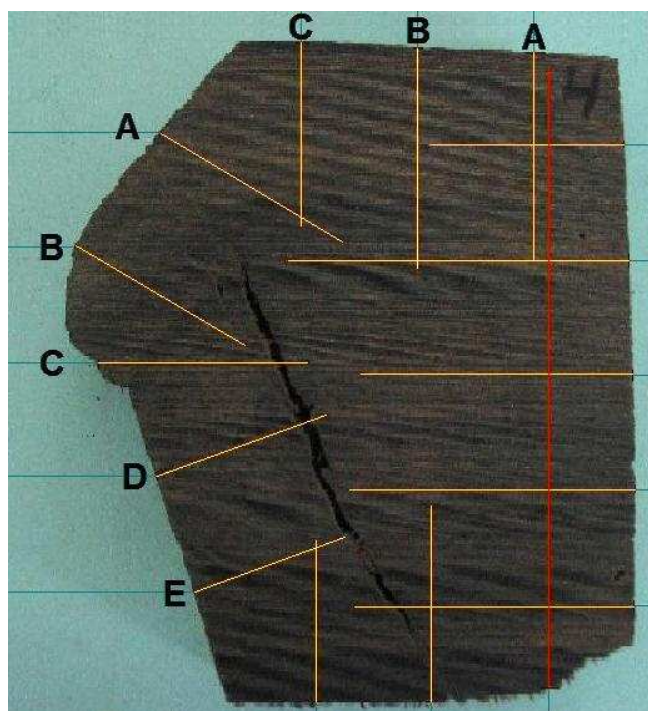


FIGURA B.25 – Resultados obtidos para a fatia 4, referente à posição 3-5 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

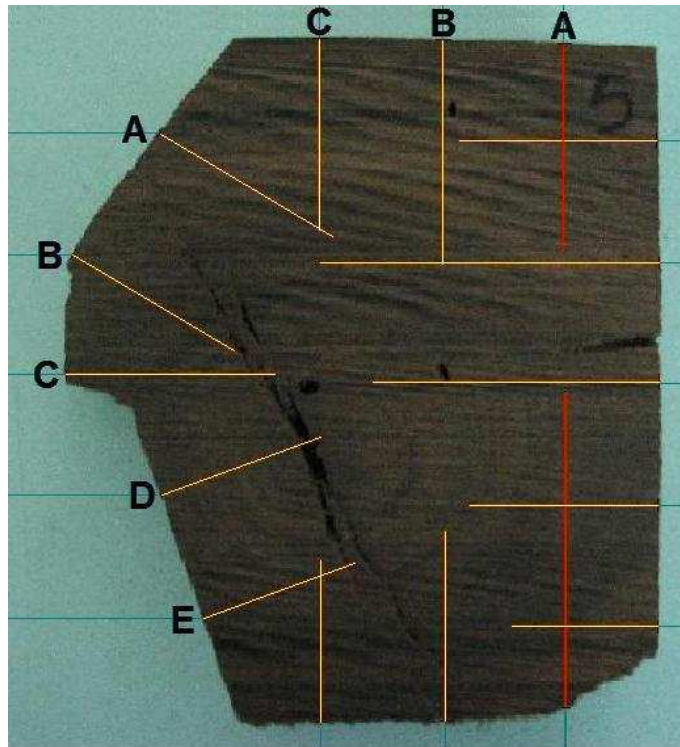


FIGURA B.26 – Resultados obtidos para a fatia 5, referente à posição 4-6 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

