

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO

**“Método complementar de análise
da qualidade de madeira com técnicas
do processamento digital de imagens”**

Orientador: Prof. Dr. Paulo E. Cruvinel

Aluno: Thiago Pirola Ribeiro

São Carlos
Agosto/2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**“Método complementar de análise da qualidade de
madeira com técnicas do processamento digital de
imagens”**

Orientador: Prof. Dr. Paulo E. Cruvinel
Aluno: Thiago Pirola Ribeiro

**São Carlos
Agosto/2002**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Método complementar de análise da qualidade de madeira com técnicas do
processamento digital de imagens

Thiago Pirola Ribeiro

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência da Computação da
Universidade Federal de São Carlos
como parte integrante dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Ciência da Computação.

Prof. Dr. Paulo Estevão Cruvinel
(Orientador – Embrapa)

Prof. Dr. Roberto de Alencar Lotufo
(DCA – FEEC – Unicamp)

Prof. Dr. Nelson Delfino d'Ávila Mascarenhas
(DC – UFSCar)

Prof. Dr. Mário Tomazello Filho
(DCF - ESALQ/USP)

São Carlos
Agosto/2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Método complementar de análise da qualidade de madeira com técnicas do
processamento digital de imagens

Thiago Pirola Ribeiro

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência da Computação da
Universidade Federal de São Carlos
como parte integrante dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Ciência da Computação.

Prof. Dr. Paulo Estevão Cruvinel
(Orientador –Embrapa)

Prof. Dr. Roberto de Alencar Lotufo
(DCA – FEEC – Unicamp)

Prof. Dr. Nelson Delfino d'Ávila Mascarenhas
(DC – UFSCar)

São Carlos
Agosto/2002

Dedico este trabalho a
Deus, aos meus pais, à
minha irmãzinha Rachel e à
minha estimada Lúcia.

Agradecimentos

A Deus por tudo que tem feito por mim.

Aos meus pais, Valter e Maria Helena, minha irmã Rachel, meus tios e tias, meus avós Adelina e Armínio e Lazara e Dorival.

À minha Lú, pela compreensão e ajuda em todos os momentos.

Ao professor Paulo Estevão Cruvinel, pela ajuda, confiança e orientação durante esse tempo.

Ao professor Mário Tomazello Filho pela co-orientação e companheirismo desde os tempos de minha graduação.

A Mirna com quem pude contar durante os vários anos de minha vida.

Aos amigos de casa Matheus, Nassim, Márcia, Reinaldo e Val.

Aos amigos de laboratório Ana Cláudia, Felipe Pazzinato, Luciano Koenigkan, Luciano Pugsley, Maurício pela ajuda, pizzas, lanches e festas durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos do Departamento de Computação.

Aos velhos e bons amigos de MOO.

Aos amigos conquistados durante esses anos Eli, Érita, Maria, Paulo Botosso, Cláudio Lisi, Vivian, Helien, Rodrigo, Ivan, Alexandre, Fernando, Jorjão e o restante nem preciso dizer os nomes, pois sabem o quanto vale nossa amizade.

Ao CNPq e Embrapa Instrumentação Agropecuária pelo suporte financeiro.

A todos aqueles que nunca acreditaram que eu poderia chegar até aqui.

Sumário

Lista de Figuras.....	i
Lista de Tabelas.....	v
Lista de Símbolos.....	viii
Resumo.....	x
Abstract.....	xi
Prefácio.....	1
Capítulo 1 – Fundamentos sobre qualidade de madeiras e metodologias de análise	2
1.1 Introdução.....	2
1.2 Fundamentos sobre qualidade de madeiras.....	4
1.3 Vetor de parâmetros envolvidos na qualidade de madeiras brasileiras.....	10
1.4 O uso da microscopia de luz e de força atômica para aquisição de imagens de amostras de madeira.....	11
1.4.1 Microscopia de luz.....	11
1.4.2 Microscopia de força atômica.....	14
Capítulo 2 – O processamento digital de imagens e técnicas de segmentação e classificação de interesse para a análise da qualidade de madeiras.....	17
2.1 O processamento de imagem.....	17
2.2 Análise de imagem.....	19
2.3 Segmentação de imagens.....	20
2.3.1 Formulação básica para a segmentação orientada por região.....	20
2.3.2 Crescimento de regiões por agregação de pixel.....	21
2.3.2.1 Algoritmo de Crescimento de Regiões por Agregação de Pixel....	22
2.3.3 Extração de características por limiar.....	24
2.3.4 Detecção de região.....	24
2.3.5 Detecção de bordas.....	26
2.4 Representação e descrição de imagens.....	27
2.4.1 Esquemas de representação.....	28

2.4.2 Esquemas de descrição.....	29
2.5 Classificação de imagens.....	30
2.5.1 Teoria da Decisão e Métodos Classificatórios.....	31
2.5.2 Métodos de decisão teórica.....	38
2.5.3 O método <i>Match</i>	39
2.5.3.1 Classificador de distância mínima.....	39
Capítulo 3 – Desenvolvimento e implementação do novo método para análise da qualidade de madeiras brasileiras com técnicas do processamento digital de imagens.....	42
3.1 Descrição dos processos.....	42
3.2 Descrição dos Procedimentos.....	53
3.3 O vetor complementar de parâmetros envolvidos na qualidade de madeiras brasileiras fornecido pelo método desenvolvido.....	59
Capítulo 4 – Resultados e Conclusões.....	60
4.1 Avaliação da interface com o usuário.....	60
4.2 Teste para validação do método para a medida de ângulo microfibrilar com técnica do processamento digital de imagem.....	75
4.3 Estudo de casos.....	83
4.3.1 Estudo de caso para a espécie <i>Amburana cearensis</i>	83
4.3.1.1 Sobre a espécie <i>Amburana cearensis</i>	83
4.3.1.2 Análise dos elementos anatômicos microscópicos.....	84
4.3.2 Estudo de caso para a espécie <i>Cedrela fissili</i>	93
4.3.2.1 Sobre a espécie <i>Cedrela fissil</i>	93
4.3.2.2 Análise dos elementos anatômicos microscópicos.....	95
4.3.3 Estudo de caso para a espécie <i>Eucalyptus saligna</i>	104
4.3.3.1 Sobre a espécie <i>Eucalyptus saligna</i>	104
4.3.3.2 Análise dos elementos anatômicos microscópicos.....	105
4.3.4 Estudo de caso para a espécie <i>Hymenaea stilbocarpa</i>	116
4.3.4.1 Sobre a espécie <i>Hymenaea stilbocarpa</i>	116

4.3.4.2 Análise dos elementos anatômicos microscópicos.....	117
4.3.5 Estudo de caso para a espécie <i>Eucalyptus saligna</i> analisando o ângulo microfibrilar.....	126
4.4 Conclusão.....	129
4.5 Sugestão de trabalho futuro.....	131
Referências Bibliográficas.....	132
Glossário.....	137

Lista de Figuras

Figura 1 - Planos anatômicos de corte (Burger & Richter, 1991).....	6
Figura 2 - Estrutura da parede celular. (a) Corte transversal mostrando inclinação das microfibrilas nas paredes primárias e secundárias. (b) Ângulo microfibrilar e porcentagem de cada constituinte da parede celular nas faces tangencial (T) e radial (R) (Chniewind & Barret, 1969).....	8
Figura 3 - Árvore de decisão.....	12
Figura 4 – Foto ilustrativa de um microscópio de luz Axioskop, da Zeiss, com objetivas de 10, 20 e 40 vezes de ampliação. Oculares de ampliação de 10 vezes. Utiliza luz transmitida ou refletida e a sua base para apoio das amostras é deslocável nos eixos X e Y	13
Figura 5 - Microscópio de força atômica TMX 2010 Discoverer da Topometrix.....	15
Figura 6 - Diagrama de alguns tópicos relacionados em análise de imagens.....	19
Figura 7 - Região crescente usando pontos iniciais conhecidos onde (a) matriz da Imagem Original; (b) matriz resultante para um limiar 3; e (c) matriz resultante para um limiar 8 (Gonzalez & Woods, 1992).....	22
Figura 8 - Ilustração pelo código de cadeia (Gonzalez & Woods, 1992).....	28
Figura 9 - Regiões com números de Euler iguais a 0 e -1, respectivamente (Gonzalez & Woods, 1992).....	30
Figura 10 - Função densidade de probabilidade de duas classes de madeiras.....	33
Figura 11 - Variação das probabilidades à posteriori para $P(w_1) = 2/3$, $P(w_2)=1/3$	34
Figura 12 - Representação gráfica do classificador de Bayes.....	38
Figura 13 - Fronteira de decisão do classificador de mínima distância para Flores - Íris versicolor e Íris setosa (Fisher, 1936).....	41
Figura 14 – (a) Fluxograma geral do sistema e (b) Diagrama de blocos do processo de Análise da Qualidade de Madeiras Brasileiras.....	43
Figura 15 – Estrutura do algoritmo de abertura da imagem.....	44
Figura 16 – Estrutura do algoritmo de zoom.....	45
Figura 17 – Diagrama de blocos do algoritmo do limiar ótimo.....	47
Figura 18 – Diagrama de blocos da estrutura do módulo de segmentação.....	49
Figura 19 – Diagrama de blocos da segmentação automática.....	50
Figura 20 – Pseudo-código da segmentação sem recursividade.....	51
Figura 21 – Estrutura do algoritmo de retas	52

Figura 22 – Estrutura do algoritmo de gráfico.....	52
Figura 23 – Estrutura do algoritmo de ajustes finos.....	53
Figura 24 – Diagrama da estrutura de análise para elementos vasculares.....	54
Figura 25 – Diagrama da estrutura de análise para raios.....	55
Figura 26 – Diagrama da estrutura de análise de espessura de parede de fibras.....	55
Figura 27 – Diagrama da estrutura de análise do diâmetro de lúmen.....	56
Figura 28 – Diagrama da estrutura de análise da largura de fibras.....	57
Figura 29 – Diagrama da estrutura de análise da angulação microfibrilar.....	58
Figura 30 - Tela de apresentação do sistema desenvolvido.....	61
Figura 31 - Tela de apresentação do menu para definição de unidades do sistema.....	62
Figura 32 - Tela de apresentação da definição de unidades do sistema para a realização da conversão de unidades dentro do sistema.....	62
Figura 33 – Tela de apresentação com a imagem de uma escala micrométrica para a conversão de unidades de pixel para micrometros.....	63
Figura 34 – Tela de apresentação com a marcação de uma linha para determinar a quantidade de pixel presente no intervalo dado pela escala micrométrica.....	64
Figura 35 – Tela de apresentação com a caixa de diálogo para a abertura da imagem.....	65
Figura 36 – Tela de apresentação com a imagem aberta e pronta para o processamento....	65
Figura 37 – Tela de apresentação do menu Processamento e o sub-menu Filtros.....	66
Figura 38 – Tela de apresentação do menu Madeiras e seus sub-menus.....	66
Figura 39 - Tela de apresentação da Limiarização.....	67
Figura 40 – Tela de apresentação da janela de zoom ao lado da imagem.....	68
Figura 41 – Tela de apresentação com as opções para ajustes e retoques na imagem.....	69
Figura 42 – Tela de apresentação da mensuração por reta com gráfico de intensidades.....	70
Figura 43 - Tela de apresentação da mensuração de elementos por retas.....	70
Figura 44 – Tela de apresentação da mensuração manual.....	71
Figura 45 – Tela de apresentação da mensuração automática e janela dos dados totalizados por cores.....	71
Figura 46 – Tela de apresentação da mensuração automática e janela dos dados totalizados por cores e ao lado indicativos da localização e dimensão de cada elemento.....	72
Figura 47 – Tela de apresentação da definição da Região de Interesse.....	73
Figura 48 – Tela de apresentação da imagem para mensurar a angulação microfibrilar.....	73

Figura 49 – Tela de apresentação do resultado da técnica de afinamento.....	74
Figura 50 – Tela de apresentação do histograma da frequência acumulada.....	74
Figura 51 – (a) Imagem padrão com angulação de 0°; (b) Imagem padrão com angulação de 45°; (c) Imagem padrão com angulação de 90° e (d) Imagem padrão com angulação de 135°.....	75
Figura 52 – (a) Imagem padrão com variação angular incremental de 0,5°; (b) Imagem padrão com variação angular incremental de 1°; (c) Imagem padrão com variação angular incremental de 2°; (d) Imagem padrão com variação angular incremental de 3,5°; (e) Imagem padrão com variação angular incremental de 5°.....	77
Figura 53 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 100 vezes ..	85
Figura 54 – Tela de apresentação da mensuração por retas no corte transversal de <i>Amburana cearensis</i> com ampliação de 100 vezes.....	86
Figura 55 - Tela de apresentação do corte radial de <i>Amburana cearensis</i> com ampliação de 100 vezes.....	87
Figura 56 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de <i>Amburana cearensis</i> com ampliação de 100 vezes.....	87
Figura 57 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 400 vezes.....	89
Figura 58 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte transversal de <i>Amburana cearensis</i> com ampliação de 400 vezes.....	90
Figura 59 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte radial de <i>Amburana cearensis</i> com ampliação de 400 vezes.....	92
Figura 60 – Tela de apresentação do corte tangencial de <i>Amburana cearensis</i> com ampliação de 400 vezes.....	93
Figura 61 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 100 vezes.....	95
Figura 62 – Tela de apresentação da mensuração por retas no corte transversal de <i>Cedrela fissili</i> com ampliação de 100 vezes.....	96
Figura 63 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte radial de <i>Cedrela fissili</i> com ampliação de 100 vezes.....	97
Figura 64 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de <i>Cedrela fissili</i> com ampliação de 100 vezes.....	98
Figura 65 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 400 vezes...	99
Figura 66 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte transversal de <i>Cedrela fissili</i> com ampliação de 400 vezes.....	100
Figura 67 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte radial de <i>Cedrela</i>	

<i>fissili</i> com ampliação de 400 vezes.....	102
Figura 68 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de <i>Cedrela fissili</i> com ampliação de 400 vezes.....	103
Figura 69 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 100 vezes...	106
Figura 70 – Tela de apresentação da mensuração por retas por retas no corte transversal de <i>Eucalyptus saligna</i> com ampliação de 100 vezes.....	106
Figura 71 – Tela de apresentação do corte transversal de <i>Eucalyptus saligna</i> com ampliação de 100 vezes.....	108
Figura 72 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de <i>Eucalyptus saligna</i> com ampliação de 100 vezes.....	108
Figura 73 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 400 vezes...	110
Figura 74 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte transversal de <i>Eucalyptus saligna</i> com ampliação de 400 vezes.....	110
Figura 75 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte radial de <i>Eucalyptus saligna</i> com ampliação de 400 vezes.....	113
Figura 76 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de <i>Eucalyptus saligna</i> com ampliação de 400 vezes.....	114
Figura 77 – Tela de resultado da definição de unidade para ampliação de 100 vezes.....	118
Figura 78 – Tela de apresentação da mensuração por retas por retas no corte transversal de <i>Hymenaea stilbocarpa</i> com ampliação de 100 vezes.....	118
Figura 79 – Tela de apresentação da mensuração por do corte radial de <i>Hymenaea stilbocarpa</i> com ampliação de 100 vezes.....	119
Figura 80 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de <i>Hymenaea stilbocarpa</i> com ampliação de 100 vezes.....	120
Figura 81 – Tela de resultado da definição de unidade para ampliação de 400 vezes.....	121
Figura 82 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte transversal de <i>Hymenaea stilbocarpa</i> com ampliação de 400 vezes.....	122
Figura 83 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte radial de <i>Hymenaea stilbocarpa</i> com ampliação de 400 vezes.....	123
Figura 84 – Tela do resultado da mensuração por reta no corte tangencial de <i>Hymenaea stilbocarpa</i> com ampliação de 100 vezes.....	124
Figura 85 – Tela de apresentação da imagem para mensurar a angulação.....	126
Figura 86 - Tela de apresentação do resultado da técnica de limiarização.....	127
Figura 87 – Tela de apresentação do resultado da técnica de afinamento.....	128
Figura 88 – Tela de apresentação do histograma da frequência acumulada.....	128

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros envolvidos na qualidade de madeiras.....	59
Tabela 2 – Dados gerados com a análise da imagem apresentada na Figura 52 (a).....	78
Tabela 3 – Síntese da análise da Tabela 2.....	78
Tabela 4 – Dados gerados com a análise da imagem apresentada na Figura 52 (b).....	79
Tabela 5 – Síntese da análise da Tabela 4.....	79
Tabela 6 – Dados gerados com a análise da imagem apresentada na Figura 52 (c).....	80
Tabela 7 – Síntese da análise da Tabela 6.....	80
Tabela 8 – Dados gerados com a análise da imagem apresentada na Figura 52 (d).....	81
Tabela 9 – Síntese da análise da Tabela 8.....	81
Tabela 10 – Dados gerados com a análise da imagem apresentada na Figura 52 (e).....	82
Tabela 11 – Síntese da análise da Tabela 10.....	82
Tabela 12 – Resultado da mensuração de elementos vasculares de <i>Amburana cearensis</i> com ampliação de 100 vezes.....	86
Tabela 13 – Resultado da mensuração de raios (Altura) para a espécie de <i>Amburana cearensis</i>	88
Tabela 14 – Resultado da mensuração de raios (Largura) para a espécie de <i>Amburana cearensis</i>	88
Tabela 15 – Resultado da mensuração de fibra (Espessura da Parede) para a espécie de <i>Amburana cearensis</i>	90
Tabela 16 – Resultado da mensuração de fibra (Diâmetro do Lúmen) para a espécie de <i>Amburana cearensis</i>	91
Tabela 17 – Resultado da mensuração de raio (Altura) para a espécie de <i>Amburana cearensis</i>	92
Tabela 18 – Resultado da análise dos elementos anatômicos microscópicos de <i>Amburana cearensis</i>	93
Tabela 19 – Resultado da mensuração de elementos vasculares de <i>Cedrela fissili</i> com ampliação de 100 vezes.....	96
Tabela 20 – Resultado da mensuração de raios (Largura) para a espécie de <i>Cedrela fissili</i>	97
Tabela 21 – Resultado da mensuração de raios (Altura) para a espécie de <i>Cedrela fissili</i>	98

Tabela 22 – Resultado da mensuração de fibra (Espessura da Parede) para a espécie de <i>Cedrela fissili</i>	100
Tabela 23 – Resultado da mensuração de fibra (Diâmetro do Lúmen) para a espécie de <i>Cedrela fissili</i>	101
Tabela 24 - Resultado do cálculo da largura de fibra para espécie de <i>Cedrela fissili</i>	101
Tabela 25 – Resultado da mensuração de raio (Largura) para espécie de <i>Cedrela fissili</i>	102
Tabela 26 – Resultado da mensuração de raio para a espécie de <i>Cedrela fissili</i>	103
Tabela 27 – Resultado da análise dos elementos anatômicos microscópicos de <i>Cedrela fissili</i>	104
Tabela 28 – Resultado da mensuração de elementos vasculares de <i>Eucalyptus saligna</i>	107
Tabela 29 – Resultado da mensuração de raios (Altura) para a espécie de <i>Eucalyptus saligna</i>	109
Tabela 30 – Resultado da mensuração de raios (Largura) para a espécie de <i>Eucalyptus saligna</i>	109
Tabela 31 – Resultado da mensuração de fibra (Espessura da Parede) para a espécie de <i>Eucalyptus saligna</i>	111
Tabela 32 – Resultado da mensuração de fibra (Diâmetro de Lúmen) para a espécie de <i>Eucalyptus saligna</i>	112
Tabela 33 – Resultado da mensuração de raio (Largura) para a espécie de <i>Eucalyptus saligna</i>	113
Tabela 34 – Resultado da mensuração de (Altura) para a espécie de <i>Eucalyptus saligna</i>	114
Tabela 35 – Resultado da mensuração de (Largura) para a espécie de <i>Eucalyptus saligna</i>	115
Tabela 36 – Resultado da análise dos elementos anatômicos microscópicos de <i>Eucalyptus saligna</i>	116
Tabela 37 – Resultado da mensuração de elementos vasculares de <i>Hymenaea stilbocarpa</i>	119
Tabela 38 – Resultado da mensuração de raios (Altura) para a espécie de <i>Hymenaea stilbocarpa</i>	120
Tabela 39 – Resultado da mensuração de raios (Largura) para a espécie de <i>Hymenaea stilbocarpa</i>	120
Tabela 40 – Resultado da mensuração de fibra (Espessura da Parede) para a espécie de <i>Hymenaea stilbocarpa</i>	122

Tabela 41 – Resultado da mensuração de fibra (Diâmetro de Lúmen) para a espécie de <i>Hymenaea stilbocarpa</i>	123
Tabela 42 – Resultado da mensuração de raios (Altura) para a espécie de <i>Hymenaea stilbocarpa</i>	124
Tabela 43 – Resultado da mensuração de raios (Largura) para a espécie de <i>Hymenaea stilbocarpa</i>	125
Tabela 44 – Resultado da análise dos elementos anatômicos microscópicos de <i>Hymenaea stilbocarpa</i>	125

Lista de Símbolos

- $f(x,y)$ – função que representa uma imagem nas coordenadas cartesianas;
- $P()$ – função booleana de análise de posição de um pixel;
- R – região a ser analisada;
- $P(R)$ – função booleana aplicada a região R ;
- \cup - símbolo de união;
- \cap - símbolo de intersecção;
- T – função de limiarização (*thresholding*);
- $p(x,y)$ – função que denota os atributos de intensidade do pixel na posição x e y ;
- $H()$ – função booleana definida de análise de região;
- M_1 – matriz para a máscara do operador de Roberts;
- M_2 – matriz para a máscara do operador de Roberts;
- M_x – matriz para as máscaras de Sobel e Prewitt;
- M_y – matriz para as máscaras de Sobel e Prewitt;
- ML – matriz para as máscaras de filtros não lineares do laplaciano;
- w – representação de uma classe;
- x – vetor de atributos;
- $P(w)$ – probabilidade *à priori*;
- $P(x|w_j)$ – função densidade de probabilidade de ocorrer o atributo x dado a classe w_j ;
- $P(w_j|x)$ – probabilidade *à posteriori* de ocorrer a classe w_j dado o atributo x ;
- C^{-1} – inversa da matriz de Covariância;

σ^2 – variância;

m – média de um vetor de atributos;

$|C_j|$ - determinante da matriz de covariância;

$g(x)$ – função discriminante;

Σ_i – matriz de covariância;

$|\Sigma|$ - determinante da matriz de covariância;

$d(x)$ – função de decisão;

Resumo

Este trabalho apresenta um método complementar de análise da qualidade de madeira com técnicas do processamento digital de imagens e estabelece um vetor de parâmetros indicadores de qualidade baseado na caracterização de aspectos microscópicos e sub-microscópicos.

Medidas e identificação de vasos, raios e fibras, bem como ângulo microfibrilar são realizados em amostras de madeira a partir da análise de imagens digitais obtidas com técnicas de microscopia de luz e de força atômica, bem como com técnicas de limiarização, classificação, segmentação por crescimento de região, filtragem e afinamento.

Resultados obtidos a partir de estudos de casos com as espécies *Amburana cearensis*, *Cedrela fissili*, *Eucalyptus saligna* e *Hymenaea stilbocarpa* mostraram erro médio percentual na classe de 5%, o que indica a potencialidade da metodologia desenvolvida e a sua utilidade na caracterização complementar de parâmetros de qualidade de madeiras brasileiras.

Abstract

This work presents a complementary methodology for wood quality analysis by means of digital image processing techniques. Also it defines a vector of parameters having a set of quality indicators as a function of the wood microscopy and submicroscopy aspects.

Calibration and testing of the developed methodology were obtained using optic and atomic force microscopy images from a set of studies with four different wood species (*Amburana cearensis*, *Cedrela fissili*, *Eucalyptus saligna*, *Hymenaea stilbocarpa*). The images were processed using the developed methodology, which includes digital image processing operations such as threshold, classification, segmentation by region growing, filtering, and skeletonization.

Results have shown for a set of measurements, obtained by measuring vessel, radii, and fibers, as well as microfibril angle, percentual average error around 5%, i.e., indicating the potentiality of such methodology and its suitability to complement Brazilian wood quality analysis.

Prefácio

Este trabalho apresenta um método complementar de análise da qualidade de madeira com técnicas do processamento digital de imagens que foi desenvolvido em parceria multiinstitucional envolvendo a Universidade Federal de São Carlos, através do seu Departamento de Computação, a Embrapa e a ESALQ/USP, Laboratório de Anatomia da Madeira.

A apresentação do documento é feita em 4 capítulos, conforme descrito abaixo, bem como da bibliografia consultada durante o desenvolvimento da pesquisa e glossário.

No capítulo 1 deste trabalho é apresentada uma introdução à biologia vegetal focando nas estruturas anatômicas das madeiras para que sejam consolidados conceitos para entender a qualidade das madeiras e a metodologia de análise e aquisição de imagens.

No capítulo 2 são apresentados conceitos fundamentais sobre imagem e apresenta uma arquitetura básica para o seu processamento digital. Também são discutidos métodos para segmentação e classificação e sua importância no desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 3 são apresentados o detalhamento da metodologia desenvolvida e a implementação do sistema para análise da qualidade de madeiras brasileiras com técnicas do processamento digital de imagens.

No capítulo 4 são apresentados em estudos de casos os resultados obtidos com o desenvolvimento e aplicação do método complementar de análise da qualidade de madeira com técnicas do processamento digital de imagens. Também, são apresentados tópicos referentes a sua aferição e análise de erros quanto a medida de ângulo microfibrilar em madeiras brasileiras.

Capítulo 1

Fundamentos sobre qualidade de madeiras e metodologias de análise

Este capítulo faz uma introdução à biologia vegetal focando nas estruturas anatômicas das madeiras para que sejam consolidados conceitos para entender a qualidade das madeiras e a metodologia de análise.

1.1 Introdução

No final da década passada e no início da presente verificou-se, com os avanços na área da computação, um gradativo e significativo processo de automatização das análises de laboratório nas diferentes áreas da ciência. Os resultados imediatos podem ser comprovados pela redução do tempo de realização e aumento no número das análises, além da melhoria da qualidade das informações e ganhos significativos em precisão. Tais procedimentos incluem desde a coleta, processamento, tratamento estatístico dos dados e a apresentação dos resultados. Atualmente, nos laboratórios modernos os pesquisadores e técnicos têm suas atividades dirigidas principalmente para o preparo das amostras, acompanhamento das análises e interpretação dos resultados. Essa nova situação, ao contrário da que ocorria no passado - em que prevaleciam procedimentos exclusivamente manuais tem eliminado o trabalho de análises exaustivas e sujeitas a erros, principalmente quando dados são coletados às dezenas e até às centenas de milhares (Clauson & Wilson, 1991; Lewis, 1995).

Dentre as áreas beneficiadas pelos avanços da informática, destacam-se as de processamento e análise de imagens digitais, visão computacional e inteligência artificial, nas quais foram aplicados significativos recursos financeiros e esforços visando a melhoria das condições e da qualidade dos trabalhos laboratoriais e de tratamento dos dados. De modo particular, nos laboratórios das universidades e institutos do primeiro mundo, que desenvolvem pesquisas nas áreas de biologia,

anatomia, ciência e tecnologia da madeira, etc. verifica-se, com frequência cada vez maior, a existência de equipamentos que incorporam as facilidades da automação (Peszlen, 1994; Stokke & Manwiller,1994). Por outro lado, há necessidade de introdução e aplicação desses sistemas de automação no processamento e análise de imagens digitais, principalmente nas áreas da biologia e anatomia, melhorando as condições de equipamento e trabalho existentes nas nossas instituições em relação a dos países desenvolvidos.

