

NILTON SERGIO RAMOS QUIRIN



**DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS EM MADEIRA
POR TOMOGRAFIA DE RAIOS X**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Vitoldo Swinka Filho

Co-orientador: Prof. Almir Sales

CURITIBA

2004

NILTON SERGIO RAMOS QUOIRIN

DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS EM MADEIRA
POR TOMOGRAFIA DE RAIOS X

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Vitoldo Swinka Filho

Co-orientador: Prof. Almir Sales

CURITIBA

2004



RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos trinta dias do mês de março de 2004, no auditório do Simepar no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. Oscar Felipe von Meien, coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, a Banca Examinadora para a Sexagésima defesa de mestrado área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no Ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, foi constituída pelos professores doutores Ricardo Tadeu Lopes (UFRJ), Almir Sales (UFSCAR), Glaciela Inês Bolzon Muñiz (UFPR), Vitoldo Swinka Filho (LACTEC). Às 15:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **Nilton Ramos Quoirin** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “Diagnóstico de Amostras de madeira Por Tomografia de Raios X”. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de argüição pelos membros participantes.

Tendo em vista a dissertação e a argüição, a banca aprovou o
trabalho com conceito A do candidato.
(de acordo com a determinação dos Artigos 62 e 63 da Resolução 62/03 de 22.07.03).

Curitiba, 12 de março 2004.

Prof. Dr. Ricardo Tadeu Lopes

Prof. Dr. Almir Sales

Prof. Dra. Glaciela Inês Bolzon Muñiz

Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho

Obs: O Prof. Almir Sales não participou da banca examinadora.

**Este trabalho é dedicado
aos meus pais e à Fernanda.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho, pelo apoio, dedicação, incentivo, sugestões, discussões e críticas durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Almir Sales, pelo apoio, pelos esclarecimentos sobre anatomia e fisiologia da madeira e pelas sugestões de aplicações da tomografia de raios X.

Ao Prof. Dr. Renê Robert, pela ajuda constante e pelas sugestões e discussões no desenvolvimento e na elaboração deste trabalho.

À Profª. Dra. Graciela Inés Bolzon Muñoz, ao Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza e ao Eng. Leopoldo Karman Saldanha, pela confecção das amostras de madeira com defeitos.

Aos colegas doutorandos MSc. Guilherme Cunha da Silva e MSc. Edemir Luiz Kowalski, pela amizade e auxílio na revisão do texto; aos colegas mestrandos Walmor Cardoso Godoi e Marcos Vinícius de Paula Pinto, assim como ao colega MSc. Juliano João Bazzo, pelas discussões sobre processamento digital de imagens.

Aos colegas do Laboratório de Metrologia, pela forte amizade, pelo convívio e pela utilização dos equipamentos.

Ao Eng. Ricardo Luiz Araújo, pelo apoio, incentivos e amizade.

Ao MSc. Hamilton Pereira da Silva, que desenvolveu a primeira versão do programa de controle do sistema tomográfico industrial.

Ao Instituto de Tecnologia de Desenvolvimento – LACTEC, pelo apoio e pela utilização das instalações e dos equipamentos.

Aos colegas da Unidade Técnica de Polímeros e Dielétricos, demais colegas do Departamento de Materiais do LACTEC e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

À CAPES, pelo auxílio financeiro.

Aos meus pais, à Fernanda, à Flávia, à Renata, ao Evaldo e à Anita.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS | vi |
| LISTA DE TABELAS | ix |
| LISTA DE TABELAS | ix |
| LISTA DE SIGLAS | x |
| LISTA DE SIGLAS | x |
| RESUMO | xi |
| ABSTRACT | xii |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. OBJETIVOS..... | 2 |
| 1.2. JUSTIFICATIVA..... | 2 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA | 3 |
| 2.1. ANATOMIA E FISILOGIA DA MADEIRA..... | 3 |
| 2.1.1. Composição Elementar | 3 |
| 2.1.2. Composição Molecular | 3 |
| 2.1.3. Estrutura Interna..... | 5 |
| 2.1.4. Anéis de Crescimento..... | 7 |
| 2.1.5. Classificação das Espécies | 8 |
| 2.1.6. Tipos de Seções..... | 9 |
| 2.1.7. Defeitos em Madeira | 10 |
| 2.1.7.1. Rachaduras internas | 10 |
| 2.1.7.2. Nós..... | 12 |
| 2.1.7.3. Degradação causada por fungos..... | 13 |
| 2.1.7.4. Ataque de insetos | 14 |
| 2.1.7.5. Medula e lenho juvenil | 15 |
| 2.2. TOMOGRAFIA | 16 |
| 2.2.1. Histórico | 17 |
| 2.2.2. Projeções | 20 |
| 2.2.3. Teorema da Projeção de Fourier | 26 |
| 2.2.4. Reconstrução de Imagens..... | 28 |
| 2.3. PROCESSAMENTO DE IMAGENS..... | 33 |
| 2.3.1. Redução de Ruído | 35 |
| 2.3.2. Morfologia Matemática..... | 40 |
| 2.3.3. Segmentação de Imagens | 43 |
| 2.4. TOMOGRAFIA DE MADEIRA | 46 |
| 2.4.1. Coeficiente de Atenuação de Raios X da Madeira..... | 50 |
| 2.4.2. Processamento de Tomografias de Madeira..... | 50 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 53 |
| 3.1. AMOSTRAS DE MADEIRA | 53 |
| 3.2. SISTEMA TOMOGRÁFICO CT2000 | 53 |
| 3.3. PROGRAMA DE CONTROLE DO TOMÓGRAFO | 55 |
| 3.3.1. Definição dos Parâmetros..... | 57 |
| 3.3.2. Aquisição das Radiografias..... | 59 |
| 3.3.3. Aquisição das Projeções..... | 59 |
| 3.3.4. Redução de Ruído | 60 |
| 3.3.5. Visualização do Sinograma..... | 60 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.3.6. | Reconstrução de Imagens..... | 61 |
| 3.4. | PROGRAMA DE PROCESSAMENTO DE TOMOGRAFIAS | 64 |
| 3.4.1. | Segmentação de Defeitos | 67 |
| 3.4.2. | Determinação da Redução da Área | 70 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 73 |
| 4.1. | CORPO DE PROVA DE ACRÍLICO | 73 |
| 4.2. | NÚMERO DE PROJEÇÕES | 74 |
| 4.3. | FILTRO DA MEDIANA | 76 |
| 4.4. | CORPO DE PROVA DE MADEIRA..... | 80 |
| 4.5. | TEMPO DE PROCESSAMENTO E QUANTIDADE DE DADOS..... | 82 |
| 4.6. | EFEITO COMETA | 83 |
| 4.7. | DISTORÇÃO DEVIDO À UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO DE RECONSTRUÇÃO PARA FEIXE PARALELO | 86 |
| 4.8. | TOMOGRAFIAS DE AMOSTRAS COM DEFEITOS..... | 88 |
| 4.8.1. | Tomografias de Amostras com Rachaduras..... | 88 |
| 4.8.2. | Tomografias de Amostra com Rachaduras e Ataque de Fungo | 94 |
| 4.8.3. | Tomografias de Amostra com Nós..... | 96 |
| 4.8.4. | Tomografias de Amostra com Medula e Lenho Juvenil | 101 |
| 4.8.5. | Tomografias de Amostra com Ataque de Insetos | 104 |
| 4.9. | SEGMENTAÇÃO DE DEFEITOS | 105 |
| 4.9.1. | Caracterização da Segmentação | 106 |
| 4.9.2. | Amostra com Rachaduras..... | 111 |
| 4.9.3. | Amostra com Rachaduras e Ataque de Fungos..... | 113 |
| 4.9.4. | Determinação da Redução da Área Efetiva..... | 116 |
| 5. | CONCLUSÕES | 120 |
| | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 122 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 124 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Molécula de β -D-glucose..... | 4 |
| Figura 2 - Segmento de uma cadeia de celulose..... | 4 |
| Figura 3 - Estrutura interna de uma árvore..... | 5 |
| Figura 4 - Anéis de crescimento em um tronco de abeto Douglas (<i>Douglas fir</i>) []. | 7 |
| Figura 5 - Tipos de seções de madeira. | 9 |
| Figura 6 - Fotografia de uma peça de madeira com rachaduras internas. | 11 |
| Figura 7 – Fotografia de um tronco com rachadura em forma de anel. | 12 |
| Figura 8 - Fotografia de um nó vivo [22]. | 13 |
| Figura 9 - Fotografia de um nó morto [22]. | 13 |
| Figura 10 - Johann Radon (1887 - 1956). | 17 |
| Figura 11 - William H. Oldendorf (1925 - 1992). | 18 |
| Figura 12 - Allan M. Cormack (1924 - 1998). | 19 |
| Figura 13 - Godfrey N. Hounsfield. | 19 |
| Figura 14 - Primeiro protótipo de tomógrafo de cérebro..... | 20 |
| Figura 15 - Representação dos coeficientes de atenuação em uma seção transversal..... | 21 |
| Figura 16 – Representação de um objeto atravessado por um feixe de raios X e projeção. | 23 |
| Figura 17 – Representação de uma projeção de feixe em leque..... | 24 |
| Figura 18 – Representação de uma projeção de feixe em cone..... | 24 |
| Figura 19 - Caso geral: projeção $P_{\theta}(t)$ | 25 |
| Figura 20 - Pontos da transformada bidimensional obtidos a partir da transformada de várias projeções..... | 28 |
| Figura 21 - Filtro rampa. | 31 |
| Figura 22 - Retroprojeção para reconstrução de uma imagem..... | 32 |
| Figura 23 - Representação matricial de uma imagem. | 34 |
| Figura 24 - Exemplo de imagem monocromática. | 34 |
| Figura 25 - Radiografia de um isolador polimérico. | 36 |
| Figura 26 - Redução de ruído por <i>overlay</i> | 36 |
| Figura 27 - Exemplo de aplicação do filtro da média de tamanho 5 x 5. | 37 |
| Figura 28 - Exemplo de aplicação do filtro da mediana de tamanho 5 x 5. | 38 |
| Figura 29 - Exemplo de aplicação dos filtros da média e da mediana. | 39 |
| Figura 30 - Exemplo de aplicação dos filtros da média e da mediana em bordas..... | 40 |
| Figura 31 - Exemplo de representação de uma imagem binária em morfologia matemática. | 41 |
| Figura 32 - Exemplo de representação de uma imagem monocromática em morfologia matemática. | 41 |
| Figura 33 - Exemplo de elemento estruturante em forma de diamante e raio 3..... | 42 |
| Figura 34 – Exemplo de elemento estruturante em forma de quadrado e tamanho 3 x 3. ... | 42 |
| Figura 35 – Exemplo de fechamento de uma tomografia..... | 43 |
| Figura 36 - Exemplo de segmentação global – (a) imagem original; (b) imagem segmentada..... | 44 |
| Figura 37 - Exemplo de limitação da segmentação global: (a) imagem original; (b) imagem segmentada..... | 45 |
| Figura 38 – Exemplo de aplicação do fechamento <i>top-hat</i> a uma tomografia. | 46 |
| Figura 39 - Sistema de tomografia industrial Gilardoni CT2000..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 40 - Câmera CCD Samsung BW-2302. | 54 |
| Figura 41 - Unidade de controle do gerador de raios X. | 55 |
| Figura 42 - Janela principal do programa de tomografia..... | 56 |
| Figura 43 - Fluxograma do processo de tomografia. | 57 |
| Figura 44 - Janela de aquisição de quadros. | 58 |
| Figura 45 - Janela de aquisição de projeções. | 59 |
| Figura 46 - Janela de visualização de sinograma. | 61 |
| Figura 47 - Janela de reconstrução de imagens. | 62 |
| Figura 48 - Fim da reconstrução de uma fatia. | 64 |
| Figura 49 - Janela do programa de processamento após abertura de uma tomografia. | 65 |
| Figura 50 - Janela do programa de processamento após limiarização de uma tomografia. . | 66 |
| Figura 51 - Tomografia de uma amostra com rachaduras. | 68 |
| Figura 52 - Imagem resultante da operação de fechamento <i>top-hat</i> | 68 |
| Figura 53 - Imagem resultante da operação de limiarização global. | 69 |
| Figura 54 - Imagem resultante da abertura morfológica. | 70 |
| Figura 55 - Resultado da limiarização da tomografia inicial seguida de preenchimento. ... | 71 |
| Figura 56 - Subtração da imagem dos defeitos da imagem da amostra preenchida. | 72 |
| Figura 57 - <i>Phantom</i> para determinação da resolução: (a) vista lateral; (b) vista superior. . | 73 |
| Figura 58 - Corpo de prova de acrílico - reconstrução com 90 projeções. | 75 |
| Figura 59 - Corpo de prova de acrílico - reconstrução com 180 projeções. | 75 |
| Figura 60 - Corpo de prova de acrílico - reconstrução com 360 projeções. | 76 |
| Figura 61 - <i>Phantom</i> de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 3x3 e 90 projeções. . | 77 |
| Figura 62 - <i>Phantom</i> de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 5x5 e 90 projeções. . | 77 |
| Figura 63 - <i>Phantom</i> de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 3x3 e 180 projeções. | 78 |
| Figura 64 - <i>Phantom</i> de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 5x5 e 180 projeções. | 78 |
| Figura 65 - <i>Phantom</i> de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 3x3 e 360 projeções. | 79 |
| Figura 66 - <i>Phantom</i> de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 5x5 e 360 projeções. | 79 |
| Figura 67 - Fotografia do corpo de prova de madeira - vista lateral. | 80 |
| Figura 68 - Fotografia do corpo de prova de madeira - vista superior. | 80 |
| Figura 69 - Tomografia do <i>phantom</i> de madeira sem redução de ruído. | 81 |
| Figura 70 - Tomografia do <i>phantom</i> de madeira com redução de ruído por filtro da mediana 5 x 5. | 82 |
| Figura 71 - Sinograma de um objeto descentralizado. | 84 |
| Figura 72 - Sinograma de um objeto centralizado. | 84 |
| Figura 73 - Reconstrução com efeito cometa. | 85 |
| Figura 74 - Reconstrução com efeito cometa eliminado. | 86 |
| Figura 75 - Reconstrução com algoritmo para feixe paralelo aplicado a feixe cônico: (a) objeto centralizado; (b) objeto descentralizado. | 87 |
| Figura 76 - Vista superior da amostra 1. | 88 |
| Figura 77 - Vista inferior da amostra 1. | 89 |
| Figura 78 - Vista superior da amostra 2. | 89 |
| Figura 79 - Vista inferior da amostra 2. | 89 |
| Figura 80 - Amostra 1 - tomografia da fatia 1. | 90 |

| | |
|---|-----|
| Figura 81 - Amostra 1 – tomografia da fatia 2. | 90 |
| Figura 82 - Amostra 1 – tomografia da fatia 3. | 91 |
| Figura 83 - Amostra 1 – tomografia da fatia 4. | 91 |
| Figura 84 - Amostra 2 – tomografia da fatia 1. | 92 |
| Figura 85 - Amostra 2 – tomografia da fatia 2. | 92 |
| Figura 86 - Amostra 2 – tomografia da fatia 3. | 93 |
| Figura 87 - Amostra 2 – tomografia da fatia 4. | 93 |
| Figura 88 - Fotografia da vista superior da amostra 3. | 94 |
| Figura 89 - Fotografia da vista inferior da amostra 3. | 94 |
| Figura 90 - Amostra 3 – tomografia da fatia superior. | 95 |
| Figura 91 - Amostra 3 – tomografia da fatia intermediária. | 95 |
| Figura 92 - Amostra 3 – tomografia da fatia inferior. | 96 |
| Figura 93 - Vista lateral da amostra 4. | 97 |
| Figura 94 - Vista superior da amostra 4. | 97 |
| Figura 95 - Radiografia da amostra 4 e posições das fatias coletadas. | 98 |
| Figura 96 - Amostra 4 – tomografia da fatia 1. | 98 |
| Figura 97 - Amostra 4 – tomografia da fatia 2. | 99 |
| Figura 98 - Amostra 4 – tomografia da fatia 3. | 99 |
| Figura 99 - Amostra 4 – tomografia da fatia 4. | 100 |
| Figura 100 - Amostra 4 – tomografia da fatia 5. | 100 |
| Figura 101 - Fotografia da vista lateral da amostra 5. | 101 |
| Figura 102 - Fotografia da vista superior da amostra 5. | 101 |
| Figura 103 - Amostra 5 – tomografia da fatia superior. | 102 |
| Figura 104 - Amostra 5 – tomografia da fatia inferior. | 102 |
| Figura 105 – Exemplo de aplicação para localização do lenho juvenil: (a) tomografia de uma amostra; (b) segmentação para separação do lenho inicial e tardio. | 103 |
| Figura 106 - Fotografia da vista superior da amostra 6. | 104 |
| Figura 107 - Amostra 6 – tomografia da fatia 1. | 104 |
| Figura 108 - Amostra 6 – tomografia da fatia 2. | 105 |
| Figura 109 – Tomografia da amostra 7. | 106 |
| Figura 110 – Tomografia da amostra 8. | 107 |
| Figura 111 – Tomografia da amostra 9. | 107 |
| Figura 112 – Segmentação da tomografia da amostra 7. | 109 |
| Figura 113 – Segmentação da tomografia da amostra 8. | 110 |
| Figura 114 – Segmentação da tomografia da amostra 9. | 110 |
| Figura 115 - Segmentação da fatia 1 da amostra 1 com limiar igual a 0,23. | 111 |
| Figura 116 - Segmentação da fatia 1 da amostra 1 com limiar igual a 0,27. | 112 |
| Figura 117 - Segmentação da fatia 1 da amostra 1 com limiar igual a 0,3. | 112 |
| Figura 118 - Segmentação da fatia superior da amostra 3 com limiar igual a 0,23. | 114 |
| Figura 119 - Segmentação da fatia superior da amostra 3 com limiar igual a 0,25. | 114 |
| Figura 120 - Segmentação da fatia superior da amostra 3 com limiar igual a 0,27. | 115 |
| Figura 121 - Segmentação da fatia intermediária da amostra 3. | 115 |
| Figura 122 - Segmentação da fatia inferior da amostra 3. | 116 |
| Figura 123 - Imagem da amostra 1 com defeitos presentes na fatia 1. | 117 |
| Figura 124 - Imagem da amostra 3 com defeitos presentes na fatia superior. | 117 |
| Figura 125 - Imagem da amostra 3 com defeitos presentes na fatia intermediária. | 118 |
| Figura 126 - Imagem da amostra 3 com defeitos presentes na fatia inferior. | 118 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela I - Composição elementar da madeira. | 3 |
| Tabela II: Coeficientes de atenuação linear do ar e da madeira (em cm^{-1}). | 50 |
| Tabela III - Diâmetros dos furos do <i>phantom</i> de acrílico..... | 74 |
| Tabela IV - Diâmetros dos furos do corpo de prova de madeira..... | 81 |
| Tabela V - Comparação de parâmetros para tomografias com 90, 180 e 360 projeções. | 83 |
| Tabela VI – Diâmetro dos furos e das amostras 7, 8 e 9. | 106 |
| Tabela VII – Cálculo da redução de área para a amostra 7. | 108 |
| Tabela VIII - Cálculo da redução de área para a amostra 8. | 108 |
| Tabela IX - Cálculo da redução de área para a amostra 9. | 109 |
| Tabela X – Resultados da análise de repetitividade da segmentação. | 111 |
| Tabela XI - Redução percentual da área das seções transversais. | 119 |

LISTA DE SIGLAS

| | | |
|---------|---|--|
| BMP | – | Bitmap |
| CCD | – | Charge-coupled Device |
| CT | – | Computerized Tomography |
| EMBRAPA | – | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| FFT | – | Fast Fourier Transform |
| JPEG | – | Joint Photographic Experts Group |
| LACTEC | – | Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento |
| PET | – | Positron Emission Tomography |
| RAM | – | Random Access Memory |
| SPECT | – | Single Photon Emission Computerized Tomography |

RESUMO

O presente trabalho apresenta a aplicação da tomografia de raios X como técnica não-destrutiva de avaliação de defeitos em madeira. Foi desenvolvido um programa para controle do sistema tomográfico (rotação do objeto, aquisição e armazenamento de dados) e reconstrução de imagens. Demonstra-se que a técnica permite visualizar as seções transversais das amostras e verificar a presença e o comportamento de defeitos internos, possibilitando a avaliação da integridade física e dimensional em toda a extensão e profundidade. A técnica pode ainda ser aplicada à visualização dos anéis de crescimento e a alguns estudos fisiológicos. As espécies de madeira utilizadas foram pinus (*Pinus taeda*) e eucalipto (*Eucalyptus viminalis*). Propõe-se ainda um método de segmentação de defeitos (rachaduras e ataque de fungos) em imagens tomográficas de amostras de madeira. Empregando técnicas de processamento de imagens, a segmentação proposta permite destacar os defeitos presentes em tomografias de seções transversais. As imagens resultantes podem ser utilizadas para a determinação das dimensões dos defeitos, como a área dos defeitos e a redução da área efetiva da seção transversal.

Palavras-chave: Tomografia de Raios X; Madeira; Processamento de Imagens.

ABSTRACT

This work presents the application of X-ray tomography to wood defects non-destructive evaluation. A software for control of the tomographic system (object rotation, data acquisition and saving) and image reconstruction was developed. The technique is shown to allow the visualization of the samples cross sections and to verify the presence and behaviour of internal defects, making possible to assess physical and dimensional integrity. The technique can also be applied to visualize growth rings and to some physiologic studies. Wood species used in this work were loblolly pine (*Pinus taeda*) and eucalyptus (*Eucalyptus viminalis*). A defects segmentation (cracks and fungal decay) for wood samples tomographic images is also proposed. Using image processing, the proposed segmentation permits to extract defects occurring in cross sections tomographies. The resulting images can be used for dimensional analysis of defects, e.g. defects area determination and evaluation of cross section effective area reduction.

Key words: X-Ray Tomography; Wood; Image Processing.

1. INTRODUÇÃO

Ensaio não-destrutivo são técnicas que permitem avaliar um corpo sem modificar as suas características físicas, mecânicas e dimensionais e sem comprometer o seu uso futuro. A tomografia de raios X, uma das técnicas mais utilizadas na medicina para a visualização do interior do corpo humano, vem sendo cada vez mais empregada como técnica não-destrutiva em aplicações industriais. Alguns exemplos de aplicações são a detecção de defeitos em componentes poliméricos, metálicos e cerâmicos, a avaliação de processos de fabricação e o controle de qualidade em linhas de produção.

A tomografia de raios X baseia-se na medição da atenuação de um feixe de raios X atravessando um objeto segundo diversos ângulos, de forma a reconstruir uma imagem da distribuição bidimensional do coeficiente de atenuação do material analisado [1]. Como o coeficiente de atenuação tem relação proporcional com a densidade de um material, torna-se possível visualizar e analisar a estrutura física de um corpo.

No campo de ensaios industriais não-destrutivos, a tomografia de raios X pode ser aplicada à visualização do interior de corpos de madeira para a verificação da ocorrência de defeitos internos, comprometendo os seus diversos usos. A madeira é um material utilizado em inúmeras aplicações: na indústria moveleira; no setor de construção civil, na forma de estacas, vigas, colunas, cercas, andaimes, pontes, telhados, etc.; no setor ferroviário e metroviário, na construção de dormentes; no setor elétrico e de telefonia, em postes de transmissão e distribuição, postes de telefonia e cruzetas; no setor rural, em cercas, estábulos, currais, galpões, etc [2, 3].

1.1. OBJETIVOS

Procura-se, neste trabalho, demonstrar a aplicação da tomografia de raios X como técnica não-destrutiva de avaliação do interior de corpos de madeira. Mostrar-se-á o potencial da técnica como método de visualização de defeitos em amostras de madeira. Será demonstrada, também, uma metodologia de segmentação de defeitos em tomografias de amostras de madeira por técnicas de processamento de imagens. A segmentação proposta servirá como ferramenta para a determinação das dimensões dos defeitos presentes nas tomografias. Os defeitos abordados neste método de segmentação são rachaduras internas e ataques causados por fungos.

1.2. JUSTIFICATIVA

Por ser uma técnica não-destrutiva, a tomografia de raios X traz como principal vantagem a possibilidade de estudo do interior de árvores ou peças de madeira, preservando suas características físicas e mecânicas e seu uso futuro. A visualização da estrutura interna de uma árvore permite analisar a presença e o comportamento de defeitos (fungos, ataques de insetos, rachaduras, etc.) que alteram suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Na indústria madeireira, a visualização do interior de toras de madeira permite a otimização da localização e da orientação do corte de tábuas. A técnica encontra aplicação no setor elétrico e de telefonia para a visualização do interior de postes de madeira com o objetivo de verificar a presença de falhas e avaliar a integridade física e a resistência mecânica. Também, em órgãos governamentais e de proteção do meio ambiente, a visualização do interior de árvores permite o diagnóstico para determinação de possíveis doenças ou mecanismos de degradação.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. ANATOMIA E FISILOGIA DA MADEIRA

A anatomia descreve os diversos tecidos da madeira e suas composições celulares. A fisiologia estuda as funções e o inter-relacionamento dos vários tipos de células e tecidos que compõem a madeira. O estudo da anatomia e da fisiologia da madeira possibilita a compreensão de sua estrutura interna, suas características, defeitos e classificações [4].

2.1.1. Composição Elementar

Os três principais elementos constituintes da madeira são o carbono, o oxigênio e o hidrogênio. A percentagem referente a cada elemento é dada na Tabela I [5]:

Tabela I - Composição elementar da madeira.

| Elemento | Percentagem (em peso) |
|-----------------|------------------------------|
| Carbono | 49 |
| Oxigênio | 44 |
| Hidrogênio | 6 |

2.1.2. Composição Molecular

A celulose, a lignina e as hemiceluloses são as principais substâncias que compõem a madeira [4, 5, 6, 7].

A celulose é um polímero linear natural formado pela união de moléculas de β -D-glucose, um produto da fotossíntese [4, 5, 7]. A Figura 1 e a Figura 2 apresentam, respectivamente, uma molécula de β -D-glucose e uma cadeia de celulose. Por ser formada pela repetição de monômeros de glucose, a celulose, portanto, é um polissacarídeo.

Compondo cerca de 60% da madeira, a celulose confere resistência e dá suporte aos organismos vegetais [5, 7].

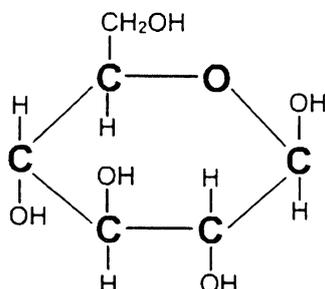


Figura 1 - Molécula de β -D-glucose.

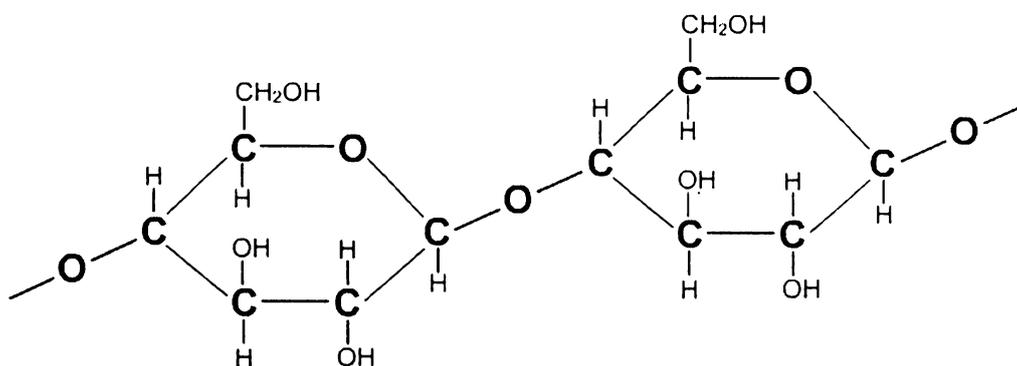


Figura 2 - Segmento de uma cadeia de celulose.

A união de cadeias de celulose adjacentes por pontes de hidrogênio forma regiões cristalinas denominadas microfibrilas. Cerca de 65% da celulose encontra-se nestas regiões; o resto forma regiões amorfas [7].

As hemiceluloses, compondo entre 20 e 35% da madeira, possuem uma estrutura muito próxima à da celulose. No entanto, enquanto a celulose é um homopolissacarídeo, ou seja, um polissacarídeo composto de apenas um tipo de unidade básica, as hemiceluloses são heteropolissacarídeos. Por serem hidrófilas, as hemiceluloses contribuem para a elasticidade e as variações dimensionais da madeira [4, 5, 7, 8].

A lignina - palavra proveniente do latim *lignum* (madeira) - é um polímero tridimensional cuja unidade funcional básica é a fenil-propana. Esta substância, que constitui de 15 a 35% da madeira, possui como funções interligar a celulose, preencher vazios e dar à parede celular rigidez e impermeabilidade [5, 7].

Por último, uma pequena parte da madeira é composta por outros compostos, como extrativos (óleos, graxas, resinas, etc.), compostos orgânicos (ceras, ácidos, ácidos graxos, etc.) e inorgânicos [4, 5, 7].

2.1.3. Estrutura Interna

A Figura 3 apresenta um esboço da estrutura comum da seção transversal de uma árvore. A estrutura interna é composta, do exterior para o centro, pelas seguintes camadas:

- Casca
- Floema
- Câmbio
- Xilema

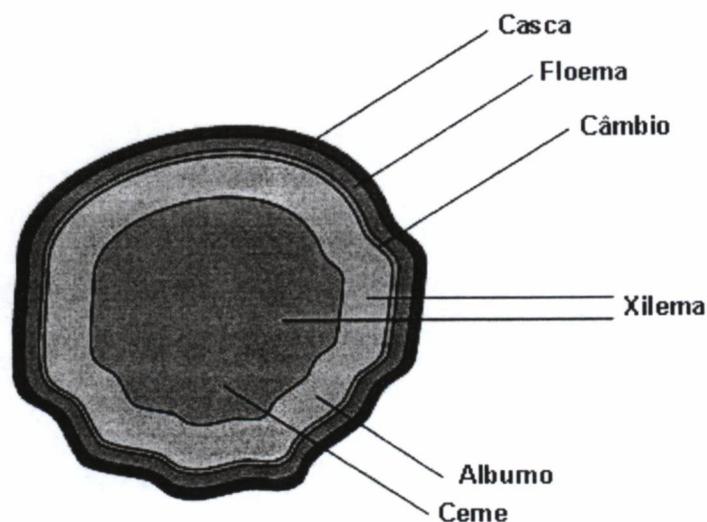


Figura 3 - Estrutura interna de uma árvore.

A casca é a região mais externa do tronco. Esta camada tem como funções proteger a árvore de fatores externos, como variações climáticas e insetos, e reter a umidade durante períodos secos.

O câmbio é responsável pelo crescimento radial de uma árvore. Nesta região ocorre a divisão e a diferenciação de novas células, dando origem ao floema e ao xilema, tecidos vasculares secundários [2, 4].