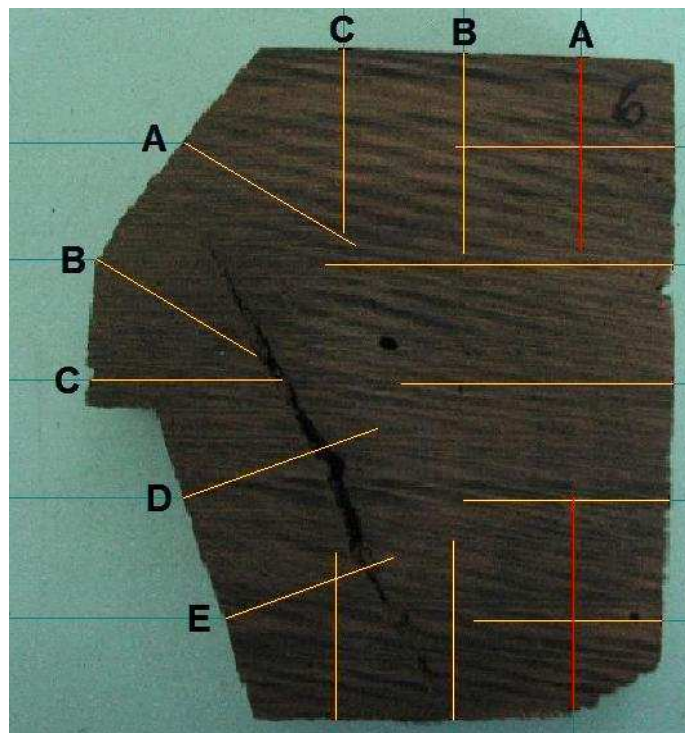


FIGURA B.27 – Resultados obtidos para a fatia 6, referente à posição 5-7 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

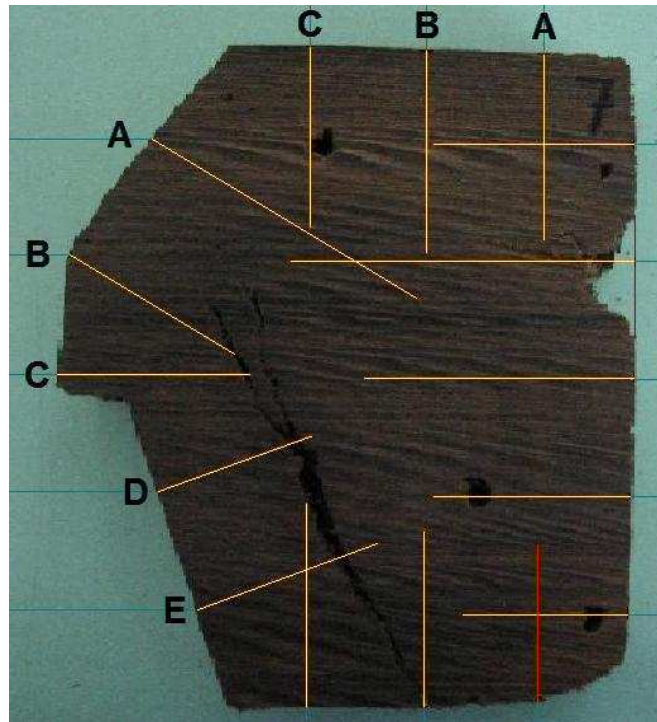


FIGURA B.28 – Resultados obtidos para a fatia 7, referente à posição 6-8 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