A utilização dessas novas técnicas é extremamente importante, principalmente na análise e interpretação das variações das estruturas celulares do lenho das espécies florestais nativas (Florsheim & Tomazello Filho,1994), ou introduzidas, bem como outras plantas de potencial tecnológico. O Brasil possui a maior floresta tropical do mundo (com 280 milhões de hectares) com significativas reservas de madeira (cerca de 50 bilhões de metros cúbicos). Portanto é necessária a caracterização, o reconhecimento e o estudo de nossas espécies florestais, que se constituem em um patrimônio da humanidade em termos de biodiversidade, atingindo cerca de 4.000 espécies. É importante salientar que, dessas milhares de espécies da floresta tropical, algumas dezenas são utilizadas no mercado nacional, e somente 23 espécies compõem mais de 60% do volume de madeira exportado, implicando em riscos de extinção caso essas espécies não sejam substituídas por outras com características semelhantes, com rápido crescimento e provenientes de florestas plantadas, como apresentam (Mainieri & Pereira,1965; Mainieri & Chimelo,1989).

Quanto as florestas plantadas com espécies introduzidas, o Brasil conta com aproximadamente 4 milhões de hectares, destacando principalmente os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, existindo necessidade de estudos referentes as propriedades das madeiras provenientes dessas espécies (Hellmeister, 1973; Oliveira & Della Lucia,1994; Oliveira et al.,1995).

Principalmente no caso do gênero *Eucalyptus*, com mais de 600 espécies, sendo algumas dezenas cultivadas no país, existe uma grande carência de informações quanto às características e propriedades de suas madeiras, principalmente para

utilização mais nobre, como na indústria moveleira e da construção civil. Alguns estudos básicos encontram-se em (Tomazello Filho, 1985a,b; 1987, 1995; Alfonso, 1987). Dessa forma, a utilização das técnicas de processamento e análise de imagens digitais no estudo do lenho dos eucaliptos e pinus, é de extrema importância, principalmente na identificação e propriedades das madeiras de suas espécies, com lenhos muito homogêneos, e difícil separação pelos métodos convencionais de identificação, além das espécies de bambu (Tomazello Filho, 1988). Também na área de dendrocronologia, que busca a interpretação de acontecimentos passados através do estudo do crescimento periódico (anéis de crescimento) do lenho das espécies florestais, tais técnicas são de grande importância (Tomazello Filho, 1995).

Para poder avaliar a qualidade da madeira, são necessários vários parâmetros. Um dos parâmetros para estabelecer esta qualidade utiliza a estrutura da parede celular, ao nível de camadas. Para poder observá-la, foi proposto a utilização de Microscopia de Força Atômica, pois com este recurso, a observação reduz-se à escala nanométrica. Com isso, poderá ser observada a angulação fibrilar e analisando-se as imagens, chega-se a um dado para ser comparado com o parâmetro de angulação padrão para qualidade da madeira.

A angulação fibrilar é um dos parâmetros utilizados para a determinação da qualidade pois, esta angulação irá determinar se a madeira irá envergar ou irá enrijecer. Outros parâmetros obtidos com o uso de microscopia de luz, também ajudam a estabelecer a qualidade da madeira, entre eles, a espessura da parede, diâmetro e largura de vasos, parênquima, fibras e raios.

1.2 Fundamentos sobre qualidade de madeiras

Atualmente, profissionais de várias áreas estão investindo em pesquisas para obter o melhor de seus produtos e com o menor custo, com o intuito de competir neste mercado globalizado. Na área de madeiras também é assim. As indústrias de papel, as madeireiras e etc. estão investindo para saber o potencial das árvores brasileiras para seus negócios.

Para poder estudar o potencial de uma madeira, são retiradas algumas amostras para serem analisadas em laboratórios especializados. A obtenção de amostras para este tipo de análise é feita por método destrutivo, ou seja, para obter as amostras é necessário a derrubada da árvore. Dessa árvore derrubada são retirados do tronco, discos de madeira que podem ser, da base, cerca de 30 cm, do DAP (Diâmetro à Altura do Peito), cerca de 1,30 m, e depois a cada metro do tronco até o ápice. A madeira é recortada em amostras pequenas, de aproximadamente 2,0 x 1,5 x 1,5 cm. Depois de recortadas, as amostras são tratadas para amolecer, geralmente fervendo-as em água por algumas horas até amolecer o suficiente para serem cortadas com micrótomo em espessura de cerca de 30 microns, o que depende do objetivo do experimento a ser feito.

As madeiras são organismos heterogêneos constituídos por células dispostas e organizadas em diferentes direções (Burger & Richter, 1991). Para estudos anatômicos, os seguintes planos convencionais de corte são adotados:

- **Transversal (X)**: perpendicular ao eixo da árvore;
- **Longitudinal radial (R)**: paralelo aos raios ou perpendicular aos anéis de crescimento;
- **Longitudinal tangencial (T)**: tangenciando os anéis de crescimento, ou perpendicular aos raios.

As amostras utilizadas neste trabalho foram obtidas de cortes histológicos dos 3 planos de estudo da madeira. A estrutura dos planos de cortes está ilustrada graficamente na Figura 1. Para isto, foi utilizado um micrótomo de deslize que retirou cortes, com espessura variando de 15 a 22 μm , dos corpos de prova.

Para a utilização das amostras em microscopia de luz, as amostras foram coloridas para destacar os tecidos e montadas em bálsamo e colocadas em laminas de vidro. No caso das amostras preparadas para serem observadas em microscopia de força atômica, estas foram preparadas sem a adição de nenhum composto ou reagente químico.

Alguns dos elementos da madeira que influenciam em sua qualidade, foram analisados sob microscopia de luz. Utilizando-se dos 3 planos de corte, foram analisados os seguintes parâmetros: espessura da parede, diâmetro e largura de vasos, parênquima radial e dimensões de vasos, fibras e raios, dentre outros.

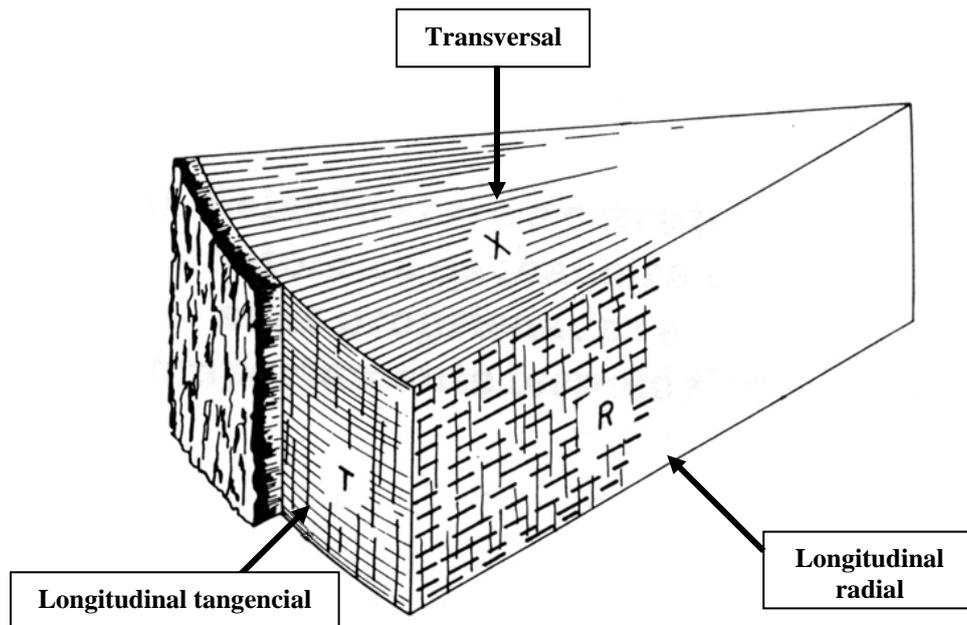


Figura 1 - Planos anatômicos de corte (Burger & Richter, 1991).

Outro parâmetro para estabelecer esta qualidade utiliza a estrutura da parede celular, composta basicamente por microfibrilas. Estas microfibrilas poderão ser observadas sob grande ampliação viabilizando visualizar a angulação microfibrilar. Analisando-se este ângulo microfibrilar, pode se chegar a dados que viabilizam comparações com os parâmetros de angulação, padrão para qualidade da madeira.

Para se entender o que é o ângulo microfibrilar, primeiramente precisa-se entender alguns conceitos da anatomia vegetal, podendo no entanto, fazer-se algumas analogias com o que se conhece da anatomia humana, conforme ilustra as citações abaixo.

“No processo de divisão celular, a primeira membrana de separação a aparecer entre o par de novas células é a lamela média, composta

principalmente de pectato de cálcio e magnésio, cuja função é unir as células umas às outras. Sobre esta membrana acumulam-se posteriormente no interior da célula microfibrilas de celulose, formando uma trama irregular, que constitui a parede primária, dotada de grande elasticidade. Esta parede acompanha o crescimento da célula durante a sua diferenciação. Concluído este processo, depositam-se junto à membrana primária microfibrilas de celulose, obedecendo a certa orientação, que destaca três camadas distintas, constituintes da parede secundária da célula: a S1, S2 e S3” (Burger & Richter, 1991).

“As microfibrilas são orientadas de várias maneiras nas paredes celulares, geralmente mais regularmente na parede secundária. Na parede primária, as microfibrilas são, muitas vezes, orientadas numa direção mais ou menos transversal ao eixo maior; tornam-se arrançadas mais longitudinalmente durante o crescimento da célula. À medida que as camadas subseqüentes são formadas, as microfibrilas são orientadas cada vez mais longitudinalmente. Essa transição é gradual; a mudança na direção das microfibrilas nas sucessivas camadas da parede pode ser de aproximadamente 120°” (Cutter, 1986).

A estrutura da parede celular, pode ser vista pela diferenciação entre as camadas S1, S2 e S3 é feita através da sua espessura e do seu ângulo microfibrilar. A camada S1 apresenta uma espessura variando de 0,1 a 0,2 μm e é composta por diversas subcamadas mais delgadas, com ângulo microfibrilar variando de 35 a 80°. Já a camada S2 varia de 1 a 10 μm em espessura e 10 a 35° de ângulo microfibrilar. A camada S3 varia sua espessura de 0,06 a 0,08 μm e o ângulo microfibrilar é semelhante ao da camada S1, como pode ser observado na Figura 2 (Butterfield, 1977).

Após localizarmos a camada S2 da parede celular, iniciaremos a avaliação do ângulo microfibrilar que irá proporcionar informações sobre a qualidade e propriedades físico-mecânicas da madeira como a variação dimensional, a resistência à flexão e a compressão, tração paralela às fibras.

A avaliação do ângulo fibrilar das microfibrilas de celulose das várias camadas da parede secundária e, em especial, da camada S2 é feita pela mensuração do ângulo de inclinação das moléculas de celulose em relação ao eixo da célula.

As propriedades físico-mecânicas citadas anteriormente variam conforme a espécie florestal sendo que, as propriedades físicas da madeira são:

- Umidade da madeira, que indica o teor de água da madeira a uma considerada umidade do ambiente;

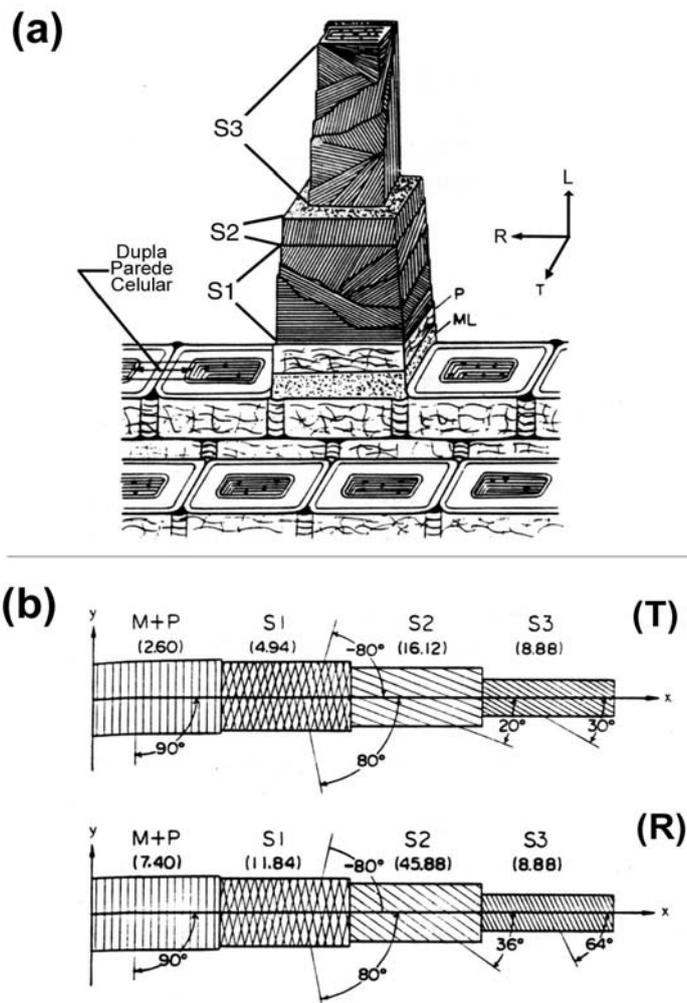


Figura 2 - Estrutura da parede celular. (a) Corte transversal mostrando inclinação das microfibrilas nas paredes primárias e secundárias. (b) Ângulo microfibrilar e porcentagem de cada constituinte da parede celular nas faces tangencial (T) e radial (R) (Chniewind & Barret, 1969).

- Massa específica, que é a relação entre a massa e o volume, a um determinado teor de umidade;
- Retratibilidade, que expressa a variação dimensional em função da alteração do teor de umidade;

e as propriedades mecânicas são:

- Compressão paralela às fibras, que determina o limite de resistência da madeira em estudo, quando submetida à compressão axial;
- Flexão estática, que possibilita a determinação do limite de resistência da madeira em estudo, quando submetida à esforço de flexão;
- Tração normal às fibras, que é utilizada para determinar a resistência da madeira, quando submetida a esforço de tração perpendicular às fibras; consiste na separação total das camadas de crescimento da peça de madeira em consequência de esforços dirigidos no sentido radial;
- Fendilhamento, que é utilizado para avaliar a resistência da madeira ao fendilhamento, deslocando gradualmente as camadas de crescimento do corpo de prova;
- Dureza, que avalia a resistência da madeira à penetração de ferramentas, fornecendo informações sobre sua resistência ao desgaste;
- Cisalhamento, que avalia a resistência da madeira, quanto aos esforços exigidos em uso, tais como vigas ou outras utilizações em estrutura de madeira.

Essas propriedades podem ser normalmente notadas sem um estudo muito aprofundado, por exemplo na instabilidade dimensional que pode ocorrer devido a entrada ou saída de água entre as moléculas de celulose da parede celular provocando o afastamento das mesmas; na fabricação de polpa e papel, madeiras com grande volume de células de grande comprimento são preferidas pois tem uma boa resistência; dentre outros (Panshin et al.,1970).

Nas propriedades físico-mecânicas, a camada S2 da parede celular é responsável, implicitamente, pela “determinação” da maioria das propriedades pois, a menor mudança do ângulo microfibrilar desta camada, que corresponde a 45% da parede celular, irá influenciar nas propriedades físico-mecânicas da árvore em estudo.

1.3 Vetor de parâmetros envolvidos na qualidade de madeiras brasileiras

Os elementos anatômicos analisados nas amostras observadas em microscopia de luz iniciaram-se pelo tecido vascular, que ocupa 10 a 40% da madeira. No plano transversal os vasos (poros) são analisados quanto ao (i) tipo - múltiplos ou solitários; (ii) o agrupamento - cadeias radiais, tangenciais, oblíquas; (iii) conteúdo - tiloses, depósitos de taninos, oxalato de cálcio, gomas, resinas, carbonato de cálcio; (iv) a forma da seção - circular, oval ou poligonal. Nos planos tangencial e radial deve-se analisar as (i) placas de perfuração; (ii) o pontuado nas paredes radiais e tangenciais e (iii) as linhas vasculares. As mensurações do tecido vascular visam determinar (i) a fração de volume dos vasos; (ii) o diâmetro tangencial e radial; (iii) a espessura da parede; (iv) o comprimento e a (v) frequência por milímetro quadrado. Na análise do tecido fibroso que ocupa 30 a 70% da madeira, deve-se mensurar o comprimento, diâmetro e espessura das paredes das fibras em material macerado. Em lâminas histológicas observa-se no plano transversal (i) a disposição das fibras - radial ou irregularmente distribuída; e (ii) o tipo - libriformes, septadas, gelatinosas, fibrotraqueídeos e traqueídeos vasicentricos - Além dos parâmetros citados deve-se, também, determinar o volume ocupado pelas fibras na madeira. O tecido parenquimático, constituído pelo raio parenquimático ocupa 10 a 40% é formado por células denominadas procumbentes e eretas, podendo ser observadas ainda células quadradas, envoltentes, cristalíferas, mucilaginosas, oleíferas, entre outras. No plano tangencial, pode variar com relação à (i) disposição - estratificado, irregular, não estratificado -; (ii) frequência por milímetro linear; (iii) altura e (iv) largura. No plano radial é classificado pelo (i) tipo de célula - homo ou heterocelular -, e analisado seu conteúdo - cristais de oxalato de cálcio, corpusculos silicosos, amido, tanino, óleo-resinas, entre outros -. Nos planos transversal e tangencial são classificados como unisseriados, bisseriados ou multisseriados, de acordo com o número de células. O tecido parenquimático constituído pelo parênquima longitudinal, ocupa de 5 a 30% da madeira, podendo estar ausente em algumas espécies.

Quanto a disposição considera-se (i) sua associação com os vasos, - paratraqueal, apotraqueal; (ii) a forma das células - fusiformes, estratificadas, não estratificadas, retangulares, entre outras - . Outras características como inclusões minerais e cristais (forma acicular, rafide, entre outras) também devem ser observadas nas células parenquimáticas. Além dos parâmetros deve-se, também determinar o volume ocupado pelo parênquima na madeira (Ribeiro et al., 1999a,b,c). A árvore de decisão apresentada na Figura 3 descreve a estrutura de análise dos parâmetros que foram anteriormente descritos.

1.4 O uso da microscopia de luz e de força atômica para aquisição de imagens de amostras de madeira

Para A análise por processamento de imagem das amostras de madeira faz-se aquisição de imagens das amostras, preparadas conforme exposto nos itens anteriores.

Neste trabalho, como parte do método desenvolvido as imagens das amostras de madeira foram obtidas com o uso das técnicas de microscopia de luz e microscopia de força atômica.

1.4.1 Microscopia de luz

A Microscopia de Luz, comumente chamada de Microscopia de Óptica, tem um funcionamento relativamente simples e é composto basicamente por uma parte mecânica (suporte) e uma parte de luz constituída por três sistemas de lentes: o condensador, a objetiva e ocular, conforme pode ser observado na Figura 4.

A ampliação total dada por um microscópio é igual ao aumento da objetiva multiplicado pelo aumento da ocular.

A resolução de um microscópio está relacionada à capacidade de separação de detalhes. Na prática a resolução é a menor distância que pode ser observada de forma a garantir que dois pontos quaisquer apareçam individualizados.

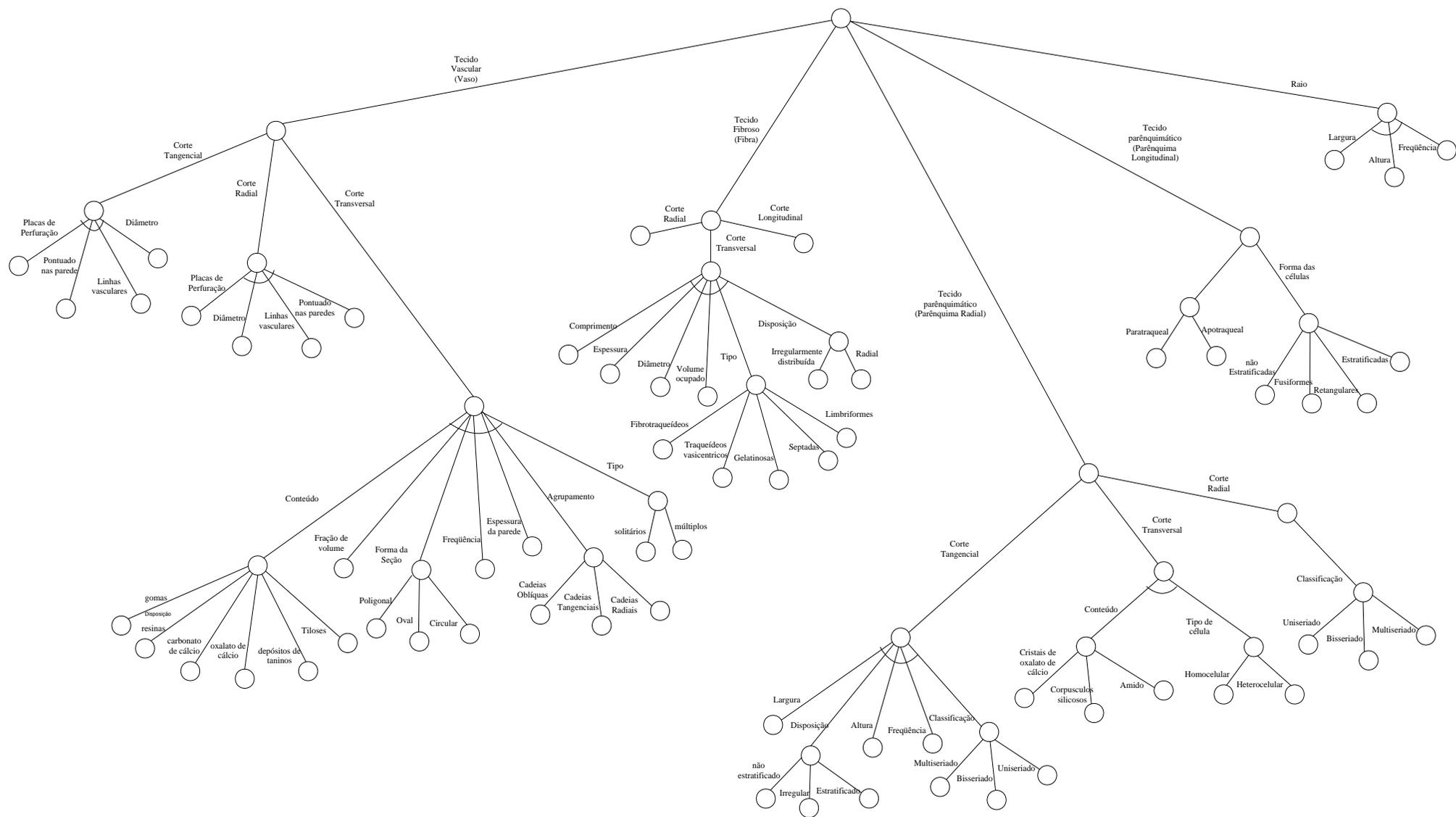


Figura 3 - Árvore de decisão.

O que determina a riqueza de detalhes da imagem fornecida por um sistema óptico é o seu limite de resolução, e não o seu poder de aumentar o tamanho dos objetos. O limite de resolução depende essencialmente da objetiva, pois a ocular não pode acrescentar detalhes à imagem, uma vez que sua função é apenas aumentar o tamanho da imagem que é projetada pela objetiva (Junqueira & Carneiro,2000).

A Figura 4 ilustra um microscópio de luz com objetivas de 10, 20 e 40 vezes de ampliação, conforme modelo do laboratório de anatomia da madeira da ESALQ/USP, Piracicaba, SP, que foi utilizado no desenvolvimento deste trabalho.



Figura 4 – Foto ilustrativa de um microscópio de luz Axioskop, da Zeiss, com objetivas de 10, 20 e 40 vezes de ampliação. Oculares de ampliação de 10 vezes. Utiliza luz transmitida ou refletida e a sua base para apoio das amostras é deslocável nos eixos X e Y.

Neste trabalho foram utilizados lentes com aumentos de 100 e 400 vezes para a obtenção das imagens. Estes valores não foram escolhidos aleatoriamente, mas baseando-se na literatura descrita para objetos a serem estudados, tais como: elementos vasculares, diâmetro tangencial e frequência dos vasos, frequência e distância dos raios, diâmetro do lúmen, largura da parede, largura e altura dos raios e o comprimento das fibras, sendo que estão distribuídas nos 3 planos de corte.

1.4.2 Microscopia de força atômica

Outro instrumento utilizado na busca de informações microscópicas em escala nanométrica é o Microscópio de Força Atômica (MFA), com o qual pode-se observar a estrutura atômico-molecular dos materiais e com isso, vem a ser possível o uso desse equipamento para investigar o ângulo fibrilar de amostras de madeira, o qual constitui parâmetro importante na qualidade.

A Microscopia de Força Atômica (MFA ou *Atomic Force Microscopy - AFM*) foi desenvolvida em 1986 por Binning e Rohen (Binning et al., 1986) a partir de instrumental já existente para microscopia de varredura por tunelamento (*scanning tunneling microscope – STM*), como uma ferramenta para a investigação de superfícies em uma escala atômico/molecular.

“Neste tipo de microscópio as imagens são geradas através da medida das forças de atração ou repulsão entre a superfície da amostra e uma sonda ou agulha bem fina que varre a amostra. Esta varredura é feita, por intermédio de um sistema piezoelétrico, com deslocamento, nas posições x, y e z com precisão de décimo de Angstrom, o que se dá através da variação da tensão aplicada no mesmo” (Herrmann et al., 1997). Basicamente, as imagens de MFA são obtidas monitorando-se a posição de uma pequena sonda mantida muito próxima à superfície da amostra que irá gerar dados para uma reconstrução gráfica da superfície.

Este tipo de instrumento permite trabalhar em 3 modos: de contato, de não-contato e contato intermitente. No modo de contato a imagem resultante da microscopia é fundamentalmente resultado da superfície da amostra do formato da ponta e das forças de atração e repulsão interatômicas entre a ponta e a superfície. Desde que este tipo de microscopia começou a ser usado sabe-se que, no modo de contato, o tamanho finito da ponta impede acesso à toda superfície da amostra, então vários esforços tem sido feitos para se descobrir a interação entre a ponta da sonda e a amostra e tentar se extrair mais informações sobre a superfície estudada.

As vantagens do MFA sobre os outros tipos de microscopias é que não necessita de métodos específicos para o preparo das amostras, uma vez que conforme citado no capítulo anterior, as amostras foram cortadas e não foi adicionado nenhum composto ou reagente químico pois, o MFA utiliza-se do modo de contato para gerar as imagens da superfície das amostras e, se algum tipo de substância estivesse presente na amostra, poderia estar influenciando e/ou alterando os dados sobre a mesma. Este tipo de microscopia também obtém uma maior resolução nas imagens sendo que é possível a geração de imagens em 3 dimensões.

Com as vantagens demonstradas, o MFA tem um grande potencial para estudos do ângulo microfibrilar de amostras de madeira. Utilizando-se um microscópio de força atômica sob ambiente climatizado, pôde-se observar imagens de seção da superfície de madeiras nas quais aparece a estrutura da parede celular onde se encontra a camada S2 que é a base para a identificação da orientação da microfibrila e da fibrila (Hanley & Gray,1994).