O floema ou líber, localizado entre a zona cambial e a casca, é responsável pelo transporte da seiva elaborada. A seiva elaborada ou orgânica é produzida nas folhas durante a fotossíntese e é composta por água e açúcares. Após um certo tempo, as células mais externas do floema morrem e passam a fazer parte da casca [2, 4, 9].

O xilema ou lenho é a camada central da árvore, situada abaixo do câmbio, e possui a função de distribuir a seiva bruta ou inorgânica (água e sais minerais). O xilema - palavra proveniente do grego *xylon* (madeira) - é o que constitui a madeira propriamente dita [2, 9].

O xilema divide-se em duas regiões distintas: o alburno e o cerne. O alburno, composto por células vivas e ativas, é mais claro, menos denso, contém mais água e apresenta menor resistência a esforços mecânicos e a insetos e micro-organismos. O cerne, por outro lado, é composto apenas por células mortas e inativas e possui maior resistência a esforços mecânicos e ao ataque de insetos e micro-organismos. Geralmente, devido à acumulação de compostos orgânicos e à ausência de água, o cerne é mais escuro que o alburno [2, 4, 7, 9].

2.1.4. Anéis de Crescimento

A produção de madeira (xilema) difere de acordo com a época do ano. Na primavera, as células formadas são mais largas, com paredes mais finas, resultando em madeira menos densa, menos resistente, mais clara e mais acessível à água. Durante o verão, outono e inverno, por outro lado, as novas células criadas são menores e suas paredes celulares são mais espessas. Conseqüentemente, a madeira formada é mais densa, escura e resistente e menos permeável [4, 5, 7, 9].

Esta alternância de células menos densas e mais densas forma os anéis de crescimento. A camada formada durante a primavera, denominada lenho inicial, primaveril ou madeira de primavera, aparece como uma faixa mais clara, ao passo que a camada originada no verão, chamada de lenho tardio, estival ou madeira de verão, pode ser vista como uma região mais escura. Os anéis de crescimento são mais visíveis em árvores de regiões de clima temperado, onde as diferenças entre as estações são mais pronunciadas. A Figura 4 apresenta a seção transversal de um tronco com anéis de crescimento visíveis [4, 5, 9].



Figura 4 - Anéis de crescimento em um tronco de abeto Douglas (*Douglas fir*) [10].

Como a alternância entre o lenho inicial e o lenho tardio ocorre de forma anual, os anéis de crescimento indicam a idade de uma árvore (este método é conhecido como dendrocronologia). No entanto, falsos anéis podem surgir devido a mudanças climáticas bruscas (secas, geadas, etc.) [4, 5, 9].

2.1.5. Classificação das Espécies

As madeiras costumam ser classificadas em duas categorias: as coníferas e as folhosas. Pinho, araucária, abeto e cipreste são alguns exemplos de coníferas; eucalipto, carvalho e álamo são exemplos de folhosas. As folhosas e as coníferas apresentam várias diferenças quanto às estruturas celulares de seus xilemas. Embora existam exceções, a madeira das folhosas geralmente é mais dura que a das coníferas. Por isso, as folhosas também são conhecidas como madeiras duras, e as coníferas são denominadas madeiras moles [2, 5, 7, 11].

As folhosas são árvores da subclasse das dicotiledôneas, pertencente à classe angiosperma. Suas sementes são protegidas por carpelos, e suas folhas caem durante o outono e crescem novamente na primavera. As folhosas possuem basicamente quatro tipos de células: os vasos, as fibras, o parênquima longitudinal e o parênquima radial. Os vasos, células alongadas com seção transversal vazada e perfurações nas extremidades, atuam na condução de seiva bruta de modo vertical. As fibras são células alongadas e afinadas nas extremidades, possuindo como principal função a sustentação da árvore [2, 4, 5, 7, 11].

As coníferas pertencem à classe das gimnospermas. Ao contrário das folhosas, suas sementes são nuas (a palavra gimnosperma vem do grego *gimno*, que significa nu). A composição celular das coníferas é mais simples e uniforme. Os traqueídeos ou fibras constituem a maior parte das células deste tipo de árvore. Estas células possuem formato

alongado e orientação vertical (paralela ao eixo do tronco) e são responsáveis por transportar a seiva bruta verticalmente e por dar força e suporte à madeira. O restante das células das coníferas são os raios, células alongadas e achatadas com orientação radial (perpendicular aos anéis de crescimento). O papel dos raios é armazenar e distribuir a seiva bruta horizontalmente [2, 4, 5, 7, 11].

2.1.6. Tipos de Seções

De acordo com o corte realizado em um tronco ou em uma tora, podem ser observados diferentes planos ou seções de madeira. A Figura 5 apresenta os três tipos de seções existentes:

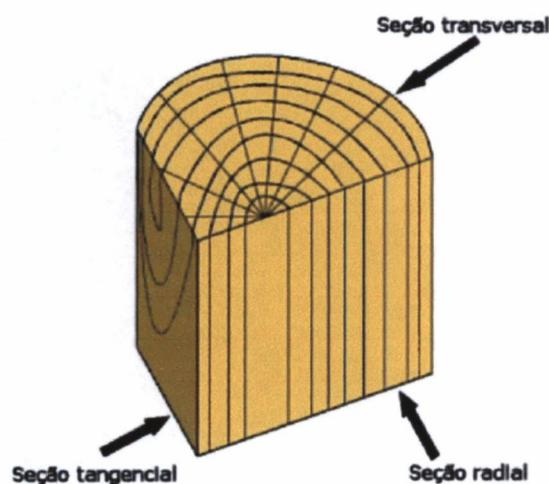


Figura 5 - Tipos de seções de madeira.

A seção transversal pode ser vista ao observar a extremidade de uma tora de madeira. Neste plano, os anéis de crescimento aparecem aproximadamente como circunferências (ou arcos de circunferências) concêntricas, e os raios são vistos como linhas normais aos anéis.

O plano radial é gerado ao cortar uma tora segundo a orientação de um raio (ou seja, de maneira perpendicular aos anéis de crescimento). Nesta superfície, os anéis aparecem como um conjunto de linhas paralelas. Os raios podem igualmente ser observados como pequenas manchas.

Por último, como o próprio nome sugere, a seção tangencial refere-se à superfície que tangencia os anéis de crescimento, com orientação normal aos raios [4, 5, 9, 12].

2.1.7. Defeitos em Madeira

A ocorrência de defeitos em madeira compromete o seu uso como matéria prima nas suas diversas aplicações. Os vários tipos de defeitos podem ter origem natural ou surgir tanto no tratamento e manejo silvicultural quanto nos processos de corte, secagem e usinagem. Alguns defeitos, como encanoamento, encurvamento, colapso, rachaduras superficiais e rachaduras de topo, são visíveis do exterior. Outros tipos, no entanto, ocorrem no interior da árvore ou da peça de madeira e podem ser visualizados apenas com o uso de técnicas não-destrutivas [11, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

2.1.7.1. Rachaduras internas

Durante o processo de secagem de peças de madeira, rachaduras internas podem surgir devido a gradientes de umidade entre o interior e o exterior da peça e a diferenças de retração nas diferentes direções dentro da peça [4, 11, 14, 16, 17].

A retração da madeira ocorre quando o teor de umidade cai abaixo do ponto de saturação das fibras. A retração é um fenômeno anisotrópico, manifestando-se com maior intensidade na direção tangencial, com menor intensidade da direção radial, e de forma pouco pronunciada na direção longitudinal.

No início da secagem, a região externa da tora ou da peça de madeira perde umidade de modo mais rápido do que a região interna. Ao atingir um teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, as camadas mais externas passam a retrair-se. Como a umidade nas camadas mais internas, por outro lado, é mais elevada, não ocorre o fenômeno de retração nesta região. Assim, as regiões externas passam a sofrer esforços de tensão, e as regiões internas são comprimidas. Se a evaporação na superfície é forte, a retração é intensa e rachaduras superficiais podem surgir.

Posteriormente, a umidade da zona interna da peça atinge o ponto de saturação e começa a retrair-se. Neste momento, as rachaduras superficiais tenderão a fechar-se. O fechamento destas fendas dificultará a retração da região interna, resultando na inversão dos esforços mecânicos: a região interna sofrerá tração, e a região externa será comprimida. Como consequência destes esforços, rachaduras internas poderão surgir. A Figura 6 apresenta uma fotografia de uma peça de madeira com rachaduras internas.



Figura 6 - Fotografia de uma peça de madeira com rachaduras internas.

Outros tipos de rachaduras podem surgir antes do corte e da secagem de um tronco. Rachaduras em forma de anel ou em forma de arco, por exemplo, são paralelas aos anéis de crescimento e podem ser causadas pela ação de esforços externos, por tensões de crescimento ou pela presença de lenho de compressão [4]. A Figura 7 mostra uma fotografia de uma tronco com rachadura em forma de anel [19].



Figura 7 – Fotografia de um tronco com rachadura em forma de anel.

2.1.7.2. Nós

O nó é a base de um galho localizada no tronco ou em outro galho. Quando o galho está vivo, os tecidos lenhosos do tronco envolvem o nó e continuam crescendo. O nó é então chamado de nó vivo, e seus tecidos estão em continuidade com os demais tecidos do tronco. Por outro lado, quando um galho morre, os tecidos do tronco crescem em volta sem nenhuma conexão com o nó. Este tipo de nó é denominado nó morto, apresentando descontinuidades nos tecidos [4, 9, 13, 16, 17, 20, 21].

Os nós dificultam o processamento das peças de madeira, reduzem sua resistência mecânica e diminuem o seu valor final. Nós mortos podem sofrer transformações, acumulando resinas ou outros materiais. Durante a secagem, os nós mortos podem soltar-se da peça de madeira. A Figura 8 e a Figura 9, cedidas pelo *site* Woodzone [22] apresentam, respectivamente, uma fotografia de um nó vivo e uma fotografia de um nó morto.



Figura 8 - Fotografia de um nó vivo [22].



Figura 9 - Fotografia de um nó morto [22].

2.1.7.3. Degradação causada por fungos

Os fungos são microorganismos biológicos que podem atacar a madeira tanto antes quanto após o corte (como durante a secagem e o transporte). O ataque de fungos pode ocasionar manchas externas ou superficiais, manchas internas e podridão [17, 23, 24].

Por não decompor a parede das células, os fungos que causam manchas não afetam a resistência mecânica da madeira. Estes fungos alimentam-se de substâncias de reserva das células, como carboidratos, aminoácidos e ácidos orgânicos. Os fungos que causam

manchas internas nutrem-se principalmente de substâncias de reserva das células do albúrnio. A cor das manchas internas e externas depende da espécie do fungo. Os fungos causadores de manchas superficiais, também chamados de fungos emboloradores, modificam o aspecto visual das peças, diminuindo o valor da madeira destinada a móveis. Estes tipos de fungos manchadores também comprometem a resistência ao impacto e aumentam a permeabilidade da madeira.

Ao contrário dos fungos manchadores, os fungos apodrecedores consomem a celulose, a lignina e a hemicelulose da madeira. Como consequência, a madeira perde peso e sua resistência física e mecânica é comprometida.

Os principais requisitos para a proliferação de fungos na madeira são a umidade, a presença de oxigênio e nutrientes e uma temperatura adequada. Deste modo, existem diversas maneiras de proteger a madeira do ataque de fungos: submersão de toras, de forma a reduzir a temperatura e a presença de oxigênio; secagem, com o objetivo de reduzir o teor de umidade da peça; diminuição da temperatura ambiente, de modo a manter os fungos inativos; aplicação de preservativos como forma de proteção.

2.1.7.4. Ataque de insetos

Dentre o grande número de insetos que causam danos à madeira, os principais tipos são o cupim, o besouro, a formiga carpinteira, a vespa e a abelha [24, 25, 26, 27].

Os cupins são insetos sociais, ou seja, organizados em sociedade e com diferentes castas. Os cupins xilófagos (nem todas as espécies de cupins alimentam-se de madeira) nutrem-se da madeira graças a um protozoário presente no seu intestino. De acordo com o seus hábitos alimentares, os cupins são classificados em 3 tipos: cupins de madeira seca, que vivem em madeiras com baixo teor de umidade, cupins de madeira úmida, que vivem

em madeiras com elevado teor de umidade e início de apodrecimento, e cupins de solo ou subterrâneos, que constroem seu ninho no solo, próximo a uma fonte de alimentação ou de umidade.

Assim como os cupins, os besouros, conhecidos como brocas, alimentam-se da madeira. O ataque tem início quando uma fêmea deposita seus ovos na madeira. As larvas que se desenvolvem dos ovos nutrem-se de madeira até atingir a fase adulta. Ao chegar ao estágio adulto, o besouro faz um furo na madeira para chegar ao exterior.

Ao contrário dos cupins e dos besouros, as formigas carpinteiras, as abelhas e as vespas não se alimentam da madeira. As formigas carpinteiras fazem galerias em troncos de árvores e estruturas de madeira para construir o seu ninho. As vespas, além de inocular uma substância tóxica e um fungo, depositam seus ovos nas árvores. Depois de desenvolvidas, as suas larvas constroem galerias na madeira.

2.1.7.5. Medula e lenho juvenil

A medula é a região central do cerne de uma árvore. Esta zona é geralmente mais escura devido à concentração de extrativos. Por apresentar baixa densidade, baixa resistência mecânica e alto valor de retração longitudinal, a medula é considerada um defeito natural.

O lenho juvenil é constituído pelas primeiras camadas formadas durante o crescimento de uma árvore, envolvendo a medula. De forma oposta, o lenho formado próximo ao câmbio é denominado lenho adulto. No início da formação da árvore, o lenho juvenil ocupa uma grande proporção do tronco. Com o passar da idade da árvore, as novas camadas produzidas apresentam características mais uniformes, e a percentagem de lenho

juvenil decresce progressivamente; ao chegar ao seu estágio adulto, o lenho adulto compõe a maior proporção da árvore [4, 16, 28, 29].

Em relação ao lenho adulto, o lenho juvenil caracteriza-se por apresentar fibras e vasos mais curtos, mais flexíveis e com paredes mais finas, menor conteúdo de celulose, maior conteúdo de lignina, menor proporção de lenho tardio, menor densidade, menor resistência mecânica e maior retratibilidade. Como consequência das menores densidade e resistência e da maior retratibilidade, a presença de lenho juvenil reduz a qualidade e o valor da madeira. Assim, em espécies de rápido crescimento, deve-se evitar o corte e a comercialização de árvores muito jovens, contendo ainda uma alta percentagem de lenho juvenil.

2.2. TOMOGRAFIA

A palavra tomografia vem do grego *tomos* (seção) + grafia. Tomografia, portanto, refere-se a qualquer técnica que permita a visualização da seção transversal de um objeto. Assim, a tomografia é um tipo de ensaio não-destrutivo, possibilitando visualizar o interior de um corpo sem a necessidade de abri-lo [1, 30].

Existem diversos tipos de tomografias. Cada tipo baseia-se em um princípio físico diferente. A tomografia de raios X, por exemplo, tem como fundamento a atenuação sofrida por um feixe de raios X ao atravessar um objeto. A tomografia de emissão, por outro lado, utiliza informações sobre o decaimento de isótopos radioativos para gerar uma imagem de sua distribuição espacial. A seguir é apresentada uma lista dos tipos mais conhecidos de tomografia [1, 31]:

- Tomografia de raios X
- Tomografia computadorizada de emissão única de fóton (SPECT - *Single photon emission computerized tomography*)
- Tomografia de emissão de pósitron (PET - *Positron emission tomography*)
- Tomografia de ultrassom
- Tomografia de impedância elétrica
- Tomografia de prótons

2.2.1. Histórico

A teoria matemática de reconstrução de imagens foi desenvolvida no começo do século passado pelo matemático austríaco Johann Radon (Figura 10). No seu artigo "Sobre a determinação de funções a partir de suas integrais ao longo de certas direções", de 1917, Radon apresentou como, a partir de um conjunto de projeções, determinar a função original.



Figura 10 - Johann Radon (1887 - 1956).

Entretanto, foi apenas na década de 60 que surgiram os primeiros tomógrafos. Em 1961, o neurólogo William H. Oldendorf (Figura 11) construiu o primeiro protótipo de tomógrafo. Utilizando uma fonte radioativa de iodo e um detetor cintilador, Oldendorf reconstruiu, pelo método da retroprojeção, a imagem de um corpo de prova feito de pregos.

Na época, devido às dificuldades práticas, este equipamento foi considerado comercialmente inviável. Oldendorf ouviu o seguinte comentário de um fabricante de equipamentos de raios X: "Mesmo funcionando como você sugere, não podemos imaginar um mercado significativo para um aparelho tão caro, que não faria nada além de gerar seções transversais radiográficas da cabeça".



Figura 11 - William H. Oldendorf (1925 - 1992).

Assim como Oldendorf, o físico Allan M. Cormack (Figura 12), de pais escoceses mas nascido na África do Sul, também interessou-se em como conhecer a distribuição dos coeficientes de atenuação dos tecidos do corpo humano. Em 1955, Cormack fora convidado para trabalhar no hospital Groote Schuur da Cidade do Cabo, supervisionando o uso de isótopos radioativos. Esta atividade o fez perceber que deveria existir uma maneira de determinar as heterogeneidades de uma seção reta a partir de medições realizadas na região exterior. No entanto, ao pesquisar sobre o assunto, o físico não encontrou trabalhos com uma solução matemática para o problema. Cormack então realizou uma série de estudos teóricos e experimentais, publicados em artigos em 1963 e 1964 [32].



Figura 12 - Allan M. Cormack (1924 - 1998).

O primeiro tomógrafo clínico foi desenvolvido pelo engenheiro eletricitista inglês Godfrey N. Hounsfield (Figura 13). O interesse de Hounsfield por tomografia computadorizada surgiu em 1967, enquanto pesquisava reconhecimento automático de padrões no laboratório de pesquisa da EMI [33].



Figura 13 - Godfrey N. Hounsfield.

Os primeiros experimentos de Hounsfield utilizavam uma fonte de raios gama. Devido às limitações da época e à baixa intensidade da fonte, 9 dias eram necessários para completar uma varredura. A fonte de raios gama foi então substituída por uma fonte de raios X, reduzindo o tempo de varredura para 9 horas. A Figura 14 mostra o primeiro protótipo de tomógrafo de cérebro, desenvolvido por Hounsfield [34].

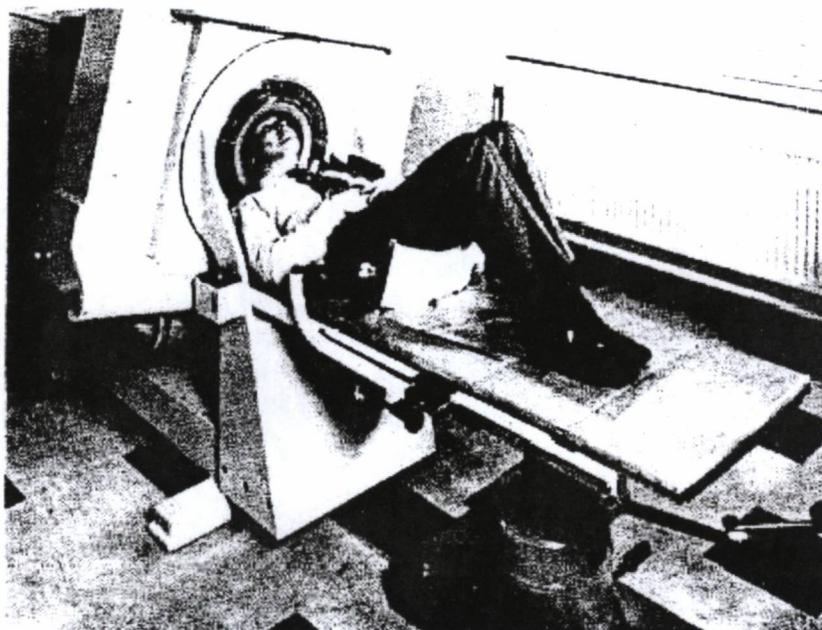


Figura 14 - Primeiro protótipo de tomógrafo de cérebro.

Em 1979, Alan Cormack e Godfrey Hounsfield receberam o prêmio Nobel de medicina pelo desenvolvimento do tomógrafo computadorizado [35].

2.2.2. Projeções

A tomografia tem como objetivo apresentar uma imagem da estrutura interna de um corpo ou objeto. Em tomografia de raios X, a imagem interna obtida ao final de uma reconstrução representa a distribuição bidimensional dos coeficientes de atenuação do objeto [1, 31].

A Figura 15 apresenta uma representação da seção transversal de um objeto a uma altura qualquer. A função $f(x,y)$ representa o coeficiente de atenuação de raios X no ponto (x,y) . Esta representação será utilizada no desenvolvimento a seguir. Esta dedução baseia-se no trabalho de Kak e Slaney [1].

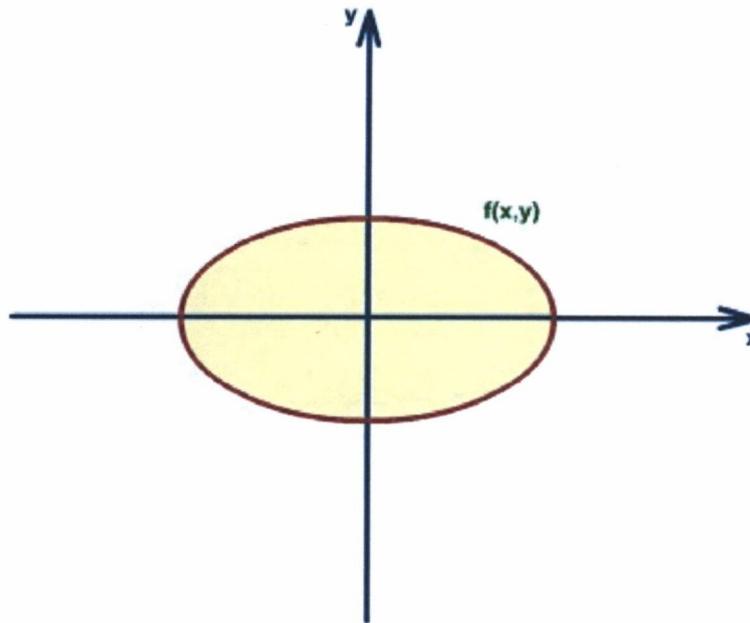


Figura 15 - Representação dos coeficientes de atenuação em uma seção transversal.

Para realizar a reconstrução de uma seção transversal, a tomografia baseia-se em medições externas ao corpo em análise. Cada tipo de tomografia utiliza uma espécie diferente de medida. A tomografia de raios X utiliza, como informação externa, a atenuação que um feixe de raios X sofre ao atravessar um objeto. Ao atravessar um objeto ao longo de um determinado caminho reto, um feixe monocromático de raios X obedece à Lei de Beer-Lambert:

$$\int_{\text{raio}} \mu(x, y) ds = \int_{\text{raio}} f(x, y) ds = \ln \frac{N_i}{N_d} \quad (1)$$

onde $\mu(x,y)$ ou $f(x,y)$ é o coeficiente de atenuação no ponto (x,y) , N_i é o número de fótons que entram no objeto e N_d é o número de fótons que saem do objeto.

Como em um objeto real o coeficiente de atenuação pode variar de um ponto para outro, a atenuação sofrida por um raio X ao longo de um caminho A não é necessariamente igual à atenuação sofrida ao longo de um segundo caminho B. Em outras palavras, o

número de fótons N_d que emergem de uma trajetória A não será necessariamente igual ao número de fótons provindo de uma trajetória B.

A Figura 16 mostra a representação da seção transversal de um objeto sendo atravessada por um feixe de raios X paralelo (todos os raios do feixe são paralelos). A parte superior da figura representa a projeção dos coeficientes de atenuação da seção transversal em função da coordenada t . A amplitude da curva para um determinado valor $t=t_l$ é função dos coeficientes de atenuação ao longo do caminho AB. A curva $P(t)$ constitui a informação externa necessária para a reconstrução de uma seção transversal.

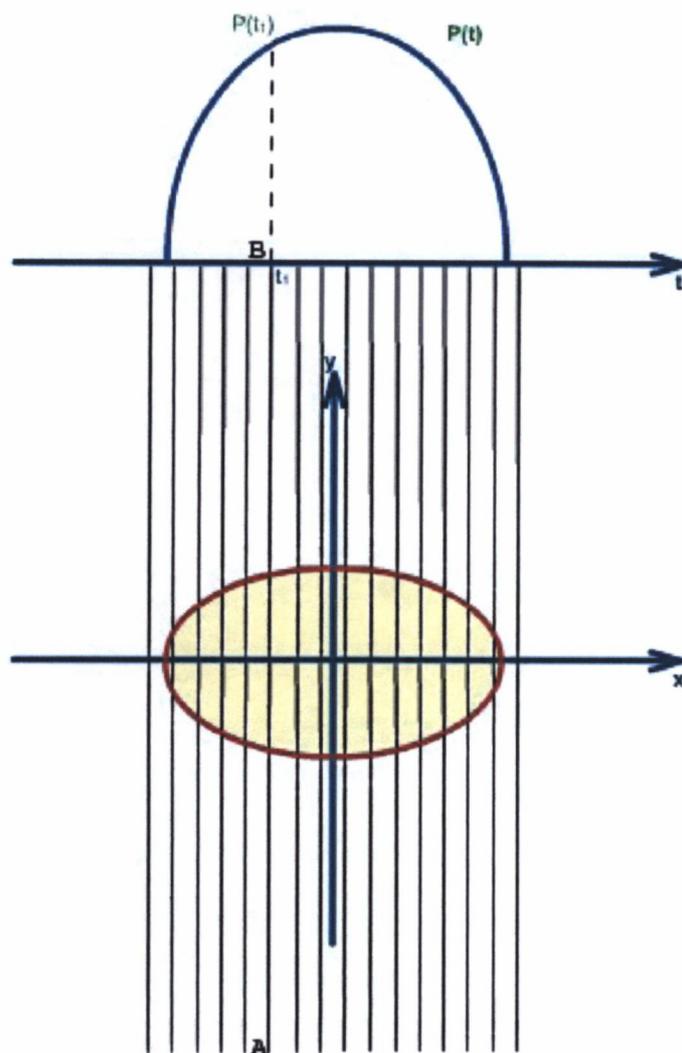


Figura 16 – Representação de um objeto atravessado por um feixe de raios X e projeção.

Existem três tipos de projeções: projeções paralelas (ou projeções de feixe paralelo), projeções de feixe em leque e projeções de feixe em cone. A Figura 16 mostra um exemplo de projeção paralela.

A Figura 17 apresenta uma projeção de feixe em leque. Neste tipo de projeção, todos os raios têm origem em um ponto (fonte) e abrem-se na forma de um leque.

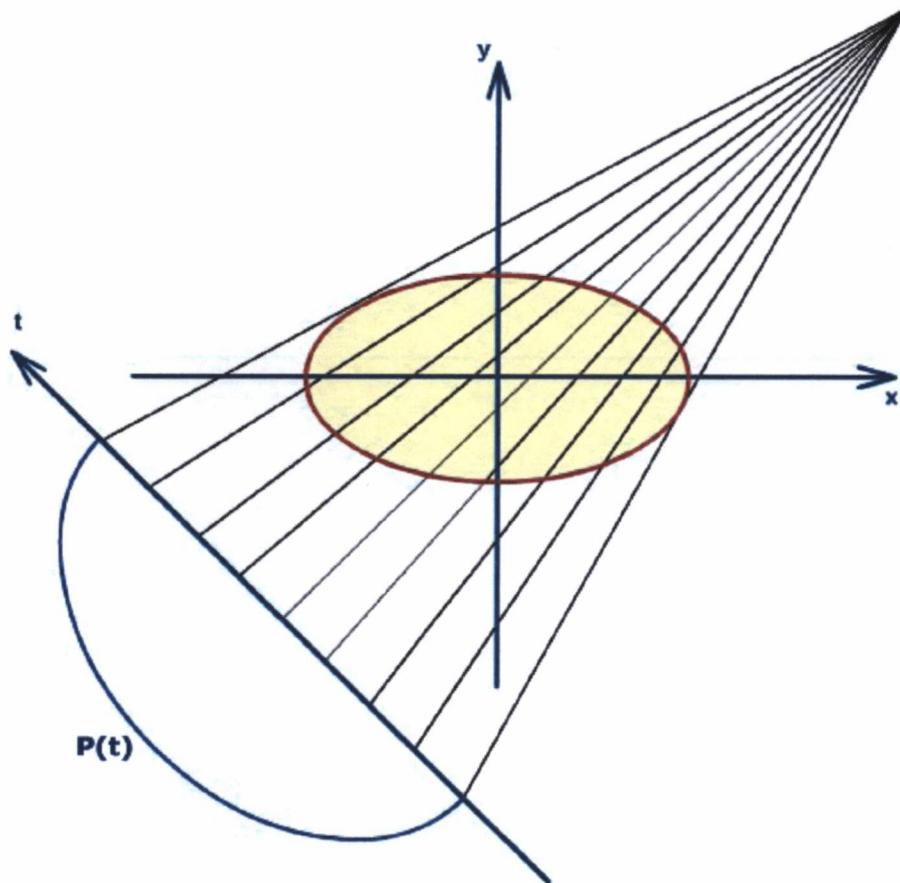


Figura 17 – Representação de uma projeção de feixe em leque.

Uma projeção de feixe em cone é ilustrada na Figura 18. Neste caso, vários feixes em leque emergem da fonte, atravessando o objeto em diversas alturas e atingindo um detector planar.

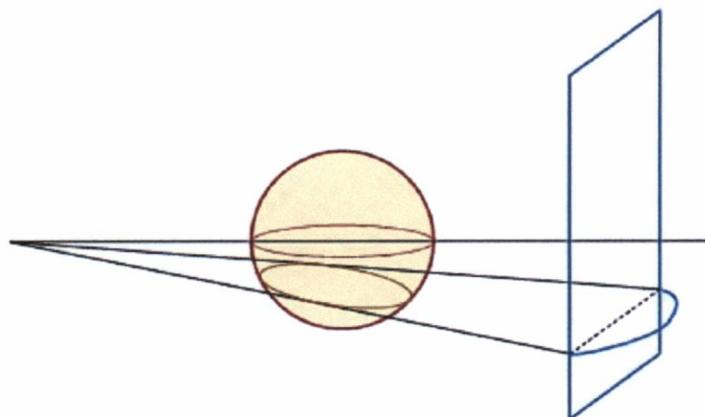


Figura 18 – Representação de uma projeção de feixe em cone.

O eixo t , entretanto, pode ter uma orientação qualquer, não necessitando estar paralelo ao eixo x como na Figura 16. A Figura 19 apresenta uma projeção $P_{\theta}(t)$, onde θ é o ângulo formado pelos eixos t e x .