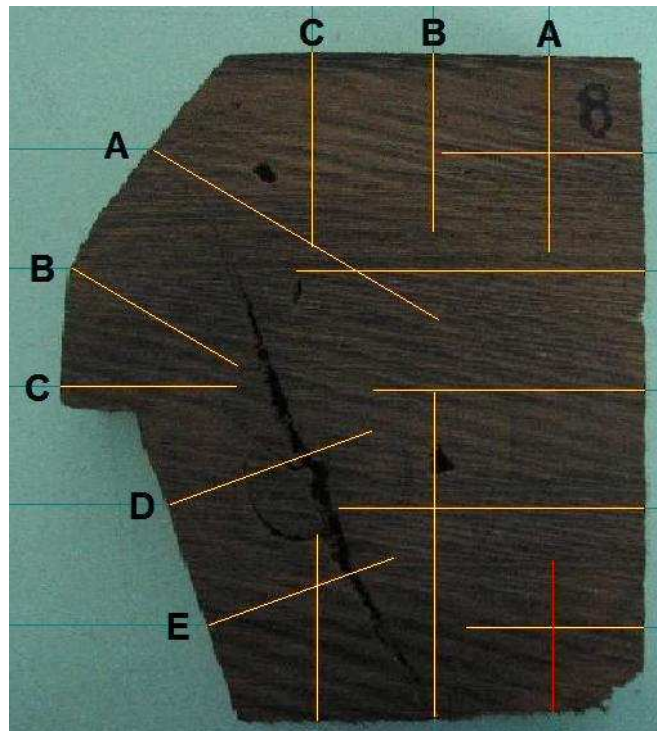


FIGURA B.29 – Resultados obtidos para a fatia 8, referente à posição 7-9 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

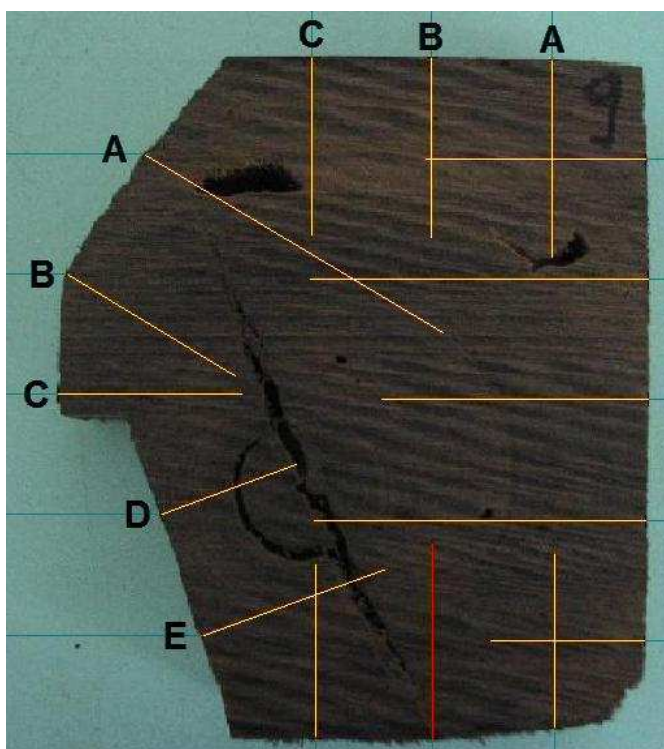


FIGURA B.30 – Resultados obtidos para a fatia 9, referente à posição 8-10 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

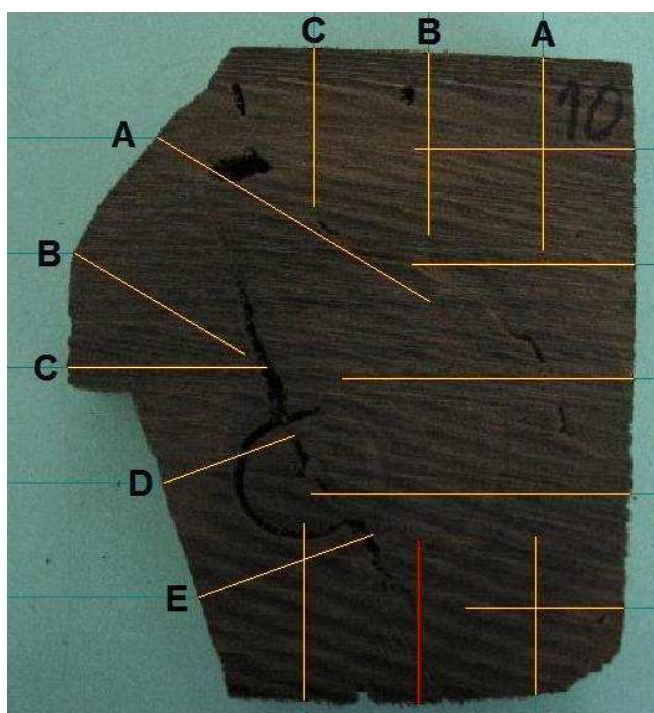


FIGURA B.31 – Resultados obtidos para a fatia 10, referente à posição 9-11 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