O microscópio de força atômica que foi utilizado neste trabalho é do modelo TMX2010 Discoverer, da Topometrix, Santa Clara-CA, USA. Foi utilizado o laboratório de microscopia do Centro de Instrumentação da Embrapa, São Carlos-SP, o qual dispõe de um microscópio de MFA TMX2010, conforme ilustrado na Figura 5.



Figura 5 - Microscópio de força atômica TMX 2010 Discoverer da Topometrix.

Neste trabalho se utilizou técnicas atuais do processamento de imagens no desenvolvimento de metodologia de análise de madeiras, a qual envolve não somente o dispositivo de imageamento mas principalmente um algoritmo dedicado para a análise.

Capítulo 2

O processamento digital de imagens e técnicas de segmentação e classificação de interesse para a análise da qualidade de madeiras

Este capítulo traz conceitos fundamentais sobre imagem e apresenta uma arquitetura básica para o seu processamento digital. Também são discutidos métodos para segmentação e classificação e sua importância no desenvolvimento deste trabalho.

2.1 O processamento de imagem

Nos últimos 30 anos, consideráveis avanços têm sido desenvolvidos nos segmentos de reconhecimento de padrões, identificação de padrão e processamento de imagens com aplicações a sistemas de visão. Esses avanços têm levado a uma grande necessidade para o desenvolvimento de métodos, softwares e hardware experimentais para uso em projeto de sistemas de visão (Duda & Hart, 1973; Fukunaga, 1985, 1990; Fong, 1996; Giacinto et al., 1997; Cruvinel et al., 1999; Ribeiro et al., 2001, 2002). A partir dos conceitos iniciais do processamento de sinal e da teoria de sistemas o processamento de imagens dependia principalmente de filtros lineares e máscaras de convolução.

A área do processamento de imagem vem sendo desenvolvida de forma significativamente crescente. Nos dias atuais há inúmeros sistemas que têm como ponto central o processamento de imagens. Esse processamento permite análises rápidas e muitas vezes automáticas de diversos tipos de imagens por exemplo imagens médicas, imagens de satélites, imagens de peças de linhas de montagens, imagens de materiais biológicos, imagens agropecuárias, etc.

Uma das primeiras aplicações de processamento de imagens ocorreu no começo do século passado, onde se tentava aprimorar a qualidade de impressão de imagens digitalizadas que eram transmitidas através do sistema Bartlane de transmissão

de imagens por cabo submarino entre Londres e Nova Iorque. O grande impulso nesta área veio com o advento dos primeiros computadores digitais de grande porte e o início do programa espacial norte-americano. Atualmente, o processamento de imagens vem sendo explorado por diversas áreas como a medicina, laboratórios de pesquisas, fabricas automotivas, processamento de documentos, fotografia, publicações, dentre outras (Marques Filho, 1999).

Um sistema de processamento de imagem é composto basicamente dos processos de aquisição, processamento, armazenamento e saída.

Uma imagem digital pode ser definida por uma função $f(x,y)$ bidimensional, ou num subconjunto limitado no plano, cujos valores assumidos pela função são números reais e não negativos, que servem para representar a medida do nível de cinza ou brilho da imagem (intensidade) no ponto considerado como as coordenadas (x,y) (Gonzalez & Woods, 1992).

Os valores discretos de $f(x,y)$ também são chamados de elementos de pintura ou “pixel” (menor elemento de exibição de intensidade ou cor). Em cada pixel o brilho da imagem é amostrado e quantizado naquele ponto. Assim, uma imagem é representada por linhas horizontais e verticais, constituídas por *pixels* adjacentes, sendo que o número total de *pixels* determina a resolução da imagem.

Neste trabalho as imagens obtidas com a técnica de microscopia de luz foram digitalizadas utilizando-se uma câmera digital acoplada ao microscópio óptico e a uma placa LGV-5480TV, acoplada a um microcomputador Pentium II com 233 MHz. Adicionalmente, auxiliado pela técnica de microscopia de força atômica, os dados resultantes da leitura das amostras de madeira, foram também adequadas a um formato de imagem digital e armazenados para posterior análise.

Para o armazenamento das imagens foram utilizados os meios convencionais, como por exemplo, discos magnéticos e CD-ROMs.

2.2 Análise de imagens

A maioria dos sistemas que envolvem aplicações na área de análise de imagens são capacitados para interpretar os resultados das análises e descrever os vários objetos e suas relações. Nestes casos, a análise de imagens é dotada de características próprias, através das operações de processamento, tais como manipulação de imagens por computador e de algumas técnicas, onde a entrada de dados é uma imagem e a saída é também uma outra imagem.

A análise de imagens se caracteriza também por englobar diversas sub-áreas independentes e por envolver basicamente o estudo de técnicas tais como extração de características, segmentação e classificação. A Figura 6 mostra um diagrama de técnicas de análise de imagens, relacionando os principais segmentos dentro de cada grupo.



Figura 6 - Diagrama de alguns tópicos relacionados em análise de imagens.

2.3 Segmentação de imagens

Segmentação é o processo que subdivide uma imagem em partes ou objetos (Gonzalez & Woods, 1992). Basicamente, consiste em dividir a imagem em regiões uniformes e homogêneas, que tenham algum significado, resultando em um conjunto de objetos separados, respeitando algumas propriedades, como tom ou textura, e cujos valores destas propriedades diferem em alguns aspectos e significados das propriedades de cada região vizinha, permitindo assim, obter sua descrição total ou parcial.

As suas aplicações confundem-se com as aplicações do próprio processamento de imagens, sendo que muitos dos algoritmos necessitam inicialmente que a imagem seja segmentada para em seguida ser analisada. A análise de imagens médicas, de estruturas anatômicas dentre outras, são aplicações em que é essencial a segmentação, para se identificar um tumor, ou um defeito em uma estrutura, por exemplo.

Atualmente, os algoritmos de segmentação de imagens são inúmeros e projetados especificamente para uma determinada aplicação. O algoritmo que detecta com grande precisão um defeito de uma peça em uma linha de montagem não obteria o mesmo resultado ao tentar detectar uma estrutura anatômica de madeira.

Esses algoritmos geralmente são baseados em uma das duas propriedades básicas dos valores do nível de cinza: descontinuidade e similaridade.

As técnicas de segmentação mais exploradas são: orientada por região, crescimento de região por agregação de pixel, detecção de pontos e linhas; detecção de bordas; detecção de regiões e limiarização. Essas técnicas permitem a identificação de objetos simples que aparecem, geralmente, como grupos de pontos conectados e correspondem às linhas ou regiões da imagem.

2.3.1 Formulação básica para a segmentação orientada por região

Se $P(R)$ é uma função booleana tal que, para qualquer região R , $P(R)$ seja verdadeira se e somente se R for homogênea, então $P_1(R)$ é verdadeira se e somente se,

dados dois pixels x_i e x_j de R , a diferença entre os níveis de cinza de x_i e x_j não for maior que uma constante d .

As regiões que satisfazem $P1$ têm o nível de cinza aproximadamente constante por toda a região se a constante d for pequena; pelo critério $P2$, o nível de cinza pode variar desde que não muito rapidamente.

Considerando R a representação da imagem inteira, pode-se ver a segmentação como um processo que particiona R em n sub-regiões, R_1, R_2, \dots, R_n , tal que:

$$\bigcup_{i=1}^n R_i = R,$$

R_i é uma região conectada, $i = 1, 2, \dots, n$,

$$R_i \cap R_j = \emptyset \text{ para todo } i \text{ e } j, i \neq j,$$

$$P(R_i) = \text{VEDADEIRO para } i = 1, 2, \dots, n, \text{ e}$$

$$P(R_i \cup R_j) = \text{FALSO para } i \neq j.$$

A condição (a) indica que a segmentação deve ser completa, isto é, todos os pixels devem estar em uma região e a união de todas as regiões é a imagem. A segunda condição requer que pontos em uma região devam ser conectados. A condição (c) indica que as regiões devem ser disjuntas. A condição (d) está relacionada com as propriedades que devem ser satisfeitas pelos pixels em uma região segmentada. Finalmente, a condição (e) indica que as regiões R_i e R_j são diferentes por causa do predicado, onde R_{ij} é obtida pela união de duas regiões adjacentes, R_i e R_j . As condições (a), (b), (c) e (d) caracterizam uma partição que satisfaz P ; a condição (e) obriga que a partição seja a mais forte possível.

2.3.2 Crescimento de regiões por agregação de pixel

Crescimento de regiões é um procedimento que agrupa pixels ou sub-regiões em regiões maiores. Esse método estabelece a agregação de pixel, iniciada com um

3. Compara cada pixel x com seus vizinhos anteriores; dois casos podem ocorrer:
 - a) X não pode ser adicionado à região de nenhum vizinho anterior sem violar a condição de homogeneidade, neste caso inicia nova região: $K \leftarrow K + 1$; $\text{Região}(x) \leftarrow K$;
 - b) X pode ser adicionado à região de p (vizinho anterior), neste caso adiciona x à região de p ; $\text{Região}(x) \leftarrow \text{Região}(p)$.

onde x é o pixel com coordenadas (x, y) ; os vizinhos anteriores de x são os pontos $(x - 1, y)$, $(x, y - 1)$, $(x - 1, y - 1)$, $(x - 1, y + 1)$; $\text{Região}(p)$ indica a região do ponto p . O algoritmo fornece regiões que satisfazem os critérios de (a), (b), (c) e (d), mas não necessariamente (e), embora isto geralmente aconteça devido ao modo com que j é definido. Para garantir o critério (e), são necessários passos adicionais com possíveis fusões das regiões que violam este critério.

Ao contrário do crescimento de regiões segundo a varredura, onde várias regiões são crescidas simultaneamente, no crescimento por busca em todas as direções uma única região é crescida por vez. Os passos para a operabilidade do método são descritos abaixo:

1. $K \leftarrow 0$;
2. Escolhe um pixel x , tal que $\text{Região}(x) = 0$, se não existe pixel nesta condição, então para: Fim;
3. Inicia nova região: $K \leftarrow K + 1$; $\text{Região}(x) \leftarrow K$;
4. Acha todos os pixels p da vizinhança de x , tal que $\text{Região}(p) = 0$ e p possa ser adicionado à região de x sem violar o critério de homogeneidade: faz $\text{Região}(p) \leftarrow \text{Região}(x)$ e guarda estes pixels em um conjunto X ;
5. se X está vazio, vai para passo 2; caso contrário, escolha e extraia um pixel x de X ;
6. Vai para passo 4;

onde inicialmente $\text{Região}(p) = 0$ para todo pixel p da imagem.

2.3.3 Extração de características por limiar

A extração de características por limiar é a forma mais comum de extrair características de objetos. É baseada em histogramas que avaliam o nível de cinza de uma imagem $f(x,y)$.

Nesta técnica, a extração destes elementos é feita através da seleção de um limiar T (*thresholding*), que separa a imagem em dois agrupamentos. Este reconhecimento é avaliado entre a função $f(x,y)$ e o limiar T . Além do nível de cinza existe a função $p(x,y)$ que denota algumas propriedades locais deste pixel, por exemplo, a variação de intensidade de brilho de um vizinho centrado em (x,y) .

Com base nos conceitos apresentados, pode-se ver o limiar como uma operação que envolve testes para uma função T da forma:

$$T = T[x, y, p(x, y), f(x, y)] \quad (1)$$

onde $f(x,y)$ é o nível de cinza no pixel (x,y) , e $p(x,y)$ uma função de alguma propriedade local. Assim, pode-se criar uma imagem limiar $g(x,y)$ definida por:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x, y) > T \\ 0, & \text{se } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (2)$$

Desta forma, por meio de (2) é possível examinar $g(x,y)$ e achar os *pixels* que assumem o valor 1 (ou qualquer outro nível de intensidade conveniente) correspondendo aos objetos, enquanto os *pixels* de valor 0 correspondem ao fundo.

2.3.4 Detecção de região

Uma região de determinada imagem é representada por um conjunto de pontos

“ligados” de tal forma que, de qualquer ponto da região, pode-se chegar a qualquer outro ponto desta, percorrendo um caminho inteiramente contido na região. A definição de “região” depende do conceito de vizinhança, principalmente no que diz respeito ao uso de vizinhança-4 ou vizinhança-8.

As regiões que se deseja detectar são, normalmente regiões homogêneas que apresentam alguma propriedade local mais ou menos constante em toda sua extensão, como o nível de cinza e a textura.

A detecção de regiões em imagens pode ser feita visando-se um dos seguintes objetivos principais:

- a) extrair uma determinada região da imagem:
- b) particionar a imagem em um conjunto de regiões disjuntas, cuja união das partes represente a imagem inteira. Dada a semelhança dos métodos para ambos os casos, é feito um tratamento unificado.

Entre os métodos mais comuns de particionamento de regiões, destacam-se o crescimento de regiões e divisão e fusão de regiões.

O crescimento de regiões também pode ser feito segundo a varredura e por busca em todas as direções. No primeiro caso, permite-se que a imagem seja percorrida de cima para baixo e da esquerda para a direita sendo cada pixel (x,y) comparado com seus vizinhos anteriores (já identificados) e adicionados a classe da região a que pertence. Assim, se um determinado pixel não for adicionado a região de um vizinho, este iniciará uma nova região. No segundo caso, na varredura por busca em todas as direções, tem-se uma única região “crescida” por vez, enquanto que no primeiro, várias regiões são “crescidas” simultaneamente.

A divisão e fusão de regiões é feita basicamente, pegando-se uma partição inicial da imagem, e considerando uma função H , do tipo booleana, definida para qualquer região homogênea R . Diz-se que $H(R)$ é verdadeira ou falsa, de acordo com o

valor de uma variável booleana. Esse método é indicado para manipular a partição da região de interesse, através de divisão e fusão de regiões, até obter uma partição que satisfaça H.

A ordem em que as regiões são consideradas influi no resultado final. Então, faz-se necessário adotar critérios para especificar a ordem de escolha dessas regiões. Por exemplo, pode-se dividir inicialmente as regiões maiores e unir as menores, através de algoritmos apropriados.

2.3.5 Detecção de bordas

Devido às características primitivas uma detecção de bordas é uma das técnicas de segmentação que é muito utilizada para sistemas de inspeção e classificação de objetos.

O termo “borda” (ou *edge element*), é assim usado por vários autores, por apresentar uma mudança súbita do nível de cinza, entre duas regiões homogêneas, ou seja, indica a existência de uma descontinuidade local, proveniente da luz que incide sobre a imagem.

Os principais algoritmos de detecção de bordas podem processar os dados em duas formas derivadas da imagem: uma que contém a magnitude de borda para cada ponto; e outra, que indica a sua direção e sentido. Esses métodos são muito utilizados em segmentação de imagens para classificação, e geralmente, usam vários tipos de operadores.

Os operadores diferenciais são os que executam diferenciações discretas da imagem para produzir o campo do gradiente. Os operadores de Roberts, por exemplo, são conhecidos por introduzir uma operação de diferenças cruzadas, como forma de aproximação de um método de diferenciação bidimensional para detectar bordas. Esse operador pode ser visto também como duas mascaras 2x2, conforme ilustrado a seguir.

$$M1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} \quad M2 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix}$$

Outros autores, como Sobel e Prewitt, também sugeriram operadores 3x3, que podem ser vistos como uma forma de combinação entre duas máscaras de gradiente: uma, que aponta para a direção norte, e outra, para a direção leste, conforme ilustrado abaixo.

Sobel	Prewitt
$M_x = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix}$	$M_x = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$
$M_y = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix}$	$M_y = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix}$

Outro operador que também pode ser empregado é o operador Laplaciano, conforme ilustrado abaixo, no caso de não existir a preferência de orientação na imagem.

$$ML = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} \quad ML = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix} \quad ML = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{vmatrix}$$

2.4 Representação e descrição de imagens

Após a segmentação da imagem, os agrupamentos de *pixels* segmentados são representados e descritos em um formato apropriado para o processamento subsequente (Gonzalez & Woods, 1992). Basicamente, a representação de uma região pode ser feita de duas maneiras: uma delas seria representar a região em termos de suas características externas e outra, seria representar a região em termos de suas características internas.

Após a etapa da representação, o próximo passo será descrever a região baseado na representação escolhida.

Geralmente, uma representação externa é escolhida quando a atenção primária estiver voltada para características de forma. Por outro lado, uma representação interna é selecionada quando estiver voltada para propriedades como cor ou textura.

2.4.1 Esquemas de representação

A representação de imagens digitais pode ser feita de várias formas, como por exemplo, utilizando-se do código de cadeia, aproximações poligonais, segmentos de fronteiras, etc.

O código de cadeia irá representar um objeto através de uma seqüência de pontos que constitui a fronteira da região ou borda. A seqüência de pontos é representada utilizando-se de um esquema de 8 direções de vetores, conforme Figura 8a. Adotando-se um ponto como inicial e seguindo as indicações do vetor de direções, pode-se representar o objeto, conforme mostrado na Figura 8b.

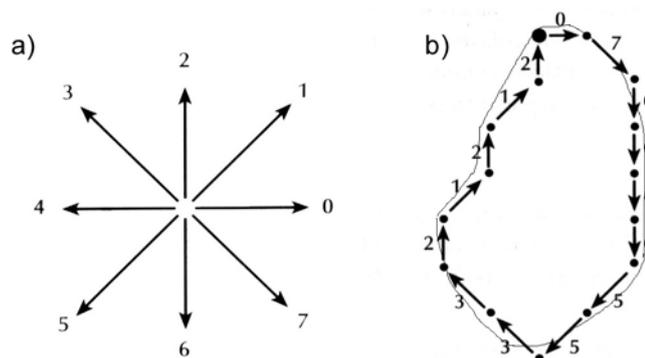


Figura 8 - Ilustração pelo código de cadeia (Gonzalez & Woods, 1992).

Existem outros esquemas para representar uma imagem digital que podem ser encontrados em (Gonzalez & Woods, 1992; Marques Filho, 1999).

2.4.2 Esquemas de descrição

Os procedimentos de descrição de imagens implicam que, tanto as formas de entrada quanto as de saída, são constituídas de representações de imagens. Portanto, diversas maneiras de descrição podem ser consideradas, empregando-se as propriedades de transformações, com a finalidade de permitir a manipulação de imagens, de suas partes, sem afetar a estrutura principal.

Na descrição de uma imagem, pode-se utilizar algumas propriedades da imagem como, por exemplo, propriedades geométricas, topológicas e analíticas.

Em um nível mais alto, o processamento é feito utilizando-se as descrições das regiões da imagem pelo seu número de pontos, destacando-se alguns tipos de transformações que caracterizam uma região:

- Transformações radiométricas: consiste em executar transformações na escala de cinza a partir de funções de transferência especificadas pelo usuário ou de funções previamente definidas, cujos valores dos níveis de cinza dos *pixels* que formam a região podem ser alterados sem mudar a estrutura.
- Transformações geométricas: referem-se a forma e a posição da região onde a estrutura da imagem pode ser alterada, preservando-se ao máximo os valores dos níveis de cinza.

Estas propriedades são baseadas nos atributos e na própria noção de uma medida de distância entre pontos no espaço bidimensional da imagem. Ao estabelecer uma noção de distância, pode-se introduzir vários atributos, tal como: perímetro, área, comprimento, etc.

O número de Euler é uma propriedade topológica. As regiões mostradas na Figura 9, por exemplo, possuem números de Euler iguais a 0 e - 1, respectivamente,

visto que o "A" possui um componente conexo e um buraco, enquanto que o "B" um componente conexo e dois buracos.

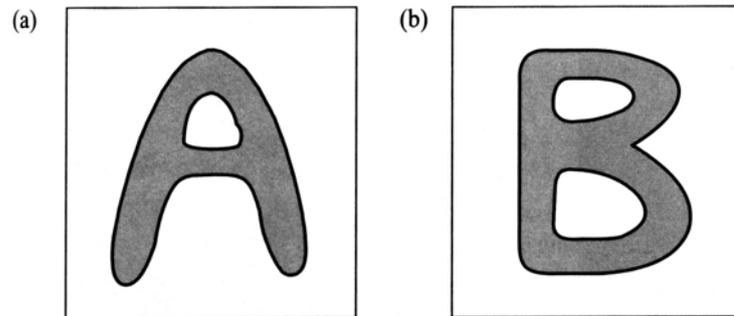


Figura 9 - Regiões com números de Euler iguais a 0 e -1, respectivamente (Gonzalez & Woods, 1992).

2.5 Classificação de imagens

Após a imagem ter sido segmentada, descrita e representada, agora esta poderá ser classificada. Para classificar-se uma imagem, primeiramente deve-se extrair os atributos da imagem que, posteriormente serão inseridos em um “banco de dados” com outros atributos para fazer um reconhecimento de padrões.

A classificação de imagens tem-se desenvolvido em torno de duas grandes linhas: classificação de padrões e reconhecimento sintático de padrões.

Segundo Gonzalez (Gonzalez & Woods, 1992), as principais técnicas de classificação de imagens podem ser descritas em: extração de atributos, técnicas de treinamento e avaliação de desempenho.

As técnicas de extração de atributos podem ser consideradas como uma forma de compressão de dados em função da diminuição do espaço computacional exigido. Estas técnicas são divididas em duas categorias: transformações no espaço de atributos e medidas de informação e distância.

As transformações no espaço de atributos consistem na redução da dimensionalidade e desempenham um importante papel, dada a sua característica de ser

eficaz no sentido de decorrelacionar as amostras e minimizar o erro médio quadrático que, para tal transformação, emprega-se o método da transformada de Karhunen-Loeve.

Para avaliar o desempenho de um sistema de classificação, utiliza-se de medidas de informação e distância, que consistem no emprego do critério de probabilidade de erro sendo que, existem algumas dificuldades na redução da dimensionalidade por este critério. Deve-se utilizar critérios indiretos e expressos por medidas de distância entre as distribuições, para obter os limites superiores ou inferiores que permitem calcular a probabilidade de erro.

2.5.1 Teoria da Decisão e Métodos Classificatórios

A teoria de decisão de Bayes é uma das teorias fundamentais para o problema de classificação de padrões, pois o assunto é posto em termos de suas probabilidades (Duda & Hart, 1973). Cada classe de padrões tem sua probabilidade conhecida, porém seus padrões podem ser completamente conhecidos ou não, muitas vezes sendo necessário estimar os atributos dos padrões para análise.

Primeiro deve-se considerar o domínio do problema para fazer uma análise mais didática. Considere o problema de placas de madeira a serem classificadas, sendo seus atributos conhecidos o brilho e a cor. Elas são de dois tipos distintos, uma vermelha e outra branca, e passam por uma esteira. Ao passar por esta, uma pá escolhe uma madeira ou outra. Os estados da natureza que o problema aborda neste caso são dois, neste caso duas classes distintas, madeira vermelha e madeira branca. A estes estados serão chamados de classe w , sendo que $w = w_1$ para madeira vermelha e $w = w_2$ para madeira branca. Devido ao fato das amostras serem imprevisíveis ao selecioná-las, as classes serão consideradas variáveis aleatórias.

A probabilidade de aparecer madeira vermelha ou branca neste caso é similar para as duas classes de madeira, e assim tem-se um conhecimento da probabilidade *a priori* $P(w)$ de serem escolhidas, ou seja, um conhecimento anterior do domínio do problema, sendo a probabilidade *a priori* de 50% para cada tipo de madeira, ou seja, são

equiprováveis. A probabilidade à priori da madeira vermelha ser escolhida é rotulada $P(w_1)$, e a da madeira branca ser escolhida é $P(w_2)$. A probabilidade de uma das madeiras aparecerem é igual, e a soma de suas probabilidades é igual a 100%, ou um. Se uma das probabilidades à priori for menor, a decisão, levando em consideração apenas o domínio do problema, será em favor da classe que apresentar uma probabilidade maior, porém o conhecimento à priori não fornece argumentos suficientes para se decidir a favor de uma classe ou outra, tendo assim que levar em conta os atributos das classes em questão.

Dado um atributo x , que representa o nível de brilho das madeiras, será um descritor para o classificador neste caso o nível de brilho da madeira. A variabilidade do nível de brilho é uma variável aleatória onde sua distribuição amostral depende do estado da natureza. Se a probabilidade de aparecer a madeira vermelha com brilho x for maior que a probabilidade de aparecer a madeira branca com brilho x , então a função densidade de probabilidade - $p(x|w_j)$ - probabilidade de ocorrer x dado w_j denotará em termos probabilísticos a diferença de brilho das duas madeiras - $p(x|w_1)$ e $p(x|w_2)$ - pela diferença dos valores probabilísticos gerados.

Conhecidas as probabilidade à priori $P(w_j)$ e a densidades condicionais $p(x|w_j)$, a influência do brilho e da probabilidade à priori no estado da natureza são dadas pela regra de Bayes, mostradas a seguir:

$$P(w_j | x) = \frac{p(x | w_j)P(w_j)}{p(x)} \quad (3)$$

onde

$$p(x) = \sum_{j=1}^N p(x | w_j)P(w_j) \quad (4)$$

onde P é o número de classes, neste caso duas.

A decisão é feita a favor do maior valor de $P(w_j|x)$, pois a medida que a densidade de probabilidade do nível de brilho varia para uma região mais alta em

relação à média da região de dados, ou seja, $P(w_1|x) > P(w_2|x)$, decide-se a favor da classe w_1 , ou por w_2 em caso contrário.

A Figura 10 ilustra a densidade de probabilidade condicional de amostras de madeira. A distância utilizada é a quadrada de Mahalanobis, onde o objeto classificado possui a menor distância de uma das médias das classes. Se uma observação de x para $P(x|w_1)$ for maior que $P(x|w_2)$, deve-se decidir em favor de w_1 , ou w_2 em caso contrário.

O valor médio de cada densidade condicional de probabilidade é o valor que maximiza a função de decisão, sendo portanto, o desvio da amostra em relação à sua média o parâmetro analisado para gerar uma decisão.

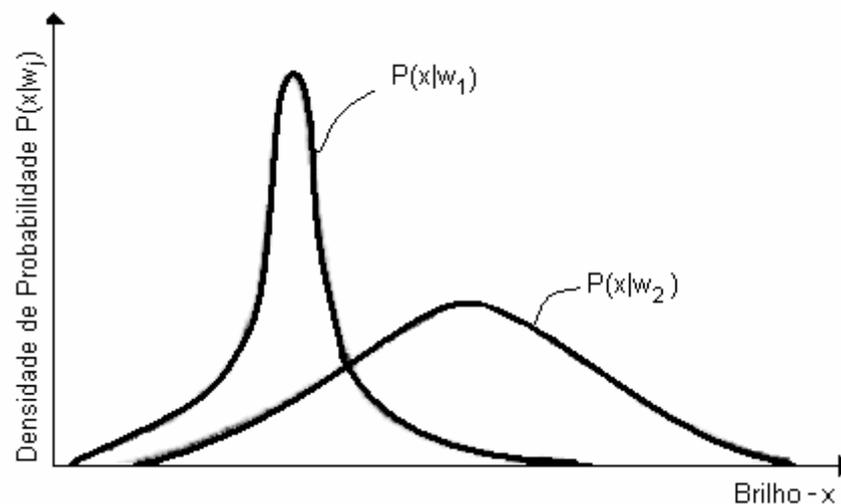


Figura 10 - Função densidade de probabilidade de duas classes de madeiras.