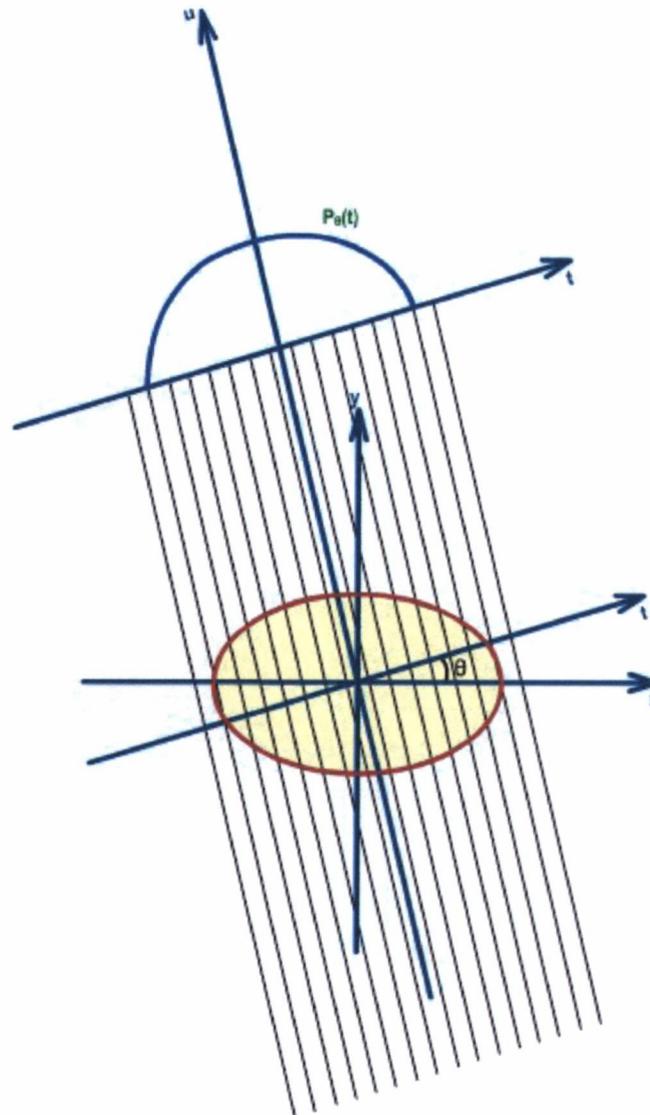


Figura 19 - Caso geral: projeção $P_{\theta}(t)$.

Assim, para o caso geral, uma projeção $P_{\theta}(t)$ é dada pela integral da equação (2), onde (θ, t) representa as coordenadas da trajetória percorrida por um raio X:

$$P_{\theta}(t) = \int_{\text{linha}(\theta,t)} f(x,y) ds \quad (2)$$

O sistema de coordenadas (t,u) mostrado na Figura 19 corresponde à rotação do par de eixos (x,y) de um ângulo θ .

$$\begin{bmatrix} t \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta \\ \text{sen } \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

Utilizando a equação (2) e a expressão acima relativa a t ($t = x \cos \theta + y \text{sen } \theta$), pode-se escrever a projeção $P_{\theta}(t)$ da seguinte forma:

$$P_{\theta}(t) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \delta(x \cos \theta + y \text{sen } \theta - t) dx dy \quad (4)$$

A equação (4) é conhecida como a Transformada de Radon da função $f(x,y)$.

Teorema da Projeção de Fourier

O Teorema da Projeção, também conhecido como o Teorema da Fatia Central, relaciona as projeções de um objeto com sua transformada de Fourier bidimensional. Este teorema é de grande importância e constitui uma ferramenta fundamental para o método de reconstrução por retroprojeção filtrada.

O Teorema da Projeção de Fourier baseia-se nas transformadas de Fourier unidimensional e bidimensional. As equações (5) e (6) apresentam as definições das transformadas de Fourier unidimensional e bidimensional, respectivamente:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j2\pi\omega t} dt \quad (5)$$

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (6)$$

Como definido na seção 2.2.2, $f(x,y)$ representa, para esta dedução, a distribuição dos coeficientes de atenuação da seção transversal de um objeto. Tomando a transformada bidimensional para o caso particular em que $v=0$, obtém-se a seguinte expressão:

$$F(u, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi ux} dx dy \quad (7)$$

A equação (7) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$F(u, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy \right] e^{-j2\pi ux} dx \quad (8)$$

A integral entre colchetes da equação (8) é um caso particular da equação (2). Como mostra a equação (9), esta integral corresponde à projeção da função $f(x,y)$ ao longo de linhas paralelas ao eixo y (ou seja, à projeção de ângulo $\theta=0^\circ$):

$$P_0(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy \quad (9)$$

Portanto, $F(u, 0)$ é igual à transformada de Fourier unidimensional $S_0(x)$ da projeção $P_0(x)$:

$$F(u, 0) = S_0(u) = \int_{-\infty}^{\infty} P_0(x) e^{-j2\pi ux} dx \quad (10)$$

Esta dedução pode ser estendida para o caso geral, no qual calcula-se a transformada de uma projeção formando um ângulo θ qualquer com o eixo x . Encontra-se então a equação (11), que é a forma geral do Teorema da Projeção de Fourier: a transformada de

Fourier unidimensional de uma projeção formando um ângulo θ com o eixo x é igual aos valores da transformada bidimensional do objeto ao longo de uma linha radial subtendendo o mesmo ângulo θ com o eixo u .

$$S_{\theta}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\theta}(t)e^{-j2\omega t} dt = F(\omega, \theta) \quad (11)$$

2.2.4. Reconstrução de Imagens

Segundo o Teorema da Projeção de Fourier, a transformada de Fourier de uma projeção que forma um ângulo θ com o eixo x fornece os valores da transformada bidimensional do objeto ao longo de uma linha radial formando o mesmo ângulo com o eixo u . Desta forma, como mostra a Figura 20, calculando a transformada de Fourier de um numero grande de projeções formando vários ângulos com o eixo x , obtém-se os valores da transformada bidimensional do objeto ao longo de várias linhas radiais:

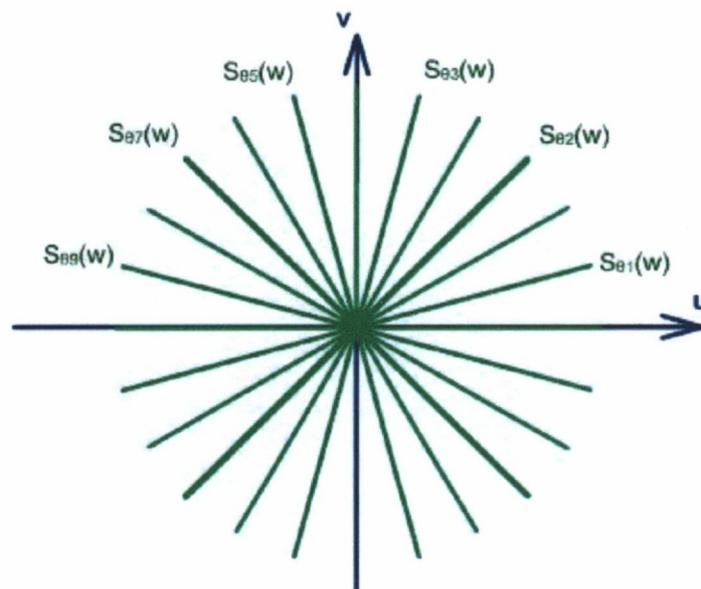


Figura 20 - Pontos da transformada bidimensional obtidos a partir da transformada de várias projeções.

É possível obter a imagem da seção reta original a partir desta distribuição de pontos. Para isso, são necessárias duas etapas: (a) uma interpolação de forma a obter pontos distribuídos em coordenadas cartesianas e (b) a transformada bidimensional de Fourier inversa, fornecendo os valores da imagem no domínio do espaço. Este método é conhecido como reconstrução direta de Fourier. Entretanto, a técnica mais utilizada de reconstrução de imagens é a retroprojeção filtrada. Este método, que tem como fundamento o Teorema da Projeção, faz proveito de uma mudança de coordenadas dos argumentos da transformada bidimensional inversa de Fourier.

A transformada de Fourier inversa de duas dimensões é dada pela equação (12):

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (12)$$

Transformando esta expressão de coordenadas cartesianas (u, v) para coordenadas polares (ω, θ) , obtém-se a equação (13):

$$f(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(\omega, \theta) e^{j2\pi\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} \omega d\omega d\theta \quad (13)$$

Separando os limites da integral (13) de 0 até π e de π até 2π , obtém-se a equação (14):

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} \int_0^{\infty} F(\omega, \theta) e^{j2\pi\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} \omega d\omega d\theta + \int_{\pi}^{2\pi} \int_0^{\infty} F(\omega, \theta) e^{j2\pi\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} \omega d\omega d\theta$$

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} \int_0^{\infty} F(\omega, \theta) e^{j2\pi\omega(x\cos\theta + y\sen\theta)} \omega d\omega d\theta + \int_0^{\pi} \int_0^{\infty} F(\omega, \theta + \pi) e^{j2\pi\omega(x\cos(\theta+\pi) + y\sen(\theta+\pi))} \omega d\omega d\theta \quad (14)$$

A transformada de Fourier em coordenadas polares obedece à propriedade apresentada na equação (15):

$$F(\omega, \theta + \pi) = F(-\omega, \theta) \quad (15)$$

A substituição desta propriedade na equação (14) resulta na equação (16):

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega, \theta) |\omega| e^{j2\pi\omega(x\cos\theta + y\sen\theta)} d\omega d\theta \quad (16)$$

Aplicando o Teorema da Projeção - equação (11) - na equação (16), obtém-se:

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(\omega) |\omega| e^{j2\pi\omega(x\cos\theta + y\sen\theta)} d\omega d\theta$$

ou

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(\omega) |\omega| e^{j2\pi\omega t} d\omega d\theta \quad (17)$$

A equação (17) é a equação principal do método da retroprojeção filtrada. Este nome surge da interpretação desta equação ao ser dividida em duas integrais:

$$Q_{\theta}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(\omega) |\omega| e^{j2\pi\omega t} d\omega \quad (18)$$

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} Q_{\theta}(x\cos\theta + y\sen\theta) d\theta \quad (19)$$

A equação (18) é a transformada inversa de Fourier do produto $S_{\theta}(\omega)|\omega|$. Esta multiplicação representa a filtragem da projeção $P_{\theta}(t)$ (cuja transformada é $S_{\theta}(\omega)$) pela função $|\omega|$. $Q_{\theta}(t)$ é, assim, denominada projeção filtrada. O gráfico do filtro $|\omega|$, conhecido como filtro rampa, está apresentado na Figura 21. Este filtro também é conhecido como filtro de Ramachandran-Lakshminarayanan, ou simplesmente filtro Ram-Lak.

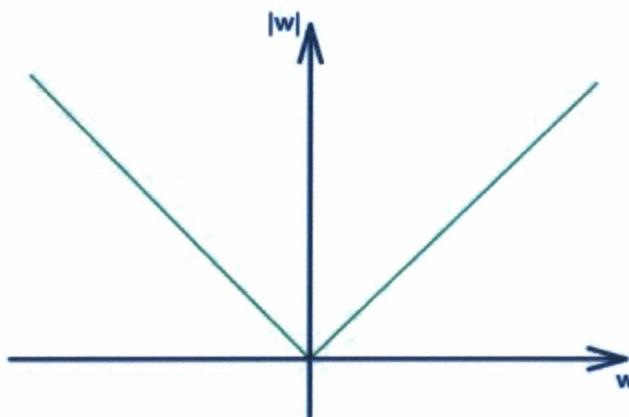


Figura 21 - Filtro rampa.

A equação (19) representa a operação de retroprojeção das projeções filtradas $Q_{\theta}(t)$. O valor de um determinado ponto de coordenadas (x,y) da imagem original é dado pelo somatório (ou integral) dos diversos valores $Q_{\theta}(xcos\theta + ysen\theta)$, para θ variando de 0 a θ . A Figura 22 mostra o significado da contribuição de uma projeção filtrada $Q_{\theta}(t)$ qualquer.

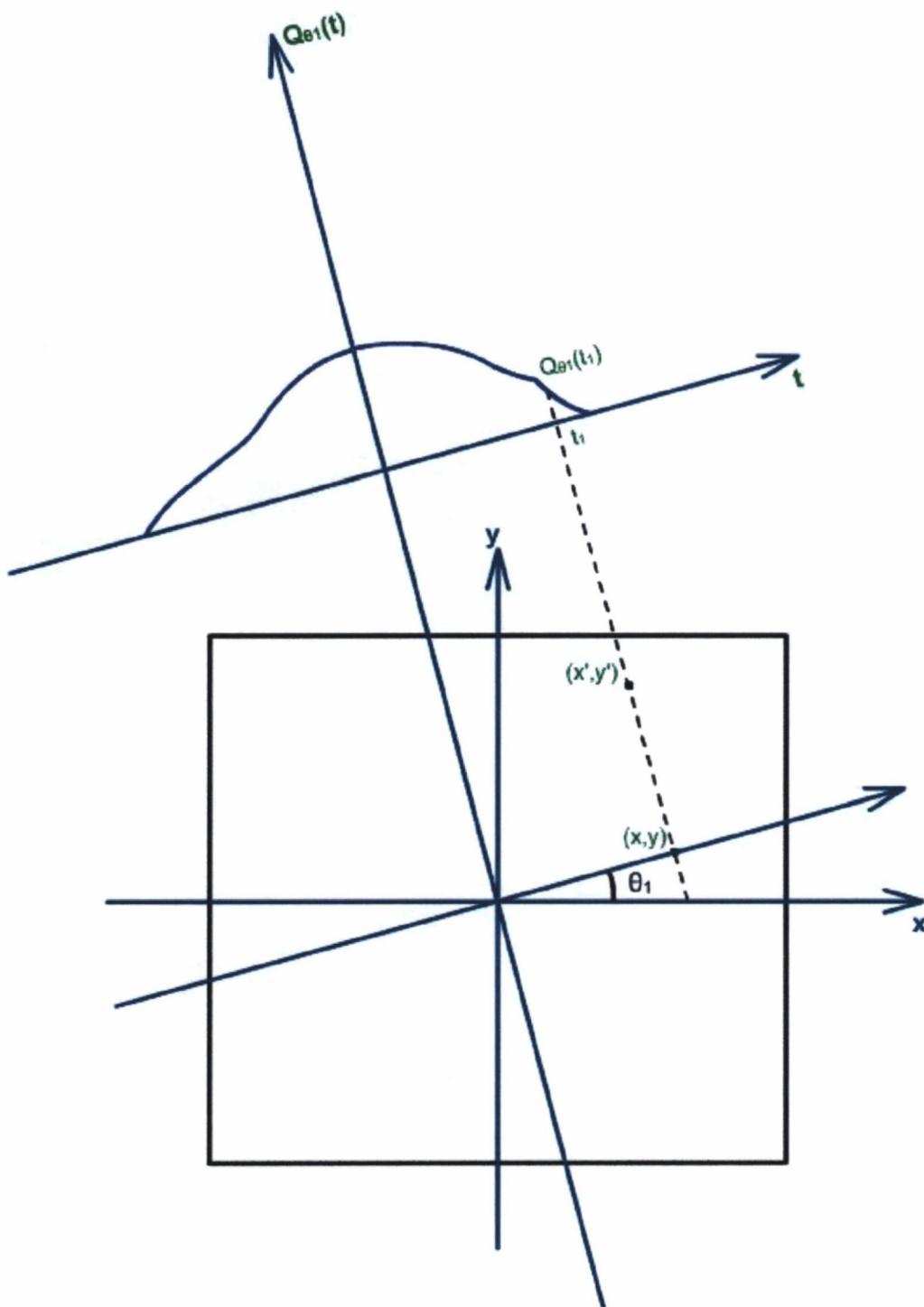


Figura 22 - Retroprojeção para reconstrução de uma imagem.

Para o ângulo θ_i , o valor da projeção filtrada $Q_{\theta_i}(t)$ que contribuirá para o valor final no ponto (x,y) é dado pela coordenada $t_i = x\cos\theta_i + y\sin\theta_i$. Para o mesmo ângulo θ_i e o ponto (x',y') , o valor da coordenada t será o mesmo: $t_i' = x'\cos\theta_i + y'\sin\theta_i = t_i$.

Portanto, o valor da projeção filtrada $Q_{\theta_i}(t_i)$ é retroprojetado na região da imagem original, contribuindo para todos os pontos ao longo da reta $t=t_i$. Todos os valores de $Q_{\theta_i}(t)$ são desta maneira retroprojetados na região da imagem original. Este processo é realizado para todos os ângulos θ_i em que foram adquiridas as projeções P_{θ_i} .

2.3. PROCESSAMENTO DE IMAGENS

O processamento de imagens digitais é uma área da computação que procura transformar e analisar imagens de forma a extrair informações relevantes, realçando e identificando estruturas, padrões e objetos, assim como melhorar a qualidade, de modo a otimizar a visualização. Dentre as inúmeras aplicações do processamento de imagens, alguns exemplos importantes são o sensoriamento remoto, a detecção de defeitos em componentes e o tratamento de imagens médicas.

O processamento de imagens digitais trabalha geralmente com a representação matricial de uma imagem. Neste modelo, cada elemento da matriz, denominado pixel (do inglês *picture element*), é identificado por suas coordenadas x e y [36, 37]. A Figura 23 apresenta a representação em forma de matriz de uma imagem de tamanho 10×10 .

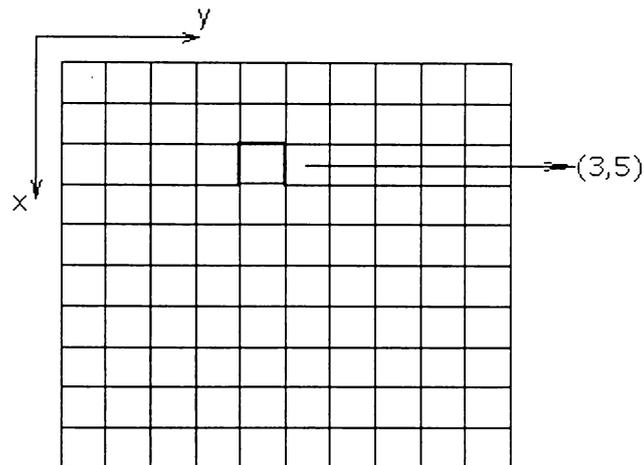


Figura 23 - Representação matricial de uma imagem.

Em uma imagem monocromática, o valor $f(x,y)$ de cada pixel representa a intensidade luminosa do ponto (x,y) . Em uma imagem de 8 bits, por exemplo, o valor mínimo (0) corresponde à intensidade luminosa nula, ou preto total. Por outro lado, o valor máximo (255) representa a intensidade luminosa máxima, ou branco total [36, 37]. A Figura 24 mostra um exemplo de uma imagem monocromática.

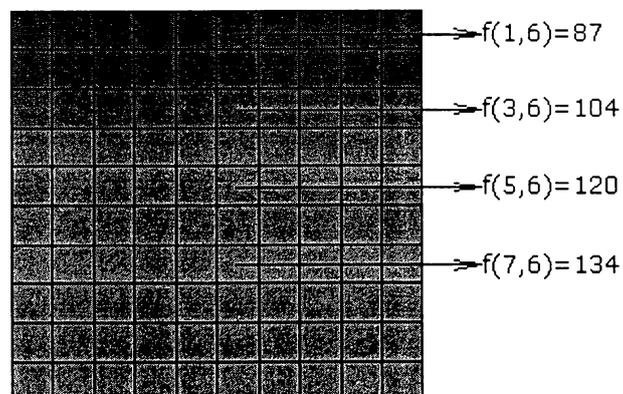


Figura 24 - Exemplo de imagem monocromática.

Deve-se ressaltar, entretanto, que, em tomografia de raios X, uma imagem monocromática representa a distribuição bidimensional do coeficiente de atenuação do material em cada ponto. Portanto, regiões mais claras de uma tomografia representam zonas com coeficientes de atenuação maiores (ou zonas mais densas), e regiões mais escuras correspondem a zonas de menor atenuação (ou zonas menos densas) [1].

2.3.1. Redução de Ruído

Em radiografia e tomografia, o ruído pode degradar significativamente a qualidade de uma imagem. O ruído é geralmente causado pelos seguintes fatores:

- Variação da intensidade da fonte de raios X
- Variação de brilho da imagem de saída do intensificador de imagens
- Variação dos tons de cinza da imagem registrada pela câmera CCD

Uma maneira de reduzir o ruído em uma imagem consiste em tomar a média de um certo número de quadros. Como o ruído é aleatório e com média nula, ao somar os valores dos pixels de uma imagem, o ruído tende a se cancelar [36]. Este método é também conhecido como *overlay*. A Figura 25 e a Figura 26 apresentam um exemplo de redução de ruído por *overlay* de uma radiografia de um isolador polimérico. A Figura 25 mostra uma imagem capturada por uma câmera CCD. A Figura 26 mostra uma imagem resultante da média de 10 quadros.

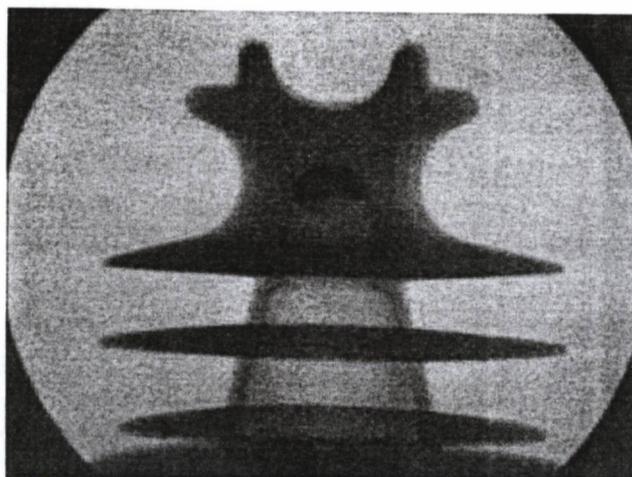


Figura 25 - Radiografia de um isolador polimérico.

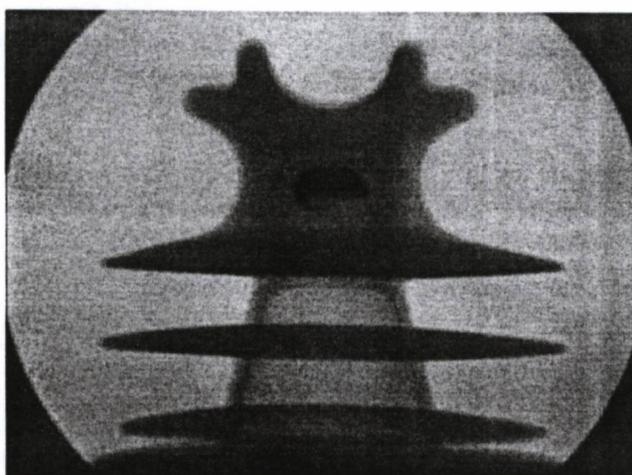


Figura 26 - Redução de ruído por *overlay*.

O método de redução de ruído por *overlay* possui como principais desvantagens os elevados tempo e processamento necessários. Para cada imagem, deve-se coletar um determinado número de quadros (no exemplo acima, 10), para, em seguida, somar todos estes quadros pixel-a-pixel e obter a média resultante.

Uma maneira mais eficiente de reduzir o ruído consiste em filtrar variações indesejadas pela aplicação de máscaras [36, 37, 38, 39]. Os dois tipos de máscaras mais empregadas são a média e a mediana. Para cada pixel de coordenadas (x,y) de uma imagem, ambos os métodos consistem nas seguintes etapas:

- a) Armazenar em um vetor os pixels da vizinhança (ou janela) $N \times N$ com centro em (x,y) .
- b) Substituir o pixel (x,y) pelo parâmetro estatístico desejado (média ou mediana dos pixels da janela).

Na aplicação do filtro da média, o pixel (x,y) é substituído pela média dos pixels vizinhos. Já na aplicação do filtro da mediana, ordena-se o vetor de pixels de forma crescente (ou decrescente), e substitui-se o pixel pelo valor intermediário do vetor ordenado. A Figura 27 e a Figura 28 apresentam, respectivamente, a aplicação dos filtros da média e da mediana à radiografia da Figura 25 (utilizando uma máscara de tamanho 5×5). Pode-se notar uma maior suavização das bordas do isolador na imagem resultante da aplicação do filtro da média.

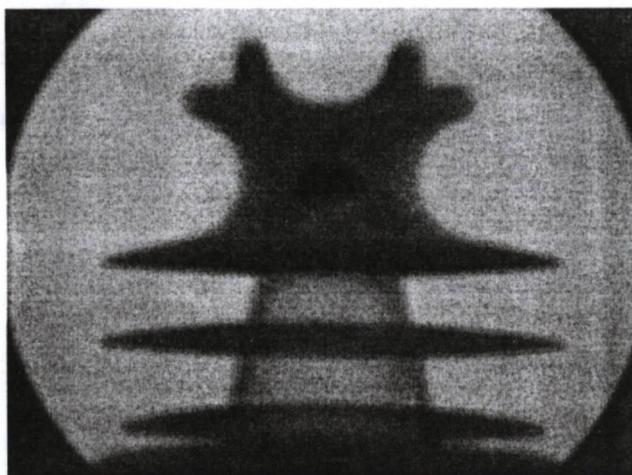


Figura 27 - Exemplo de aplicação do filtro da média de tamanho 5×5 .

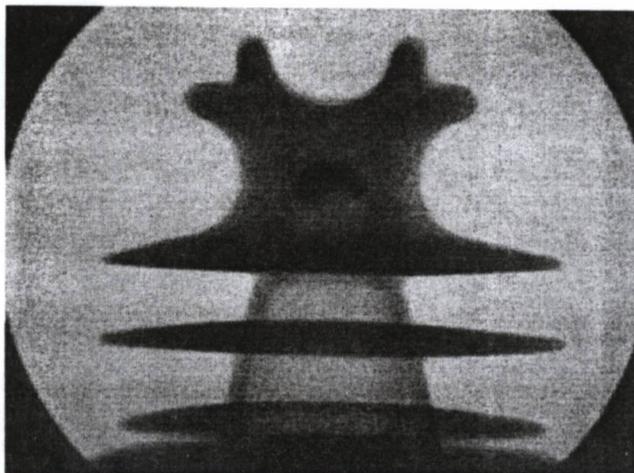


Figura 28 - Exemplo de aplicação do filtro da mediana de tamanho 5 x 5.

A Figura 29 ilustra um exemplo de cálculo da média e da mediana para o pixel central da região apresentada. A janela adotada possui tamanho 3 x 3. A matriz superior apresenta os valores originais dos pixels. Os pixels (3,3), (2,4) e (4,4), correspondentes, respectivamente, aos valores 21, 0 e 2, representam ruído. O vetor da região intermediária apresenta os pixels ordenados em ordem crescente. A matriz inferior direita mostra o resultado do filtro da média para o pixel central; a matriz inferior esquerda apresenta o resultado do filtro da mediana.

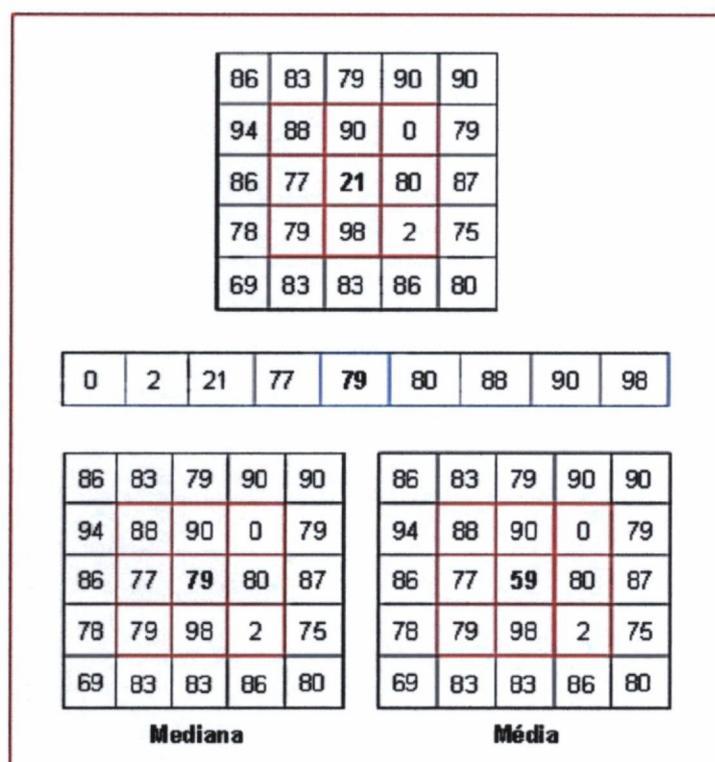


Figura 29 - Exemplo de aplicação dos filtros da média e da mediana.

Desta forma, o efeito dos filtros da média e da mediana é o de remover ruído (como no exemplo acima) e de suavizar a imagem. Entretanto, por descartar os valores extremos em cada vizinhança, a mediana remove ruído de maneira mais eficiente que a média [36, 37, 38, 39]. No exemplo da Figura 29, a média da janela ao redor do pixel central é 59, um valor não tão próximo ao dos pixels vizinhos.

O filtro da mediana também é superior ao filtro da média com relação às bordas presentes nas imagens [36, 37, 38, 39]. Enquanto a mediana preserva as transições rápidas, a média, por considerar os valores da janela no cálculo do valor final de cada pixel, atenua estas transições. Esta característica é ilustrada no exemplo da Figura 30:

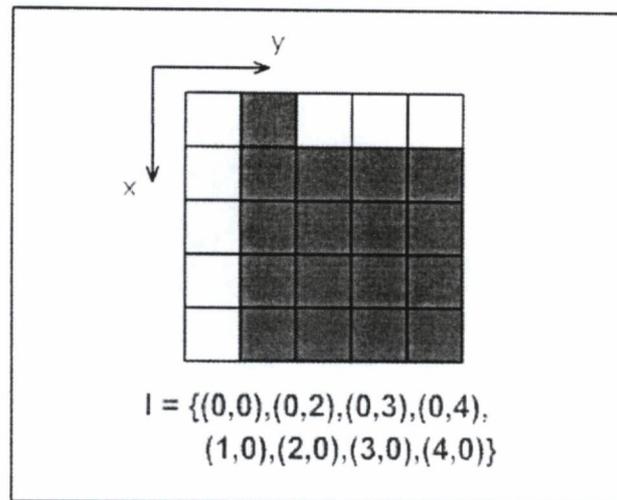


Figura 31 - Exemplo de representação de uma imagem binária em morfologia matemática.

Analogamente, uma imagem monocromática é representada como um conjunto no espaço Z^3 , cujos elementos são as coordenadas de cada pixel e o seu respectivo nível de cinza [36, 37]. A Figura 32 mostra um exemplo de representação de imagem monocromática.

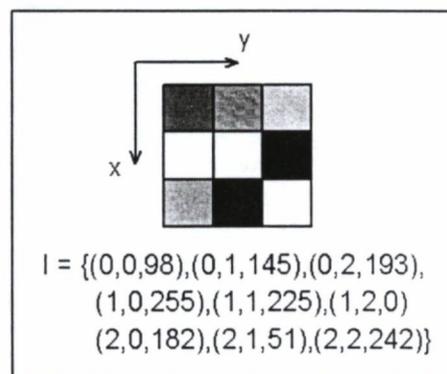


Figura 32 - Exemplo de representação de uma imagem monocromática em morfologia matemática.