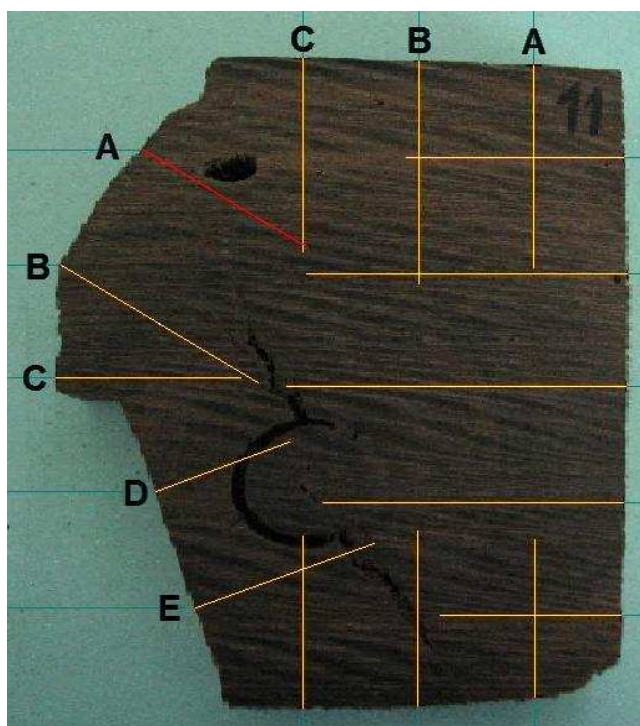


FIGURA B.32 – Resultados obtidos para a fatia 11, referente à posição 10-12 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

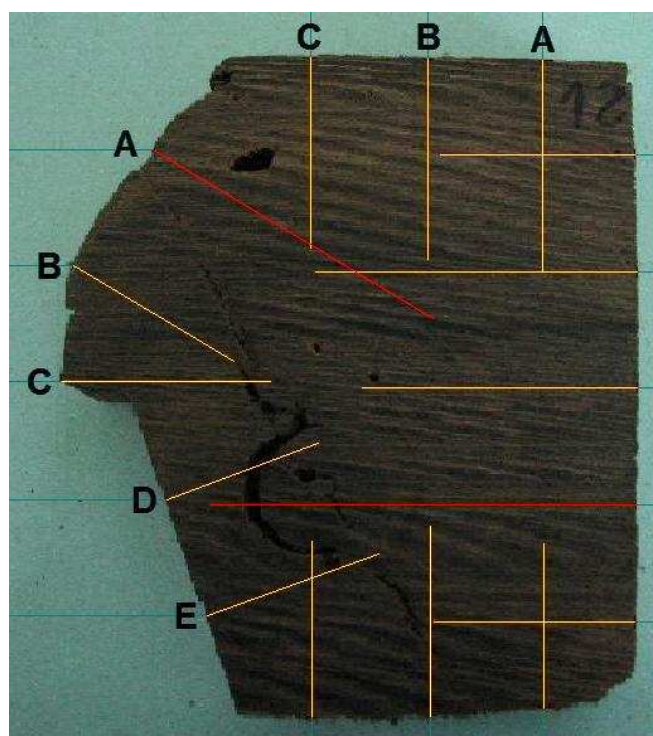


FIGURA B.33 – Resultados obtidos para a fatia 12, referente à posição 11-13 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