A distância quadrada de Mahalanobis é dada pela fórmula:

$$D_m = \sqrt{(x_n - x_m)C^{-1}(x_n - x_m)'} \quad (5)$$

onde C é a matriz de covariância e

$$C = [c_{ij}] \quad (6)$$

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jk} - \bar{x}_j) / n \quad (7)$$

Outras distâncias podem ser utilizadas, onde pode ser destacada a distância euclidiana:

$$D_{nm} = \sqrt{\sum_{i=1}^I (x_{in} - x_{im})^2} \quad (8)$$

utilizada para casos onde apenas uma dimensão é necessária.

A Figura 11 ilustra a relação entre as duas probabilidades *à posteriori*, onde a medida que o brilho aumenta, a probabilidade de ser escolhido $P(w_2/x)$ aumenta, e a medida que o brilho diminui, a probabilidade de ser escolhido $P(w_1/x)$ aumenta.

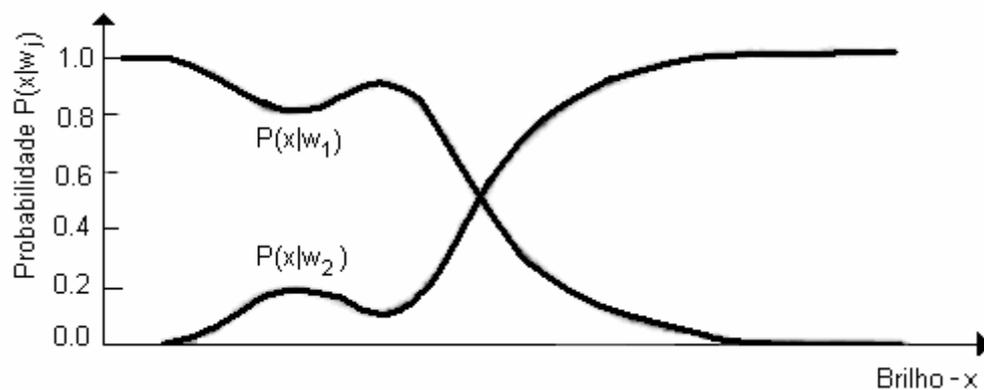


Figura 11 - Variação das probabilidades à posteriori para $P(w_1) = 2/3$, $P(w_2) = 1/3$.

Como a estrutura do classificador bayesiano é determinado primariamente pelas densidades condicionais, deve-se analisar as diversas densidades condicionais.

Considere agora um problema unidimensional envolvendo duas classes com padrões governadas por densidades Gaussianas, com média m_1 e m_2 e desvio padrão σ_1 e σ_2 , respectivamente. A função de decisão Gaussiana para este caso toma a forma:

$$P(x | w_j) = p(x | w_j)P(w_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left[-\frac{(x - m_j)^2}{2\sigma_j^2}\right] P(w_j) \quad (9)$$

onde os padrões agora são escalares, denotados por x . A superfície de decisão entre as duas classes é um simples ponto, denotado por x_0 . Se $P(w_1)=P(w_2)=1/2$, e a superfície de decisão no valor de x_0 for $p(x_0/w_1)=p(x_0/w_2)$, então o ponto x_0 será a intersecção das duas funções de densidade probabilidade.

Para o caso n-dimensional a Regra de Bayes assumirá a forma:

$$p(x | w_j) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |C_j|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x - m_j)^T C_j^{-1} (x - m_j)\right] \quad (10)$$

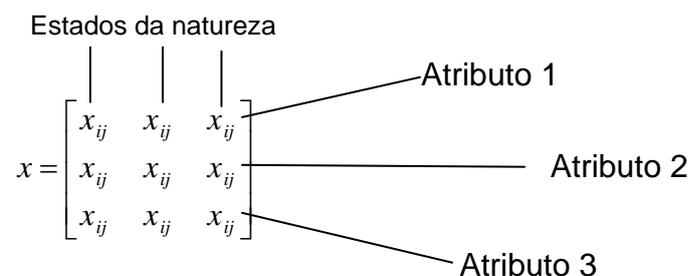
onde

$$m_j = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in w_j} x \quad (11)$$

$$C_j = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in w_j} xx^T - m_j m_j^T \quad (12)$$

e a variável N_j será o número total de classes w_j existentes.

Desta forma tem-se que x é um vetor de observações para o aprendizado bayesiano de cada classe, tendo d-dimensões e w_j é um conjunto de N estados da natureza ou padrões que o representam, como ilustrado abaixo:



onde x_{ij} são os descritores que estão contidos no vetor \mathbf{x} , e tem-se que a probabilidade à posteriori será o desvio da função densidade de probabilidade e da probabilidade à priori em relação à média das amostras do vetor de cada classe distinta.

A regra de decisão de Bayes ocorre pela máxima probabilidade *à posteriori*, ou critério MAP, onde a decisão será em favor da probabilidade que minimiza o erro (Young & Fu, 1986).

Decidir em favor de w_1 se

$$P(w_1 | x) > P(w_2 | x) \quad (13)$$

caso contrário decidir em favor w_2 .

Outra forma de representar um classificador de padrões é em termos de suas funções discriminantes $g_i(x)$, $i=1, \dots, c$, onde \mathbf{x} é um vetor de atributos passado para a função que mapeia os descritores em um valor de classificação.

$$g_i(x) > g_j(x) \quad (14)$$

onde

$$g_i(x) = \log p(x | w_i) + \log P(w_i) \quad (15)$$

Estas funções discriminantes representam o decisor bayesiano de maneira semelhante, somente colocando tudo de uma forma canônica. A função acima classificará $g_i(x)$ se este for maior $g_j(x)$, caso contrário escolherá $g_j(x)$.

Basicamente, o decisor bayesiano é uma máquina que computa c funções discriminantes e seleciona a categoria adequada ao maior valor discriminante, que corresponde à região onde o erro é mínimo e ótimo, denotando uma classificação em favor da máxima probabilidade *à posteriori*.

Vários modelos de distribuição podem ser utilizados, mas para efeito de simplificação aqui é utilizado a densidade gaussiana.

Desta maneira o classificador Bayesiano irá classificar os padrões baseados em suas variâncias e covariâncias e distribuições probabilísticas a partir de um conhecimento prévio e aplicações de características dos padrões a uma função de decisão, para o caso em que os padrões devem ser totalmente conhecidos.

O caso em que os padrões são totalmente conhecidos o aprendizado é supervisionado, sendo os valores incluídos pelo próprio usuário. Para o caso em que os padrões não são totalmente conhecidos deve-se utilizar o aprendizado não supervisionado (Duda & Hart, 1973).

O classificador de padrões usando funções discriminantes simplificado é transformado em logaritmos para simplificar o cálculo da função densidade, e é dado pela equação quadrática:

$$g_i(x) = -\frac{1}{2}(x - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1}(x - \mu_i) - \frac{d}{2} \log 2\pi - \frac{1}{2} \log |\Sigma_i| + \log P(w_i) \quad (16)$$

A Figura 12 ilustra o classificador de Bayes na forma de uma máquina computando várias funções discriminantes e passando através de um decisor de máxima probabilidade à posteriori.

A função discriminante $g_i(x)$ possui três casos especiais que devem ser avaliados, com a vantagem muitas vezes de se poder transformar o classificador quadrático em linear eliminando termos da função de decisão. Da maneira que é colocada acima, a função discriminante gera superfícies de decisão hiperquadráticas, tornando-se impraticável para o caso em que se necessita separar o espaço de amostras em várias superfícies de classificação, devido ao grande número de amostras necessárias.

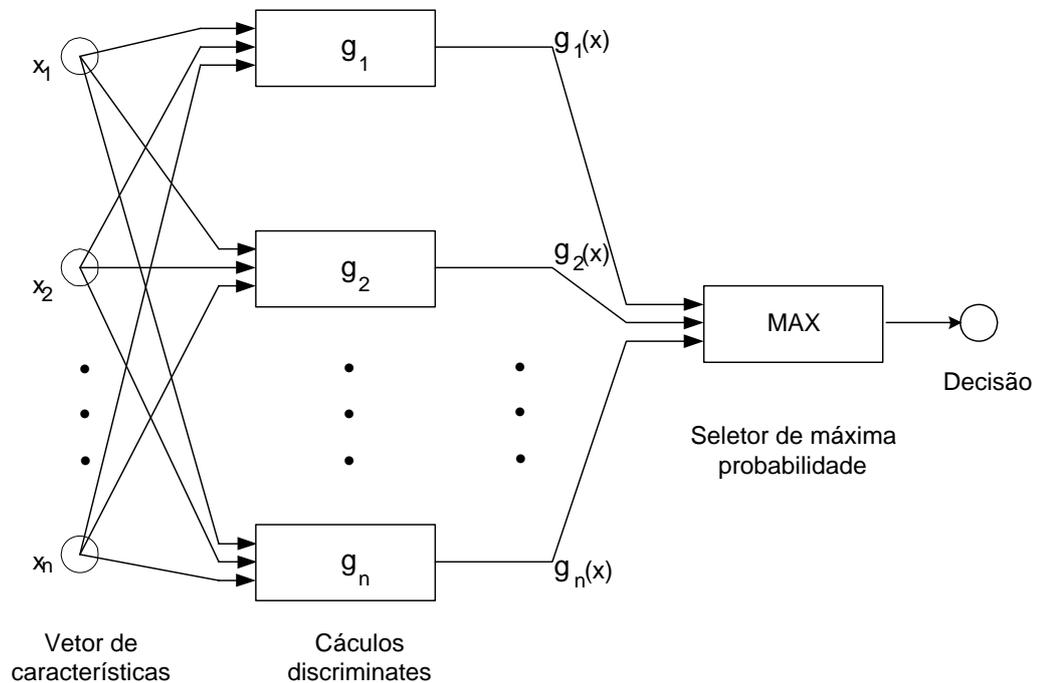


Figura 12 - Representação gráfica do classificador de Bayes.

2.5.2 Métodos de decisão teórica

As abordagens de decisão teórica para o reconhecimento baseiam-se na utilização de funções de decisão. Seja $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ um vetor de padrões n -dimensional. Para M classes de padrões $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$, o problema básico em reconhecimento de padrões por decisão teórica é encontrar M funções de decisão $d_1(x), d_2(x), \dots, d_M(x)$, com a propriedade que, se o padrão x pertencer à classe ω_i , então

$$d_i(x) > d_j(x) \quad j = 1, 2, \dots, M; \quad j \neq i \quad (17)$$

Contudo, um padrão desconhecido x pertence à i -ésima classe de padrões se a substituição de x em todas as funções de decisão fizer com que $d_i(x)$ tenha o maior valor numérico. Empates são resolvidos arbitrariamente, pelos valores de x para os quais

$$d_i(x) - d_j(x) = 0 \quad (18)$$

É comum identificar-se a fronteira de decisão entre duas classes pela função $d_{ij}(x) = d_i(x) - d_j(x) = 0$. Portanto, $d_{ij}(x) > 0$ para os padrões da classe ω_i e $d_{ij}(x) < 0$ para os padrões da classe ω_j (Ah-Soon & Tombre, 2001).

2.5.3 O método *Match*

2.5.3.1 Classificador de distância mínima

Supondo-se que cada classe de padrões é representada por um vetor protótipo (ou médio):

$$m_i = \frac{1}{N} \sum_{x \in \omega_j} x \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (19)$$

em que N_j é o número de vetores de padrões da classe ω_j e a soma é realizada sobre esses vetores. Uma maneira de definir a pertinência de um vetor x de padrões desconhecidos é atribuí-lo à classe de seu protótipo mais próximo. A distância euclidiana pode ser usada para determinar a proximidade, reduzindo o problema à computação das distâncias:

$$D_j(x) = \|x - m_j\| \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (20)$$

em que $\|a\| = (a^T a)^{1/2}$ é norma euclidiana. Atribuímos, então, x à classe ω_i se $D_i(x)$ for a menor distância. Ou seja, a menor distância implica no melhor match nessa formulação. Não é difícil mostrar que isso é equivalente a avaliar as funções

$$d_j(x) = x^T m_j - \frac{1}{2} m_j^T m_j \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (21)$$

e atribuir x à classe ω_i se $d_i(x)$ levar ao maior valor numérico. Essa formulação está de acordo com o conceito de função de decisão, como definido na equação 15.

A partir das equações 16 e 19, pode-se ver que a fronteira de decisão entre as classes ω_i e ω_j para o classificador de distância mínima é

$$\begin{aligned} d_{ij}(x) &= d_i(x) - d_j(x) = \\ & x^T(m_i - m_j) - \frac{1}{2}(m_i - m_j)^T(m_i - m_j) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

A superfície dada pela equação 20 é a bisseção perpendicular do segmento de linha entre m_i e m_j . Para $n=2$, a bisseção perpendicular é uma linha, para $n=3$ é um plano, e para $n>3$ é chamada de hiperplano.

Um exemplo é ilustrado na Figura 13 onde ilustra duas classes de padrões extraídas das amostras de flores Íris. As duas classes, Íris versicolor e Íris setosa, denotadas por ω_1 e ω_2 , possuem vetores médios (das amostras) $m_1 = (4,3, 1,3)^T$ e $m_2 = (1,5, 0,3)^T$ respectivamente. Pode-se ver, a partir da Equação 19, que as funções de decisão são $d_1(x) = x^T m_1 - \frac{1}{2} m_1^T m_1 = 4,3x_1 + 1,3x_2 - 10,1$ e $d_2(x) = x^T m_2 - \frac{1}{2} m_2^T m_2 = 1,5x_1 + 0,3x_2 - 1,17$. A partir da Equação 20, a equação da fronteira se torna:

$$\begin{aligned} d_{12}(x) &= d_1(x) - d_2(x) \\ &= 2,8x_1 + 1,0x_2 - 8,9 = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

A substituição de qualquer padrão de classe ω_1 resultaria em $d_{12}(x) > 0$. Por outro lado, qualquer padrão da classe ω_2 resultaria em $d_{12}(x) < 0$. Em outras palavras, dado um padrão desconhecido que pertença a uma dessas classes, o sinal de $d_{12}(x)$ seria suficiente para determinar a classe a qual o padrão pertence.

O classificador de mínima distância funciona bem quando a distância entre as médias for grande em comparação com a dispersão ou aleatoriedade de cada classe em relação à sua média (Kim et al., 2001).

A ocorrência simultânea de grandes separações entre as médias com relativamente pouca dispersão nas classes ocorre raramente na prática, a menos que o projetista do sistema controle a natureza da entrada de dados.

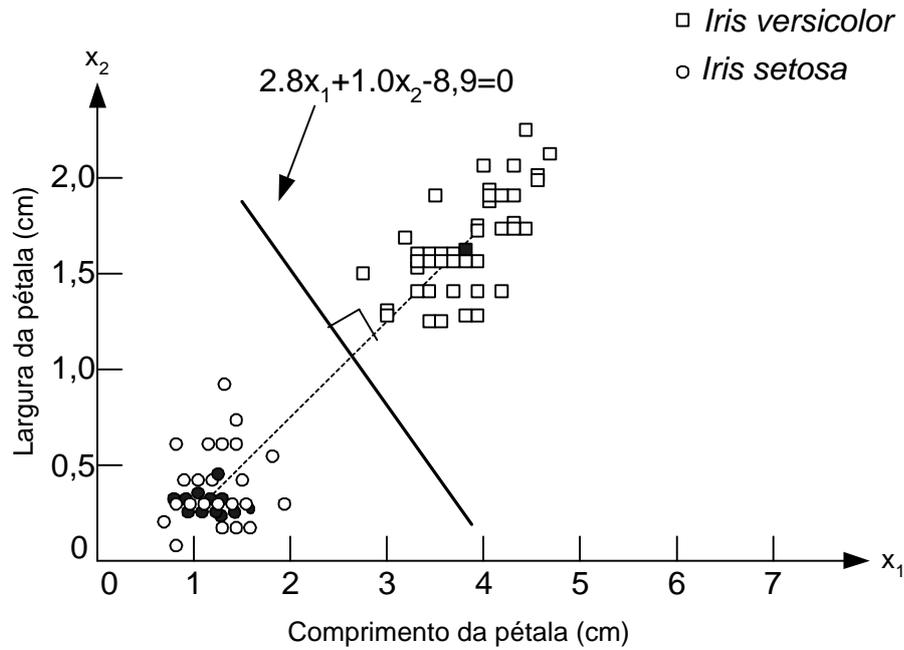


Figura 13 - Fronteira de decisão do classificador de mínima distância para Flores - *Íris versicolor* e *Íris setosa* (Fisher, 1936).

Capítulo 3

Desenvolvimento e implementação do novo método para análise da qualidade de madeiras brasileiras com técnicas do processamento digital de imagens

Neste capítulo são apresentados o detalhamento da metodologia desenvolvida e a implementação do sistema para análise da qualidade de madeiras brasileiras com técnicas do processamento digital de imagens.

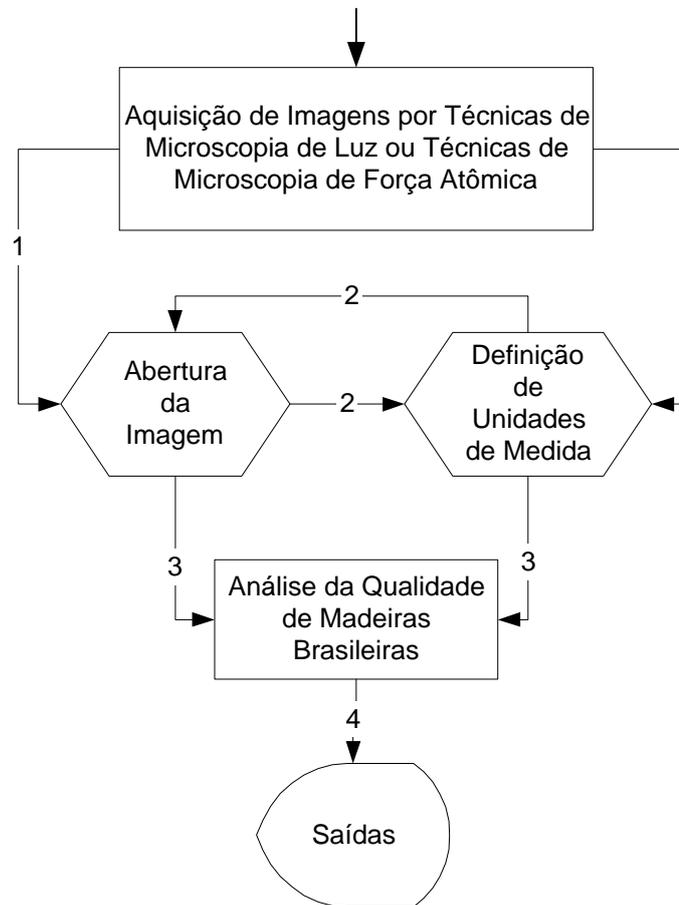
3.1 Descrição dos processos

A Figura 14 apresenta o fluxograma geral do sistema desenvolvido e um diagrama do processo de análise de imagens, que é composto pelos módulos de: Ajustes Finos, Filtros, Gráficos, Segmentação, Retas, Unidades, Zoom e Caracterização do vetor de qualidade. Pode-se observar pelo fluxograma que poderá se optar por iniciar o processo de análise pela abertura da imagem, definindo unidades de medida, análise da imagem, exibição das saídas, ou ainda definindo unidades de medida, abertura da imagem, e análise com posterior exibição dos resultados de saída.

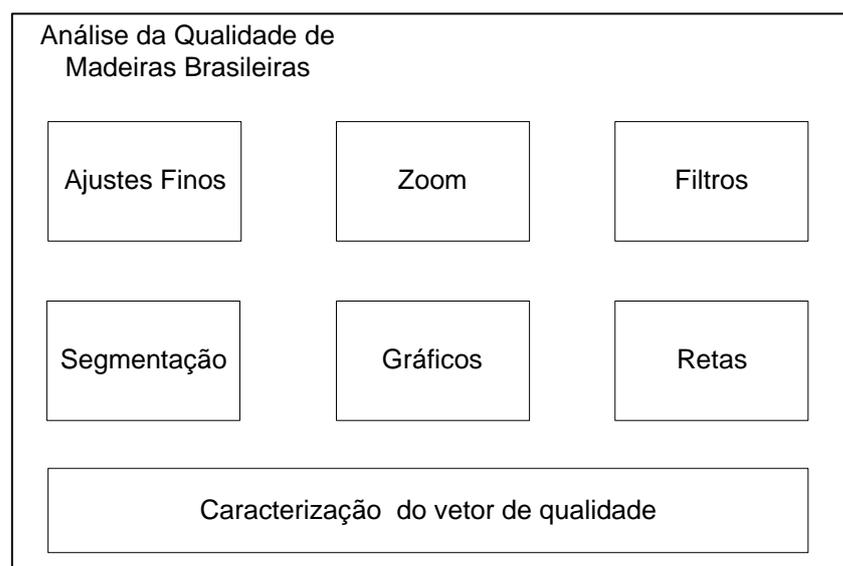
No sistema desenvolvido, pode-se ainda optar por definir a unidade de medida ou trabalhar com unidade padrão que neste caso é a unidade pixel.

Na definição de unidade o sistema converterá a unidade de pixel para a unidade solicitada pelo usuário. Os valores inseridos serão o número de pixels presentes em uma determinada dimensão da escala real da unidade escolhida, sendo que esta poderá ser: pixel, nanômetro (nm), micrometro (um), milímetro (mm), centímetro (cm), metro (m) e polegada (in).

O sistema permite trabalhar com imagens de microscopia de luz e microscopia de força atômica nos padrões BMP (*Bit Map Picture*) e JPEG (*Joint Photographic Experts Group*). A interpretação com descompressão da imagem, quando for o caso, ocorre na abertura da mesma, conforme ilustra a Figura 15.



(a)



(b)

Figura 14 – (a) Fluxograma geral do sistema e (b) Diagrama de blocos do processo de Análise da Qualidade de Madeiras Brasileiras.

```

Begin
  Begin
  Caso aquisição por microscopia de luz faça
    Begin
      Selecionar amostra;
      Visualizá-la sob microscópio;
      Capturar imagem;
      Salvar imagem em formato BMP ou JPG;
    End;
  Caso aquisição por microscopia de força atômica faça
    Begin
      Selecionar amostra;
      Colocar amostra no porta amostra;
      Selecionar ponto para varredura;
      Varrer a imagem gerando imagem em vídeo;
      Salvar imagem em BMP ou JPG;
    End;
  End;
  Usuário escolhe imagem;
  Begin
  Se extensão da imagem for JPG
    Begin
      Descomprimir imagem;
    End;
  End;
  Carregar imagem no sistema;
End;

```

Figura 15 – Estrutura do algoritmo de abertura da imagem.

Aberta a imagem, o usuário poderá utilizar-se do recurso de *zoom*. O *zoom* é um instrumento muito utilizado no sistema para auxiliar, principalmente, na marcação mais precisa das retas para mensuração, nos ajustes finos feitos na imagem, na definição mais precisa dos pontos para a reta do gráfico e também para a visualização em uma maior ampliação de alguma estrutura de interesse do usuário. A estrutura do algoritmo para a realização do *zoom* está ilustrada pela Figura 16, onde é realizada uma captura de uma matriz quadrada de pixels, sendo que esta matriz é adaptada ao aumento escolhido pelo usuário. A matriz será copiada para uma imagem de 100x100 pixels, onde os pixels serão interpolados linearmente, conseguindo com isso uma suavização da imagem e ao mesmo tempo a ampliação da mesma.

```

Begin
  Capturar matriz (50x50)* pixels centrada na posição do
  mouse;
  Begin
    Para cada pixel da matriz
      Begin
        Copiar pixel para uma imagem 100x100 pixels
        espaçando-os;
      End;
    End;
    Interpolação linear entre os pixels da imagem 100x100;
  End;

  * valor adaptado à escolha do usuário, conforme aumento.

```

Figura 16 – Estrutura do algoritmo de zoom.

A metodologia desenvolvida estabelece o seguinte procedimento para análise da qualidade de madeiras brasileiras:

- a) Leitura da imagem e ajuste de unidades de medida (neste caso poderá utilizar sobre a imagem unidade padrão pixel ou predefinir outras unidades de medidas lineares como nanômetro, micrometro, milímetro, centímetro, polegada ou metro).
- b) Limiarização da imagem com possibilidade de se aplicar limiar duplo ou janela de limiar, o qual pode ser estabelecido de forma manual ou de forma automática utilizando o menor valor da média entre os máximos valores médios do histograma da imagem em análise. A Figura 17 ilustra a estrutura do algoritmo de limiarização ótima, onde primeiramente é gerado um histograma da imagem em questão e em seguida, subdivide-se o histograma em regiões. Para cada região é calculada a média dos valores presentes na mesma, gerando com isso um pico para cada região. Pode ocorrer que picos de regiões vizinhas fiquem “conectados” e para resolver isso, retira-se os picos conectados de

menores valores, ficando assim somente o pico de maior valor. Com a retirada dos picos de vizinhança, restará somente alguns poucos picos sendo em sua grande maioria 2 picos ou raramente 3 picos. Caso restem mais de dois picos, estes serão eliminados pela escolha dos dois picos de maior valor. Encontrado os dois picos, encontra-se o menor valor entre os dois picos restantes, pois este será o limiar mais próximo do ótimo. O limiar encontrado poderá ainda passar por um ajuste mais fino. Esse ajuste fino poderá ser feito pelo usuário caso o mesmo julgue que outros objetos de interesse devam ser considerados na análise. Neste caso o sistema permite que o usuário ajuste o limiar sugerido como ótimo. A etapa de limiarização tem a finalidade de viabilizar a diferenciação entre os elementos da amostra de madeira, separando o que é estrutura e o que é espaço vazio.

- c) A segmentação manual tem a finalidade de viabilizar as medidas de área e indicar qual o elemento anatômico a ser mensurado. Este procedimento é desenvolvido após a seleção de um pixel semente para a realização do procedimento por crescimento de região. Após a escolha da semente, a imagem será segmentada por crescimento de região, sendo que o algoritmo utilizado no sistema não é recursivo, conforme pode ser visto no fluxograma na Figura 18, e a região segmentada será mensurada. Após essa mensuração, o sistema apresenta os resultados, os quais auxiliam o usuário na aferição da qualidade da madeira em análise. Após essa etapa, os dados poderão ser armazenados em um arquivo de formato texto para posteriormente serem utilizados na geração de tabelas, gráficos ou ambos.

No caso do plano de corte ser transversal, o usuário indicará qual o elemento anatômico será mensurado. Após essa indicação, a imagem será segmentada e as áreas serão mensuradas. Após essa etapa, os dados poderão ser armazenados em um arquivo de formato texto para posteriormente serem utilizados na geração de tabelas, gráficos ou ambos.

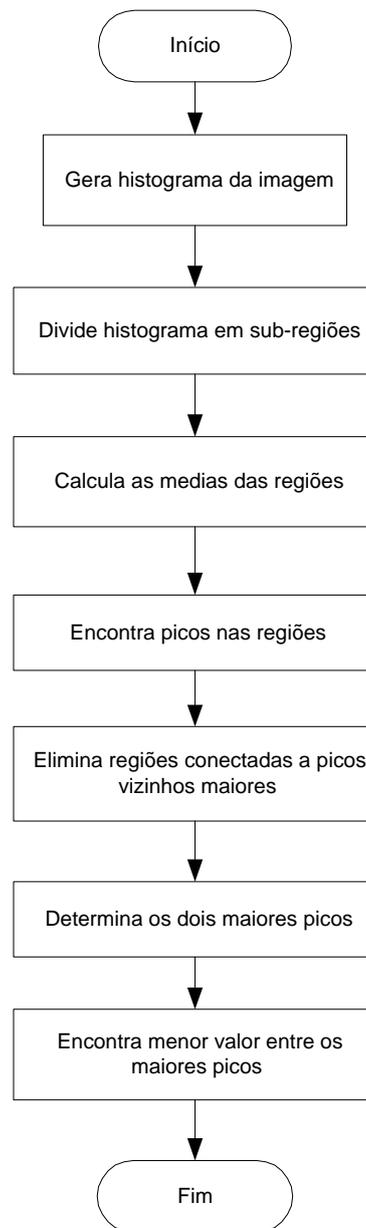


Figura 17 – Diagrama de blocos do algoritmo do limiar ótimo.