A partir destas representações, a morfologia matemática define algumas operações básicas que atuam sobre os pixels de uma imagem: translação, complemento, reflexão e diferença. As operações de união, interseção e translação são utilizadas para definir os operadores de Minkowski (operações de adição e subtração). A combinação da adição e da

subtração de Minkowski, por sua vez, dá origem a todas as outras funções morfológicas: dilatação, erosão, abertura, fechamento, etc [36, 37, 40].

As operações da morfologia matemática consistem na modificação de uma imagem original por um elemento estruturante. Um elemento estruturante, também denominado *kernel*, é um conjunto de pontos discretos referenciados a uma determinada origem. A Figura 33 e a Figura 34 apresentam dois exemplos de elementos estruturantes. A origem de cada elemento corresponde ao ponto dentro de uma circunferência.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | ⓪ | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Figura 33 - Exemplo de elemento estruturante em forma de diamante e raio 3.

| | | |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | ⓪ | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

Figura 34 – Exemplo de elemento estruturante em forma de quadrado e tamanho 3 x 3.

A operação de fechamento morfológico possui como função aumentar as bordas de regiões claras (ou regiões de valor 1, em imagens binárias) e reduzir ou eliminar buracos escuros (ou, em imagens binárias, buracos com valor 0). A equação (20) apresenta a definição da operação: o fechamento é uma dilatação (\oplus) seguida de uma erosão (θ). O fechamento de uma imagem A é controlado pelo elemento estruturante B aplicado – o tamanho e a forma deste elemento alteram o resultado final da operação. O fechamento preserva regiões escuras com formato similar ou com maior tamanho que o elemento estruturante [36, 37, 41].

$$A \bullet B = (A \oplus B) \theta B \quad (20)$$

A Figura 35 apresenta o resultado (b) de uma operação de fechamento aplicada a uma tomografia de uma amostra de madeira (a). A operação utilizou um elemento estruturante em forma de diamante e raio 10.

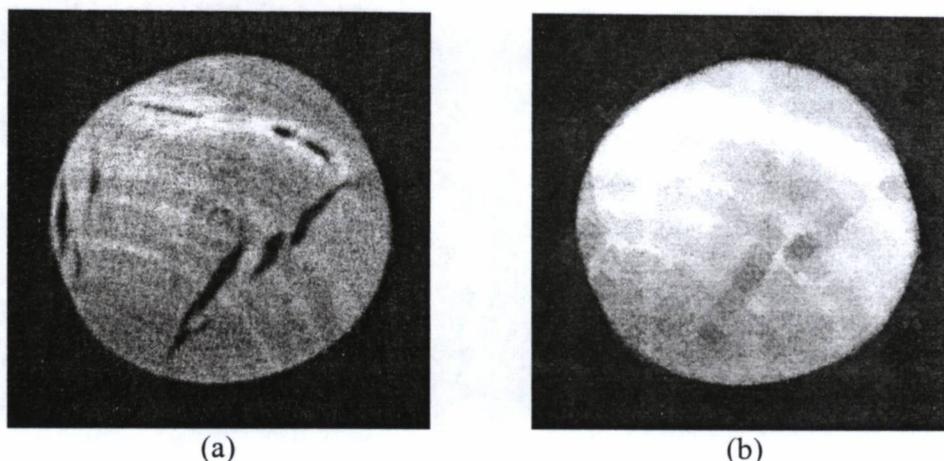


Figura 35 – Exemplo de fechamento de uma tomografia.

Analogamente, como mostra a equação (21), a abertura morfológica consiste em uma erosão seguida de uma dilatação. O resultado da aplicação da abertura a uma imagem é a redução das bordas das regiões claras da imagem e o aumento do tamanho de buracos escuros internos. A abertura preserva regiões claras com formato similar ou com maior tamanho que o elemento estruturante [36, 37, 42].

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (21)$$

2.3.3. Segmentação de Imagens

A segmentação tem como objetivo destacar, distinguir e extrair padrões, regiões ou objetos de imagens [36]. A segmentação produz, geralmente, imagens binárias, nas quais os objetos de interesse são representados por pixels de valor 1 (pixels brancos), enquanto o resto da imagem é representado por pixels de valor 0 (pixels pretos). No entanto, em situações nas quais é necessário destacar mais de um tipo de objeto ou padrão, cada tipo de

objeto é identificado por um nível de cinza diferente, resultando em uma imagem monocromática.

Os principais métodos de segmentação de imagens são a limiarização, a detecção de descontinuidades e a segmentação por regiões. A limiarização baseia-se na classificação dos pixels em relação a um valor de limiar. A detecção de descontinuidades, muito usada para destacar pontos, linhas ou bordas, baseia-se na detecção de variações rápidas dos tons de cinza. A segmentação por regiões busca agrupar ou separar os pixels de uma imagem com base em critérios de similaridade [36, 37].

A limiarização classifica os pixels de uma imagem de acordo com um ou vários valores de limiares. Na limiarização global, eficiente para imagens bem comportadas e com iluminação uniforme, pixels acima do valor de limiar recebem o valor 1, ao passo que pixels abaixo do limiar são representados pelo valor 0 [36, 37, 43]. A Figura 36 mostra um exemplo de aplicação de segmentação por limiarização global.

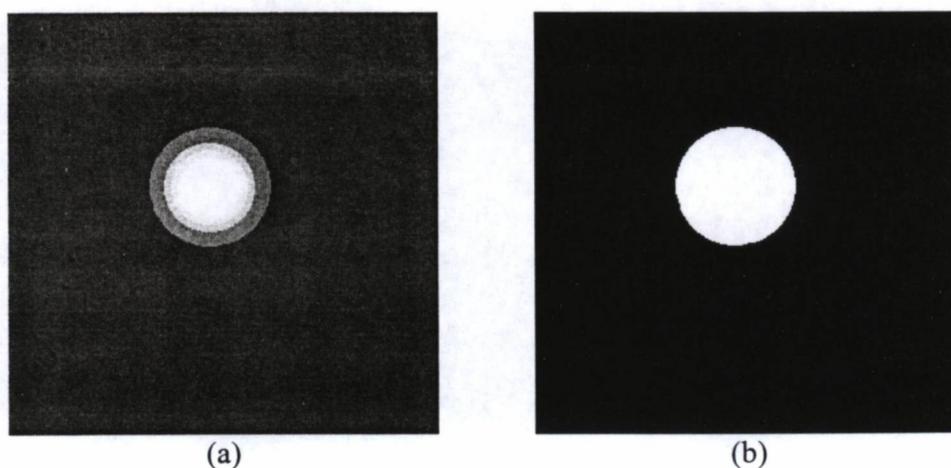


Figura 36 - Exemplo de segmentação global – (a) imagem original; (b) imagem segmentada.

Em imagens com gradientes de iluminação, variações de níveis de cinza nos objetos a serem extraídos ou ruído intenso, a limiarização global mostra limitações [36, 37, 44]. A

Figura 37 apresenta um exemplo de segmentação de uma imagem com gradiente de iluminação e diferença de níveis de cinza dos objetos.

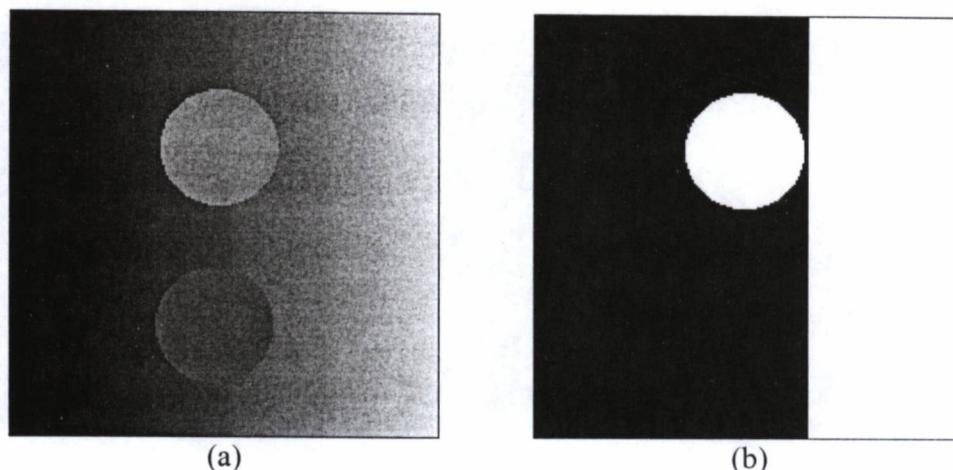


Figura 37 - Exemplo de limitação da segmentação global: (a) imagem original; (b) imagem segmentada.

Nestas situações, a limiarização adaptativa, que adota limiares diferentes para cada ponto da imagem, pode trazer melhores resultados. A implementação mais comum da limiarização adaptativa consiste em aplicar uma máscara a cada pixel da imagem e calcular o limiar local como sendo um parâmetro estatístico dos pixels pertencentes à vizinhança coberta pela máscara. Exemplos de parâmetros adotados são a média, a mediana, o mínimo e o máximo [36, 37, 44].

Uma maneira de tornar a limiarização mais eficiente consiste em aplicar técnicas de realce à imagem antes de realizar a binarização (ou multi-limiarização). Exemplos de técnicas de realce de imagem são transformações da escala de cinza, filtragem no domínio do espaço e da frequência e operações de morfologia matemática.

Dois operadores morfológicos muito úteis para o realce de uma imagem antes da segmentação são o fechamento e a abertura *top-hat* [45]. O fechamento *top-hat*, também conhecido como filtro *bottom-hat*, possui como finalidade destacar regiões com baixos

níveis de cinza. A implementação deste operador ($\hat{\bullet}$) consiste em subtrair a imagem original de seu fechamento (operador \bullet), como mostra a equação (22) [45, 46]:

$$I\hat{\bullet}S = I\bullet S - I \quad (22)$$

A Figura 38 mostra uma tomografia de uma amostra de madeira (a), seu fechamento com um elemento estruturante em forma de diamante e raio 10 (b), e o fechamento *top-hat*, resultante da subtração da imagem original da imagem produzida pelo fechamento (c).

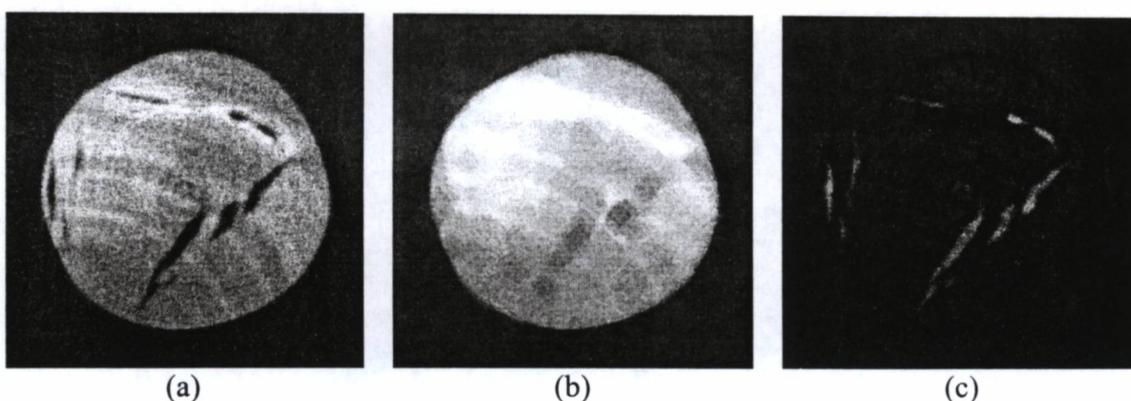


Figura 38 – Exemplo de aplicação do fechamento *top-hat* a uma tomografia.

A abertura *top-hat*, também denominada filtro *top-hat*, possui finalidade contrária à do filtro *bottom-hat*: destacar regiões com altos níveis de cinza. Este operador ($\hat{\circ}$) consiste em subtrair da imagem inicial a sua abertura (operador \circ), como mostra a equação (23) [36, 45, 47]:

$$I\hat{\circ}S = I - I\circ S \quad (23)$$

2.4. TOMOGRAFIA DE MADEIRA

A tomografia de raios X pode ser empregada para visualizar e analisar a estrutura interna de árvores (tanto em amostras cortadas quanto em espécimes vivos). Vários trabalhos demonstraram a aplicação da técnica. Onoe *et al.* desenvolveram um tomógrafo de raios X portátil para análise não destrutiva de árvores, postes de madeira, estátuas,

colunas e outras estruturas no campo [48]. O tomógrafo desenvolvido, composto por uma fonte de raios X com tensão variável de 40 a 120 kV e por três cintiladores de NaI, foi aplicado a um poste de abeto Douglas e a árvores de cedro japonês, pinho vermelho, pinho negro, cipreste japonês e bordo, entre outros. As tomografias permitiram visualizar os anéis de crescimento das árvores. Além de revelar a idade de uma árvore, os anéis de crescimento podem indicar mudanças climáticas anormais e auxiliar o estudo do processo de crescimento e dos efeitos causados por poluentes. Outra aplicação desta técnica é a análise de mudanças diárias ou sazonais da distribuição de água na seção transversal de uma árvore. O tomógrafo permitiu ainda visualizar regiões de apodrecimento avançado e rachaduras. A partir da tomografia do cedro japonês, os autores demonstraram a relação linear entre o coeficiente de absorção de raios X e o conteúdo de água.

Utilizando um tomógrafo clínico Siemens modelo Somatron Plus, Fromm *et al.* estudaram a distribuição espacial da densidade e do conteúdo de água em amostras cilíndricas de 5 cm de altura, retiradas do tronco e de galhos de carvalho e de pino a diversas alturas [49]. As imagens reconstruídas apresentaram os anéis de crescimento e as regiões do cerne e do alburno, com resolução espacial de $0,1225 \text{ mm}^3$. Para determinar a concentração de água, cada amostra foi escaneada duas vezes – antes e após um processo de secagem. Desta forma, o conteúdo de água pôde ser determinado subtraindo as imagens reconstruídas antes e após a secagem.

Gupta *et al.* propuseram um novo método de tomografia tangencial para aplicação em toras de madeiras [50]. Um conjunto linear de detectores é posicionado de maneira paralela ao eixo de rotação do objeto. Um feixe de raios X em forma de leque é aplicado ao corpo de madeira, estendendo-se ao longo do seu eixo de rotação. A tora de madeira é simultaneamente rotacionada em volta do seu eixo e transladada em uma direção normal ao

feixe de raios X. O tomógrafo, composto por um conjunto de 128 detectores e por uma fonte de raios X de 300 kV, permite varrer toras de até 15 polegadas de diâmetro e 2 pés de comprimento. Os autores apresentaram as seguintes vantagens para o método proposto: (a) aquisição simultânea de dados referentes a um volume do objeto, permitindo a reconstrução de várias fatias; (b) como a maioria das fatias são geradas a partir de dados coletados por apenas um detector, as imagens reconstruídas estão menos sujeitas a ruído e variações entre detectores; (c) movimentos mecânicos simples; (d) os dados adquiridos estendem-se estritamente de um lado da amostra ao outro (nenhum dado é coletado fora do objeto), levando a menores arquivos e reconstruções mais rápidas; (e) um número qualquer de raios e de projeções pode ser obtido alterando a taxa de rotação e de translação do sistema (o número de raios é igual ao número de rotações e o número de projeções é igual ao número de pontos coletados durante uma rotação), possibilitando a resolução geométrica desejada. As limitações apontadas pelos autores são a inexistência atual de algoritmos rápidos e eficientes de reconstrução para varredura tangencial e a espessura fixa de tomografias de seções transversais (devido à largura e ao espaçamento dos detectores).

Rinnhofer *et al.* utilizaram um tomógrafo de raios X de aeroporto para a visualização do interior de toras de madeira em marcenarias, com o objetivo de determinar melhores posições e padrões de corte e obter produtos de maior qualidade e valor [51]. Tomógrafos de aeroporto apresentam as seguintes vantagens: operação contínua, operação sob grandes faixas de temperatura e altos valores de umidade, velocidade de varredura razoável e grande abertura para exame de bagagens. Um programa permitiu as seguintes opções: visualizar as tomografias, girar e inclinar virtualmente a tora, visualizar tábuas virtuais e visualizar os padrões de corte.

Outra aplicação da tomografia de raios X é o estudo da distribuição espacial de raízes de árvores. O pobre desenvolvimento de raízes pode prejudicar o crescimento e a saúde de árvores urbanas, reduzindo suas expectativas de vida de 10 a 20 anos. Pierret *et al.* estudaram amostras de solo arenoso com um tomógrafo médico (General Electric, modelo Pace scanner), com 140 kV e 140 mA e um tempo de exposição de 4 s. As amostras foram colhidas de pontos próximos a duas espécies de árvores – castanheiro e bordo [52].

No Brasil, o CNPDIA (Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária) da Embrapa desenvolveu um minitomógrafo portátil para o estudo de solos e plantas em campo [53]. O tomógrafo, que pode utilizar uma fonte de raios gama ou de raios X, pode ser empregado para a análise de amostras de solo, de plantas e de árvores. Algumas aplicações do tomógrafo são a determinação da densidade no interior das amostras, a determinação do teor de umidade média, o estudo da difusão da água no solo e o estudo da compactação de solos.

2.4.1. Coeficiente de Atenuação de Raios X da Madeira

A Tabela II apresenta os coeficientes de atenuação linear (em cm^{-1}) do ar e de uma espécie de madeira de densidade igual a $0,5 \text{ g/cm}^3$ [54].

Tabela II: Coeficientes de atenuação linear do ar e da madeira (em cm^{-1}).

| Energia (keV) | Ar | Madeira |
|----------------------|-----------|----------------|
| 5 | 0,052 | 15 |
| 10 | 0,0067 | 1,8 |
| 15 | 0,00021 | 0,6 |
| 20 | 0,001 | 0,31 |
| 30 | 0,00046 | 0,2 |
| 40 | 0,00033 | 0,15 |
| 50 | 0,00027 | 0,12 |
| 60 | 0,00023 | 0,11 |
| 80 | 0,00022 | 0,094 |
| 100 | 0,0002 | 0,085 |

2.4.2. Processamento de Tomografias de Madeira

Técnicas de processamento de imagens podem ser utilizadas para detectar objetos em imagens tomográficas. Diversas publicações relatam a aplicação de métodos de filtragem, segmentação, análise e inteligência artificial a tomografias de madeira.

Zhu *et al.* apresentaram um método de filtragem de imagens tomográficas de toras de madeira com o objetivo de remover os anéis de crescimento [55]. A presença dos anéis prejudica o desempenho de um sistema de análise de imagens, causando artefatos na etapa de segmentação. Os anéis de crescimento localizam-se nas altas frequências do espectro das imagens, comportando-se como ruído de alta frequência.

Bhandarkar *et al.* apresentaram um método de detecção de defeitos em toras de madeira por análise computacional de tomografias [56]. O processo consiste em duas etapas: (a) segmentação da imagem e seleção de regiões que possam incluir defeitos, e (b) análise por correlação das regiões selecionadas em fatias vizinhas. Uma imagem de uma seção de madeira é usualmente composta de quatro grupos de níveis de cinza. Do menor ao maior nível de cinza, estes grupos correspondem a: (1) rachaduras, vazios, algumas regiões com apodrecimento e algumas partes de lenho inicial; (2) regiões com apodrecimento, lenho inicial e algumas partes de lenho tardio; (3) lenho tardio e algumas partes de nós; (4) nós e algumas partes de lenho tardio. O algoritmo de segmentação de imagens seleciona o primeiro e o quarto grupo, de forma a localizar apenas rachaduras, vazios e nós. Para eliminar regiões com falsos defeitos, é feita uma análise de parâmetros tridimensionais usando sucessivas fatias. Exemplos de parâmetros tridimensionais são a orientação, o formato e a variação de área da região analisada.

Li *et al.* desenvolveram um sistema de análise de imagens de toras de madeira [57]. O método é composto por 3 processos: (a) uma etapa de pré-processamento, (b) uma etapa de classificação por rede neural e (c) um passo final de pós-processamento. O sistema foi ajustado com duas espécies de carvalho (*Quercus rubra* e *Quercus nigra*). Uma terceira espécie (álamo) foi utilizada para o teste do sistema. O pré-processamento tem como objetivo normalizar os valores de CT (*Computerized Tomography* – Tomografia Computadorizada) para poder aplicar a classificação a diferentes tipos de madeira. A classificação utiliza uma rede neural de propagação para frente (*feed-forward*) multicamada. Para cada pixel da imagem, é tomada uma janela 3 x 3 x 3 ao seu redor. Os valores de CT normalizados desta janela, assim como a distância radial entre o pixel e o centro da imagem, formam a entrada da rede, totalizando 28 neurônios de entrada. A

camada de saída da rede possui 5 neurônios, cada um correspondendo a um tipo de defeito: nó, rachadura, vazio, podridão e casca. O resultado da classificação é dado pelo neurônio de maior valor de saída. Aplicando validação cruzada, várias configurações de camadas intermediárias foram testadas. A melhor rede, com uma camada intermediária com 12 neurônios, apresentou uma exatidão de 94,7 %. Por último, um passo de pós-processamento foi empregado para eliminar falsas regiões classificadas como defeitos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. AMOSTRAS DE MADEIRA

Amostras de pinus (*Pinus taeda*) e eucalipto (*Eucalyptus viminalis*) foram cedidas pelo Departamento de Engenharia Industrial Madeireira da Universidade Federal do Paraná. As amostras 1 a 5 e 7 a 9 possuem formato cilíndrico; a amostra 6 apresenta seção retangular. As amostras contêm os seguintes tipos de defeitos: rachaduras, nós, medula, ataque de fungo e ataque de insetos.

3.2. SISTEMA TOMOGRÁFICO CT2000

O sistema tomográfico CT2000 do Laboratório de Instrumentação para Diagnóstico de Materiais do LACTEC permite estudar o interior de objetos de modo não-destrutivo, possibilitando a visualização de sua estrutura interna e a detecção de possíveis defeitos. Graças ao seu detector planar, o sistema, apresentado na Figura 39, pode ser utilizado tanto no modo radiografia quanto no modo tomografia.



Figura 39 - Sistema de tomografia industrial Gilardoni CT2000.

O sistema CT2000 é composto pelos seguintes elementos:

- Gerador de raios X
 - Minifoco de $0,4 \times 0,4 \text{ mm}^2$
 - Alvo de tungstênio
 - Faixa de tensão: 10 a 160 kV
 - Faixa de corrente: 0 a 10 mA
 - Potência máxima: 640 W

- Intensificador de imagens

Este dispositivo é responsável pela conversão dos raios X em luz visível. Uma camada de fósforo na entrada do intensificador absorve os fótons de raios X e emite parte da energia absorvida na forma de fótons de luz visível. O brilho da imagem é aumentado por um sistema de eletrodos de focalização. Um sistema eletrônico permite ainda magnificar a imagem de saída. Três opções de magnificação (*zoom*) existem: 9", 6" e 4" (em ordem crescente de *zoom*).

- Câmera CCD

Uma câmera CCD Samsung BW-2302, mostrada na Figura 40, é acoplada à saída do intensificador de imagens.



Figura 40 - Câmera CCD Samsung BW-2302.

- Sistema de rotação com microposicionamento

- Unidade de controle

A unidade de controle, apresentada na Figura 41, comanda o gerador de raios X, permitindo o ajuste e a visualização de parâmetros como tensão e corrente do tubo e tempo de aplicação. A unidade de controle também possibilita escolher entre diversos modos de operação.



Figura 41 - Unidade de controle do gerador de raios X.

- Micro-computador

O sistema e os processos de radiografia e tomografia são comandados por um micro-computador. Um programa dedicado controla a rotação e a posição da mesa rotatória, adquire e salva os quadros da câmera CCD, e é responsável pelo processo de reconstrução e visualização de imagens.

3.3. PROGRAMA DE CONTROLE DO TOMÓGRAFO

Para o controle do sistema tomográfico, foi desenvolvido um programa computacional (*software*) utilizando a linguagem de programação Borland C++ Builder 4. O *software* é responsável pelo controle da mesa rotativa, pela aquisição dos dados e pela reconstrução das imagens. A janela principal do programa desenvolvido pode ser visualizada na Figura 42.

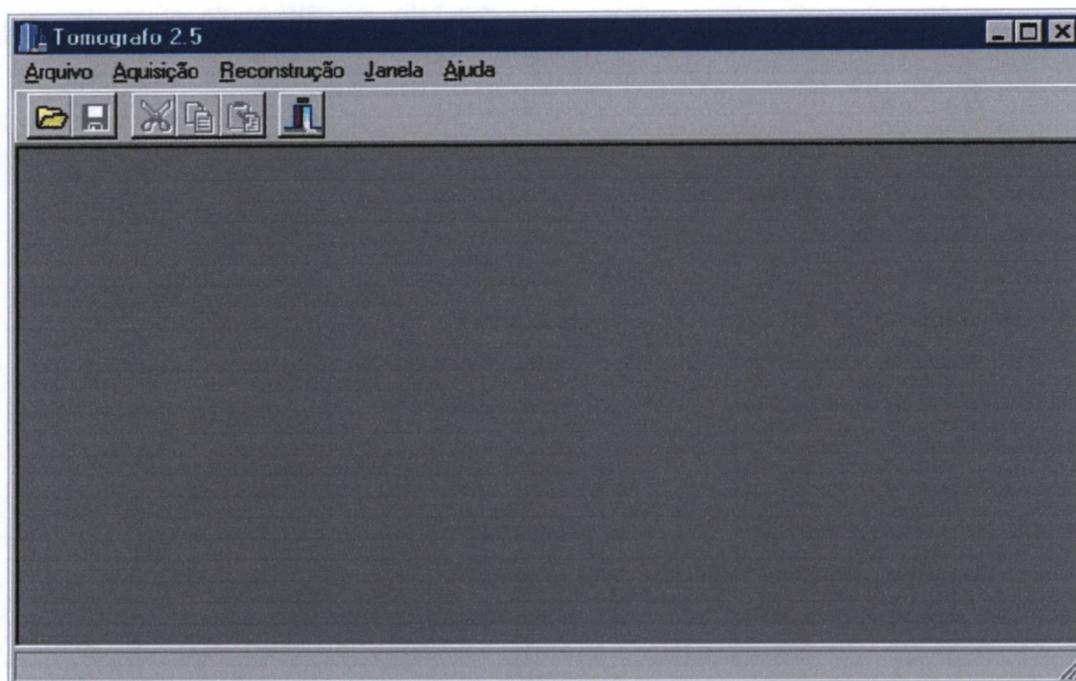


Figura 42 - Janela principal do programa de tomografia.

Para a aquisição das imagens provenientes da placa de captura de vídeo, foi utilizado o componente de captura de vídeo Tvideo, desenvolvido por J. Huebler [58].

A Figura 43 apresenta o fluxograma das etapas do processo de tomografia:

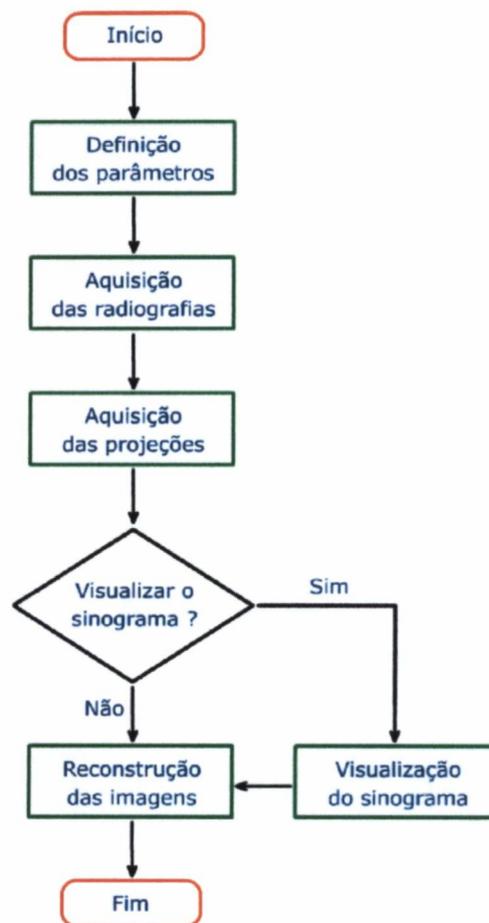


Figura 43 - Fluxograma do processo de tomografia.

3.3.1. Definição dos Parâmetros

Abre-se a janela de aquisição de quadros (menu **Aquisição** ⇒ **Quadros**), apresentada na Figura 44, e ajustam-se os seguintes parâmetros:

- Tensão catodo-anodo do tubo de raios X
- Corrente do tubo de raios X
- Incremento angular

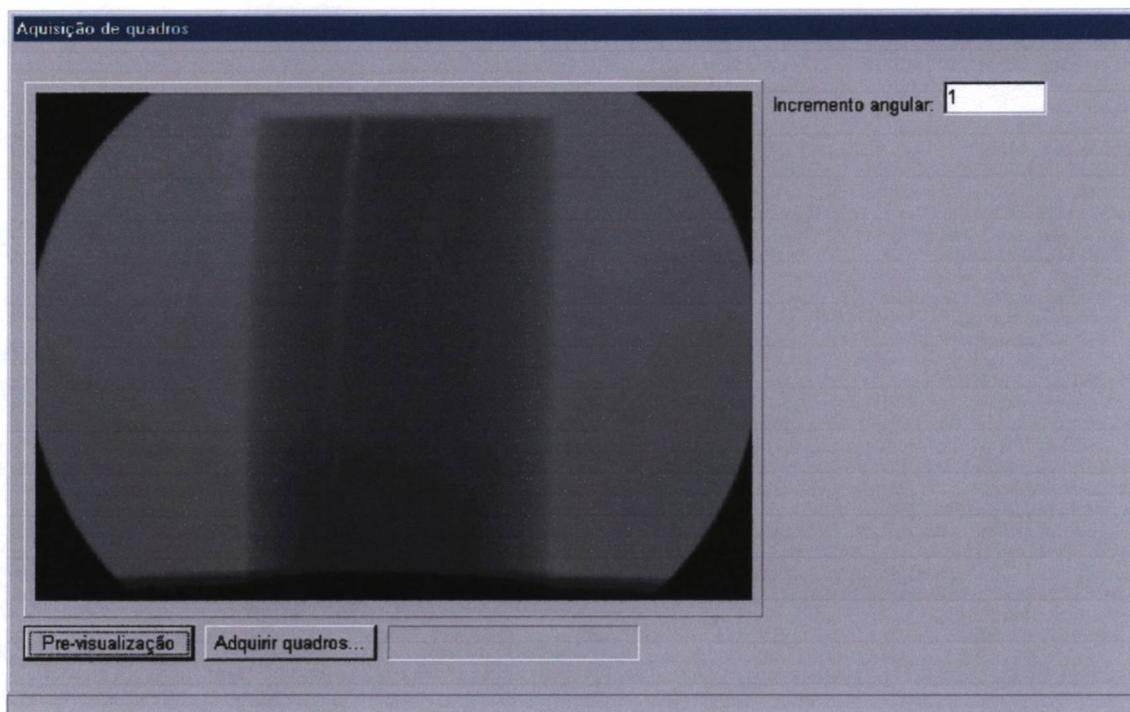


Figura 44 - Janela de aquisição de quadros.