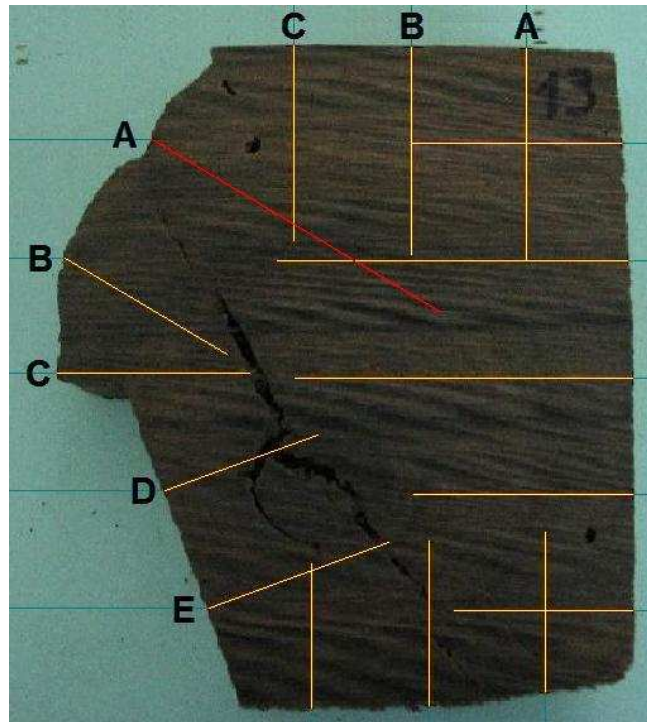


FIGURA B.34 – Resultados obtidos para a fatia 13, referente à posição 12-14 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

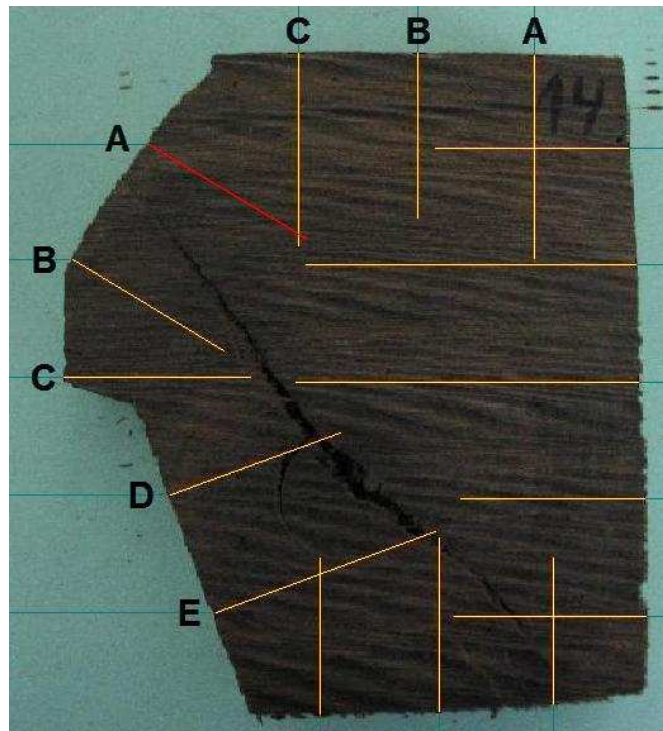


FIGURA B.35 – Resultados obtidos para a fatia 14, referente à posição 13-15 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

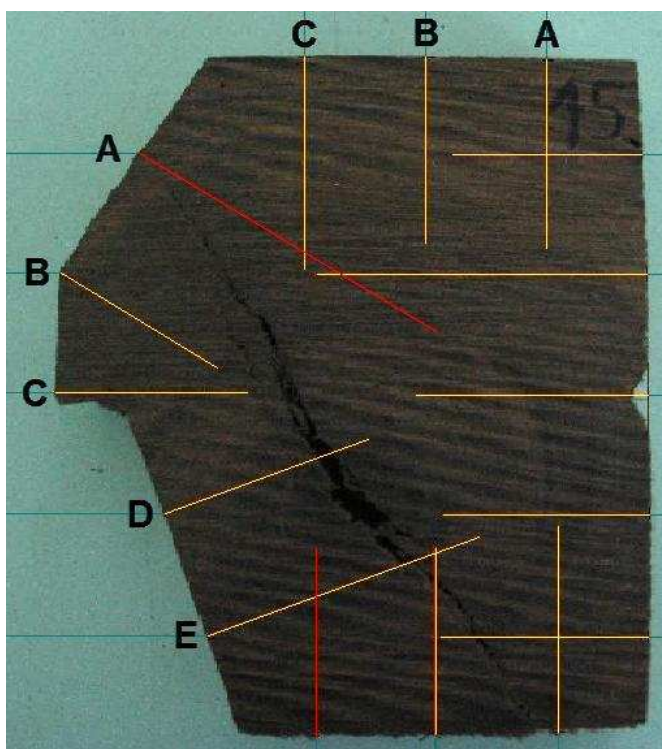


FIGURA B.36 – Resultados obtidos para a fatia 15, referente à posição 14-16 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