No caso dos outros planos de corte, o usuário irá selecionar com o mouse um ponto na imagem que servirá como semente para a realização da segmentação por crescimento de região. Após a escolha da semente, a imagem será segmentada por crescimento de região e a região segmentada será mensurada. Após essa etapa, os dados poderão ser armazenados em um arquivo de formato texto para posteriormente serem utilizados na geração de tabelas, gráficos ou ambos.

De forma a se evitar um possível estouro de pilha, optou-se por projetar um algoritmo de segmentação sem recursividade. Algoritmos de segmentação utilizam recursividade em regiões complexas ou muito grandes podem, em geral apresentar esse tipo de problema.

Adicionalmente pode-se optar pela segmentação automática cuja estrutura segue o diagrama de blocos apresentado na Figura 19. O algoritmo deverá percorrer toda a imagem procurando por pixel que não seja borda. Encontrado o pixel, esse servirá de semente para a segmentação por crescimento de região, descrita no algoritmo na Figura 20. Os valores retornados dessa segmentação são a partir daí armazenados em uma tabela e o algoritmo continua a percorrer o restante da imagem.

Tendo percorrido a imagem inteira, o algoritmo gera uma tabela de cores as quais serão atribuídas aos valores encontrados pela segmentação, obtendo com isso, cores iguais para mesmos valores de segmentação. O ultimo passo é o preenchimento das regiões com suas respectivas cores atribuídas.

O algoritmo, descrito na Figura 20, realiza a segmentação por crescimento de região a partir de uma semente. O processo inicia-se com a indicação de uma semente, podendo esta ser indicada pelo usuário (segmentação manual) ou pelo sistema (segmentação automática). Tendo a semente, o sistema varrerá os pixels vizinhos até encontrar pixels de borda, os quais serão os delimitadores da região a ser segmentada. A partir daí, verifica-se utilizando o raio de crescimento, se um dado pixel pertence à região de interesse, que no caso é a região que está sendo segmentada. Essa verificação é feita através de uma votação, ou seja, a quantidade de votos que o pixel recebe indicará se é um pixel da região de interesse (acima de 1 voto) ou se é um pixel de borda (nenhum voto). Neste algoritmo, a distancia da borda pode ser controlada, pois conforme explicado anteriormente o número de votos indicará a distância. Depois de calculados os votos, a segunda etapa será o preenchimento dos pixels, sempre verificando a quantidade de votos recebidos e a posição relativa ao crescimento da região.

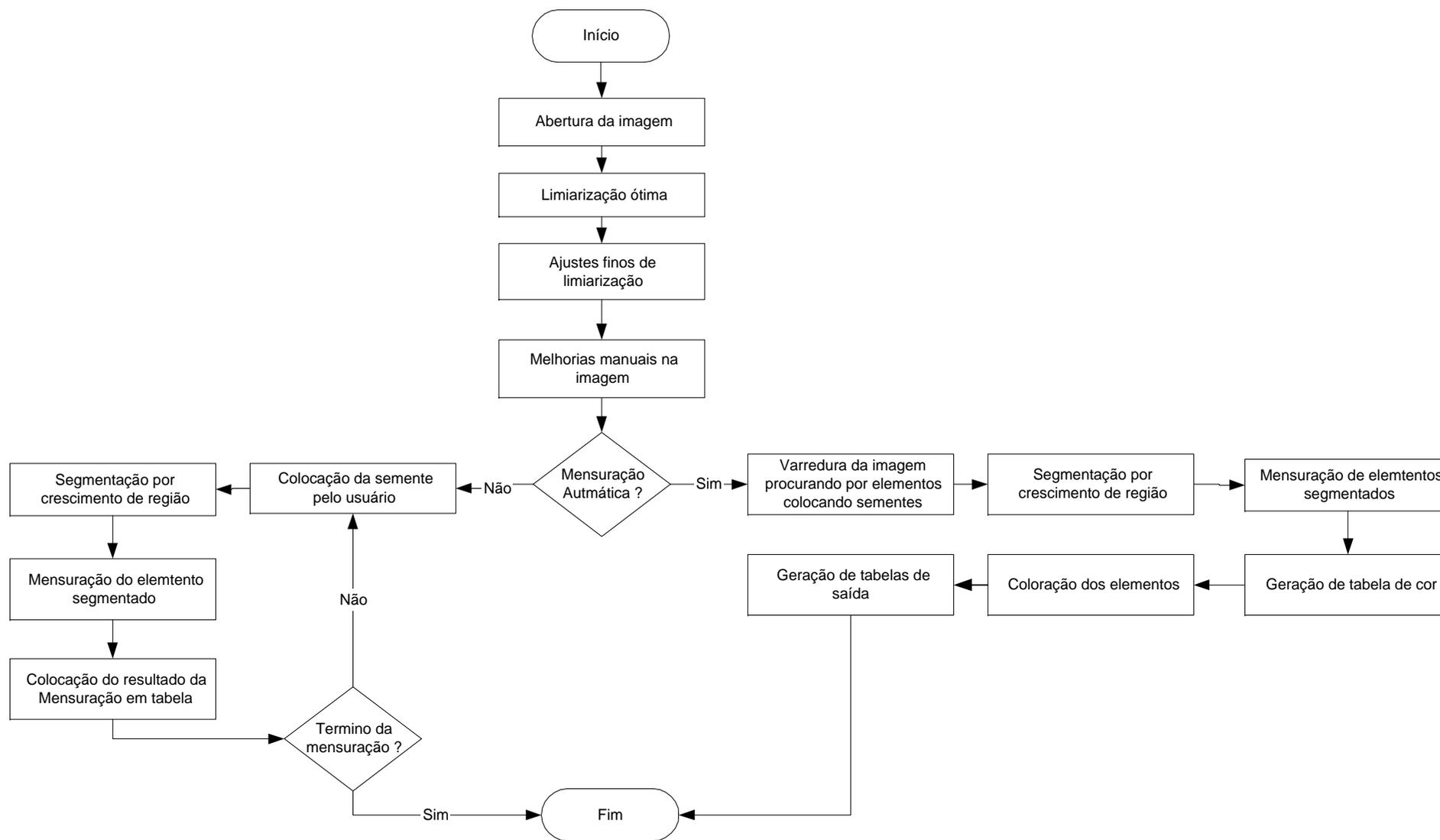


Figura 18 – Diagrama de blocos da estrutura do módulo de segmentação

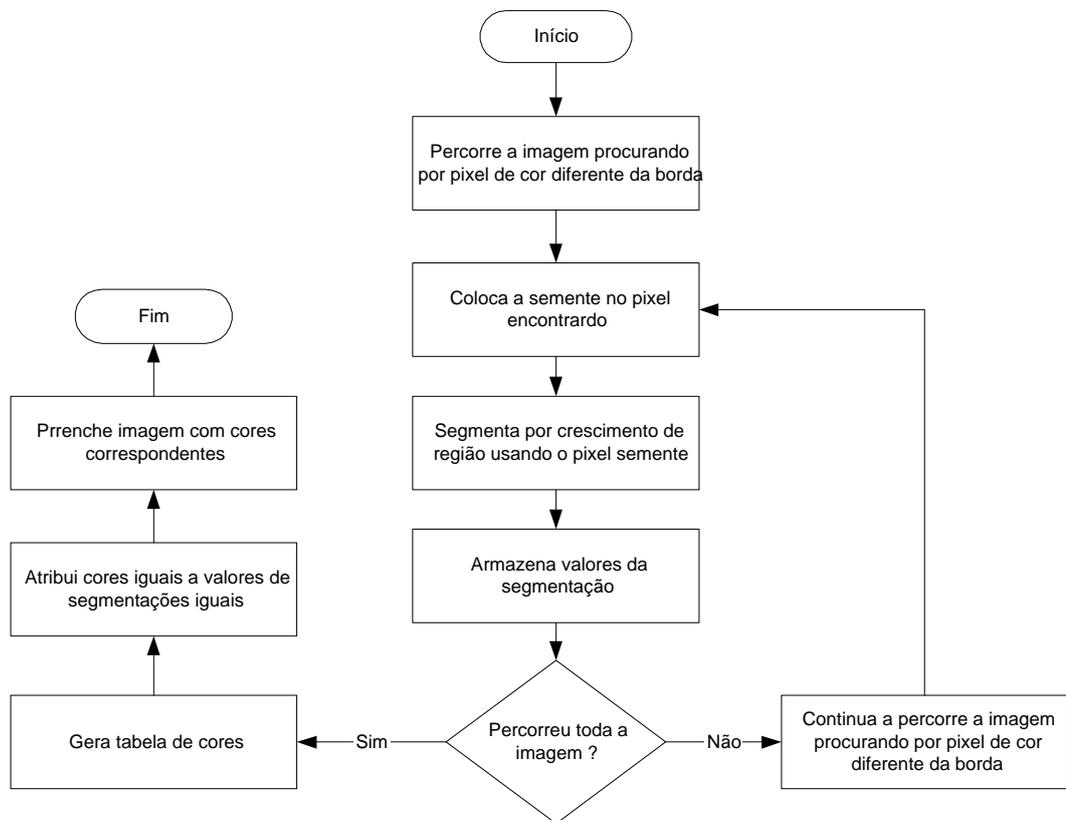


Figura 19 – Diagrama de blocos da segmentação automática

- d) A mensuração por reta é realizada dentro do desenvolvimento metodológico para encontrar a largura de vasos, raios, fibras e parede celular; a altura de vasos, raios e fibras presentes nas amostras de madeira sob análise. Caso sejam selecionados dois pontos onde haja alguma angulação entre a reta obtida por eles e o eixo da imagem, a distância entre os pontos é obtida utilizando-se do teorema de Pitágoras, pois tendo as coordenadas dos dois pontos, pode-se calcular o comprimento da reta através do triângulo retângulo virtual traçado pelos mesmos. O usuário pode optar por uma reta contínua, tendo essa, vários pontos de quebras. Neste caso a única alteração em relação ao algoritmo anterior seria a realização de um somatório das mensurações de cada semi-reta traçada. A Figura 21 apresenta a estrutura do algoritmo descrito. Adicionalmente com o uso de um módulo gráfico é possível visualizar graficamente as avaliações de distâncias com o uso de um algoritmo, conforme Figura 22, que retorna valores de intensidade, a qual está relacionada a uma densidade relativa à luz refletida

ou à rugosidade da amostra, dos pixels existentes em um caminho traçado entre dois pontos pré-selecionados da imagem.

```

f(x,y)=cor;
Para raio variando de 1 até Limite da Imagem
Begin
  Para f(x,y)-raio até f(x,y)+raio
  Begin
    Se f(x,y)=cor
    Begin
      Para N variando de -1 até 1 e M variando de -1 até 1
      Begin
        Se vizinhança f(x-N,y-M) possuir outra cor
        Begin
          soma_número_cor++;
        End;
      End;
    End;
    Se soma_número_cor > 0
    Begin
      soma_número_cor = 0
      Para N variando de -1 até 1 e M variando de -1 até 1
      Begin
        Se vizinhança f(x-N,y-M) > 0 e igual a semente
        Begin
          f(x-N,y-M) = cor_preenchimento
        End;
      End;
    End;
  End;
End;

```

Figura 20 – Pseudo-código da segmentação sem recursividade.

- e) Completando os módulos que compõem a metodologia desenvolvida, foram incluídas técnicas de filtragem de baixa e alta intensidade as quais envolvem filtros morfológicos que viabilizam operações de dilatação e erosão e outros filtros de detecção de bordas como Laplaciano e Sobel em XY, bem como o de média.

```

Enquanto usuário não finalizar seleções
Begin
  Usuário seleciona 1º ponto para reta;
  Usuário seleciona 2º ponto para reta;
  Calcular angulação na reta;
  Begin
  Se há angulação na reta
    Begin
    Obter comprimento da reta por Pitágoras;
    End;
  Senão
    Begin
    Comprimento através da contagem de pixels entre pontos
    selecionados;
    End;
  End;
  Begin
  Se reta contínua
    Begin
    Acumular comprimento da reta;
    End;
  End;
End;

```

Figura 21 – Estrutura do algoritmo de retas.

```

Begin
  Usuário seleciona 1º ponto para reta;
  Usuário seleciona 2º ponto para reta;
  Localizar posição do 1º ponto;
  Para cada pixel entre os dois pontos
    Begin
    Envia intensidade do pixel para geração do gráfico;
    Procura próximo pixel;
    End;
  Copia trecho selecionado da imagem para gráfico;
End;

```

Figura 22 – Estrutura do algoritmo de gráfico.

- f) Para o ajuste fino na imagem, correções manuais são possíveis e permitem a eliminação de possíveis imperfeições. Para se fazer o ajuste, deverá ser escolhida a dimensão padrão de pintura e a cor. Em seguida, este seleciona-se com o mouse sobre a imagem o local onde deverá ocorrer o preenchimento dos pixels. A Figura 23 ilustra a estrutura do algoritmo do ajuste fino.

```
Begin  
  Usuário seleciona tamanho do pincel;  
  Usuário seleciona cor;  
  Usuário clica na imagem;  
  Preenchimento dos pixels clicados pelo usuário;  
End;
```

Figura 23 – Estrutura do algoritmo de ajustes finos.

3.2 Descrição dos Procedimentos

Os procedimentos descritos abaixo foram implementados para o desenvolvimento de operações a serem realizadas sobre os elementos anatômicos microscópicos e sub-microscópicos presentes nas imagens a serem analisadas.

- a) O procedimento para mensuração de elementos vasculares, ilustrado pela Figura 24, inicia-se com a abertura da imagem, sendo que esta deverá obrigatoriamente ser do corte transversal pelas razões explicadas no capítulo 1. Faz-se uma limiarização ótima e em seguida, um ajuste desse limiar para que a imagem limiarizada fique representando adequadamente os vasos a serem analisados. Após ter limiarizado a imagem, pode-se optar pela mensuração manual ou automática. Caso a opção seja a mensuração manual, deve-se clicar nos elementos a serem analisados, conforme foi explicado no item sobre segmentação manual. Caso a opção seja pela mensuração automática, o sistema se encarregará de mensurar todos os elementos da imagem, utilizando-se do processo de segmentação automática. Após a mensuração é exibida a tela com os resultados das mensurações e a imagem mensurada.

- b) O procedimento para mensuração de raios, ilustrado pela Figura 25, inicia-se com a abertura da imagem, sendo que esta poderá ser do corte radial ou transversal. Poderá optar-se por mensurar utilizando-se das retas ou gerar um gráfico para mensurar visualmente.

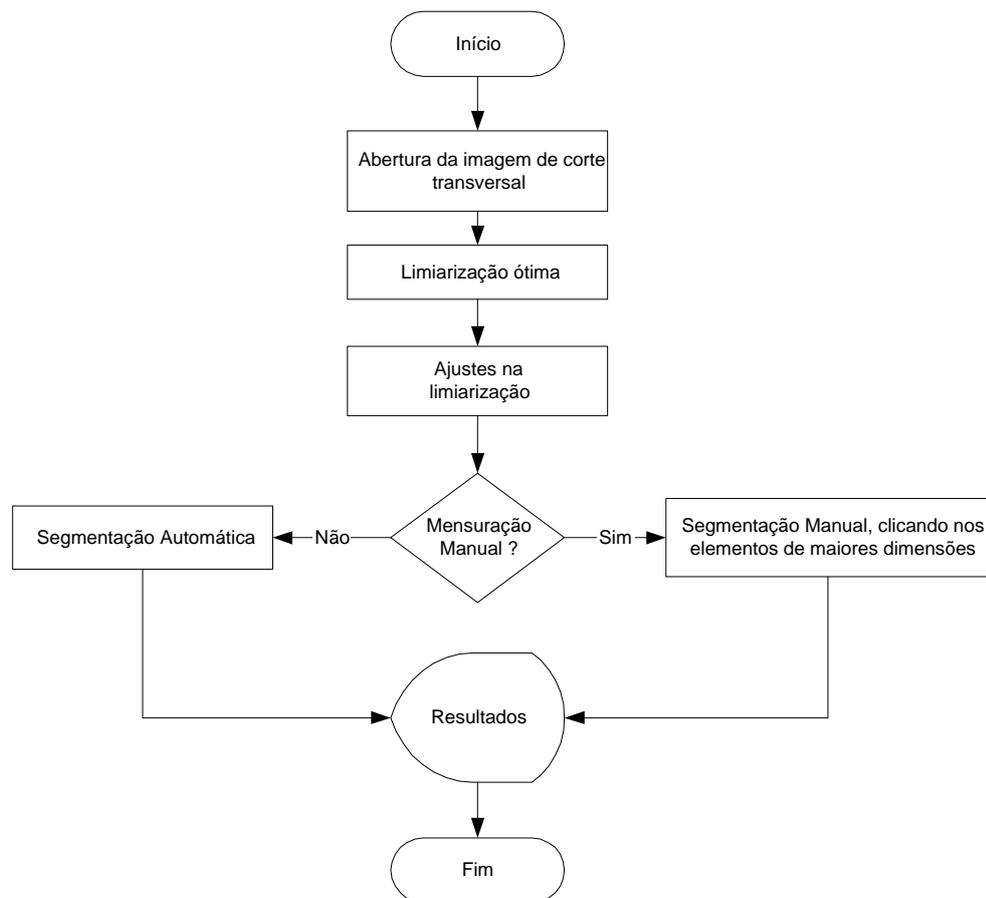


Figura 24 – Diagrama da estrutura de análise para elementos vasculares.

- c) O procedimento para mensuração das paredes das fibras, ilustrado pela Figura 26, inicia-se com a abertura da imagem, sendo que esta deverá ser do corte transversal com uma ampliação de 400 vezes. Poderá optar-se por mensurar utilizando-se das retas ou gerar um gráfico para mensurar visualmente. Estes dois procedimentos foram explicados anteriormente.

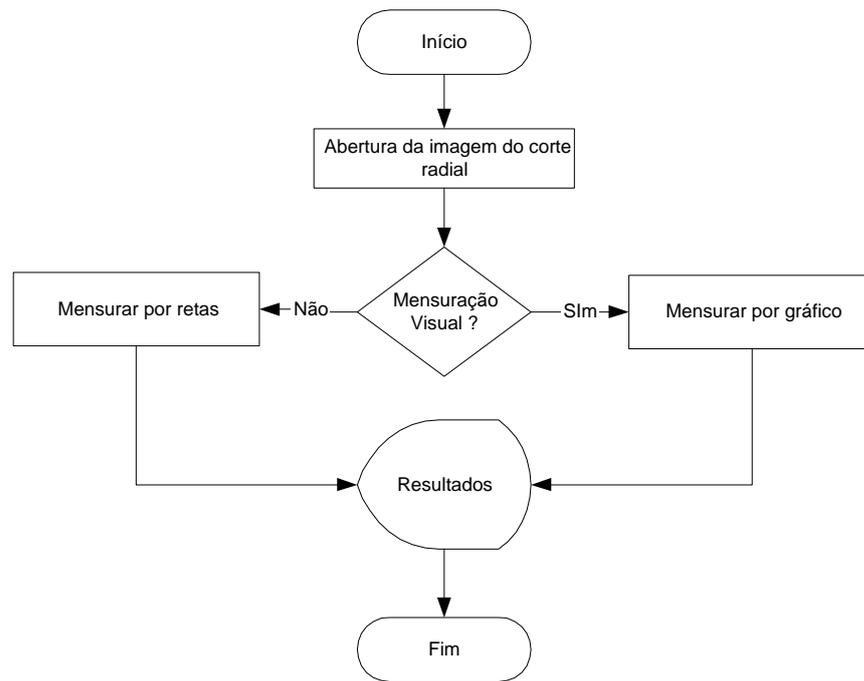


Figura 25 – Diagrama da estrutura de análise para raios.

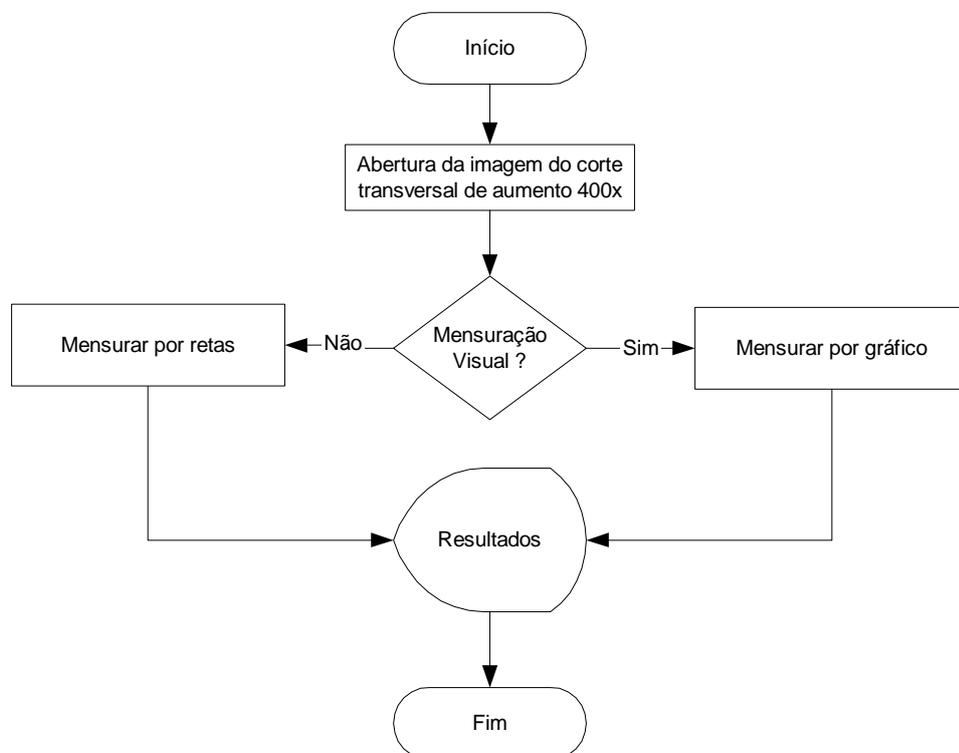


Figura 26 – Diagrama da estrutura de análise de espessura de parede de fibras.

- d) O procedimento para mensuração de diâmetro de lúmem, ilustrado pela Figura 27, inicia-se com a abertura da imagem, sendo que esta deverá ser do corte transversal com aumento de até 400 vezes. Poderá optar-se por mensurar o diâmetro do lúmem utilizando-se das retas ou por geração de gráfico.

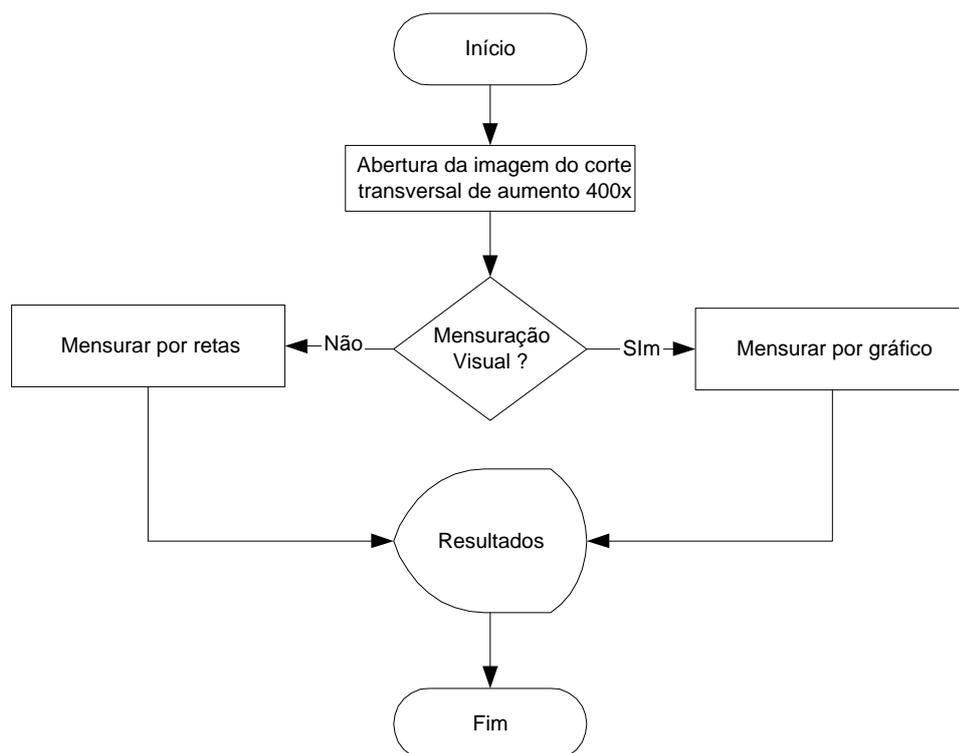


Figura 27 – Diagrama da estrutura de análise do diâmetro de lúmem.

- e) O procedimento para mensuração da largura das fibras, ilustrado pela Figura 28, inicia-se com a abertura da imagem, sendo que esta deverá ser do corte transversal com uma ampliação de até 400 vezes. Poderá optar-se por mensurar a largura das fibras utilizando-se das retas ou por geração de gráfico. Outra maneira de se obter a largura das fibras é primeiramente obter a largura da parede das fibras, pelo procedimento anteriormente explicado, obter o diâmetro do lúmem das fibras, também pelo procedimento anteriormente explicado. Após obter essas medidas, a largura das fibras é dada por:

$$(\text{Largura da Fibra}) = 2 (\text{Largura da Parede}) + (\text{Diâmetro do Lúmem}) \quad (24)$$

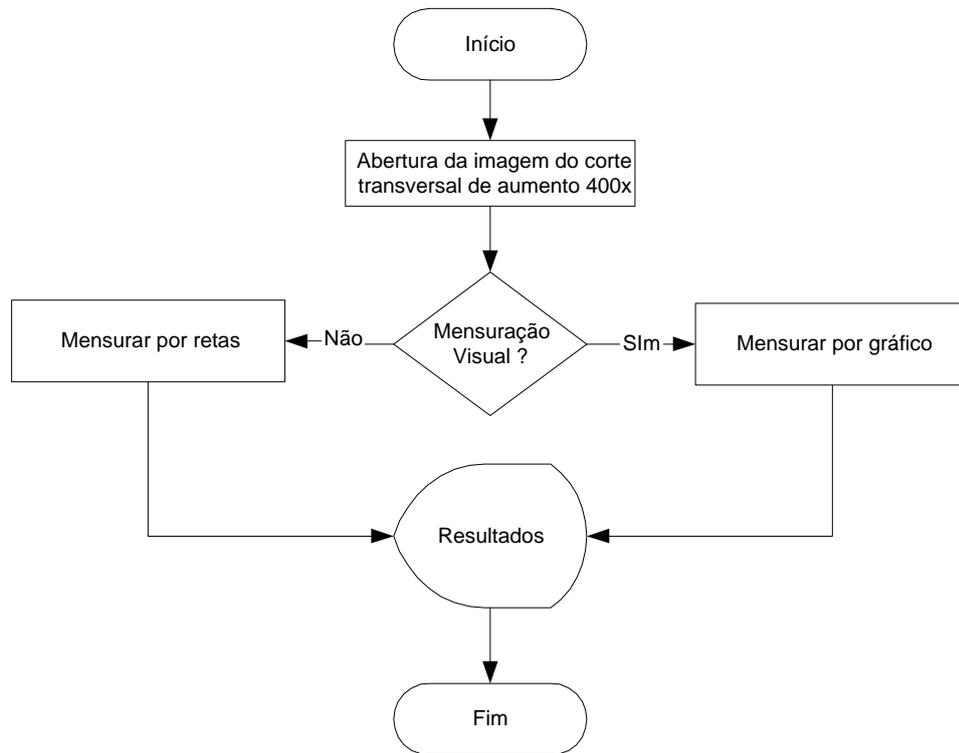


Figura 28 – Diagrama da estrutura de análise da largura de fibras.