A tensão e a corrente do tubo de raios X são ajustadas na unidade de controle do gerador de raios X de maneira a obter uma pre-visualização satisfatória.

Antes de dar início à rotação do objeto, o incremento angular é ajustado. O incremento angular determina o número de projeções ou de radiografias coletadas ao longo de 180° . Assim, um incremento angular de 2° , por exemplo, resulta na aquisição de 90 radiografias. Quanto menor o incremento, maior a qualidade das tomografias. No entanto, maior serão a quantidade de dados coletados e os tempos de aquisição e reconstrução de imagens. Por outro lado, incrementos maiores resultam em baixos tempos de aquisição e reconstrução, mas também em imagens com menor qualidade e resolução.

3.3.2. Aquisição das Radiografias

Nesta etapa, inicia-se a rotação do objeto e a aquisição das radiografias (botão **Adquirir quadros**). Para o armazenamento dos quadros, fornece-se um nome-base. Após a coleta do primeiro quadro, o programa de controle gira a mesa do incremento angular especificado. Este passo é repetido sucessivas vezes até atingir um ângulo final de 180°. As radiografias adquiridas são armazenadas no formato bmp (*bitmap*) ou jpeg (*Joint Photographic Experts Group*) utilizando o nome-base definido inicialmente. Assim, para o nome-base “quadro” e um incremento angular igual a 1°, por exemplo, serão coletadas as radiografias quadro1.bmp a quadro180.bmp (ou quadro1.jpg a quadro180.jpg).

3.3.3. Aquisição das Projeções

Este passo é realizado na janela **Aquisição de projeções** (menu **Aquisição** ⇒ **Projeções**), que pode ser visualizada na Figura 45.

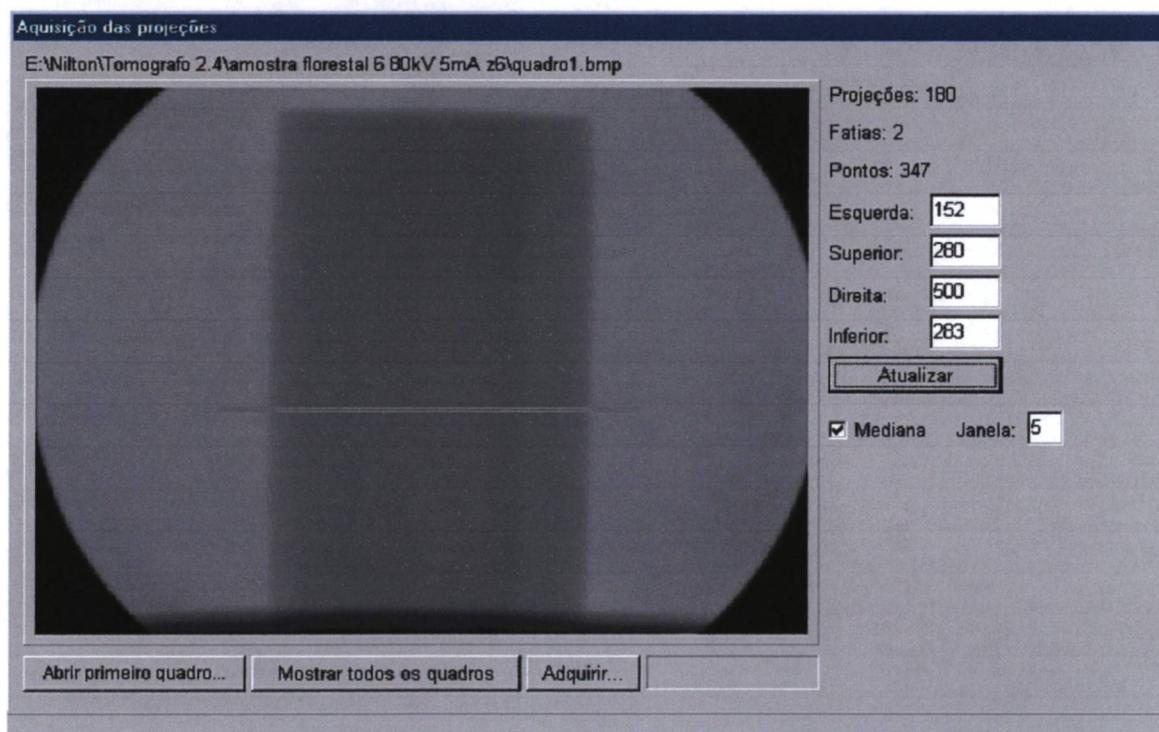


Figura 45 - Janela de aquisição de projeções.

Em primeiro lugar, abre-se a primeira radiografia com o botão **Abrir primeiro quadro**. Ao abrir o primeiro quadro, o programa verifica automaticamente o número de quadros existentes no diretório e atualiza o campo **Projeções**. O botão **Mostrar todos os quadros** permite visualizar todas as radiografias armazenadas, apresentando o objeto sendo rotacionado. A seleção da(s) fatia(s) pode ser realizada utilizando o *mouse* ou digitando as coordenadas esquerda, superior, direita e inferior da seleção. Os campos **Fatias** e **Pontos** apresentam o número de fatias e de pontos contidos na área selecionada.

Em seguida, clica-se no botão **Adquirir** para iniciar a coleta das projeções. Neste processo, o *software* adquire e armazena os pixels contidos na região selecionada de todas as radiografias. Os dados do arquivo resultante possuem o formato de uma coluna, na qual as três primeiras linhas representam, respectivamente, o número de projeções ou radiografias, o número de pontos por projeção e o número de fatias. Estes dados são armazenados para uso posterior pelas rotinas de leitura dos arquivos contendo dados.

3.3.4. Redução de Ruído

Com o objetivo de reduzir o ruído nos quadros, a opção **Mediana** da janela de aquisição das projeções permite aplicar o filtro da mediana às imagens radiográficas antes da aquisição dos pixels. O tamanho da janela do filtro é definido no campo **Janela**.

3.3.5. Visualização do Sinograma

Esta etapa é opcional e possibilita visualizar o sinograma das projeções coletadas. A Figura 46 apresenta a janela **Sinograma** (menu **Aquisição** ⇒ **Sinograma**). Além de permitir a visualização do sinograma de projeções previamente coletadas, esta janela torna

possível verificar a centralização das projeções e eventuais causas de artefatos de reconstrução.

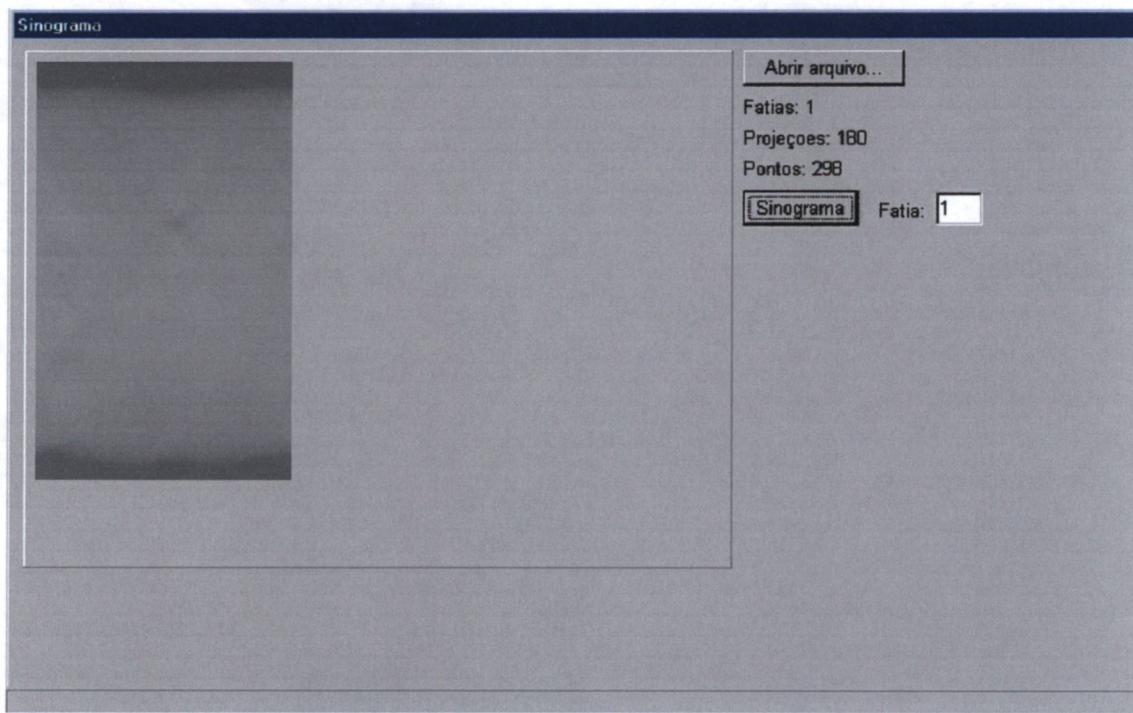


Figura 46 - Janela de visualização de sinograma.

3.3.6. Reconstrução de Imagens

A última etapa do processo tomográfico consiste na reconstrução das imagens a partir das projeções coletadas. Esta fase é realizada na janela **Reconstrução de imagens** (menu **Reconstrução** ⇒ **2D**), apresentada na Figura 47:

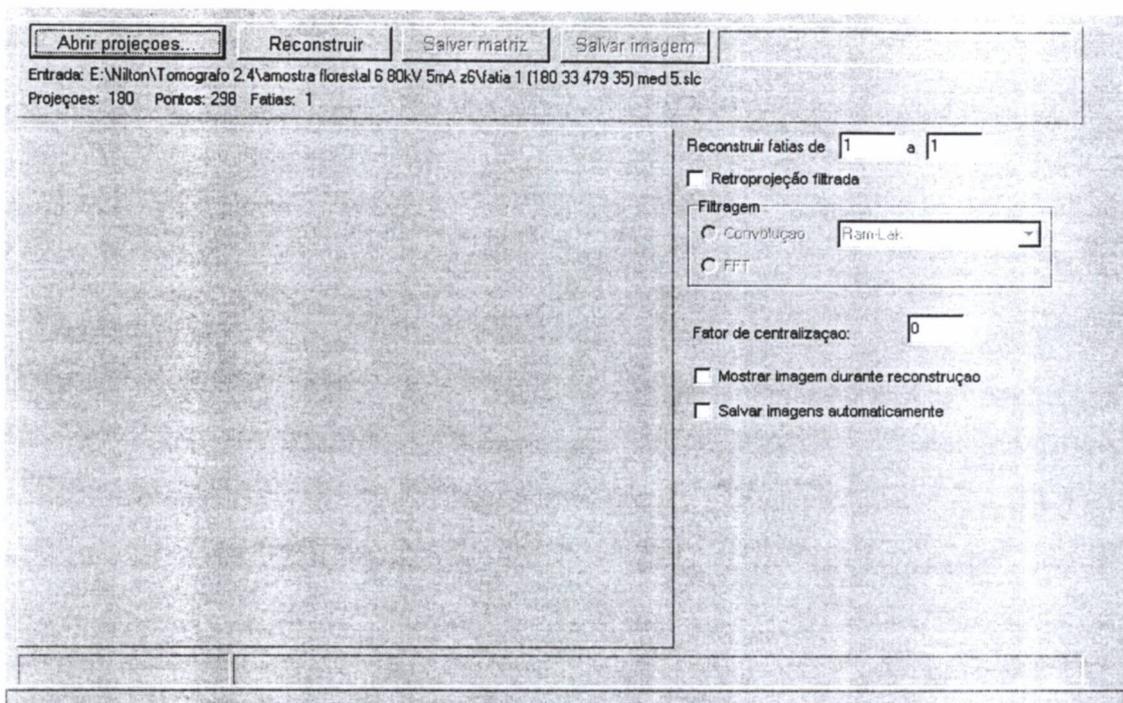


Figura 47 - Janela de reconstrução de imagens.

Nesta janela do programa, deve-se abrir um arquivo com os dados coletados das projeções anteriormente. Ao abrir o arquivo, o programa lê automaticamente o número de fatias, o número de projeções por fatia e o número de pontos por projeção, atualizando os campos **Projeções**, **Pontos** e **Fatias**. Para arquivos com mais de uma fatia, é possível reconstruir uma fatia em particular ou reconstruir todas as fatias em seqüência.

O método de reconstrução implementado neste programa é o da retroprojeção filtrada para feixe paralelo. Levando em conta que as amostras foram sempre posicionadas distantes da fonte de raios X e no centro do feixe, o feixe de raios X em leque foi considerado aproximadamente paralelo.

Para filtragem das projeções, é necessário marcar a opção **Retroprojeção filtrada**, selecionar uma das opções do campo **Filtragem** (Convolução ou FFT) e o filtro a ser aplicado (Ram-Lak, Shepp-Logan, Hamming ou Hanning).

Caso o centro das projeções não coincida com o centro de rotação do objeto, deve-se alterar o valor do campo **Fator de centralização** para eliminar o efeito cometa.

A opção **Mostrar imagem durante reconstrução** permite visualizar o progresso da reconstrução. Entretanto, esta visualização torna o processo de reconstrução mais demorado devido à necessidade de apresentar a imagem resultante a cada passo.

Na reconstrução de várias fatias, é necessário marcar a opção **Salvar imagens automaticamente**, de forma a armazenar a reconstrução de cada fatia antes de reconstruir a próxima.

Depois de ajustar estes parâmetros, inicia-se a reconstrução clicando no botão **Reconstruir**. O andamento da reconstrução pode ser acompanhado pela barra de progresso, situada na parte superior direita, e pela barra de *status*, situada na parte inferior da janela. Ao fim da reconstrução, é realizada uma normalização dos dados entre os valores 0 e 255, de modo a apresentar uma imagem monocromática de 8 bits da fatia. A Figura 48 apresenta a janela de reconstrução de imagens após o fim da reconstrução de uma fatia:

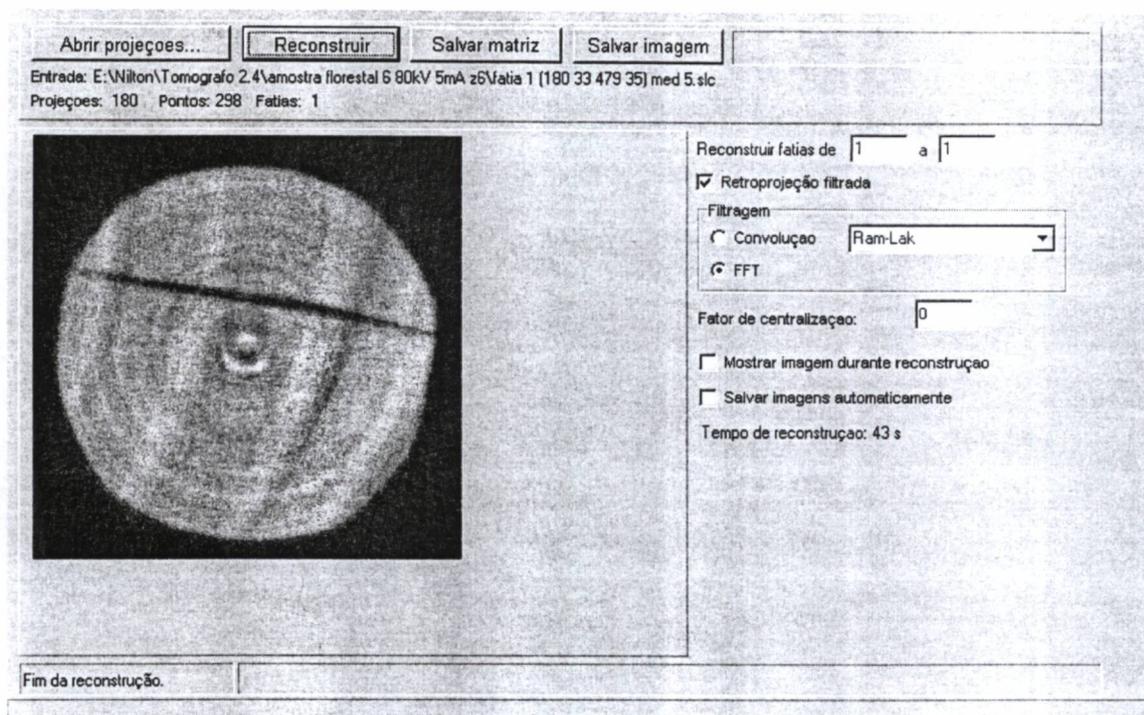


Figura 48 - Fim da reconstrução de uma fatia.

Após a apresentação da reconstrução da fatia, é possível salvar a imagem em formato bmp ou jpeg (botão **Salvar imagem**) ou salvar a matriz não-normalizada em formato texto (botão **Salvar matriz**).

3.4. PROGRAMA DE PROCESSAMENTO DE TOMOGRAFIAS

Com o intuito de aplicar técnicas de processamento de imagens às tomografias geradas pelo programa de controle do tomógrafo, foi desenvolvido um programa computacional utilizando o *software* Matlab, versão 6.5 [59]. O programa, criado com a ferramenta de desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário *guide*, baseia-se na caixa de ferramentas (*toolbox*) de processamento de imagens do Matlab, versão 3.2.

A Figura 49 mostra a janela do programa após a abertura de uma imagem (menu **Arquivo** ⇒ **Abrir arquivo**). Na região esquerda visualiza-se a imagem à qual são

aplicadas as operações desejadas. As funções de processamento de imagens são aplicadas mediante o uso dos controles da interface gráfica (menus, botões, etc.). O resultado destas operações é então mostrado na região direita da janela. Para aplicar uma seqüência de funções a uma mesma imagem, deve-se transferir a imagem resultante para a região esquerda da janela. Esta transferência é realizada pelo botão <<. A Figura 50 apresenta um exemplo de uma limiarização de uma tomografia.

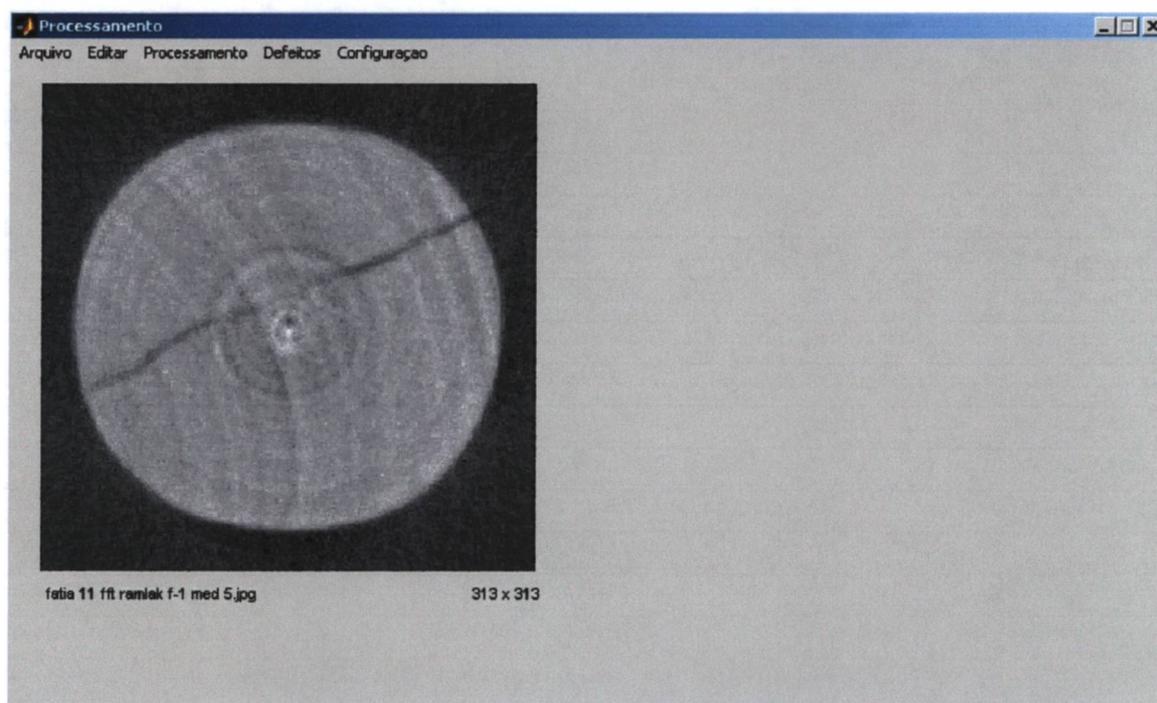


Figura 49 - Janela do programa de processamento após abertura de uma tomografia.

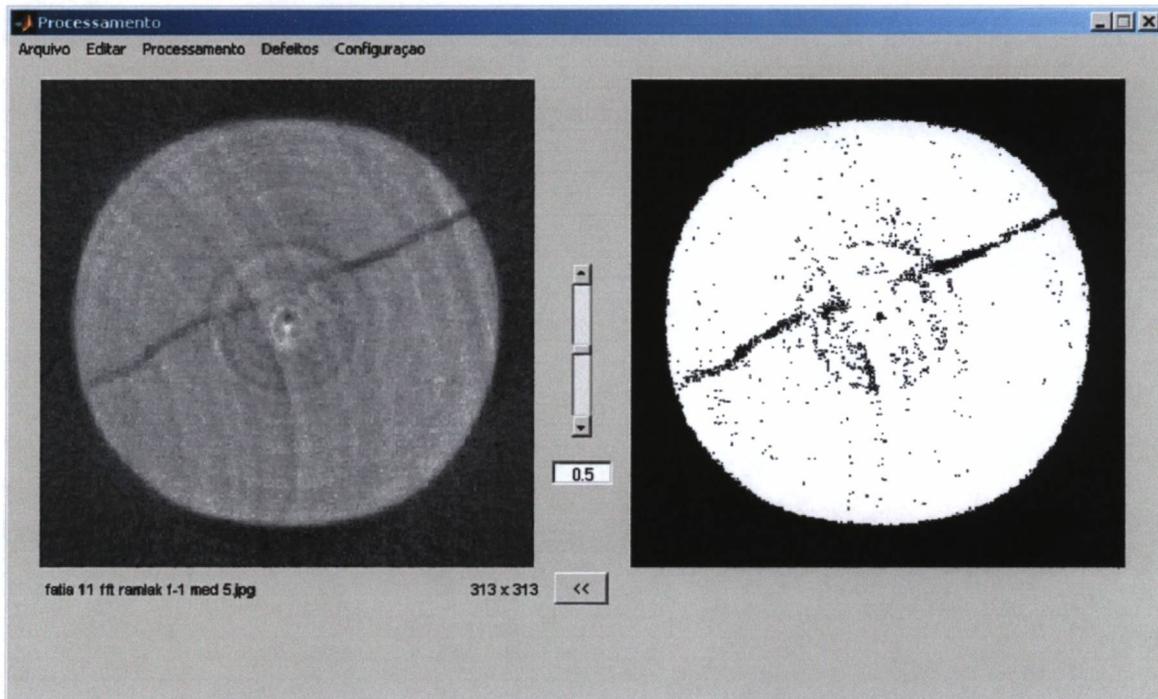


Figura 50 - Janela do programa de processamento após limiarização de uma tomografia.

As seguintes operações de processamento de imagens foram implementadas e são acessíveis a partir do menu **Processamento**:

- Limiarização
 - Limiarização global
 - Limiarização adaptativa por média local
- Morfologia
 - Dilatação
 - Erosão
 - Abertura
 - Fechamento
 - Fechamento *top-hat*
 - Abertura *top-hat*
 - Eliminação de pontos brancos
 - Eliminação de pontos pretos
 - Preenchimento
- Seleção de regiões por crescimento

3.4.1. Segmentação de Defeitos

Utilizando o programa de processamento de tomografias, desenvolveu-se uma metodologia de segmentação de defeitos em imagens tomográficas de amostras de madeira. O objetivo da segmentação é selecionar e destacar as regiões pertencentes a rachaduras e ataques causados por fungos e insetos, tornando possível a avaliação dos tamanhos destes defeitos e do seu impacto na estrutura física da amostra. A segmentação requer a intervenção de um usuário capaz de observar e analisar as tomografias, reconhecer os defeitos e distingui-los de outras regiões da seção transversal.

O procedimento adotado para a segmentação das tomografias consiste na seguinte seqüência de operações:

- Fechamento *top-hat*
- Limiarização global
- Abertura

A operação de fechamento *top-hat* tem como função destacar as áreas mais escuras da imagem, ou seja, as áreas relativas a defeitos. A imagem resultante desta etapa apresenta os defeitos como regiões mais claras, e o resto da amostra como zonas mais escuras. A Figura 51 e a Figura 52 apresentam, respectivamente, uma tomografia de uma amostra com rachaduras e a imagem gerada pelo processo de fechamento *top-hat* com um elemento estruturante em forma de diamante e raio igual a 13.

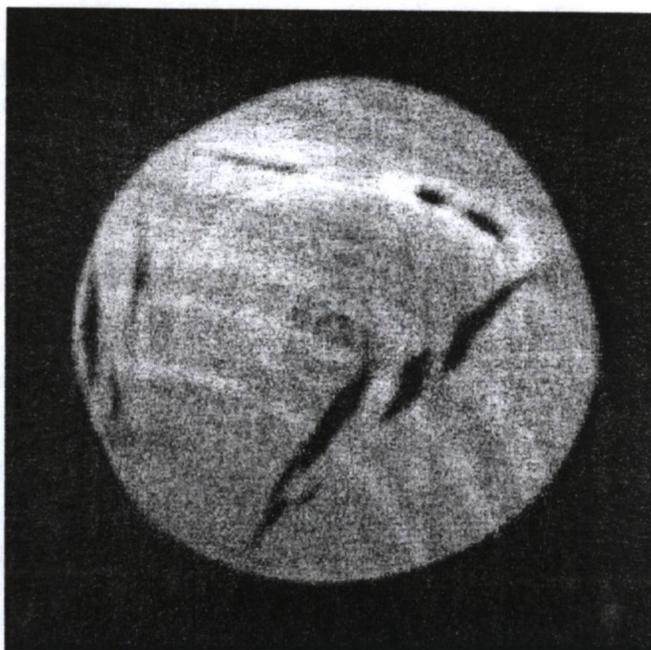


Figura 51 - Tomografia de uma amostra com rachaduras.



Figura 52 - Imagem resultante da operação de fechamento *top-hat*.

A limiarização global binariza a imagem resultante do fechamento *top-hat* de forma a atribuir um valor 1 às regiões de defeitos, e um valor 0 ao restante da amostra. A Figura 53 mostra a limiarização da imagem da Figura 52 utilizando um valor de limiar igual a 0,23

(o programa Matlab usa uma escala de 0 a 1, na qual 0 corresponde à cor preta, e 1 corresponde ao branco máximo).



Figura 53 - Imagem resultante da operação de limiarização global.

Por último, a operação morfológica de abertura elimina pequenos grupos isolados de pixels de valor 1 indesejáveis resultantes da limiarização global. Para utilização posterior, armazena-se a imagem final da segmentação (menu **Defeitos** ⇒ **Armazenar** ⇒ **Defeitos**). A Figura 54 apresenta a imagem produzida pela operação de abertura morfológica, utilizando um elemento estruturante em forma de disco com raio 1.



Figura 54 - Imagem resultante da abertura morfológica.

3.4.2. Determinação da Redução da Área

A partir da imagem resultante da segmentação, é possível avaliar a redução da área da amostra causada pelos defeitos. Para esta determinação, realizam-se os passos abaixo:

- Limiarização global da tomografia inicial
- Preenchimento
- Subtração dos defeitos
- Cálculo das áreas

As etapas de limiarização global e preenchimento são aplicadas de modo a obter uma imagem binária com toda a região da amostra representada por pixels de valor 1, e o restante da imagem representado por pixels de valor 0. A Figura 55 mostra a imagem resultante deste passo, utilizando um limiar igual a 0,4.

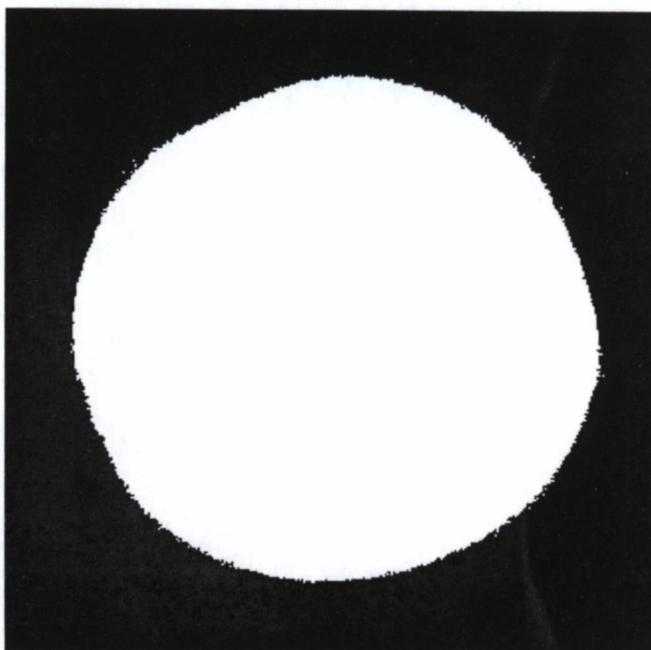


Figura 55 – Resultado da limiarização da tomografia inicial seguida de preenchimento.

Após armazenar a imagem resultante (menu **Defeitos** \Rightarrow **Armazenar** \Rightarrow **Área total**), subtrai-se a imagem dos defeitos segmentados (armazenada anteriormente) desta imagem, obtendo uma imagem binária com pixels 1 representando zonas de madeira e pixels 0 representando os defeitos e a região ao redor da amostra. A Figura 56 apresenta a imagem gerada pela subtração da imagem da Figura 54 da imagem da Figura 55.



Figura 56 - Subtração da imagem dos defeitos da imagem da amostra preenchida.

Ao fim deste processo, a imagem final é armazenada (menu **Defeitos** ⇒ **Armazenar** ⇒ **Área com defeitos**) e utilizada para calcular a área efetiva da amostra (ou seja, a área de madeira sem defeitos) e a redução percentual de área em relação à área total da amostra. Para a determinação da área efetiva da amostra, é necessário conhecer a relação mm^2/pixel da tomografia inicial. Este fator é fornecido ao programa de processamento através da janela de calibração (menu **Configuração** ⇒ **Calibração**).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CORPO DE PROVA DE ACRÍLICO

Para testar o algoritmo de reconstrução e determinar a resolução em contraste do tomógrafo, foi confeccionado um corpo de prova (*phantom*) de acrílico com furos de diversos diâmetros. A Figura 57 mostra duas fotografias do corpo de prova:

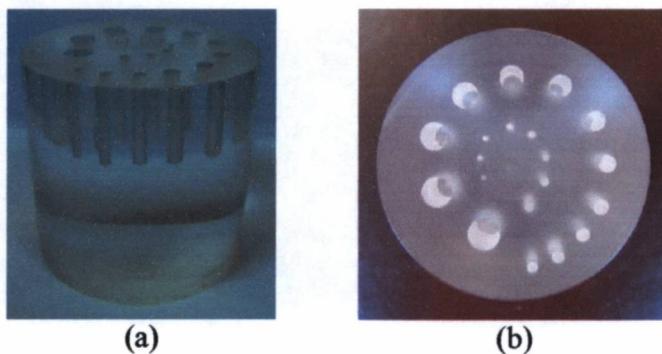


Figura 57 - *Phantom* para determinação da resolução: (a) vista lateral; (b) vista superior.