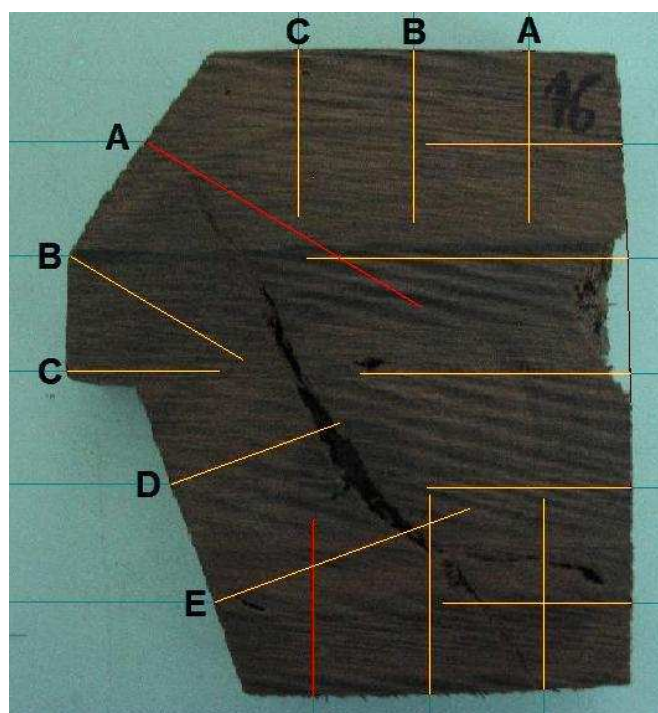


FIGURA B.37 – Resultados obtidos para a fatia 16, referente à posição 15-17 dos transdutores de frequência de 150 kHz.

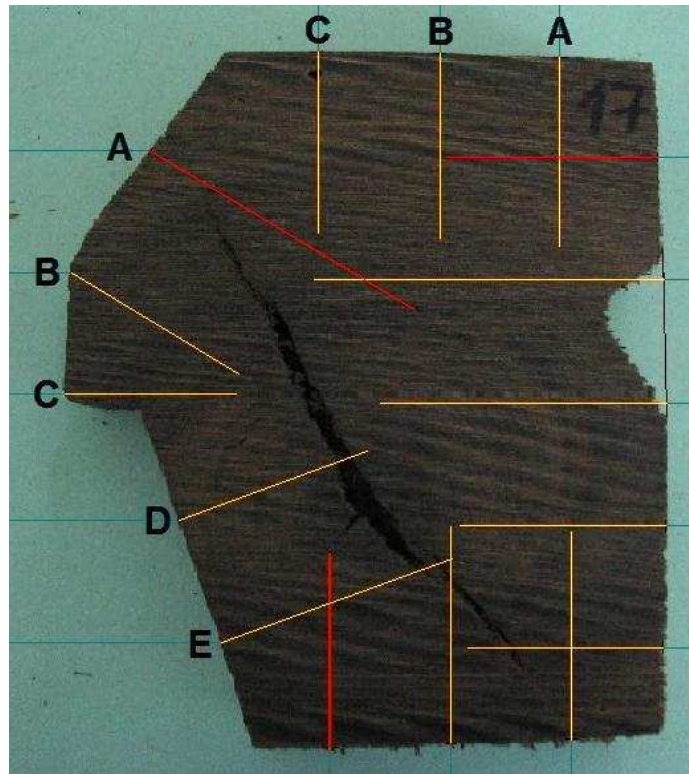


FIGURA B.38 – Resultados obtidos para a fatia 17, referente à posição 16-18 dos transdutores de frequência de 150 kHz.