- f) O procedimento para a mensuração do ângulo fibrilar, ilustrado pela Figura 29, inicia-se com a abertura da imagem de microscopia de força atômica. O algoritmo utiliza-se da filtragem por Sobel em XY para a detecção da variação brusca de frequências na imagem, resultado em uma imagem com apenas as altas frequências. Aplica-se então, uma limiarização para que as linhas se sobressaíam. A técnica de afinamento é utilizada sobre a imagem filtrada para que as bordas encontradas tornem-se linhas. Faz-se uma perseguição de pixels, encontrando as extremidades das linhas. Esse algoritmo inicia a varredura da imagem da esquerda para a direita e de cima para baixo. Calcula-se então, a angulação da reta obtida a partir das posições das extremidades das linhas encontradas. A partir daí ajusta-se as informações para os primeiros dois quadrantes, de forma a corrigir o processo de varredura. Ajustada a angulação, gera-se um histograma de frequência acumulada das angulações e o subdivide-se em conjuntos para uma melhor análise do intervalo de angulação. Isto é feito porque na obtenção dos dados a amostragem de linhas não é suficiente para um melhor detalhamento do histograma.

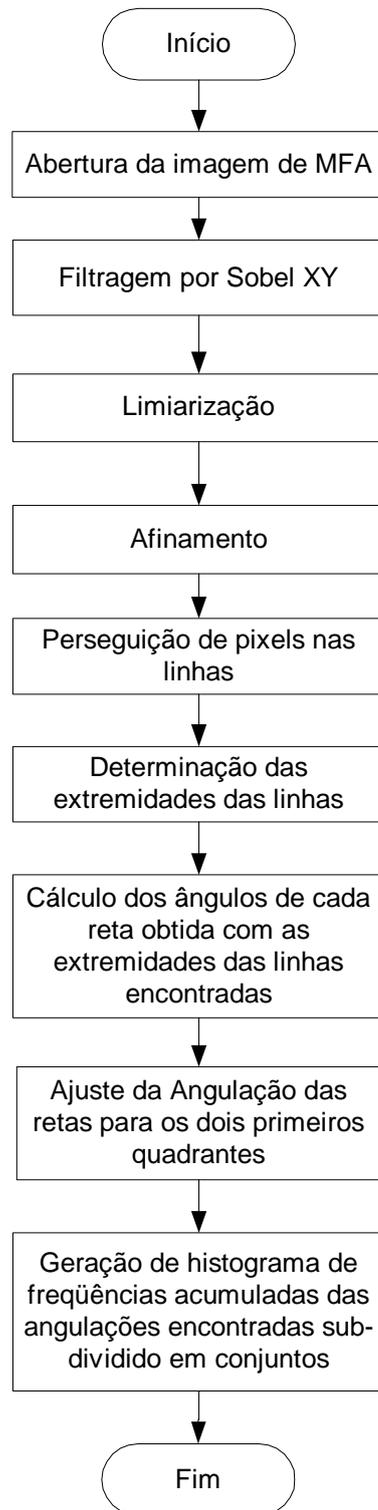


Figura 29 – Diagrama da estrutura de análise da angulação microfibrilar.

3.3 O vetor complementar de parâmetros envolvidos na qualidade de madeiras brasileiras fornecido pelo método desenvolvido

Para o estudo de casos a serem abordados na validação da metodologia desenvolvida implementou-se um vetor complementar de parâmetros indicadores de qualidade constituído pelos três elementos principais relativos aos aspectos anatômicos microscópicos das amostras de madeira e um elemento relativo ao aspecto anatômico sub-microscópico, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros envolvidos na qualidade de madeiras.

Elementos Anatômicos Microscópicos	Vaso	diâmetro (μm)
		freqüência ($\text{n.}^\circ/\text{mm}^2$)
	Raio	$\text{n.}^\circ/\text{mm}$
		largura (μm)
		altura (μm)
	Fibra	espessura de parede (μm)
diâmetro do lúmen (μm)		
largura (μm)		
Elementos Anatômicos Sub-Microscópicos	Microfibrilas	ângulo (°)

O vetor de parâmetros é considerado complementar devido ao fato de que os indicadores de qualidade de madeira são caracterizados em sua forma completa quando se é focado uma aplicação específica, a qual depende de parâmetros físicos, químicos e mecânicos além dos anatômicos microscópicos e sub-microscópicos considerados.

Capítulo 4

Resultados e Conclusões

Neste capítulo são apresentados em estudos de casos os resultados obtidos com o desenvolvimento e aplicação do método complementar de análise da qualidade de madeira com técnicas do processamento digital de imagens. Também, são apresentados tópicos referentes a sua aferição e análise de erros quanto a medida de ângulo microfibrilar em madeiras brasileiras.

4.1 Avaliação da interface com o usuário

O sistema proposto foi desenvolvido em ambiente Windows utilizando o Borland C++ Builder 5.0.

A tela principal do sistema desenvolvido contém os menus de acesso às funções de abertura da imagem e configuração de unidades do sistema, conforme ilustra a Figura 30.

O sistema foi desenvolvido com a finalidade de auxiliar o processo de análise da qualidade de madeiras, através da automatização de mensurações de elementos anatômicos microscópicos e um elemento anatômico sub-microscópico, ou seja, o ângulo microfibrilar.

Para utilizar o sistema desenvolvido, será necessário primeiramente definir o que se quer mensurar e seguir alguns passos, que podem variar para cada tipo de elemento a ser mensurado.

Primeiramente o usuário faz a definição da unidade de medida padrão. Nessa definição, o sistema converterá a unidade de pixel para a unidade solicitada pelo usuário como por exemplo, a unidade micrometro (μm).

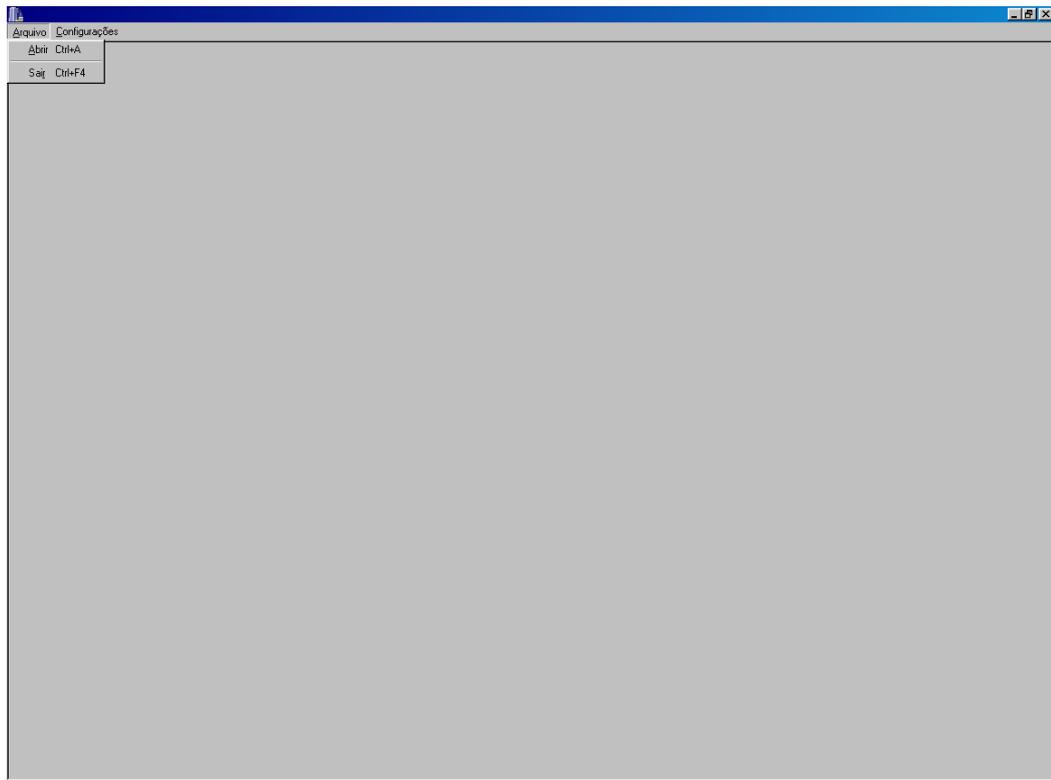


Figura 30 - Tela de apresentação do sistema desenvolvido.

A Figura 31 ilustra a tela com o menu para a definição de unidades e escalas. Acessando o item <Configurações> do menu do sistema, será exibida a opção de <Definir Unidades>.

Acessada a opção de calibração, é aberta uma janela, conforme ilustra a Figura 32, onde são inseridos os valores das unidades, caso o usuário já os tenha obtido previamente. Nessa janela os valores inseridos serão a quantidade de pixels presentes na quantidade real da unidade escolhida.

Caso o usuário não tenha previamente os valores para a conversão de unidades, este deverá clicar no botão <Abrir Imagem da Escala>. Este botão abrirá uma janela solicitando a imagem a ser aberta, que neste caso deverá ser a imagem da escala que o usuário deseja utilizar para suas mensurações.

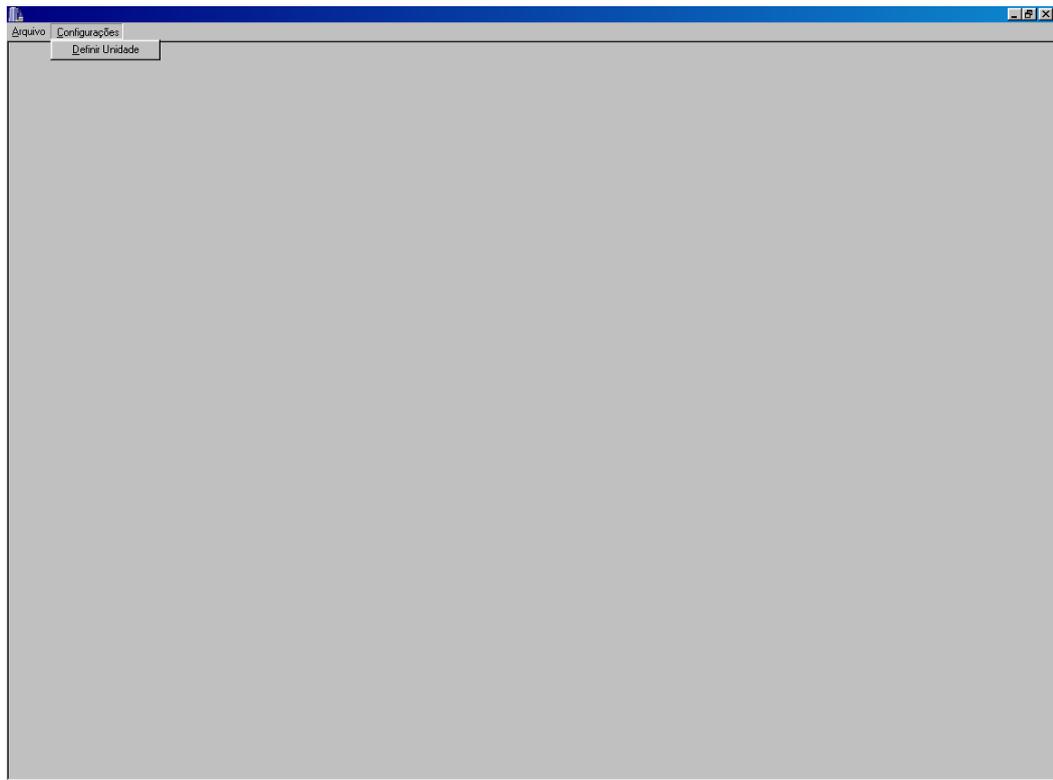


Figura 31 - Tela de apresentação do menu para definição de unidades do sistema.

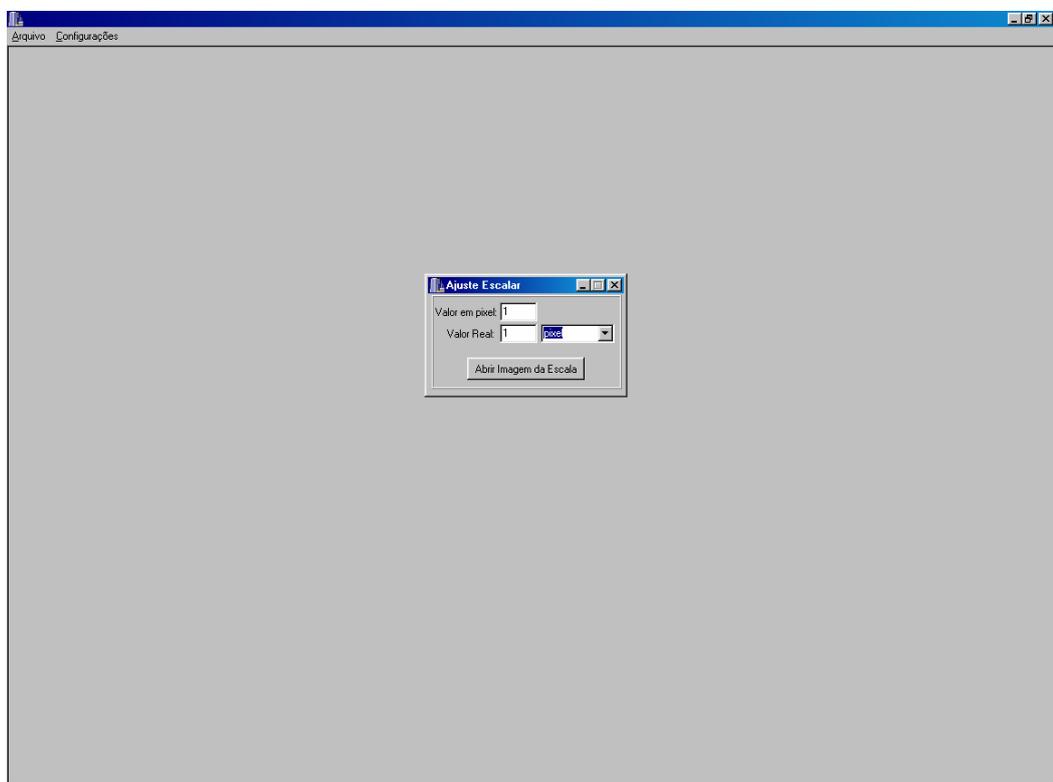


Figura 32 - Tela de apresentação da definição de unidades do sistema para a realização da conversão de unidades dentro do sistema.

Após a escolha da imagem, esta será mostrada conforme ilustra a Figura 33. Nessa janela há um botão para iniciar a mensuração. Clicando nesse botão, o usuário deverá clicar na imagem em um ponto próximo a uma das retas da escala, e arrastar o mouse até a uma outra posição, conforme ilustrado na Figura 34. Marcadas as posições, o sistema apresenta no quadro a esquerda da imagem, a quantidade de pixels presentes na reta traçada. O usuário deverá preencher o campo <Valor Pixel> e <Valor Real>, onde deverá ser informado o tamanho conhecido que será dado pela escala e no campo a direita deste, definir o nome da unidade adotada. Após essa etapa de definição o usuário deverá clicar no Botão <Salvar> para que as informações tornem-se padrão para o sistema. Caso o usuário não queira definir nenhuma unidade, o sistema assumirá como padrão a unidade pixel.

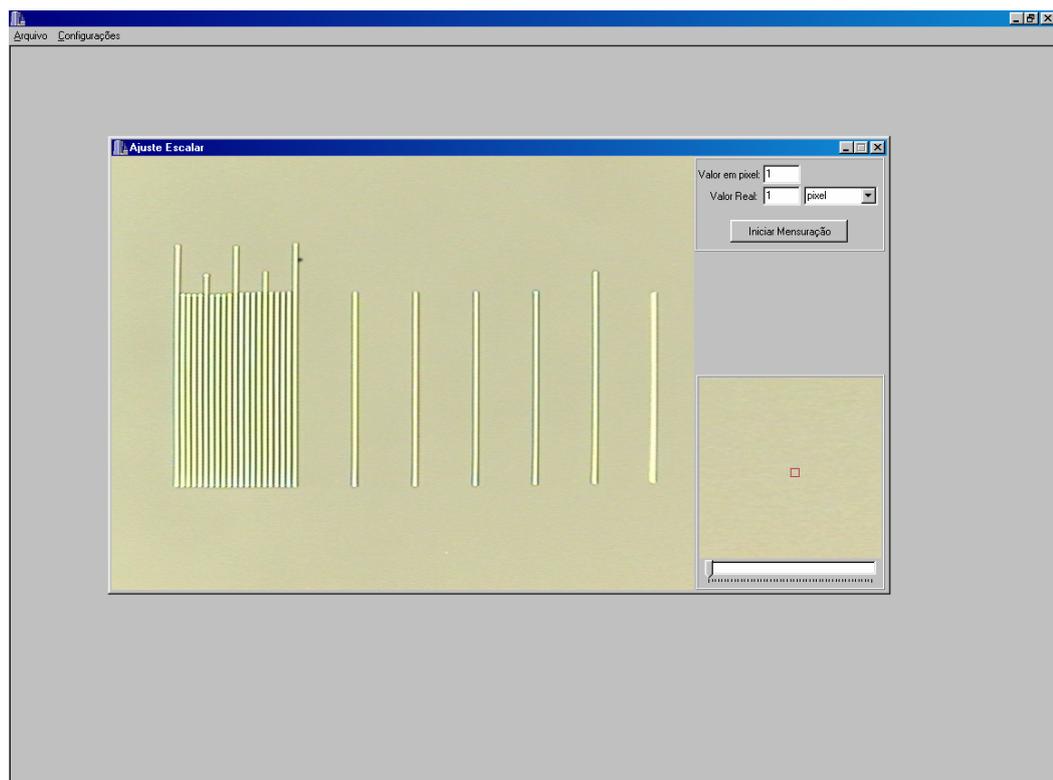


Figura 33 – Tela de apresentação com a imagem de uma escala micrométrica para a conversão de unidades de pixel para micrometros.

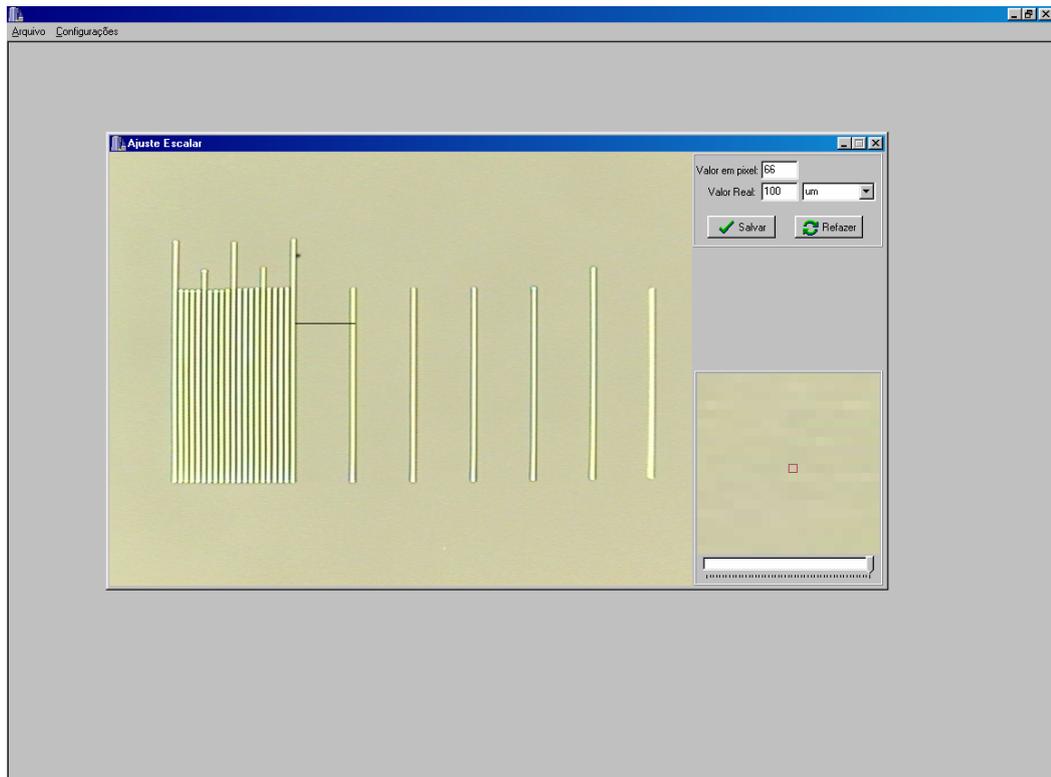


Figura 34 – Tela de apresentação com a marcação de uma linha para determinar a quantidade de pixel presente no intervalo dado pela escala micrométrica.

Após a etapa da definição da unidade padrão para o sistema, o usuário deverá acessar a opção <Arquivo> do menu do sistema, onde serão exibidas as opções de <Abrir> imagem e <Sair> do sistema.

Caso o usuário optar por abrir uma imagem, aparecerá uma caixa de diálogo com as imagens e diretórios, conforme ilustra a Figura 35. Após selecionar a imagem que o sistema irá trabalhar, a imagem é carregada no sistema, aparecendo dentro de uma janela, conforme ilustrado na Figura 36.

Após carregada a imagem, o usuário poderá optar pela realização de uma filtragem para uma possível melhora na imagem, utilizando para isso o menu <filtros>, conforme ilustra a Figura 37.

A Figura 38 demonstra que além do menu <filtros> existem outras opções como o <zoom> e o menu <madeiras>, sendo esse composto por sub-menus de <mensuração>, <geração de gráficos> e <ajustes finos>.

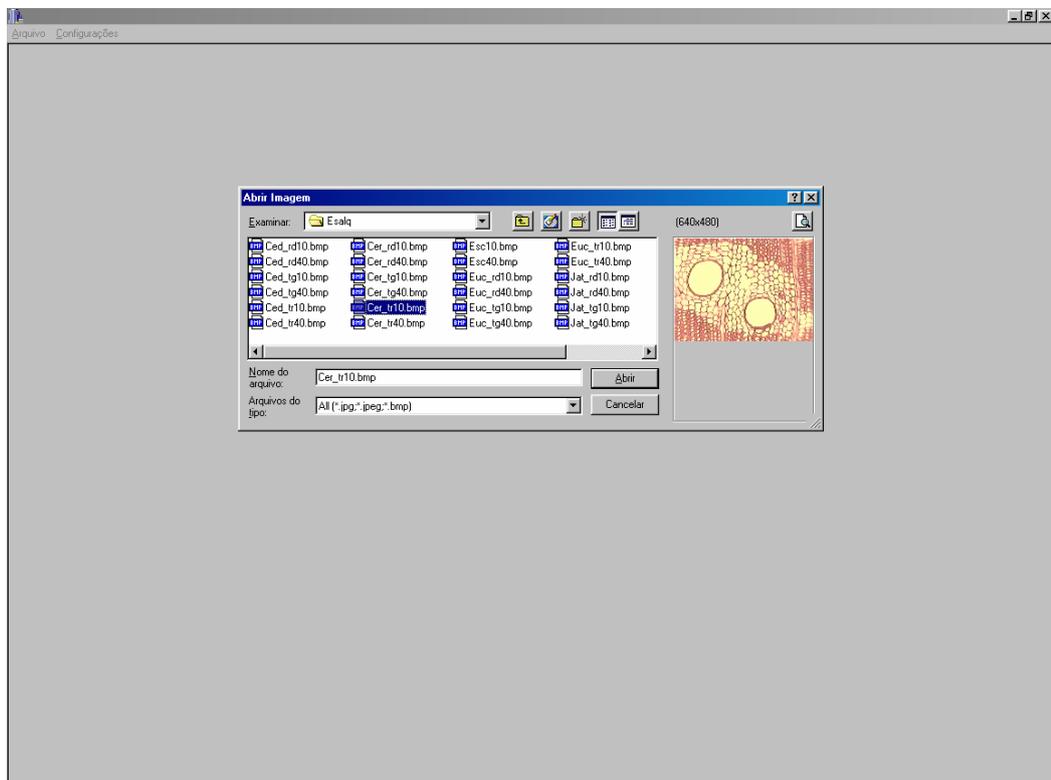


Figura 35 – Tela de apresentação com a caixa de diálogo para a abertura da imagem.

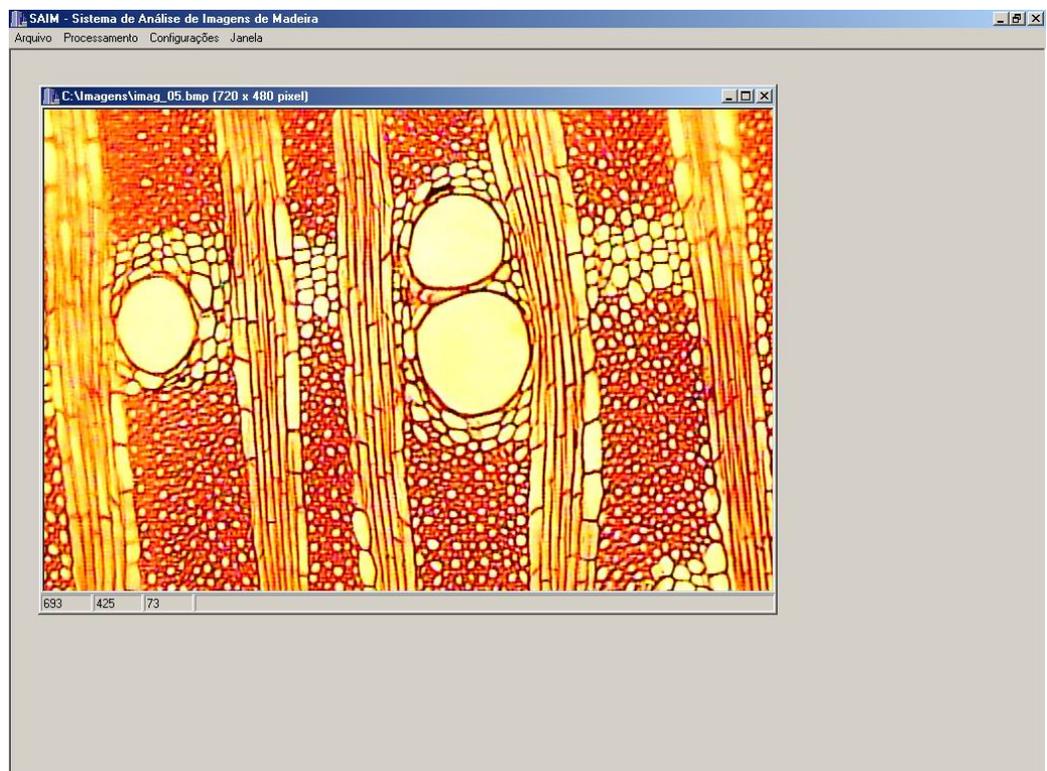


Figura 36 – Tela de apresentação com a imagem aberta e pronta para o processamento.