Os diâmetros dos furos do *phantom* foram medidos com um micrômetro digital Mitutoyo modelo 293-801 e estão apresentados na Tabela III:

Tabela III - Diâmetros dos furos do *phantom* de acrílico.

| Furo | Diâmetro (mm) |
|------|------------------------|
| 1 | $D_1 = 5,93$ |
| 2 | $D_2 = 5,53$ |
| 3 | $D_3 = 5,11$ |
| 4 | $D_4 = 4,73$ |
| 5 | $D_5 = 4,34$ |
| 6 | $D_6 = 3,94$ |
| 7 | $D_7 = 3,54$ |
| 8 | $D_8 = 3,15$ |
| 9 | $D_9 = 2,76$ |
| 10 | $D_{10} = 2,49$ |
| 11 | $D_{11} = 2,00$ |
| 12 | $D_{12} = 1,58$ |
| 13 | $D_{13} = 1,49$ |
| 14 | $D_{14} = 1,16$ |
| 15 | $D_{15} = 0,98$ |
| 16 | $D_{16} = 0,78$ |
| 17 | $D_{17} = 0,78$ |
| 18 | $0,49 < D_{18} < 0,78$ |
| 19 | $0,49 < D_{19} < 0,78$ |
| 20 | $D_{20} = 0,49$ |

4.2. NÚMERO DE PROJEÇÕES

Para observar o efeito do número de projeções coletadas na qualidade das imagens reconstruídas, foram realizadas 3 tomografias do corpo de prova de acrílico. Na primeira tomografia, foram adquiridas 90 radiografias, para um intervalo angular de 2° ; na segunda, foi utilizado um intervalo angular de 1° , resultando em um conjunto de 180 radiografias; a terceira tomografia consistiu na coleta de 360 radiografias, referentes a um intervalo de $0,5^\circ$. As tomografias foram realizadas com os seguintes parâmetros:

- Distância centro do *phantom*-intensificador de imagens: 7,5 cm
- Magnificação do intensificador de imagens: 4"
- Tensão: 90 kV
- Corrente: 7 mA

A Figura 58, a Figura 59 e a Figura 60 mostram, respectivamente, as reconstruções da fatia para 90, 180 e 360 radiografias. As tomografias apresentadas nesta seção, assim como nas seções seguintes, foram reconstruídas aplicando o filtro de Ram-Lak.

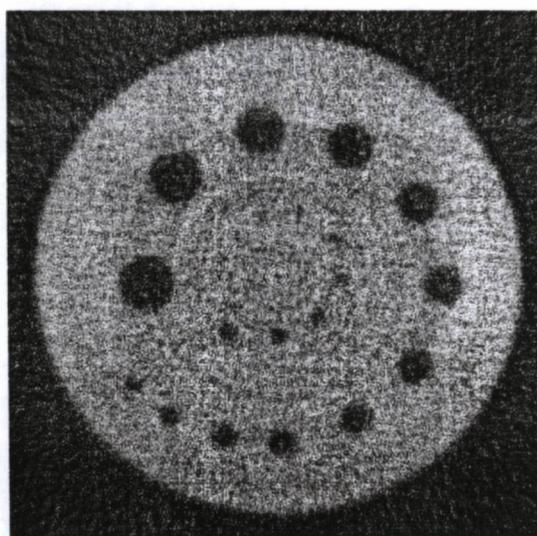


Figura 58 - Corpo de prova de acrílico - reconstrução com 90 projeções.

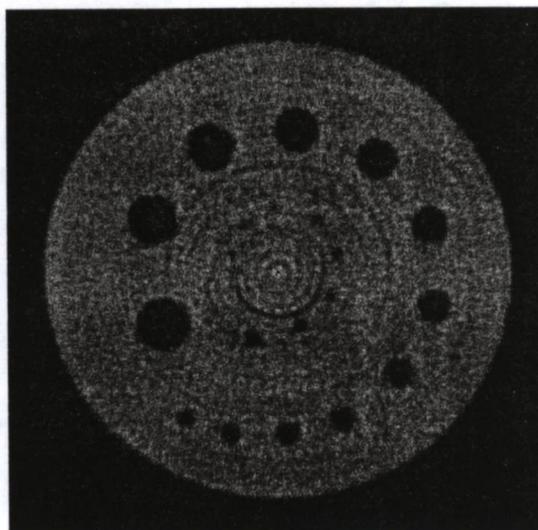


Figura 59 - Corpo de prova de acrílico - reconstrução com 180 projeções.

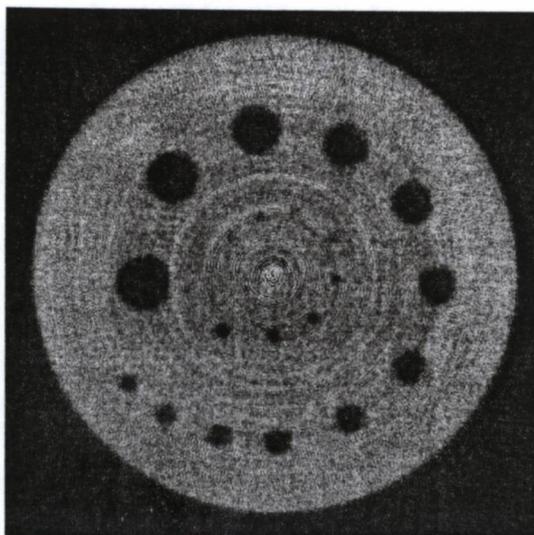


Figura 60 - Corpo de prova de acrílico - reconstrução com 360 projeções.

4.3. FILTRO DA MEDIANA

A aplicação do filtro da mediana pode melhorar significativamente a qualidade das imagens reconstruídas. A intensidade do efeito do filtro é controlada pelo tamanho da janela aplicada. Quanto maior a janela, maior a filtragem do ruído das tomografias; por outro lado, maior o efeito de suavização ou borramento nas imagens resultantes. A Figura 61, a Figura 63 e a Figura 65 mostram reconstruções das fatias apresentadas na seção 4.2, com aplicação do filtro da mediana com janela de tamanho 3×3 para 90, 180 e 360 projeções, respectivamente. A Figura 62, a Figura 64 e a Figura 66 apresentam, respectivamente, reconstruções com aplicação do filtro da mediana com janela de tamanho 5×5 para 90, 180 e 360 projeções.

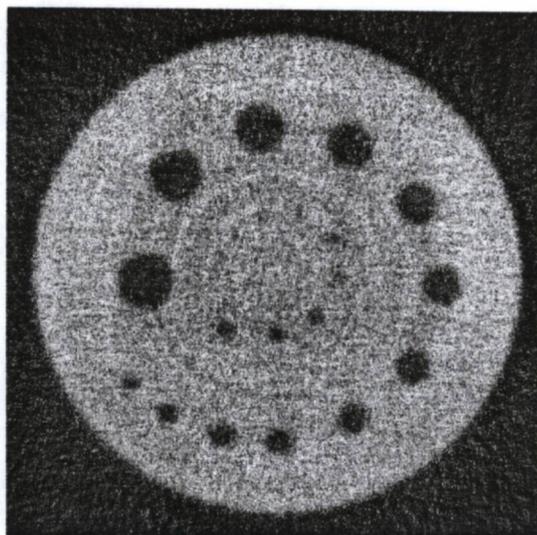


Figura 61 - *Phantom* de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 3x3 e 90 projeções.

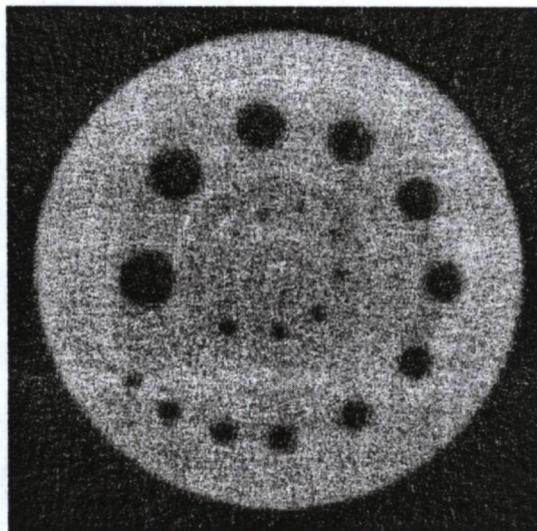


Figura 62 - *Phantom* de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 5x5 e 90 projeções.

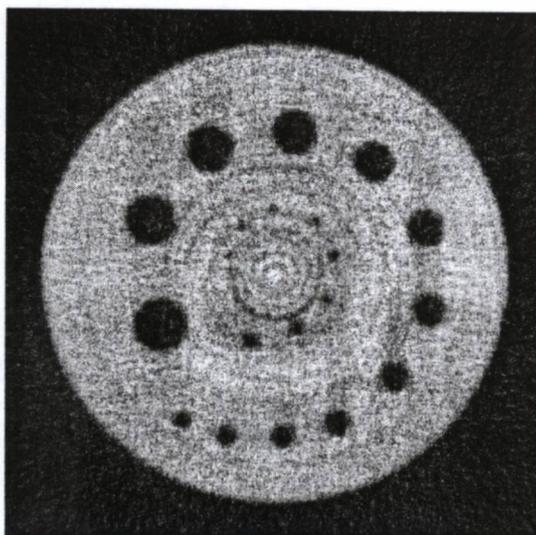


Figura 63 - *Phantom* de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 3x3 e 180 projeções.

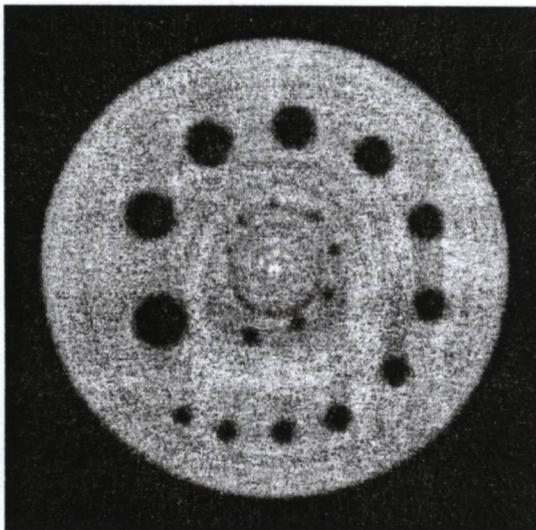


Figura 64 - *Phantom* de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 5x5 e 180 projeções.

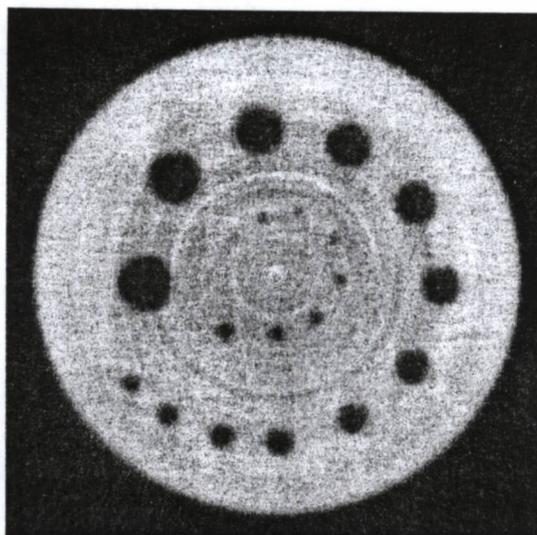


Figura 65 - *Phantom* de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 3x3 e 360 projeções.

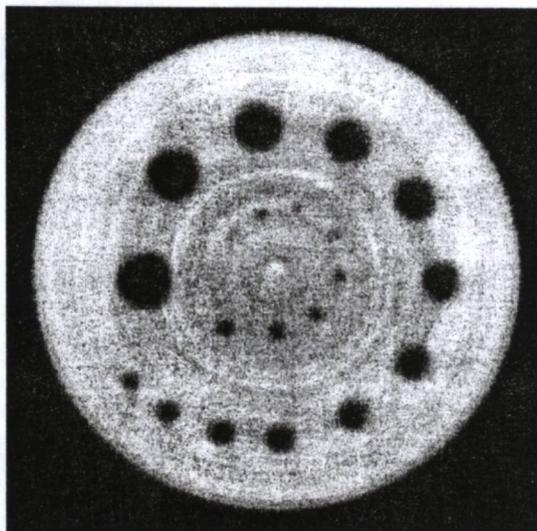


Figura 66 - *Phantom* de acrílico - reconstrução com filtro da mediana 5x5 e 360 projeções.

Verifica-se, a partir das figuras acima, a redução de ruído pela aplicação do filtro da mediana. Observa-se, ainda, que o efeito de suavização do filtro faz com que o menor furo do corpo de prova (furo nº 20) fique menos nítido. Assim, para objetos de acrílico, o diâmetro do menor furo visível nas tomografias com redução de ruído é de aproximadamente 0,78 mm.

4.4. CORPO DE PROVA DE MADEIRA

Com o objetivo de determinar a resolução em contraste em corpos de madeira, a análise descrita acima foi repetida com um corpo de prova de madeira (*Pinus taeda*) de altura igual a 7 cm e diâmetro igual a 3,5 cm. Assim como o *phantom* de acrílico, o corpo de prova de madeira, mostrado na Figura 67 e na Figura 68, possui vários furos de diferentes diâmetros. A Tabela IV apresenta os diâmetros dos furos do *phantom*, medidos com um micrômetro digital Mitutoyo modelo 293-801.



Figura 67 - Fotografia do corpo de prova de madeira - vista lateral.



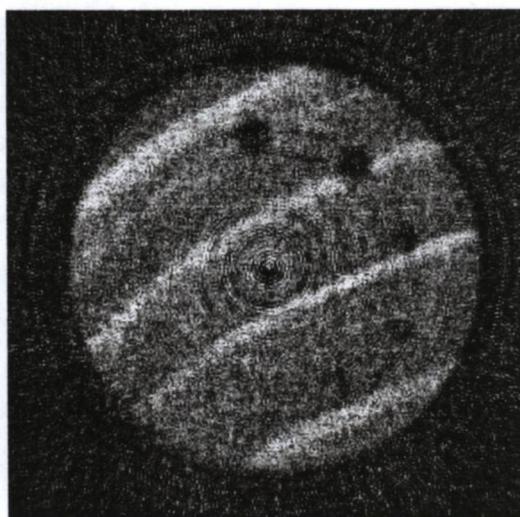
Figura 68 - Fotografia do corpo de prova de madeira - vista superior.

Tabela IV - Diâmetros dos furos do corpo de prova de madeira.

| Furo | Diâmetro (mm) |
|------|---------------|
| 1 | $D_1 = 3,15$ |
| 2 | $D_2 = 2,77$ |
| 3 | $D_3 = 2,49$ |
| 4 | $D_4 = 2,01$ |
| 5 | $D_5 = 1,47$ |
| 6 | $D_6 = 0,98$ |
| 7 | $D_7 = 0,89$ |
| 8 | $D_8 = 0,48$ |
| 9 | $D_9 = 0,79$ |

A Figura 69 e a Figura 70 mostram, respectivamente, tomografias do *phantom* de madeira sem e com redução de ruído, realizadas de acordo com os parâmetros abaixo:

- Distância centro do *phantom* – intensificador de imagens: 7,5 cm
- Zoom do intensificador de imagens: 4''
- Tensão: 80 kV
- Corrente: 5 mA
- Número de projeções: 180

**Figura 69 - Tomografia do *phantom* de madeira sem redução de ruído.**

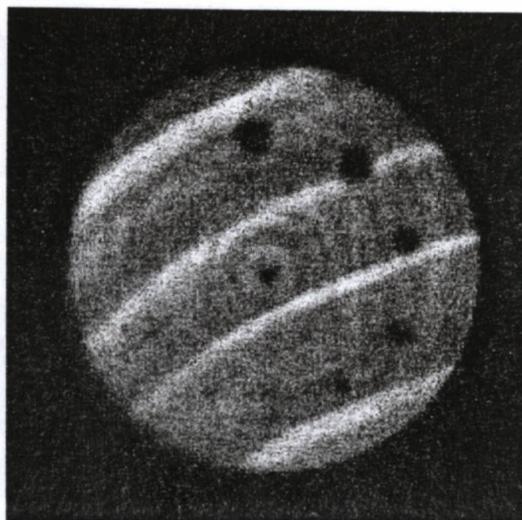


Figura 70 - Tomografia do *phantom* de madeira com redução de ruído por filtro da mediana 5 x 5.

Observa-se que apenas os cinco primeiros furos do corpo de prova de madeira são razoavelmente distinguíveis. O sexto e o sétimo furo podem ser vistos, mas de forma muito menos nítida; os dois últimos furos não aparecem na imagem. Assim, o diâmetro do menor furo visível é de aproximadamente 1,5 mm, maior que no corpo de prova de acrílico. Isto se deve à diferença entre os coeficientes de atenuação do acrílico e da madeira. A madeira, que contém um grande volume de vazios no seu interior, possui coeficiente de atenuação menor e mais próximo do coeficiente do ar. Assim, o contraste entre um furo e o material adjacente é menor na madeira do que no acrílico. É importante salientar ainda que a resolução encontrada vale apenas para a espécie utilizada. Para espécies mais densas, a resolução em contraste deverá aumentar.

4.5. TEMPO DE PROCESSAMENTO E QUANTIDADE DE DADOS

Como pode ser notado na seção 4.2, quanto maior o número de radiografias coletadas (ou, em outras palavras, quanto menor o incremento angular), maior a qualidade das imagens reconstruídas. No entanto, um maior número de quadros tem como consequência um tempo maior de aquisição das radiografias - resultando em um maior uso

da fonte de raios X - e das projeções e um tempo maior de reconstrução de imagens. A Tabela V mostra uma comparação destes fatores para tomografias com 90, 180 e 360 projeções. As informações desta comparação foram obtidas usando um computador com processador Pentium I MMX 200 MHz e 64 MB de RAM. A quantidade de dados refere-se à aquisição de radiografias no formato jpeg.

Tabela V - Comparação de parâmetros para tomografias com 90, 180 e 360 projeções.

| | Número de projeções | | |
|--|---------------------|-----|-----|
| | 90 | 180 | 360 |
| Quantidade de dados (MB) | 7 | 14 | 28 |
| Tempo de aquisição dos quadros (s) | 129 | 174 | 336 |
| Tempo de aquisição das projeções de uma fatia (s) | 28 | 53 | 107 |
| Tempo de aquisição de uma fatia com mediana 5 x 5 (s) | 36 | 71 | 148 |
| Tempo de reconstrução de uma fatia (s) | 21 | 43 | 85 |

4.6. EFEITO COMETA

O artefato conhecido como efeito cometa surge quando o centro do objeto não coincide com o centro da mesa rotativa. Assim, além de uma rotação, ocorre uma translação do centro do objeto. Este efeito pode ser observado comparando o sinograma de uma fatia de um objeto centralizado com o de uma fatia de um objeto descentralizado, como mostram a Figura 71 e a Figura 72:

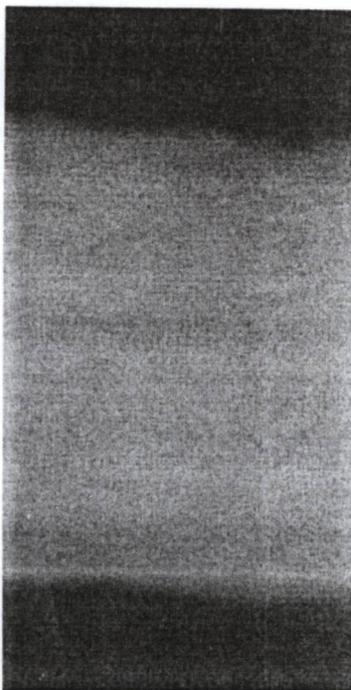


Figura 71 - Sinograma de um objeto descentralizado.

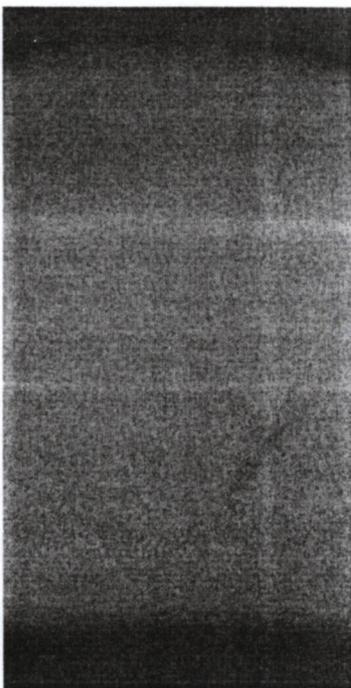


Figura 72 - Sinograma de um objeto centralizado.

Na Figura 71, nota-se um deslocamento progressivo das projeções para baixo, correspondente a uma translação do centro. Já a Figura 72 apresenta um sinograma de uma fatia centralizada. A primeira e a última projeções estão aproximadamente na mesma altura do sinograma. A Figura 73 apresenta a imagem reconstruída a partir das projeções do sinograma da Figura 71.

O efeito cometa pode ser eliminado deslocando a posição da origem do eixo paralelo aos detetores (eixo t da Figura 22). Este ajuste é feito alterando o campo **Fator de centralização** da janela **Reconstrução de imagens** do programa desenvolvido. A Figura 74 mostra a reconstrução das projeções da Figura 71 com um fator de centralização igual a -6 .

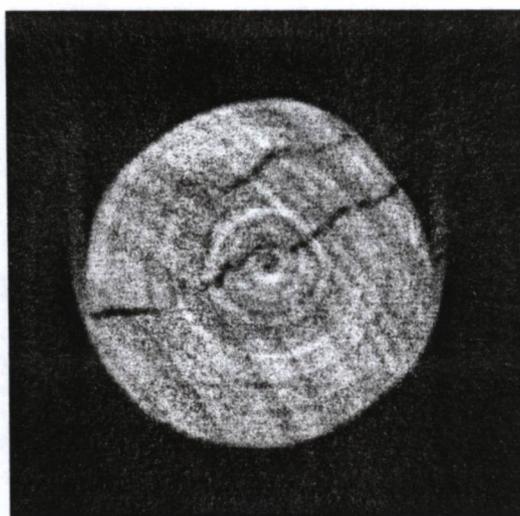


Figura 73 - Reconstrução com efeito cometa.

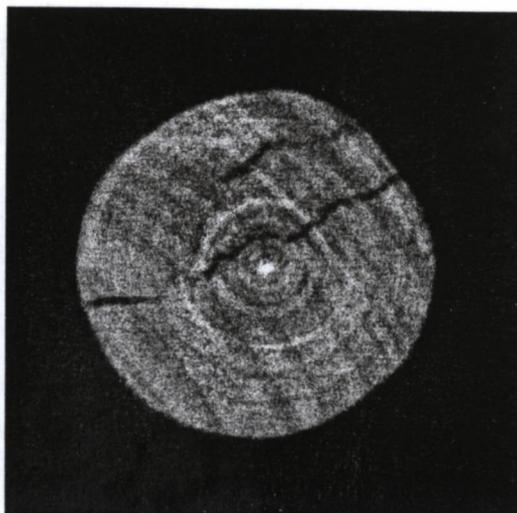


Figura 74 - Reconstrução com efeito cometa eliminado.

4.7. DISTORÇÃO DEVIDO À UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO DE RECONSTRUÇÃO PARA FEIXE PARALELO

O algoritmo de reconstrução de imagens implementado no programa de controle do tomógrafo é um algoritmo para feixe paralelo. No entanto, o feixe produzido pelo tubo de raios X do sistema é um feixe cônico, como o da Figura 18. Portanto, é necessário posicionar os objetos no centro do feixe e o mais distante possível da fonte de raios X, de maneira a reduzir a distorção causada pela aplicação do algoritmo para feixe paralelo.

Para observar esta distorção, foram feitas duas tomografias de um corpo de prova cilíndrico de acrílico, a primeira com o corpo colocado no centro do feixe e a segunda com o corpo descentralizado, posicionado na beira da mesa rotativa. A Figura 75 mostra os resultados das duas reconstruções.

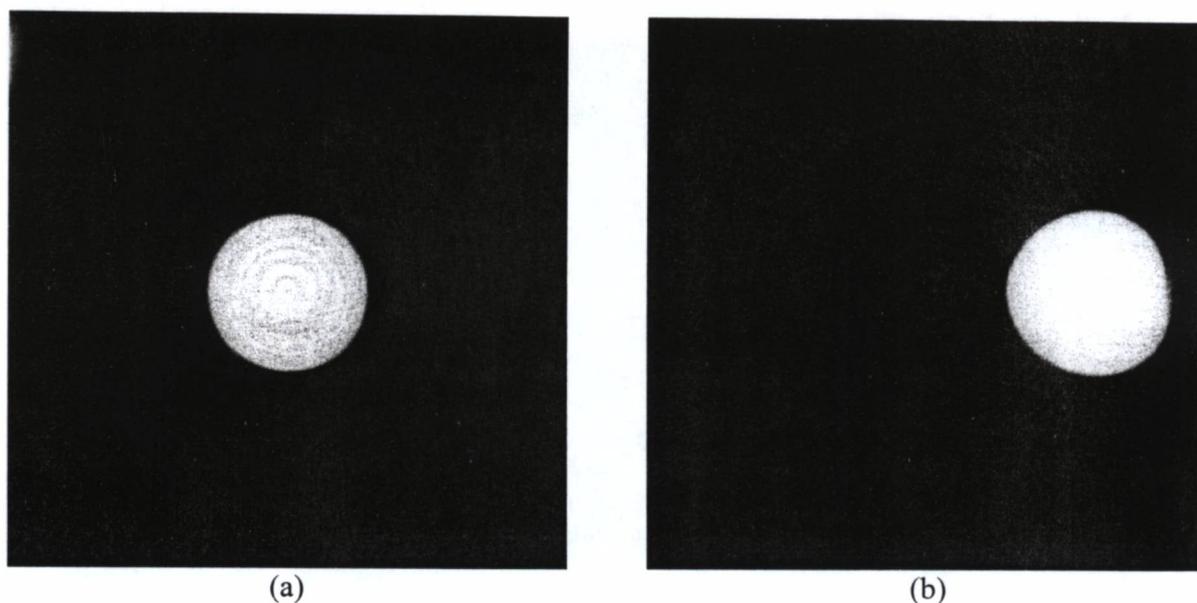


Figura 75 – Reconstrução com algoritmo para feixe paralelo aplicado a feixe cônico: (a) objeto centralizado; (b) objeto descentralizado.

Verifica-se que, para o objeto centralizado, o resultado da reconstrução é satisfatório. Por outro lado, a reconstrução de um objeto descentralizado com um algoritmo para feixe paralelo resulta na distorção da forma do corpo. No entanto, esta distorção não prejudicou a qualidade das tomografias das amostras, já que estas possuem diâmetro pequeno se comparado à abertura do feixe e foram sempre posicionadas no centro do feixe de raios X.

4.8. TOMOGRAFIAS DE AMOSTRAS COM DEFEITOS

Todas as tomografias das amostras foram realizadas utilizando os seguintes parâmetros:

- Distância centro da amostra-intensificador de imagens: 7,5 cm
- Tensão: 80 kV
- Corrente: 5 mA
- Incremento angular: 1° (180 projeções)
- Redução de ruído por filtro da mediana com janela de tamanho 5 x 5

4.8.1. Tomografias de Amostras com Rachaduras

A Figura 76, a Figura 77, a Figura 78 e a Figura 79 apresentam, respectivamente, fotografias das vistas superior e inferior das amostras 1 e 2, com diâmetro e altura iguais a 6 cm e 10 cm, respectivamente. Estas amostras, de eucalipto (*Eucalyptus viminalis*), contêm rachaduras nas suas superfícies e no seu interior.

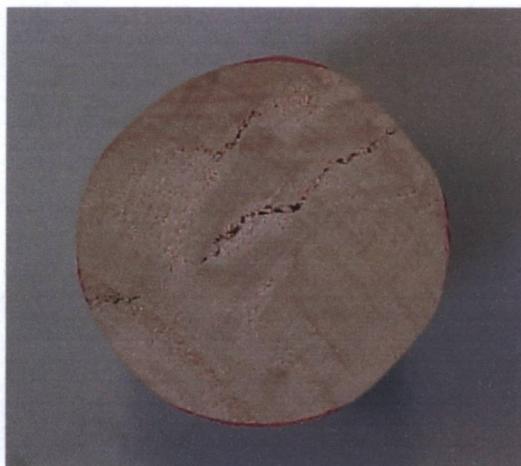


Figura 76 - Vista superior da amostra 1.



Figura 77 - Vista inferior da amostra 1.

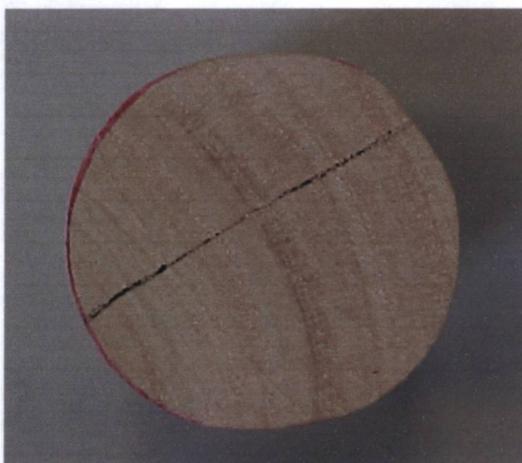


Figura 78 - Vista superior da amostra 2.

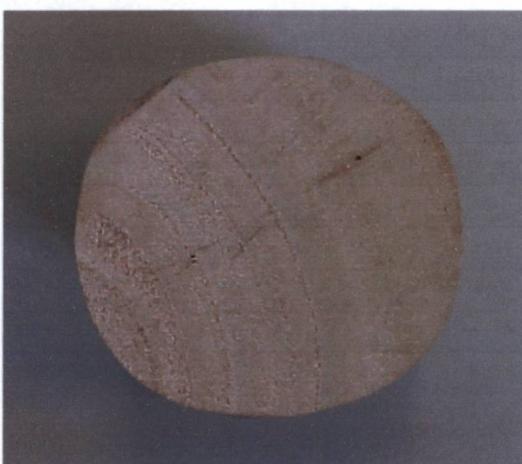


Figura 79 - Vista inferior da amostra 2.

Para cada amostra, foram reconstruídas 4 fatias: uma fatia próxima ao topo da amostra (fatia 1), duas fatias intermediárias (fatias 2 e 3) e uma fatia próxima à base (fatia 4). A Figura 80, a Figura 81, a Figura 82 e a Figura 83 apresentam as reconstruções das fatias da amostra 1. A Figura 84, a Figura 85, a Figura 86 e a Figura 87 mostram as fatias reconstruídas da amostra 2.

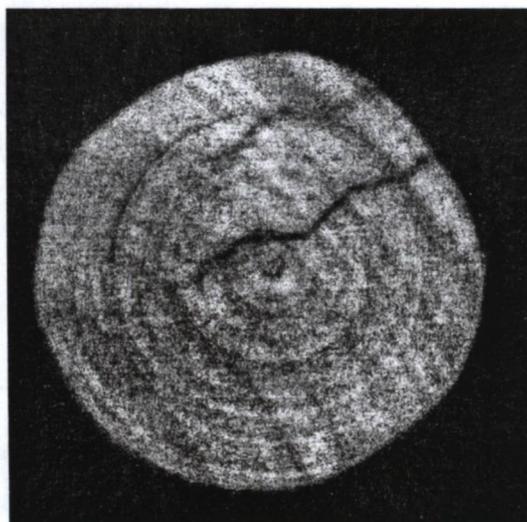


Figura 80 - Amostra 1 – tomografia da fatia 1.

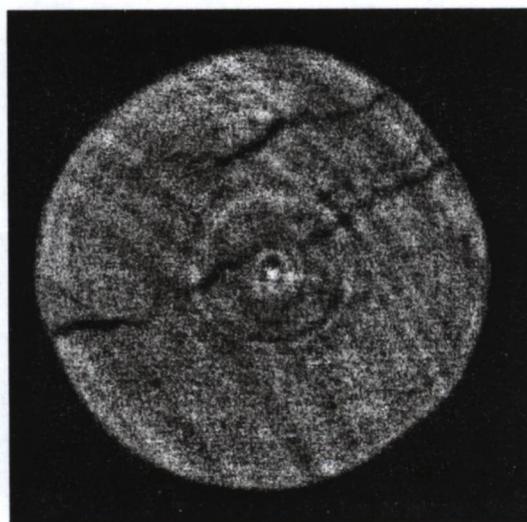


Figura 81 - Amostra 1 – tomografia da fatia 2.

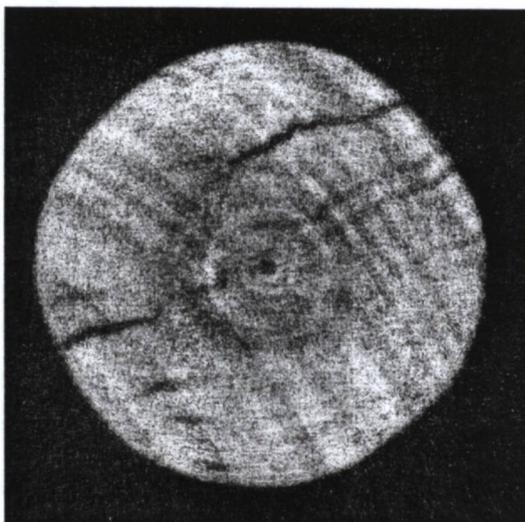


Figura 82 - Amostra 1 – tomografia da fatia 3.

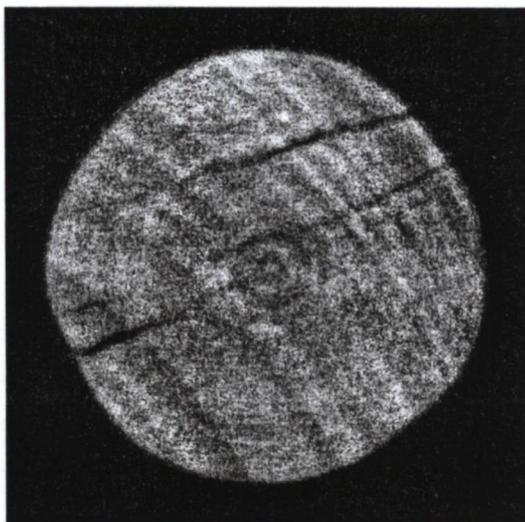


Figura 83 - Amostra 1 – tomografia da fatia 4.

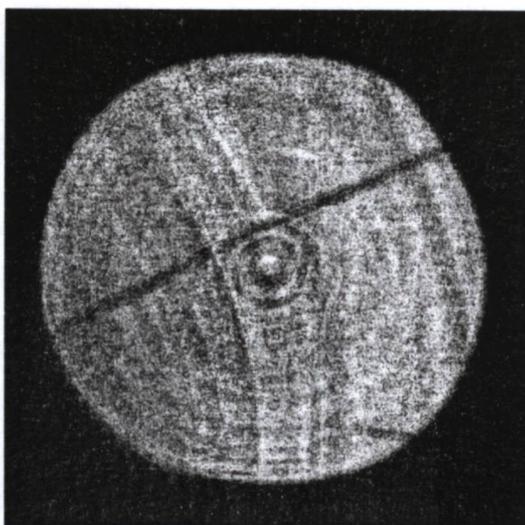


Figura 84 - Amostra 2 – tomografia da fatia 1.

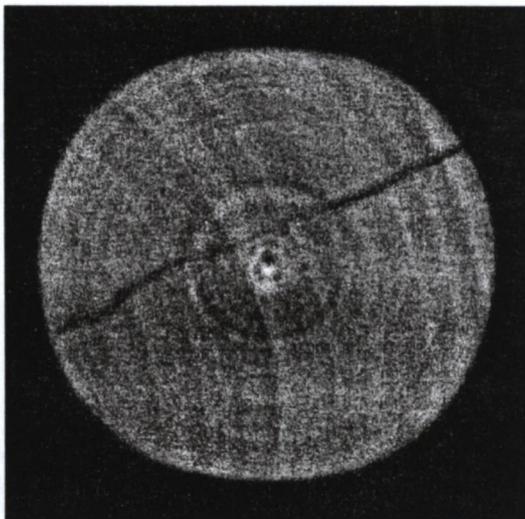


Figura 85 - Amostra 2 – tomografia da fatia 2.

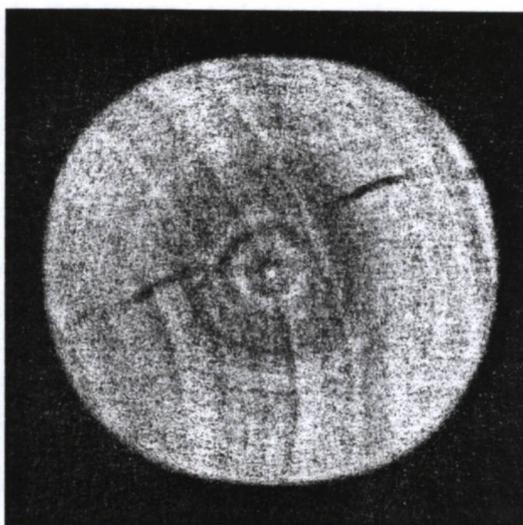


Figura 86 - Amostra 2 – tomografia da fatia 3.

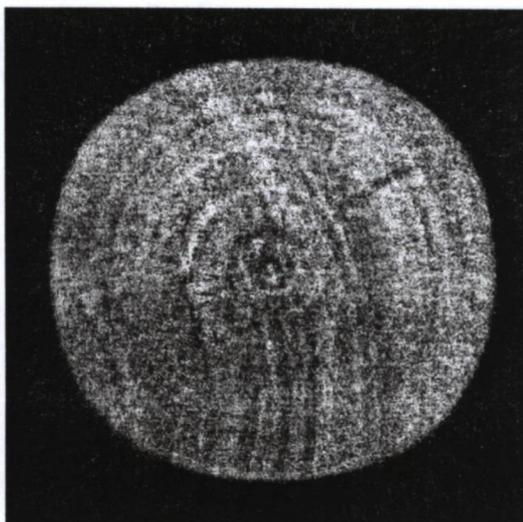


Figura 87 - Amostra 2 – tomografia da fatia 4.

As figuras acima permitem visualizar as rachaduras presentes nas amostras 1 e 2. A reconstrução de várias amostras possibilita verificar a presença e a mudança de formato, orientação e dimensões das rachaduras no interior das amostras. Os defeitos possuem tons de cinza inferiores às regiões vizinhas. No entanto, devido à presença de artefatos em forma de anel, a região central de algumas imagens apresenta tons de cinza similares aos dos defeitos.

4.8.2. Tomografias de Amostra com Rachaduras e Ataque de Fungo

A Figura 88 e a Figura 89 mostram, respectivamente, fotografias da vista superior e da vista inferior da amostra 3, de eucalipto (*Eucalyptus viminalis*). Como pode ser observado, esta amostra apresenta rachaduras na direção radial e ataques causados por fungo na direção tangencial.

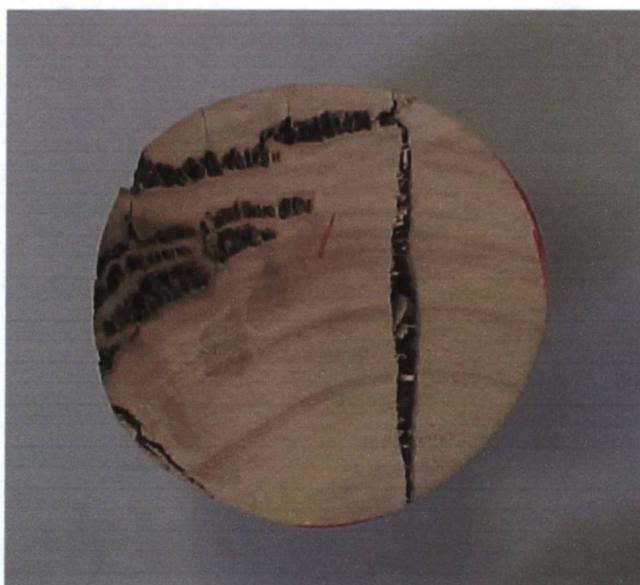


Figura 88 - Fotografia da vista superior da amostra 3.



Figura 89 - Fotografia da vista inferior da amostra 3.

Foi realizada uma tomografia da amostra 3 com o objetivo de visualizar os defeitos no seu interior. A Figura 90, a Figura 91 e a Figura 92 apresentam, respectivamente, uma fatia coletada no topo da amostra, uma fatia numa posição intermediária, e uma fatia da região inferior.

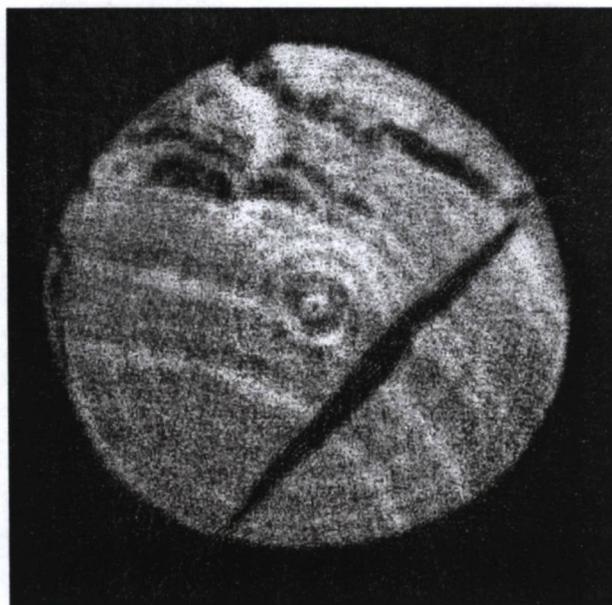


Figura 90 - Amostra 3 – tomografia da fatia superior.

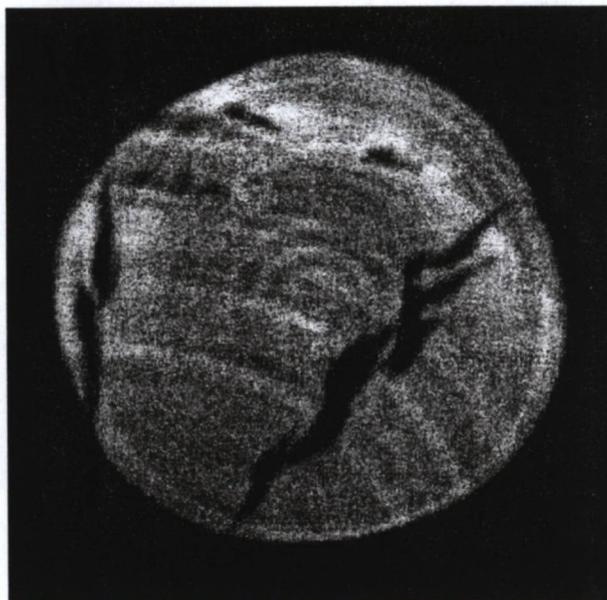


Figura 91 - Amostra 3 – tomografia da fatia intermediária.

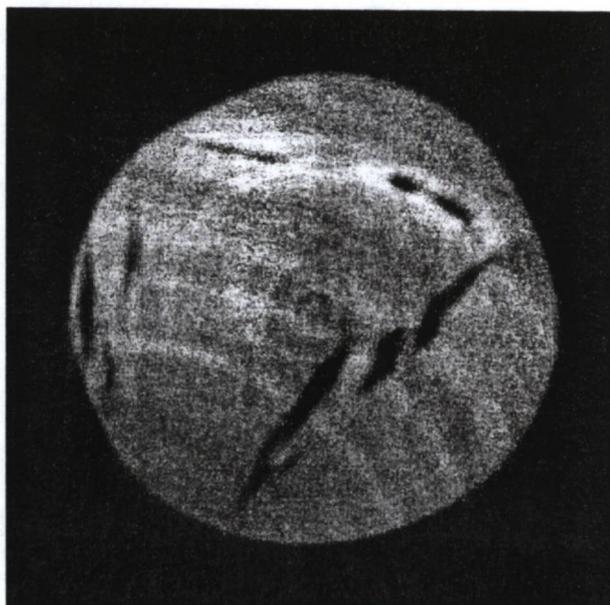


Figura 92 - Amostra 3 – tomografia da fatia inferior.

Nas tomografias das figuras acima, é possível visualizar nitidamente os defeitos na amostra: rachaduras na região esquerda e centro-direita da amostra e ataque de fungo na zona superior das fatias. Os defeitos causados por fungo apresentam formato mais irregular e maior variedade de tons de cinza que as rachaduras.

4.8.3. Tomografias de Amostra com Nós

A Figura 93 e a Figura 94 apresentam, respectivamente, uma vista lateral e uma vista inferior da amostra 4. Esta amostra, da espécie *Pinus taeda*, possui dois nós próximos a alturas distintas.



Figura 93 - Vista lateral da amostra 4.



Figura 94 - Vista superior da amostra 4.

Foram reconstruídas várias fatias para verificar a posição do nó a diferentes alturas da amostra. A Figura 95 apresenta as posições das fatias coletadas. As fatias reconstruídas são mostradas da Figura 96 à Figura 100.

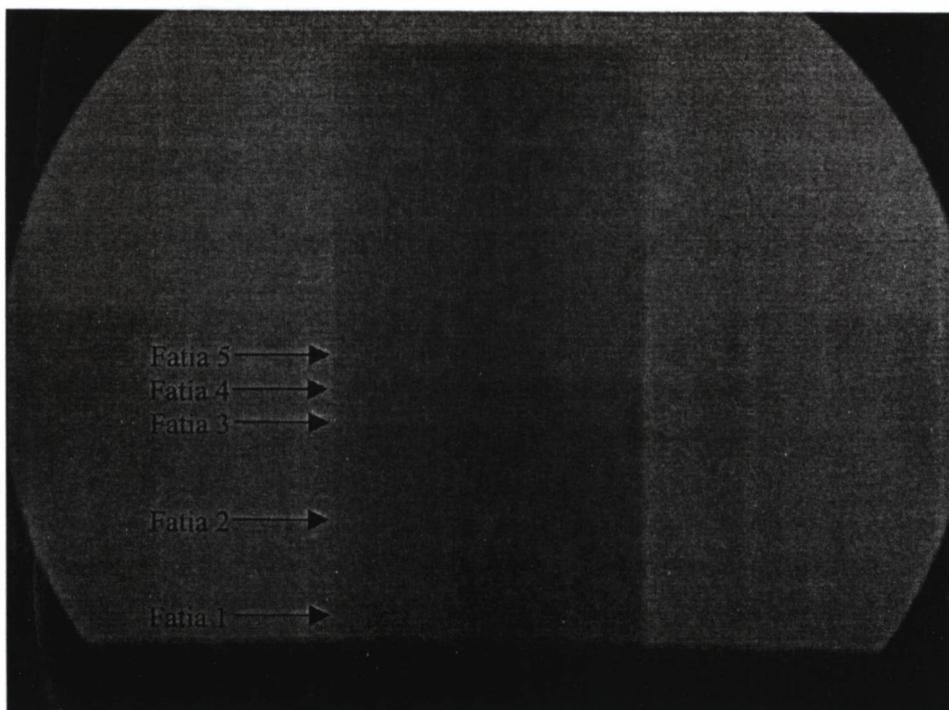


Figura 95 - Radiografia da amostra 4 e posições das fatias coletadas.

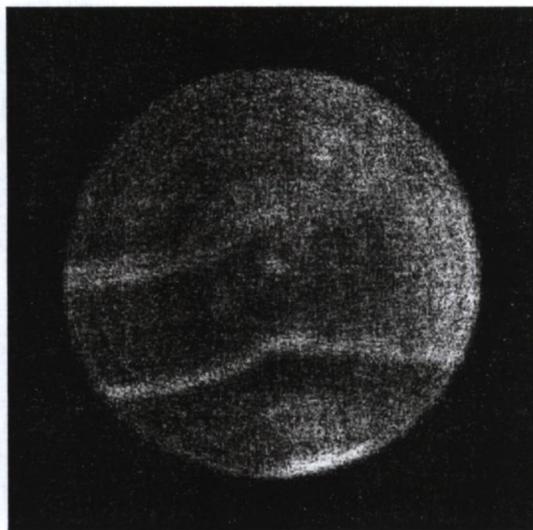


Figura 96 - Amostra 4 – tomografia da fatia 1.

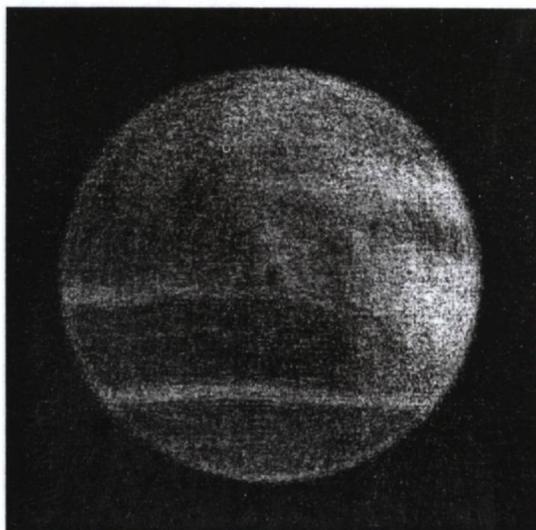


Figura 97 - Amostra 4 – tomografia da fatia 2.

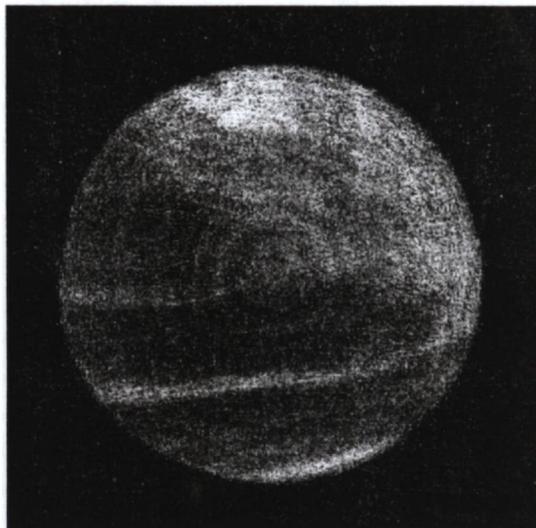


Figura 98 - Amostra 4 – tomografia da fatia 3.

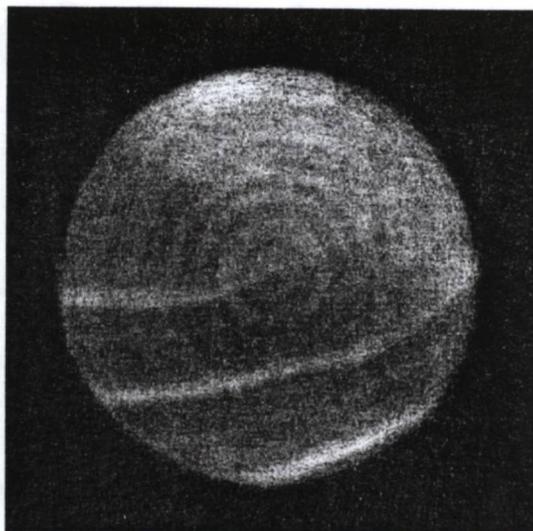


Figura 99 - Amostra 4 – tomografia da fatia 4.

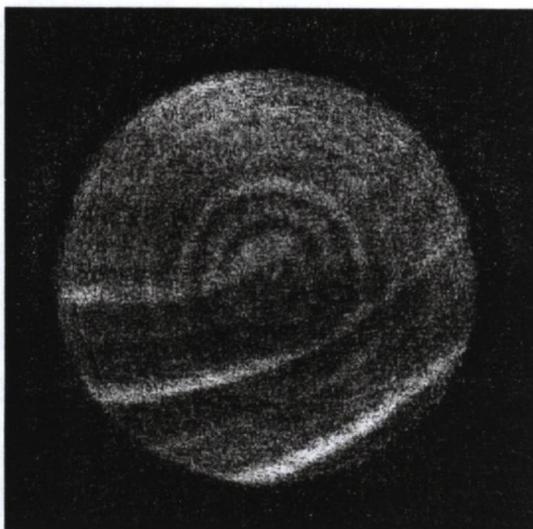


Figura 100 - Amostra 4 – tomografia da fatia 5.

Pode-se observar o nó como uma região mais clara, correspondente a uma densidade maior. À medida que se caminha da fatia inferior para as fatias mais intermediárias, a região mais densa desloca-se da direita, onde encontra-se o primeiro nó, para a esquerda, zona na qual localiza-se o segundo nó. Tomografias de amostras contendo nós são particularmente úteis para a indústria moveleira, visto que os nós diminuem a qualidade e o valor dos produtos serrados. Assim, as tomografias permitiriam verificar a

extensão dos nós no interior das toras, possibilitando uma otimização da localização e da orientação do corte.

4.8.4. Tomografias de Amostra com Medula e Lenho Juvenil

A Figura 101 e a Figura 102 mostram, respectivamente, as vistas lateral e superior da amostra 5 (*Pinus taeda*), contendo uma parte da medula (nas fotografias, região mais escura) e raios medulares. Duas fatias foram coletadas - uma próxima ao topo e uma próxima à base da amostra. A Figura 103 e a Figura 104 apresentam as fatias reconstruídas.



Figura 101 - Fotografia da vista lateral da amostra 5.



Figura 102 - Fotografia da vista superior da amostra 5.

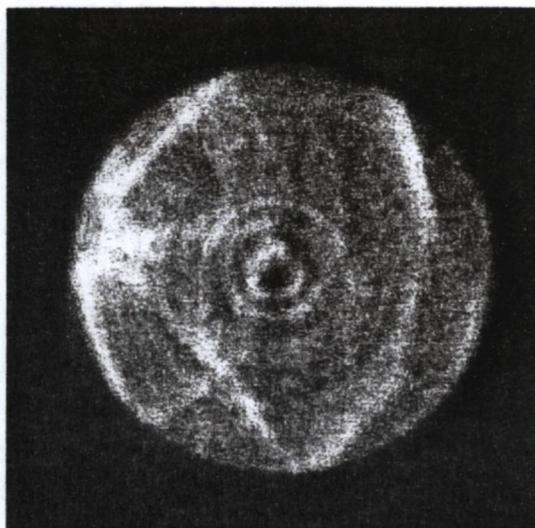


Figura 103 - Amostra 5 – tomografia da fatia superior.

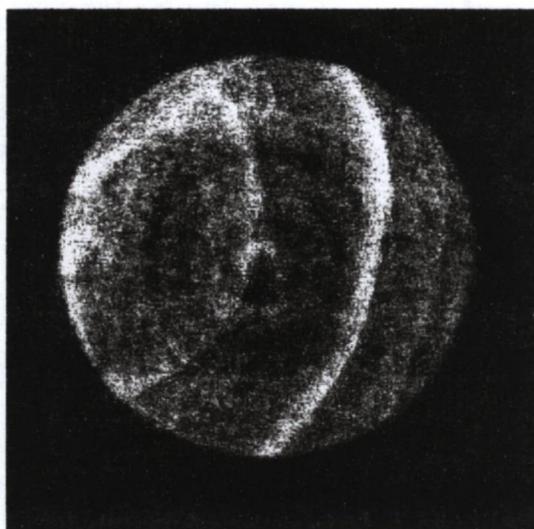


Figura 104 - Amostra 5 – tomografia da fatia inferior.

As tomografias da Figura 103 e da Figura 104 permitem visualizar a medula e os raios medulares que dela saem. A zona central de uma tora de madeira contendo a medula é denominada lenho juvenil. Esta região pode ser considerada um defeito natural, uma vez que possui propriedades indesejáveis: baixa densidade, baixa resistência mecânica e alto valor de retração longitudinal.

A tomografia de raios X e o processamento de imagens podem ser aplicados para a localização do lenho juvenil, do lenho de transição e do lenho adulto. Esta determinação pode ser feita visualizando as seções transversais de uma tora e observando a proporção de lenho tardio e lenho inicial em cada anel. O lenho juvenil é marcado por uma grande proporção de lenho inicial; a percentagem de lenho inicial em cada anel decresce ao longo do lenho de transição, até alcançar um valor mínimo no lenho adulto.

A Figura 105 apresenta um exemplo de tomografia de uma seção transversal de *Pinus taeda* (a) e a imagem resultante de uma limiarização global (b). A tomografia permite visualizar os anéis de crescimento na seção transversal e analisar a proporção de lenho inicial e tardio em cada um. Para um processamento automático desta tarefa, é possível aplicar técnicas de processamento de imagem para segmentar a tomografia, separando as regiões referentes ao lenho inicial daquelas pertencentes ao lenho tardio. A imagem (b) da Figura 105 mostra o resultado de uma binarização com limiar igual a 0,43, seguida de uma abertura morfológica com elemento estruturante em forma de disco e raio 2.

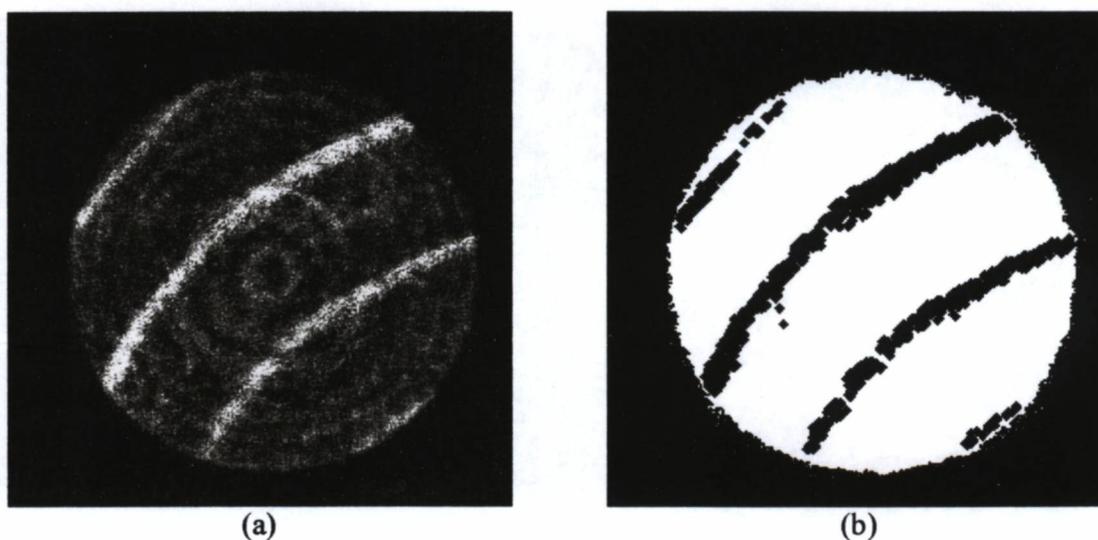


Figura 105 – Exemplo de aplicação para localização do lenho juvenil: (a) tomografia de uma amostra; (b) segmentação para separação do lenho inicial e tardio.

4.8.5. Tomografias de Amostra com Ataque de Insetos

A amostra 6 (pinus), de seção retangular e dimensões 5 cm x 7,3 cm x 9,7 cm, apresenta ataque de broca (anobium). A Figura 106 apresenta uma fotografia da vista superior da amostra. Foram reconstruídas duas fatias desta amostra, em posições próximas ao topo. A Figura 107 e a Figura 108 mostram as reconstruções das fatias.



Figura 106 - Fotografia da vista superior da amostra 6.

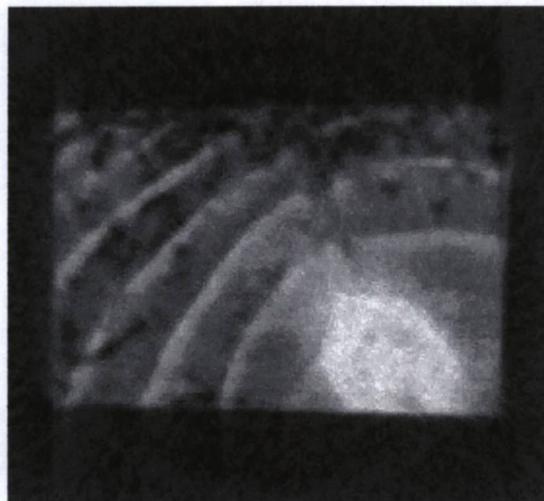


Figura 107 - Amostra 6 – tomografia da fatia 1.

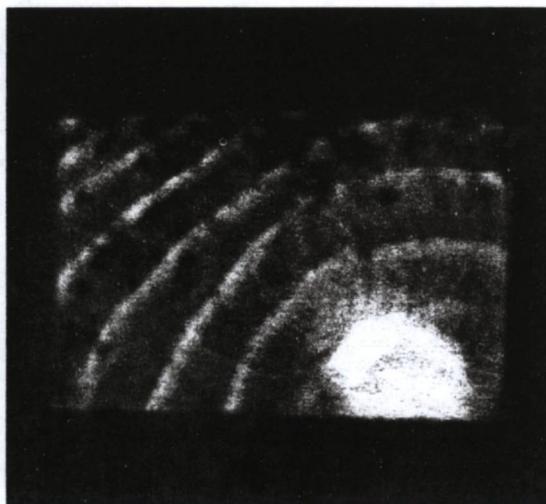


Figura 108 - Amostra 6 – tomografia da fatia 2.

As tomografias acima permitem visualizar as regiões danificadas pelo ataque de broca (zonas mais escuras, concentradas principalmente na parte superior da imagem), além de apresentar os anéis de crescimento e o nó presentes na amostra. Comparando as duas imagens, nota-se ainda uma diminuição da região correspondente ao nó na segunda fatia, mais distante do topo da amostra.