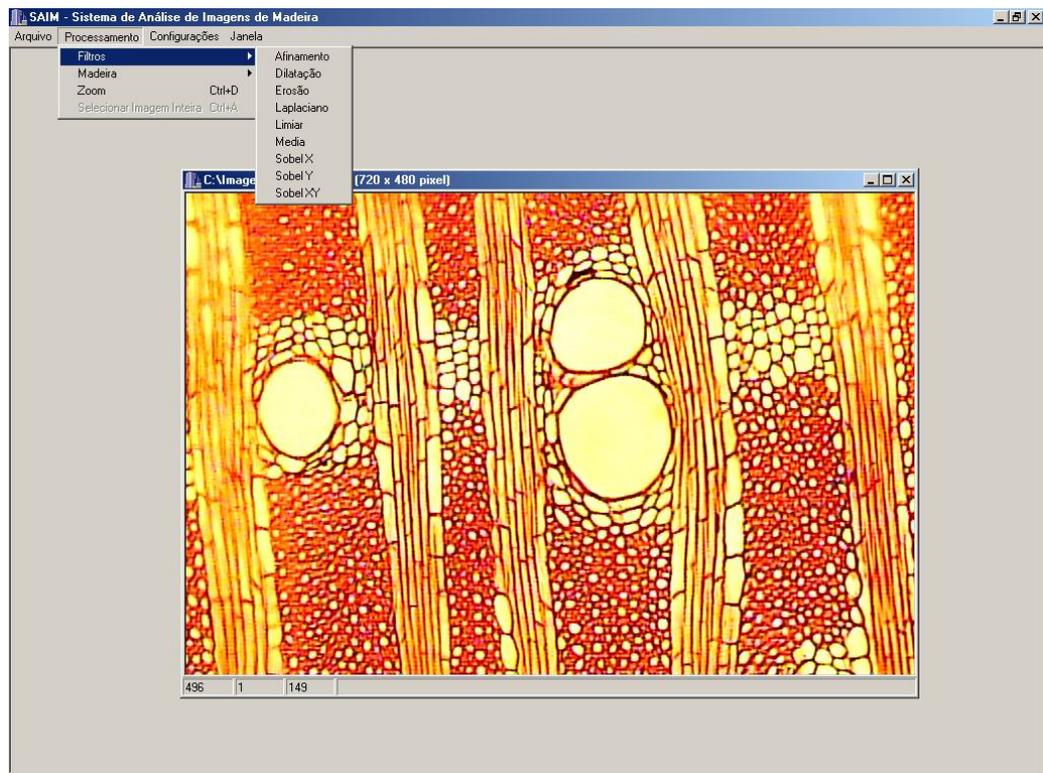


Figura 37 - Tela de apresentação do menu <Processamento> e o sub-menu <Filtros>.

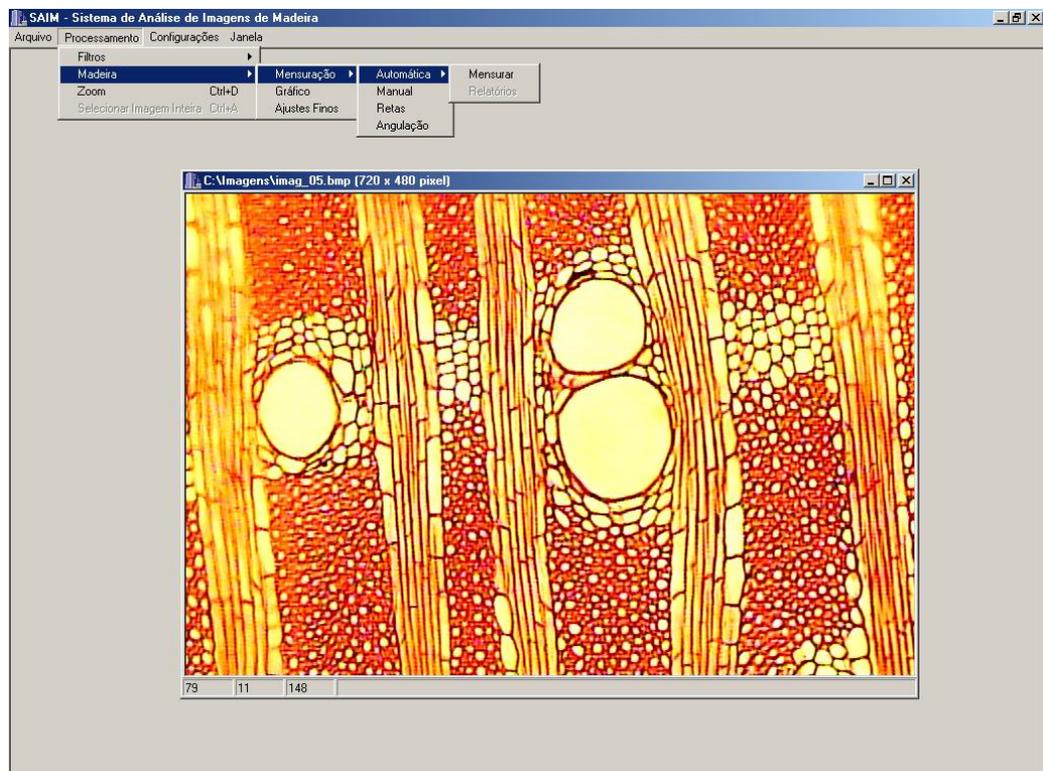


Figura 38 - Tela de apresentação do menu <Madeiras> e seus sub-menus.

Na Figura 39, observa-se a tela demonstrando uma limiarização, sendo esse método acessado pelo menu filtros. Pode-se observar também, a opção de janela de limiar, composta de um valor mínimo e um valor máximo para a limiarização. Conforme o usuário desloca as barras de rolagem do limiar, a limiarização ocorre sem a necessidade de pressionar botões e com isso, o usuário poderá visualizar a limiarização e definir o limiar mais facilmente.

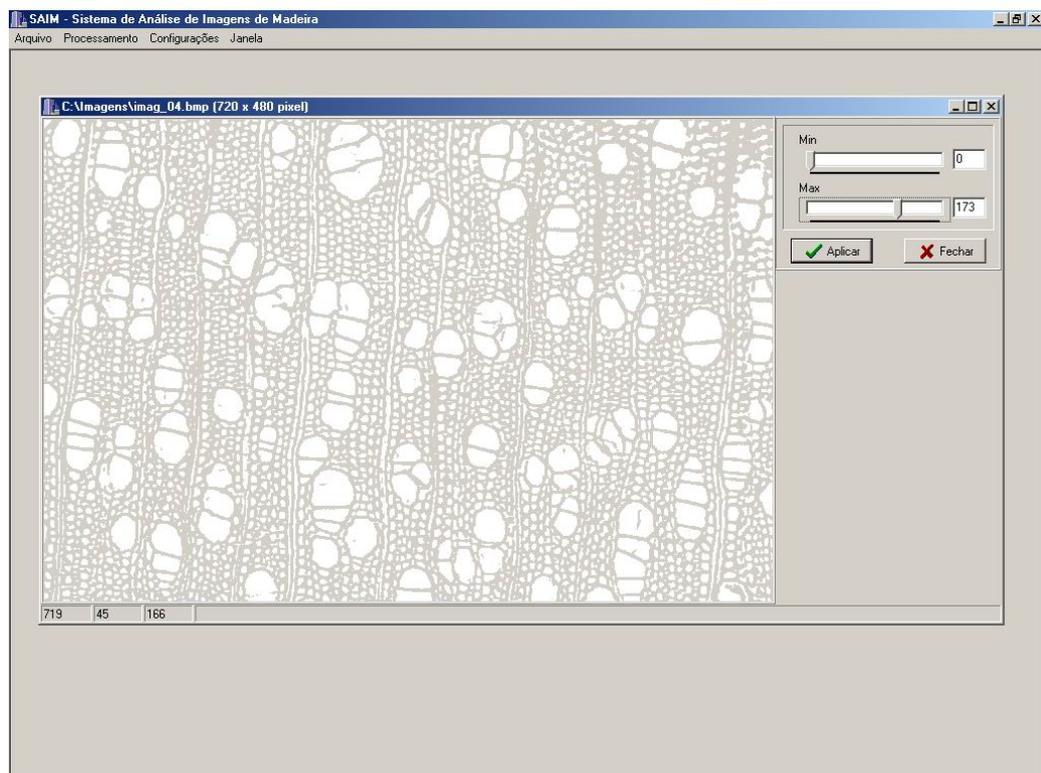


Figura 39 - Tela de apresentação da Limiarização.

A Figura 40 demonstra a utilização do recurso de zoom, estando esse recurso no menu processamento. Ao optar pelo zoom, abre-se uma janela onde aparecerá a imagem ampliada do objeto no qual o usuário estará com o ponteiro do mouse incidindo sobre o objeto. Pode-se observar que na parte inferior da janela de zoom, há uma barra de rolagem utilizada para a definição da ampliação a ser visualizada pela janela de zoom que pode ser de 2 vezes à 20 vezes.

Algumas imagens podem apresentar objetos de interesses impróprios para análise. Para o tratamento desses defeitos na imagem, utiliza-se o recurso de ajuste fino,

conforme ilustrado na Figura 41, o qual é acessado através do sub-menu <madeiras>. O ajuste fino permite definir a cor e o tamanho do pincel a ser utilizado.

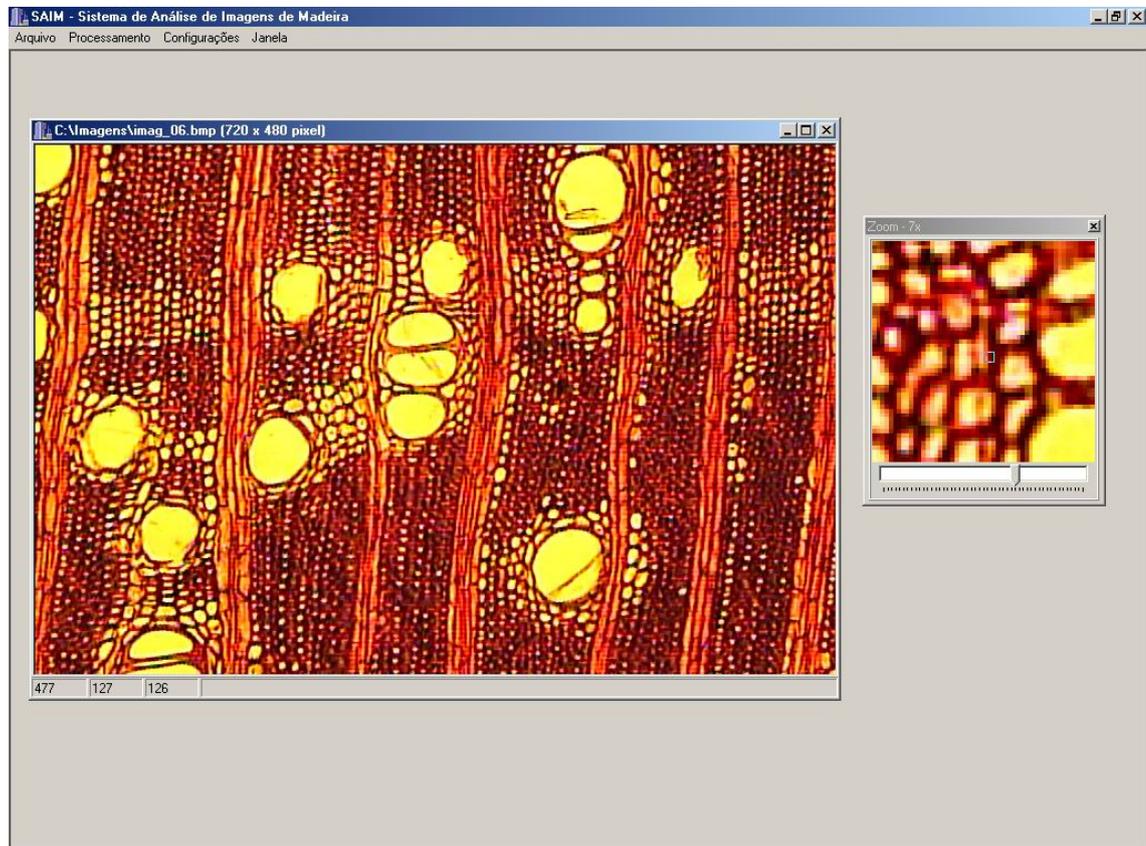


Figura 40 – Tela de apresentação da janela de zoom ao lado da imagem.

Uma das maneiras de se mensurar objetos é através da utilização de gráficos de intensidades por distância. Para utilizar esse recurso, acessa-se o sub-menu madeiras e a opção gráfico. O usuário deverá clicar em dois pontos na imagem para que seja traçada uma reta entre os pontos e com isso, será gerado o gráfico de intensidades dos pixels presentes sob essa reta, sendo esse apresentado em uma nova janela, conforme ilustrado pela Figura 42. Na parte superior da janela do gráfico observa-se a imagem apresentando a região presente entre os pontos selecionados.

Outra maneira de mensurar objetos presentes nas imagens é através da utilização de retas, muito semelhante as retas traçadas para a obtenção de gráficos de intensidades, mas nesse caso o resultado será a distância presente entre os dois pontos

selecionados. Pode-se optar por selecionar mais de dois pontos sendo que para o sistema a reta seria contínua e o valor final seria a soma de todas as semi-retas traçadas. O resultado de cada mensuração aparece na tabela a direita da imagem mensurada, conforme ilustra a Figura 43.

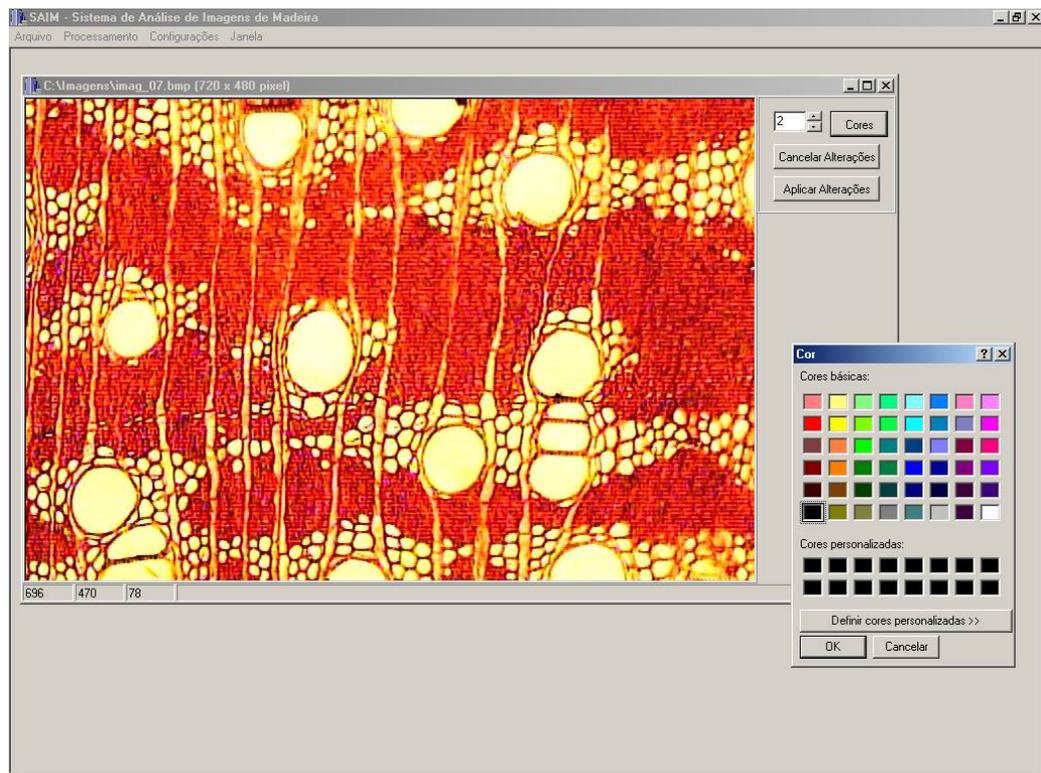


Figura 41 – Tela de apresentação com as opções para ajustes e retoques na imagem.

Pode-se obter a área dos objetos utilizando-se do recurso de mensuração manual onde se seleciona o objeto de interesse e o sistema mensura toda a área interna do objeto em questão. A Figura 44 ilustra a mensuração de dois objetos, destacados pela cor vermelha.

Caso haja a necessidade de obter a área de vários objetos em uma mesma imagem, pode-se utilizar a opção de mensuração automática. Essa mensuração varre a imagem toda mensurando todos os elementos encontrados pelo sistema, apresentando como resultado, uma tabela de valores e também a identificação através de cores dos objetos de mesma área, conforme ilustrado na Figura 45.

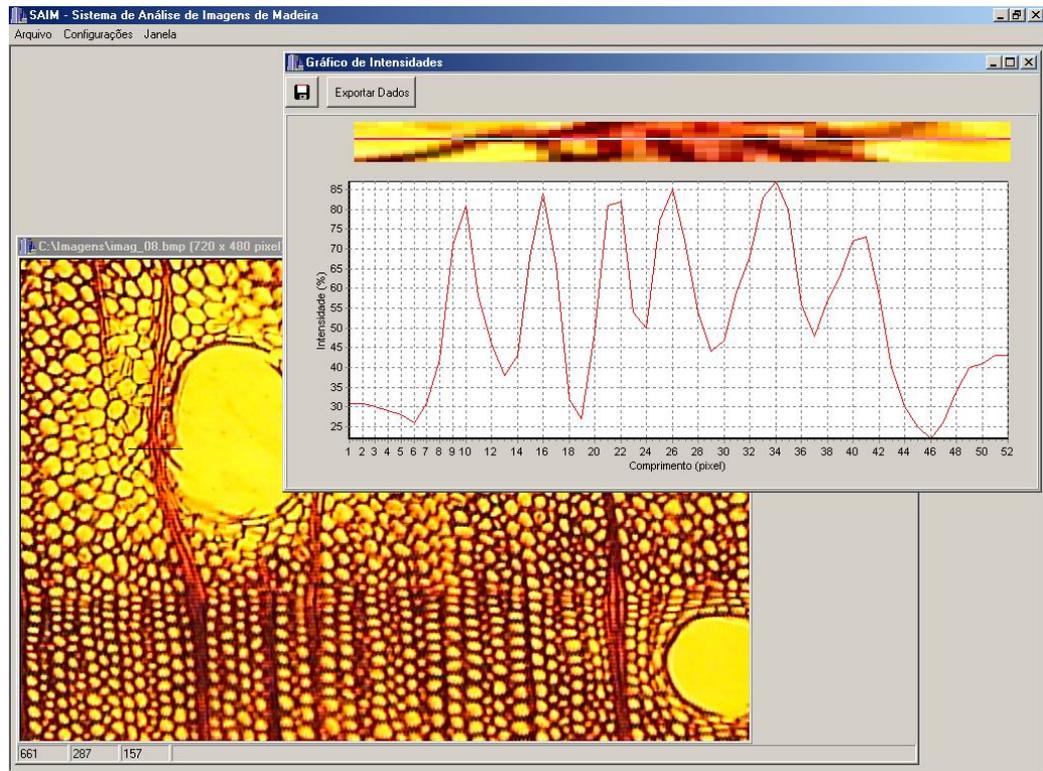


Figura 42 – Tela de apresentação da mensuração por reta com gráfico de intensidades.

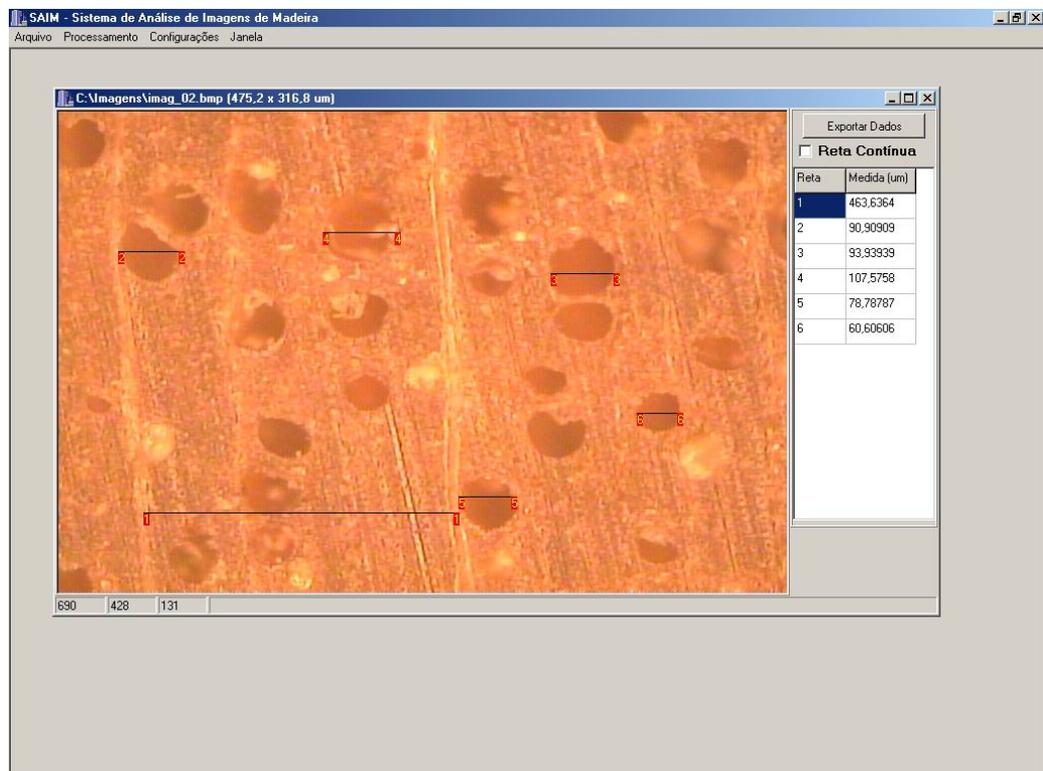


Figura 43 - Tela de apresentação da mensuração de elementos por retas.

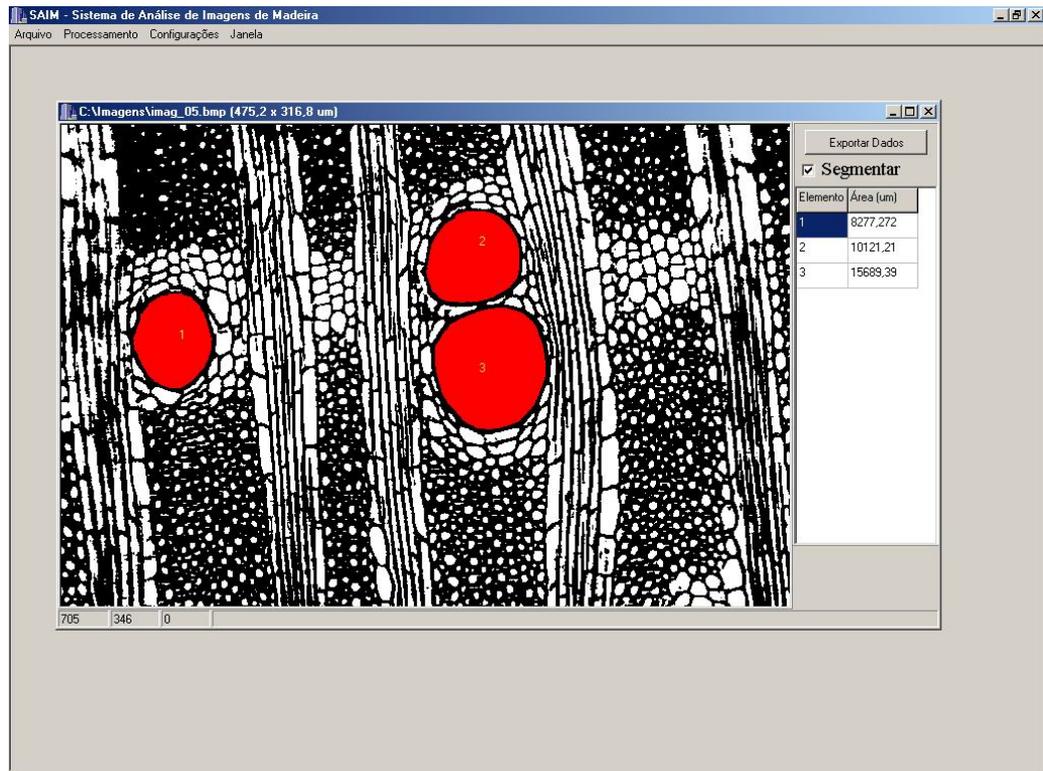


Figura 44 – Tela de apresentação da mensuração manual.

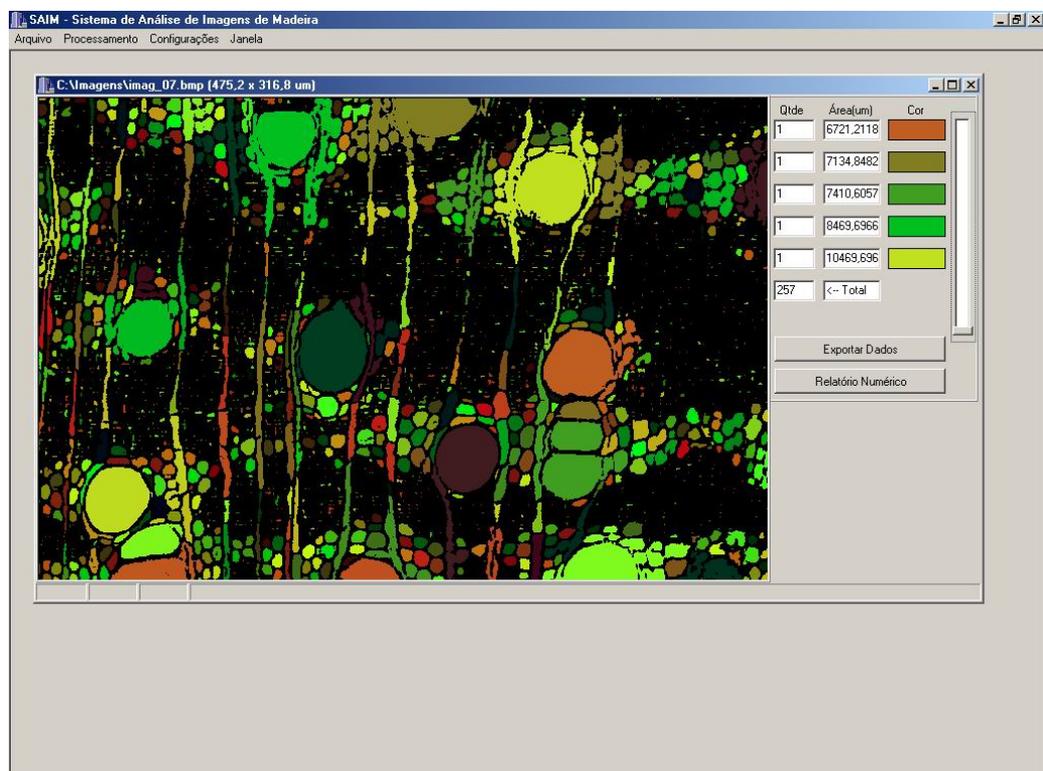


Figura 45 – Tela de apresentação da mensuração automática e janela dos dados totalizados por cores.