4.9. SEGMENTAÇÃO DE DEFEITOS

Esta seção apresenta as imagens resultantes da segmentação proposta na seção 3.4.1. Todas as imagens resultaram da aplicação de um filtro *bottom-hat* (fechamento *top-hat*) com elemento estruturante em forma de diamante com raio igual a 13, uma etapa de limiarização global e uma operação de abertura morfológica com elemento estruturante em forma de disco com raio 1.

4.9.1. Caracterização da Segmentação

Com o objetivo de caracterizar e verificar o desempenho do método de segmentação das tomografias, foram preparadas três amostras de madeira (*Pinus taeda*) com um furo de diâmetro distinto em cada uma. Com a ajuda de um micrômetro digital Mitutoyo modelo 293-801, foram medidos os diâmetros dos furos realizados e o diâmetro de cada amostra. A partir destes valores e utilizando a equação (24), determinou-se a redução de área das seções transversais devido aos defeitos. A Tabela VI apresenta estes resultados.

$$\text{Redução de área} = \frac{\text{Área do furo}}{\text{Área da amostra}} \times 100 \quad (24)$$

Tabela VI – Diâmetro dos furos e das amostras 7, 8 e 9.

| Amostra | Diâmetro do furo (mm) | Diâmetro da amostra (mm) | Redução de área (%) |
|---------|-----------------------|--------------------------|---------------------|
| 7 | 2,01 ± 0,01 | 34,08 ± 0,05 | 0,35 ± 0,08 |
| 8 | 2,77 ± 0,01 | 35,02 ± 0,07 | 0,62 ± 0,11 |
| 9 | 3,92 ± 0,01 | 34,77 ± 0,03 | 1,27 ± 0,15 |

Foram realizadas tomografias das amostras 7, 8 e 9 de acordo com os mesmos parâmetros adotados para as amostras com defeitos (ver seção 4.7). A Figura 109, a Figura 110 e a Figura 111 mostram as tomografias geradas.

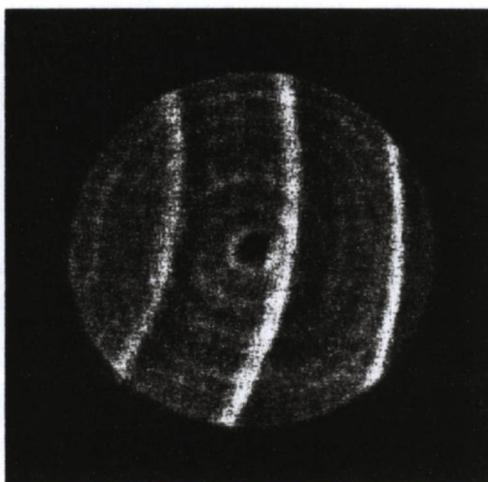


Figura 109 – Tomografia da amostra 7.

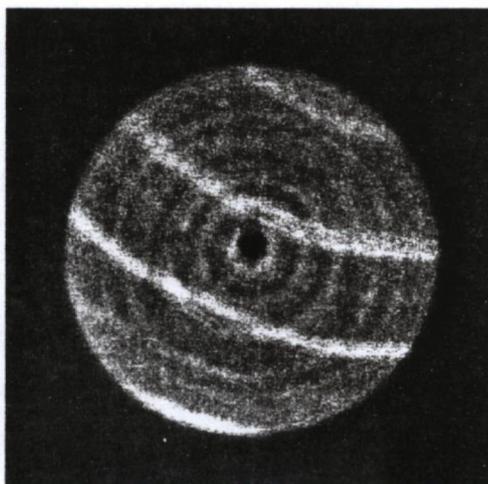


Figura 110 – Tomografia da amostra 8.

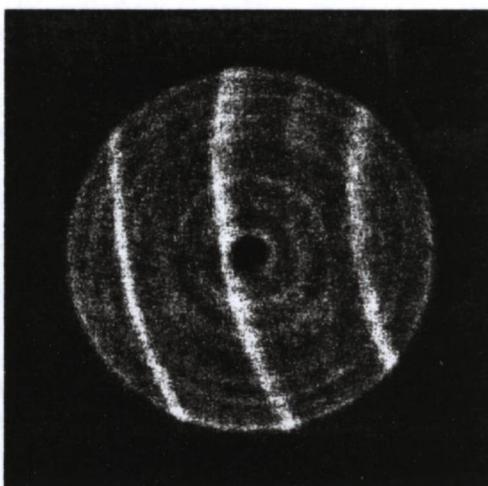


Figura 111 – Tomografia da amostra 9.

As tomografias acima foram segmentadas segundo os parâmetros apresentados na seção 4.9. Para cada tomografia, variou-se o valor de limiar e encontrou-se a redução de área dividindo-se o número de pixels pertencentes ao defeito pelo número de pixels pertencentes à imagem da amostra sem defeitos. Este valor foi então comparado à redução de área determinada a partir dos diâmetros do furo e da amostra. A Tabela VII, a Tabela VIII e a Tabela IX apresentam a redução de área encontrada a partir da segmentação e o erro relativo ao valor encontrado a partir dos diâmetros.

Tabela VII – Cálculo da redução de área para a amostra 7.

| Limiar | Redução de área (%) | Erro (%) |
|---------------|----------------------------|-----------------|
| 0,36 | 0,087 | 74,88 |
| 0,34 | 0,142 | 59,27 |
| 0,32 | 0,172 | 50,62 |
| 0,3 | 0,220 | 36,73 |
| 0,28 | 0,280 | 19,40 |
| 0,26 | 0,377 | 8,31 |
| 0,24 | 0,476 | 36,91 |
| 0,22 | 0,784 | 125,29 |
| 0,20 | 1,504 | 332,42 |

Tabela VIII - Cálculo da redução de área para a amostra 8.

| Limiar | Redução de área (%) | Erro (%) |
|---------------|----------------------------|-----------------|
| 0,36 | 0,47 | 24,10 |
| 0,34 | 0,51 | 19,17 |
| 0,32 | 0,55 | 12,44 |
| 0,3 | 0,57 | 8,39 |
| 0,28 | 0,64 | 1,93 |
| 0,26 | 0,65 | 3,28 |
| 0,24 | 0,80 | 27,08 |
| 0,22 | 1,21 | 93,99 |
| 0,20 | 1,99 | 217,92 |

Tabela IX - Cálculo da redução de área para a amostra 9.

| Limiar | Redução de área (%) | Erro (%) |
|---------------|----------------------------|-----------------|
| 0,36 | 0,60 | 52,68 |
| 0,34 | 0,66 | 47,93 |
| 0,32 | 0,71 | 43,85 |
| 0,3 | 0,84 | 34,12 |
| 0,28 | 0,99 | 22,57 |
| 0,26 | 1,18 | 6,95 |
| 0,24 | 1,33 | 4,82 |
| 0,22 | 1,84 | 44,45 |
| 0,20 | 2,84 | 123,46 |

Verifica-se que uma correta segmentação depende da escolha de um limiar adequado. Limiares muito elevados resultam na seleção de um número pequeno de pixels de alto nível de cinza pertencentes ao defeito. Por outro lado, níveis muito baixos causam a inclusão de pixels que não pertencem ao defeito da amostra. Portanto, a segmentação deve ser realizada com um valor intermediário. A Figura 112, a Figura 113 e a Figura 114 mostram as segmentações das tomografias utilizando limiares iguais a 0,26, 0,28 e 0,26, respectivamente.

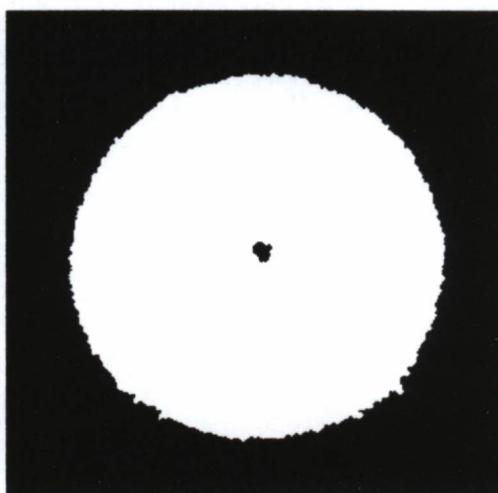


Figura 112 – Segmentação da tomografia da amostra 7.

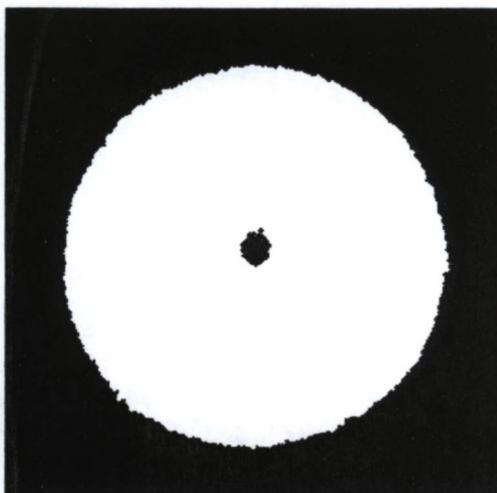


Figura 113 – Segmentação da tomografia da amostra 8.

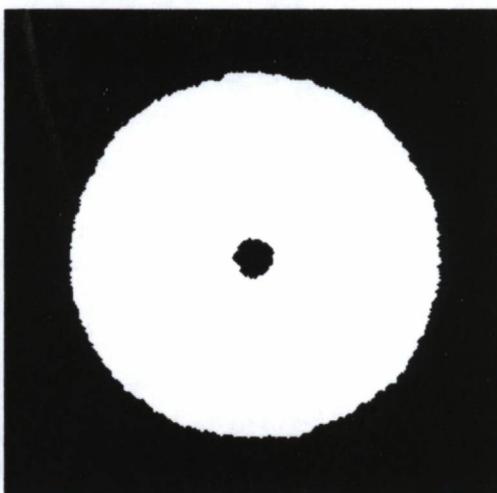


Figura 114 – Segmentação da tomografia da amostra 9.

Por último, para observar a repetitividade da segmentação, repetiu-se duas vezes o procedimento acima para a amostra 9. Foram feitas duas novas tomografias com a amostra aproximadamente na mesma posição e com os mesmos parâmetros, e as imagens resultantes foram segmentadas adotando o valor 0,26 como limiar. Como resultado das três medidas, obteve-se uma redução de área de $1,18 \pm 0,03$ %. A Tabela X apresenta os valores de redução de área obtidos, assim como os erros relativos aos valores encontrados a partir dos diâmetros do furo e da amostra.

Tabela X – Resultados da análise de repetitividade da segmentação.

| Medida | Redução de área (%) | Erro (%) |
|--------|---------------------|----------|
| 1 | 1,18 | 6,95 |
| 2 | 1,15 | 9,66 |
| 3 | 1,20 | 5,59 |

4.9.2. Amostra com Rachaduras

O método de segmentação proposto foi aplicado à tomografia da fatia 1 da amostra 1, contendo rachaduras (Figura 80). A Figura 115, a Figura 116 e a Figura 117 mostram a segmentação da tomografia aplicando, respectivamente, um limiar global igual a 0,23, 0,27 e 0,3. O valor de limiar modifica a sensibilidade da segmentação em relação aos níveis de cinza mais elevados. Assim, um limiar igual a 0,23 (Figura 115) resulta em uma segmentação contendo regiões que não representam defeitos. A inclusão destas regiões pode ser minimizada aumentando o limiar (Figura 116); entretanto, um valor muito alto reduz as regiões relativas a defeitos, como mostra a Figura 117.



Figura 115 - Segmentação da fatia 1 da amostra 1 com limiar igual a 0,23.



Figura 116 - Segmentação da fatia 1 da amostra 1 com limiar igual a 0,27.



Figura 117 - Segmentação da fatia 1 da amostra 1 com limiar igual a 0,3.

A segmentação da Figura 116 destaca com sucesso a rachadura da zona central da amostra. Contudo, apenas uma parte da outra rachadura presente na amostra aparece na imagem resultante. O restante deste defeito, apesar de visível na tomografia original, não é detectado pela segmentação por ser muito fino. Uma parte desta rachadura também não é

detectada pela segmentação por estar localizada numa região onde ocorre um anel de crescimento.

4.9.3. Amostra com Rachaduras e Ataque de Fungos

A Figura 118, a Figura 119 e a Figura 120 mostram a segmentação da tomografia da fatia superior da amostra 3 (Figura 90), utilizando valores de limiar iguais a 0,23, 0,25 e 0,27, respectivamente. Verifica-se que um limiar muito baixo (0,23) causa a inclusão de regiões que não representam defeitos na imagem final. Esta inclusão pode ser minimizada aumentando o valor do limiar. No entanto, valores maiores de limiar acabam reduzindo as regiões referentes aos defeitos.

Observa-se que as regiões pertencentes às rachaduras são satisfatoriamente segmentadas pelo método proposto; as regiões referentes a ataque de fungos, por outro lado, por apresentarem grande variação de tons de cinza, não são totalmente segmentadas. Algumas partes dos defeitos, com tons de cinza mais claros, são classificadas como pixels de valor 0 pela etapa de limiarização. Nota-se ainda que, quanto menor o valor de limiar adotado na etapa de binarização, maior a inclusão da região central da amostra como defeito devido aos artefatos em forma de anel.



Figura 118 - Segmentação da fatia superior da amostra 3 com limiar igual a 0,23.



Figura 119 - Segmentação da fatia superior da amostra 3 com limiar igual a 0,25.



Figura 120 - Segmentação da fatia superior da amostra 3 com limiar igual a 0,27.

A Figura 121 e a Figura 122 apresentam o resultado da segmentação das tomografias das fatias intermediária e inferior da amostra 3. Para estas imagens, foi adotado um valor de limiar igual a 0,25.



Figura 121 - Segmentação da fatia intermediária da amostra 3.



Figura 122 - Segmentação da fatia inferior da amostra 3.

4.9.4. Determinação da Redução da Área Efetiva

As imagens resultantes da segmentação, apresentadas nas seções 4.9.2 e 4.9.3, foram utilizadas para a determinação da redução de área das seções transversais devido à presença de defeitos. A Figura 123, a Figura 124, a Figura 125 e a Figura 126 mostram as imagens resultantes da subtração das imagens dos defeitos segmentados (Figura 116, Figura 119, Figura 121 e Figura 122) das imagens das amostras respectivas sem defeitos (imagens binarizadas e preenchidas).

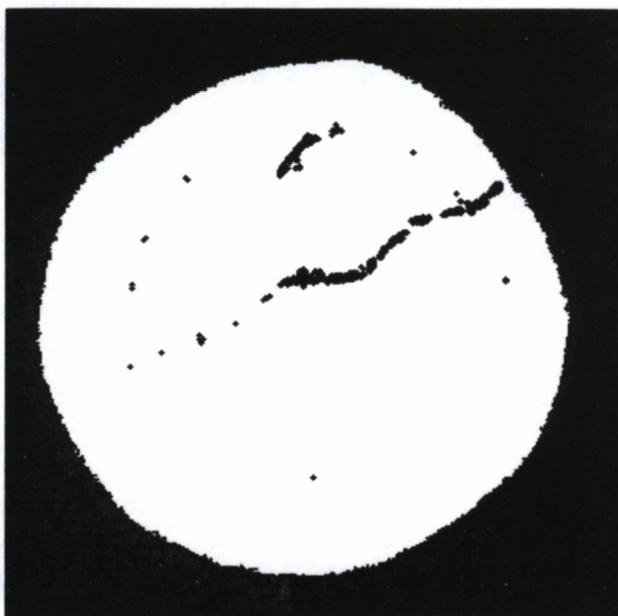


Figura 123 - Imagem da amostra 1 com defeitos presentes na fatia 1.



Figura 124 - Imagem da amostra 3 com defeitos presentes na fatia superior.



Figura 125 - Imagem da amostra 3 com defeitos presentes na fatia intermediária.



Figura 126 - Imagem da amostra 3 com defeitos presentes na fatia inferior.

A Tabela XI apresenta a redução percentual da área das seções transversais apresentadas nas figuras acima.

Tabela XI - Redução percentual da área das seções transversais.

| Fatia | Redução percentual da área (%) |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Amostra 1 - Fatia 1 | 1,59 |
| Amostra 3 – Fatia superior | 8,34 |
| Amostra 3 – Fatia intermediária | 8,55 |
| Amostra 3 – Fatia inferior | 5,18 |

5. CONCLUSÕES

Mostrou-se neste trabalho que a tomografia de raios X é uma técnica não-destrutiva eficiente para a visualização do interior de corpos de madeira. As reconstruções das seções transversais apresentaram fielmente todos os defeitos presentes nas amostras analisadas. A reconstrução de fatias em várias alturas permite analisar a posição, a orientação, o formato e a extensão dos defeitos em todo o volume de uma amostra. Além disso, foi possível observar os anéis de crescimento, formados pela alternância de faixas claras (lenho tardio, mais denso) e escuras (lenho inicial, menos denso).

A redução de ruído por filtro da mediana proporcionou um aumento significativo da qualidade das tomografias. Entretanto, a aplicação do filtro, além de requerer um maior tempo de aquisição das projeções, acarreta uma suavização das imagens reconstruídas. Estas desvantagens aumentam com o tamanho da janela adotada. Assim, adotou-se uma janela de tamanho 5 x 5 como satisfatória para a redução de ruído.

Todas as imagens reconstruídas apresentam artefatos em forma de anel. Estes artefatos, causados por diferenças de resposta dos diversos elementos da câmera CCD, podem ser minimizados pelo filtro da mediana, mas não desaparecem completamente.

O método proposto para a segmentação de defeitos nas imagens tomográficas apresentou bons resultados para rachaduras e ataque causado por fungo. A operação de fechamento *top-hat* destaca os defeitos em relação às regiões vizinhas de madeira. Em seguida, o passo de limiarização extrai os defeitos realçados, classificando os defeitos como pixels com valor 1 e madeira e o fundo da imagem como pixels com valor 0. Por último, a etapa de abertura morfológica elimina pixels isolados indesejáveis

No entanto, a segmentação apresenta limitação em certas situações. Em defeitos de pequenas dimensões, como rachaduras muito finas, ou com grande variação de tons de

cinza, como em ataques causados por fungo, o realce pela aplicação do fechamento *top-hat* não é suficiente para que a etapa de limiarização global diferencie os defeitos com sucesso. Neste caso, um limiar global muito baixo detecta todos os defeitos, mas inclui ao mesmo tempo zonas de madeira sem defeitos. Por outro lado, um maior valor de limiar elimina zonas indesejáveis, mas causa a perda de algumas regiões de defeitos.

Apesar destas limitações, a segmentação proposta, além de demonstrar o potencial das técnicas de processamento digital de imagens, permitiu, com boa repetibilidade, a avaliação aproximada da área ocupada pelos defeitos, assim como a redução percentual da área das seções transversais analisadas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- **Implementação de um algoritmo de reconstrução para feixe em leque** – Modificar o algoritmo atual que considera o feixe aproximadamente paralelo. Depois de implementada a reconstrução para feixe em leque, repetir as reconstruções e as segmentações apresentadas neste trabalho, verificando possíveis melhorias na qualidade das tomografias e nos resultados da segmentação.
- **Implementação de um algoritmo de reconstrução tridimensional** – Como o sistema tomográfico industrial permite a aquisição de radiografias, é possível implementar um algoritmo de reconstrução de todo o volume do objeto. A partir da reconstrução do objeto em três dimensões, pode-se extrair fatias em qualquer posição e orientação.
- **Desenvolvimento de um tomógrafo de campo para árvores e postes de madeira** – O estudo apresentado neste trabalho poderá servir de base à construção de um tomógrafo portátil. O equipamento poderá ser aplicado na avaliação de possíveis doenças e defeitos e na visualização do interior de árvores e postes de madeira, muito utilizados no setor elétrico e de telefonia.
- **Desenvolvimento de um método de segmentação de defeitos automático** – Automatizar a escolha do valor de limiar ótimo, buscando como possíveis soluções a limiarização local adaptativa e a análise do histograma das tomografias.
- **Reconhecimento automático de defeitos em tomografias de corpos de madeira usando redes neurais artificiais** - As imagens geradas pelo tomógrafo industrial poderão ser empregadas como entrada para um sistema de identificação automática de defeitos por redes neurais. Além de dados referentes aos tons de cinza, parâmetros

relativos a textura, como variância, orientação e tamanho devem ser usados como informações pela rede neural.

- **Estudo da relação entre a redução de área e propriedades mecânicas** – Relacionar o resultado da determinação da redução de área por segmentação das tomografias com a modificação das propriedades mecânicas de amostras de madeira (resistência a esforços de tração, compressão, cisalhamento, etc.)
- **Aplicação da técnica para outros estudos em madeira** – A tomografia de raios X poderá ser aplicada em outras análises da madeira: visualização da distribuição do conteúdo de água, estudo do processo de secagem, estudo do processo de absorção de água, visualização do surgimento e da formação de rachaduras internas durante a secagem, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KAK, A. C.; SLANEY, M. **Principles of computerized tomographic imaging**. New York: IEEE Press, 1988.
2. CASTRO E SILVA, A. **Anatomia da madeira**. Disponível em: <<http://www.geocities.com/adcastro2000/inicio/principal.html>> Acesso em: 13 jan. 2004.
3. AES FLORESTAL. Disponível em <<http://www.aessul.com.br/florestal/index.asp>> Acesso em: 12 jan. 2004.
4. TSOUMIS, G. **Science and technology of wood**: Structure, properties, utilization. New York: Chapman & Hall, 1991.
5. STRUCTURE of wood. Disponível em: <<http://www.swst.org/teach/set2/struct1.html>> Acesso em: 12 jan. 2004.
6. APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. (Eds.). **Anatomia vegetal**. Viçosa: Editora UFV, 2003.
7. HELLMEISTER, J. C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira**. São Carlos, 1973. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
8. GAY, P. (Ed.). **L'atlas du bois**. Paris: Éditions de Monza, 2001.
9. THE ANATOMY of wood. Disponível em <<http://waynesword.palomar.edu/trjuly99.htm>> Acesso em: 12 jan. 2004.
10. UNIVERSITY OF ARIZONA. The Laboratory of Tree-Ring Research. **Useful Tree Species for Tree-Ring Dating**. Disponível em: <<http://tree.ltrr.arizona.edu/lorim/good.html>> Acesso em: 16 jan. 2004.
11. VILLIERE, A. **Séchage des bois**. 6. ed. Paris: Editora Dunod, 1966.

-
12. WHEELER, E. **General characteristics of wood.** Disponível em: <<http://courses.ncsu.edu/classes/wps202002/intro/wood.html>> Acesso em: 12 jan. 2004.
 13. LUMBER defects. Disponível em: <<http://www.bordenanderickson.com/defects.html>> Acesso em: 12 jan. 2004.
 14. DEFEITOS na secagem de madeiras. Disponível em: <<http://www.ipef.br/tecprodutos/defsecagem.html>> Acesso em: 12 jan. 2004.
 15. SECAGEM. Disponível em: <<http://mapara.inpa.gov.br/madeira/bra/drying.htm>>. Acesso em: 12 jan. 2004.
 16. TOMASELLI, I.; KLITZKE, R. A. **Secagem da madeira.** Apostila do curso de Engenharia Florestal - Universidade Federal do Paraná, 2000.
 17. WOOD characteristics. Disponível em: <http://www.dot.ca.gov/hq/esc/construction/Manuals/Falsework/Appendix_A.pdf> Acesso em: 12 jan. 2004.
 18. THOMASSON LUMBER COMPANY. **Photographic manual of wood pole characteristics.** Disponível em: <<http://www.thomassonlumber.com/ansi.htm>> Acesso em: 13 jan. 2004.
 19. RING shake vs wind shake. Disponível em: <<http://www.woodcentral.com/shots/shot137.shtml>>. Acesso em: 26 jan. 2004.
 20. INSIDE a tree trunk. Disponível em: <<http://www.botany.uwc.ac.za/ecotree/trunk/woodanatomy.htm>> Acesso em: 13 jan. 2004.
 21. NÓS na madeira. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/ed59nos.asp>> Acesso em: 13 jan. 2004.
 22. WOODZONE. Disponível em: <<http://www.woodzone.com/index.htm>> Acesso em: 13 jan. 2004.

-
23. FURTADO, E. L. Microorganismos manchadores da madeira. In: SIMPÓSIO DO CONE SUL SOBRE MANEJO DE PRAGAS E DOENÇAS DE PINUS, 1., 2000, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2000. p. 91-96.
24. REEB, J. E. College of Agriculture, University of Kentucky. **Wood-destroying organisms & wood preservatives**. Disponível em: <<http://www.ca.uky.edu/agc/pubs/for/for54/for54.pdf>> Acesso em: 13 jan. 2004.
25. CONTROLE de pragas. Disponível em: <<http://www.otamandua.com.br/controle.htm>> Acesso em: 13 jan. 2004.
26. DOW AGROSCIENCES. **Centro de informações sobre cupins**. Disponível em: <<http://www.dowagro.com/sentricon/br/cupim/index.htm>> Acesso em: 13 jan. 2004.
27. WESTERN PEST SERVICES. **Bugged at home?** Disponível em: <<http://www.westernpest.com/why/bugged.html>> Acesso em: 13 jan. 2004.
28. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE FOREST SERVICE. Forest Products Laboratory. **Properties of juvenile wood**. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/techline/VI-7.pdf>> Acesso em: 20 jan. 2004.
29. LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. **Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira**. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 7, n. 1, p. 279-291, jan./dez. 2000.
30. WHAT is tomography? Disponível em: <<http://www.tomography.umist.ac.uk/whattom.shtml>> Acesso em: 13 jan. 2004.
31. HERMAN, G. T. **Image reconstruction from projections**. Orlando: Academic Press, 1996.

-
32. CORMACK, A. M. **Autobiography**. Disponível em: <<http://www.nobel.se/medicine/laureates/1979/cormack-autobio.html>> Acesso em: 13 jan. 2004.
33. HOUNSFIELD, G. N. **Autobiography**. Disponível em: <<http://www.nobel.se/medicine/laureates/1979/hounsfeld-autobio.html>> Acesso em: 13 jan. 2004.
34. HOUNSFIELD, G. N. **Computed medical imaging**. Disponível em: <<http://www.nobel.se/medicine/laureates/1979/hounsfeld-lecture.html>> Acesso em: 13 jan. 2004.
35. THE NOBEL prize in physiology or medicine 1979. Disponível em: <<http://www.nobel.se/medicine/laureates/1979/index.html>> Acesso em: 13 jan. 2004.
36. GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
37. MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro: Brasport Livros e Multimídia, 1999.
38. MEAN filter. Disponível em: <<http://www.dai.ed.ac.uk/HIPR2/mean.htm>> Acesso em: 13 jan. 2004.
39. MEDIAN filter. Disponível em: <<http://www.dai.ed.ac.uk/HIPR2/median.htm>> Acesso em: 13 jan. 2004.
40. MATHEMATICAL morphology. Disponível em: <<http://www.dai.ed.ac.uk/HIPR2/matmorph.htm>> Acesso em: 13 jan. 2004.
41. CLOSING. Disponível em: <<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/close.htm>>. Acesso em: 26 jan. 2004.
42. OPENING. Disponível em: <<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/open.htm>>. Acesso em: 26 jan. 2004.

-
43. THRESHOLDING. Disponível em: <<http://www.dai.ed.ac.uk/HIPR2/threshld.htm>>
Acesso em: 13 jan. 2004.
44. ADAPTIVE thresholding. Disponível em: <<http://www.dai.ed.ac.uk/HIPR2/adpthrsh.htm>> Acesso em: 13 jan. 2004.
45. TOP-HAT and bottom-hat filters. Disponível em: <<http://utam.geophys.utah.edu/ebooks/gg527/impro/ch7/ch/node6.html>> Acesso em: 13 jan. 2004.
46. MMCLOSETH – closing top hat. Disponível em: <<http://www.mmorph.com/html/morph/mmcloseth.html>> Acesso em: 13 jan. 2004.
47. MMOPENTH – opening top hat. Disponível em: <<http://www.mmorph.com/html/morph/mmopenth.html>> Acesso em: 13 jan. 2004.
48. ONOE, M.; TSAO, J. W.; YAMADA, H.; NAKAMURA, H.; KOGURE, J.; KAWAMURA, H.; YOSHIMATSU, M. Computed tomography for measuring the annual rings of a live tree. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. 221, n. 1, p. 213-220, mar. 1984.
49. FROMM, J. H., SAUTTER, I., MATTHIES, D., KREMER, J., SCHUMACHER, P., GANTER, C. Xylem water content and wood density in spruce and oak trees detected by high-resolution computed tomography. **Plant Physiology**, Rockville, v. 127, n. 2, p. 416-425, out. 2001.
50. GUPTA, N. K.; SCHMOLDT, D. L.; ISAACSON, B. Tangential scanning of hardwood logs: developing an industrial computer tomography scanner. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 11.,1999, Madison. **Proceedings**... Madison: Forest Products Society, 1998. p. 131-139.

-
51. RINNHOFFER, A.; PETUTSCHNIGG, A.; ANDREU, J. P. Internal log scanning for optimizing breakdown. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 41, n. 1-3, p. 7-21, dez. 2003.
52. PIERRET, A., CAPOWIEZ, Y., MORAN, C. J., KRETZSCHMAR, A. X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distributions. **Geoderma**, v. 90, n. 3-4, p. 307-326, jul. 1999.
53. CRESTANA et al. **Instrumentação Agropecuária: Contribuições no Limiar do Novo Século**. Brasília: EMBRAPA, 1996. 291 p.
54. CESAREO, R. *et al.* **X and γ -Ray Tomography for the study of works of art**. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/v05n01/cesareo/cesareo.htm>> Acesso em: 09 fev. 2004.
55. ZHU, D.; CONNERS, R.; ARAMAN, P. CT image sequence processing for wood recognition. In: **SOUTHEAST SYMPOSIUM ON SYSTEM THEORY**, 23., 1991, Columbia. **Proceedings...** Columbia: University of South Carolina, 1991. p. 75-79.
56. BHANDARKAR, S., FAUST, T. D., TANG, M. A system for detection of internal log defects by computer analysis of axial CT images. In: **IEEE WORKSHOP ON APPLICATIONS OF COMPUTER VISION**, 3., 1996, Sarasota. **Proceedings...** Sarasota, 1996. p. 258-263.
57. LI, P., ABBOTT, A. L., SCHMOLDT, D. L. Automated analysis of CT images for the inspections of hardwood logs. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS**, 1996, Washington DC. **Proceedings...** Washington DC: IEEE, 1996, p. 1744-1749.
58. Disponível em: <<http://www.torry.net/video.htm>>. Acesso em: 13 jan. 2004.

59. THE MATHWORKS – Matlab. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab>> Acesso em: 14 jan. 2004.

60. QUOIRIN, N. S. R. **Diagnóstico de amostras de madeira por tomografia de raios X.**

Disponível em: <<http://www.tomografiademadeira.tk>> Acesso em: 16 fev. 2004.