Além da tabela de cores, a mensuração automática apresenta uma tabela com os valores e suas respectivas posições dentro da imagem, conforme ilustra a Figura 46.

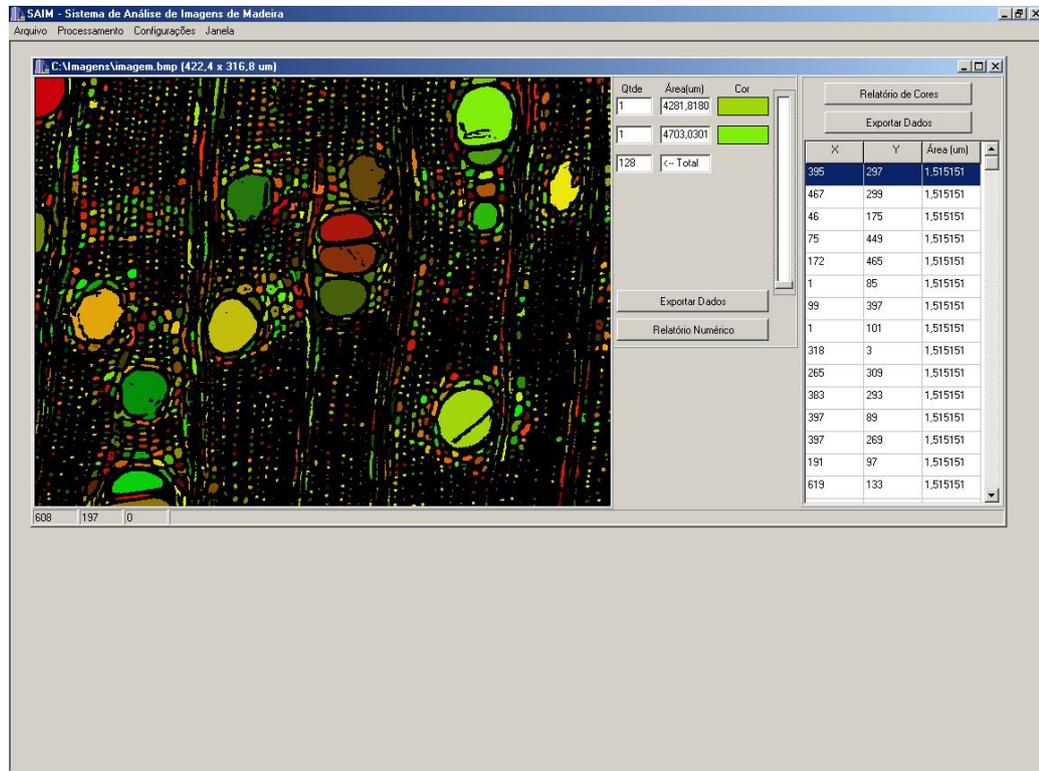


Figura 46 – Tela de apresentação da mensuração automática e janela dos dados totalizados por cores e ao lado indicativos da localização e dimensão de cada elemento.

O sistema permite que seja selecionada apenas uma região de interesse dentro da imagem (ROI – *Region of Interest*). Essa opção melhora o desempenho do sistema, pois com a definição do ROI, o sistema processará somente a região selecionada evitando assim o processamento desnecessário da imagem inteira, conforme ilustrado na Figura 47.

A Figura 48 ilustra uma imagem para mensuração de ângulos. A partir da imagem, o sistema obterá o ângulo para cada reta detectada na imagem. Para tal detecção, utiliza-se de filtragem por Sobel e também do recurso de afinamento para obter apenas uma linha, conforme ilustra a Figura 49. Tendo apenas a linha, o sistema varre a imagem procurando pelas linhas e calculando as angulações decorrentes das mesmas. O resultado desses cálculos é a geração de dois histogramas de frequência acumulada, ilustrado na Figura 50, sendo que um dos histogramas apresenta todos os

ângulos encontrados e o outro sub-divide os ângulos em agrupamentos em intervalos de 10 graus.

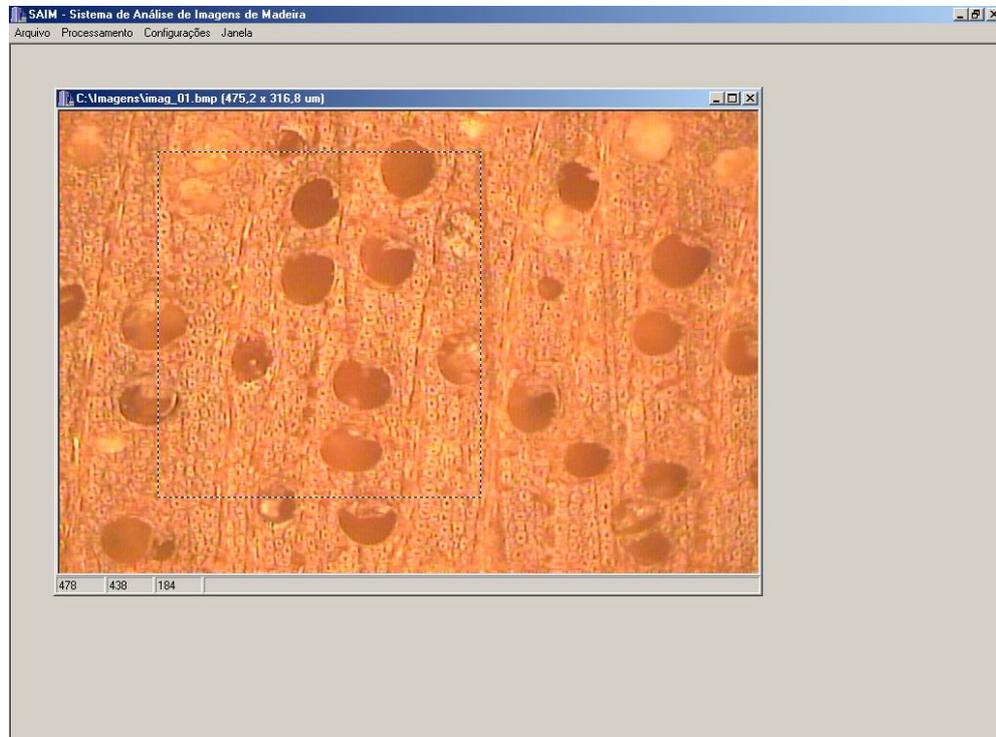


Figura 47 – Tela de apresentação da definição da Região de Interesse (ROI).

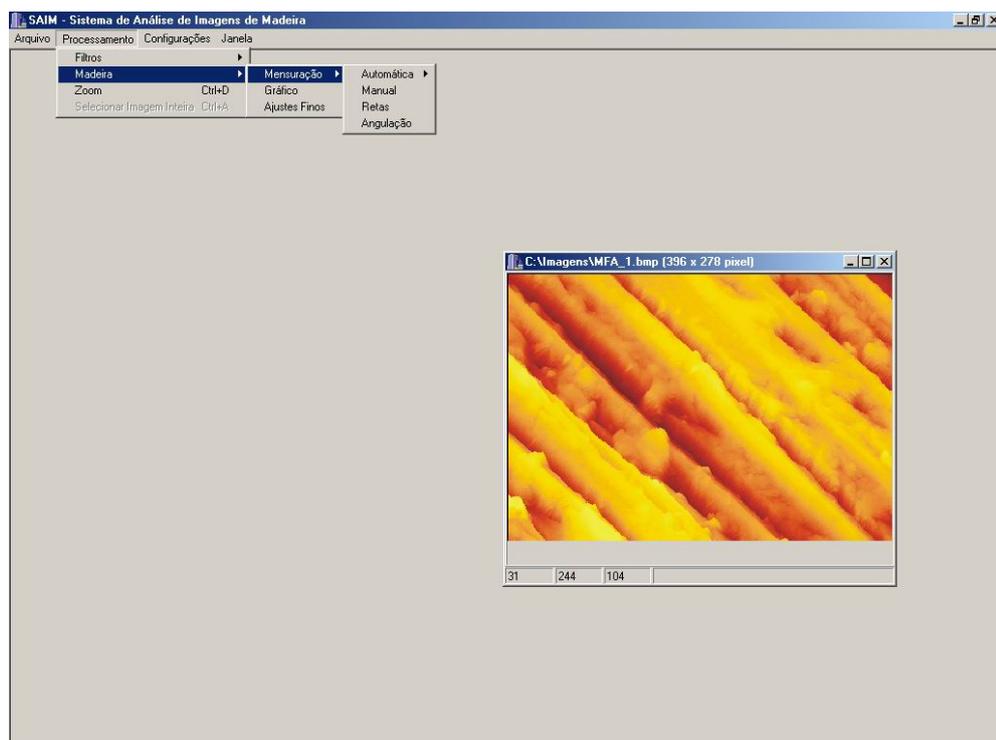


Figura 48 – Tela de apresentação da imagem para mensurar a angulação microfibrilar.

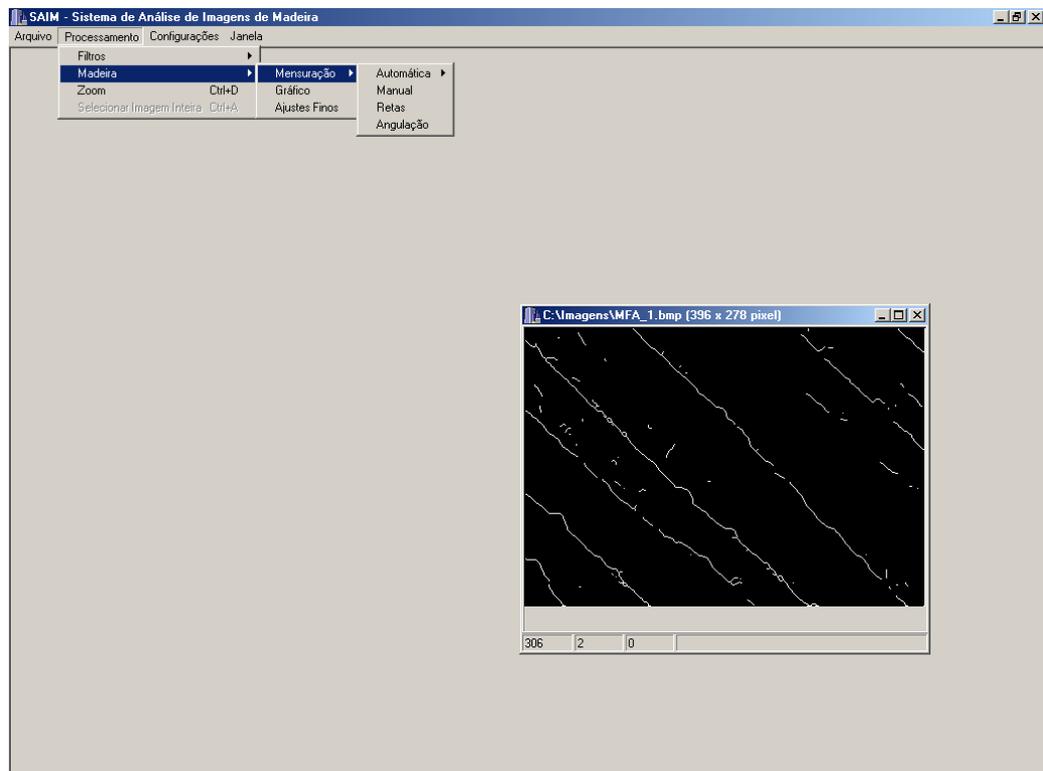


Figura 49 – Tela de apresentação do resultado da técnica de afinamento.

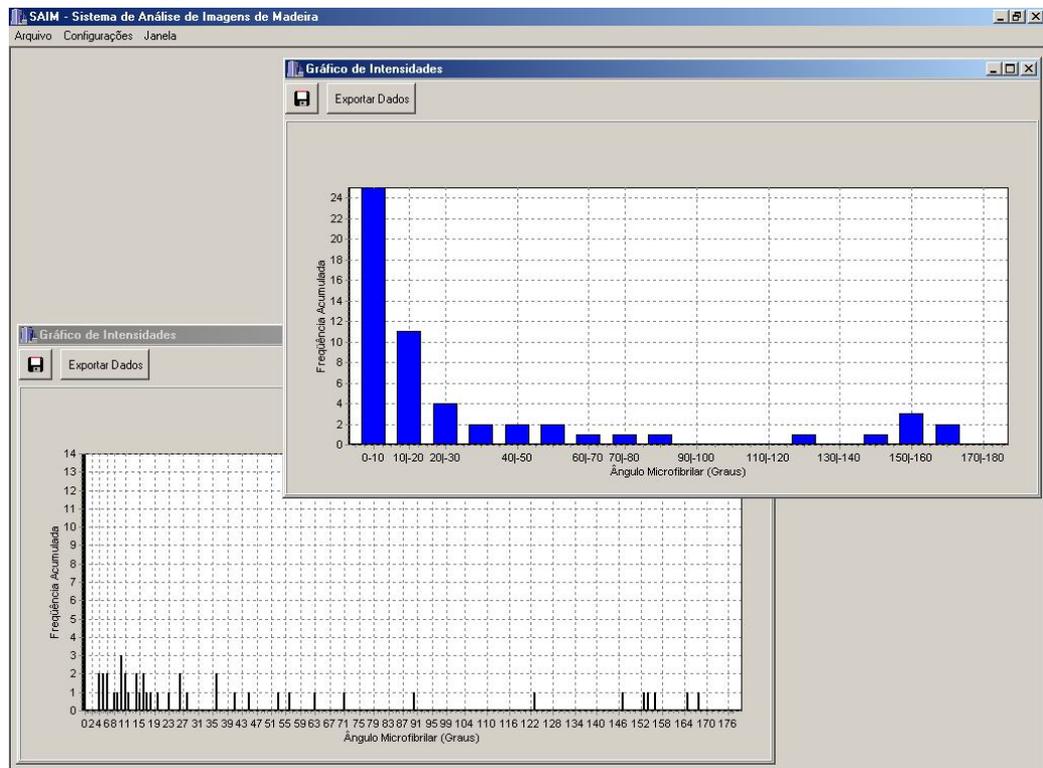


Figura 50 – Tela de apresentação do histograma da frequência acumulada.

4.2 Teste para validação do método para a medida de ângulo microfibrilar com técnica do processamento digital de imagem

Para calibrar o sistema implementado foram geradas imagens com padrões de retas, pré-definidas e diferenciadas em angulação, conforme ilustra a Figura 51.

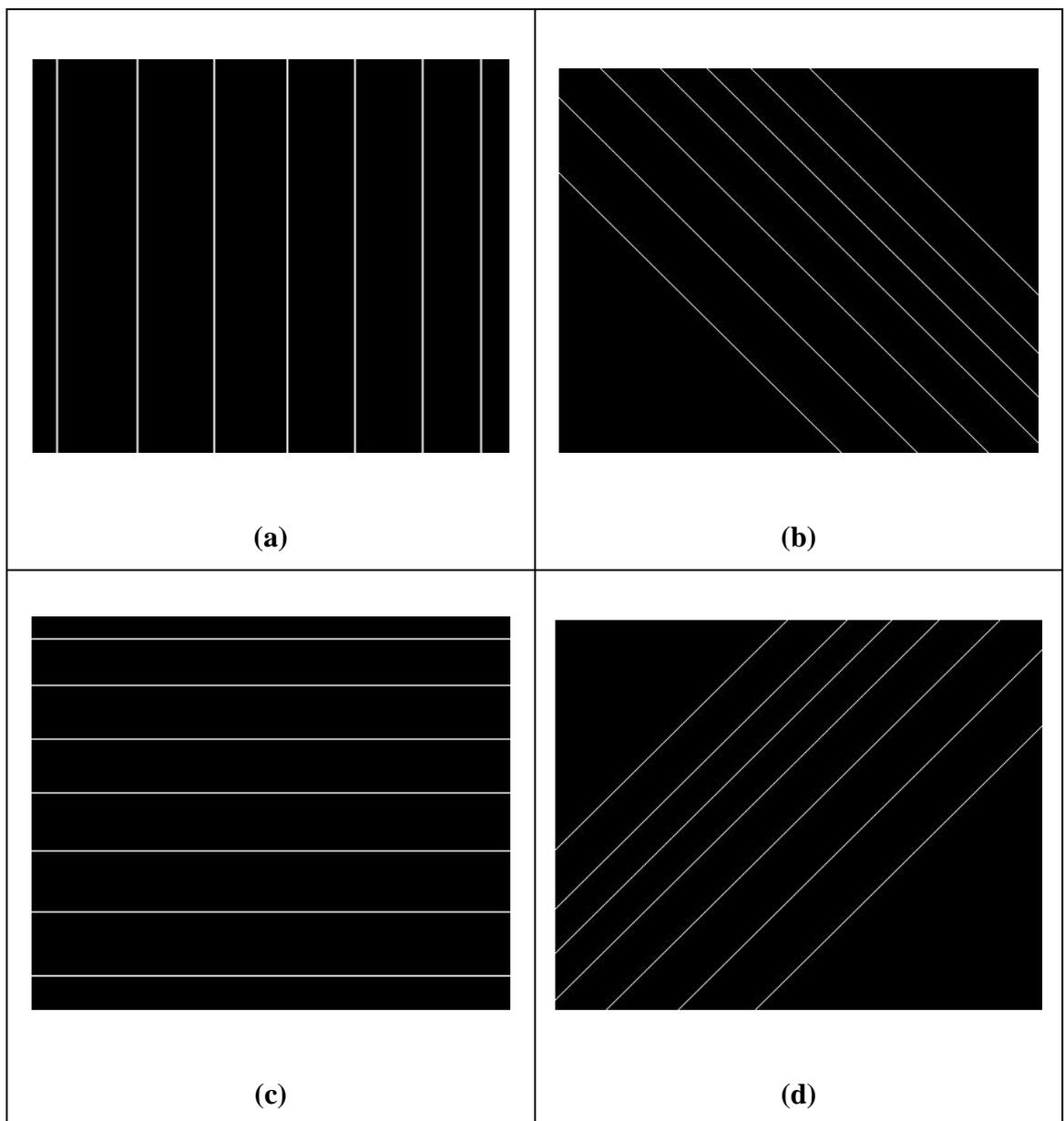


Figura 51 – (a) Imagem padrão com angulação de 0° ; (b) Imagem padrão com angulação de 45° ; (c) Imagem padrão com angulação de 90° e (d) Imagem padrão com angulação de 135° .

Para a validação do método foram avaliados os resultados de erro absoluto verdadeiro ($[\text{°}]$), erro absoluto aparente ($[\text{°}]$), erro relativo ($[\text{°}]$), erro percentual ($[\text{\%}]$), erro percentual médio ($[\text{\%}]$), desvio médio ($[\text{°}]$), desvio padrão ($[\text{°}]$), variância ($[\text{°}]$) e erro tolerável ($[\text{°}]$).

Adicionalmente, o sistema foi avaliado com o uso de um padrão especial constituído por um feixe de retas com variação angular incremental. A Figura 52 ilustra padrões de imagens geradas para avaliação da resolução de detecção do parâmetro sub-microscópico considerado no vetor complementar de parâmetros de qualidade de madeira.

A Figura 51 (a) apresenta a imagem padrão com angulação de 0° , (b) apresenta a imagem padrão com angulação de 45° , (c) apresenta a imagem padrão com angulação de 90° e (d) apresenta a imagem padrão com angulação de 135° .

A Tabela 2 apresenta uma análise dos dados obtidos com o padrão de retas com angulação de $0,5^\circ$. Os dados da Tabela 2 foram sintetizados na Tabela 3.

A Tabela 4 apresenta uma análise dos dados obtidos com o padrão de retas com angulação de 1° . Os dados da Tabela 4 foram sintetizados na Tabela 5.

A Tabela 6 apresenta uma análise dos dados obtidos com o padrão de retas com angulação de 2° . Os dados da Tabela 6 foram sintetizados na Tabela 7.

A Tabela 8 apresenta uma análise dos dados obtidos com o padrão de retas com angulação de $3,5^\circ$. Os dados da Tabela 8 foram sintetizados na Tabela 9.

A Tabela 10 apresenta uma análise dos dados obtidos com o padrão de retas com angulação de 5° . Os dados da Tabela 10 foram sintetizados na Tabela 11.

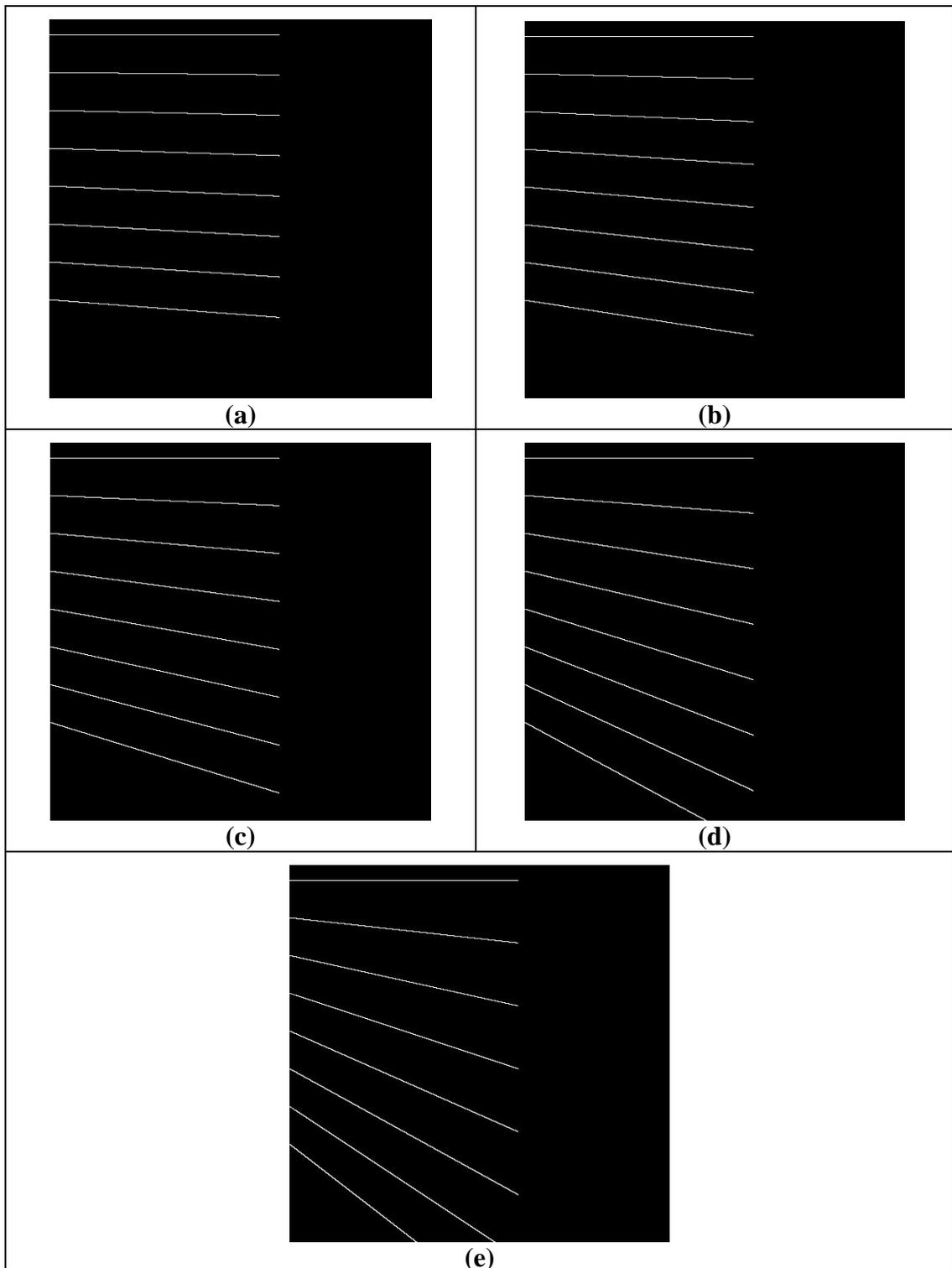


Figura 52 – (a) Imagem padrão com variação angular incremental de $0,5^\circ$; (b) Imagem padrão com variação angular incremental de 1° ; (c) Imagem padrão com variação angular incremental de 2° ; (d) Imagem padrão com variação angular incremental de $3,5^\circ$; (e) Imagem padrão com variação angular incremental de 5° .

Tabela 2 – Dados gerados com a análise da imagem apresentada na Figura 52 (a).

Análise dos dados com padrão de retas gerados com variação incremental de 0,5°					
Experimental (°)	Valor Real (°)	Erro Verdadeiro (°)	Erro Aparente (°)	Erro Relativo (°)	Erro Porcentual (%)
86,500	85,000	1,500	1,500	0,018	1,76
87,000	86,000	1,000	1,000	0,012	1,16
87,500	86,000	1,500	1,500	0,017	1,74
88,000	87,000	1,000	1,000	0,011	1,15
88,500	88,000	0,500	0,500	0,006	0,57
89,000	88,000	1,000	1,000	0,011	1,14
89,500	89,000	0,500	0,500	0,006	0,56
90,000	90,000	0,000	0,000	0,000	0,00

Tabela 3 – Síntese da análise da Tabela 2.

Medidas	
Erro Médio Percentual	1,155
Desvio Médio	1,000
Desvio Quadrático Médio	0,378
Desvio Padrão	0,408
Variância	0,167
Erro Tolerável	0,500

Tabela 4 – Dados gerados com a análise da imagem apresentada na Figura 52 (b).

Análise dos dados com padrão de retas gerados com variação incremental de 1°					
Experimental (°)	Valor Real (°)	Erro Verdadeiro (°)	Erro Aparente (°)	Erro Relativo (°)	Erro Porcentual (%)
83,000	81,000	2,000	2,000	0,025	2,469
84,000	82,000	2,000	2,000	0,024	2,439
85,000	83,000	2,000	2,000	0,024	2,410
86,000	85,000	1,000	1,000	0,012	1,176
87,000	86,000	1,000	1,000	0,012	1,163
88,000	87,000	1,000	1,000	0,011	1,149
89,000	88,000	1,000	1,000	0,011	1,136
90,000	90,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 5 – Síntese da análise da Tabela 4.

Medidas	
Erro Médio Percentual	1,71
Desvio Médio	1,429
Desvio Quadrático Médio	0,495
Desvio Padrão	0,535
Variância	0,286
Erro Tolerável	0,857

Tabela 6 – Dados gerados com a análise da imagem apresentada na Figura 52 (c).

Análise dos dados com padrão de retas gerados com variação incremental de 2°					
Experimental (°)	Valor Real (°)	Erro Verdadeiro (°)	Erro Aparente (°)	Erro Relativo (°)	Erro Porcentual (%)
76,000	72,000	4,000	4,000	0,056	5,556
78,000	75,000	3,000	3,000	0,040	4,000
80,000	77,000	3,000	3,000	0,039	3,896
82,000	79,000	3,000	3,000	0,038	3,797
84,000	82,000	2,000	2,000	0,024	2,439
86,000	85,000	1,000	1,000	0,012	1,176
88,000	87,000	1,000	1,000	0,011	1,149
90,000	90,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 7 – Síntese da análise da Tabela 6.

Medidas	
Erro Médio Percentual	3,145
Desvio Médio	2,429
Desvio Quadrático Médio	1,050
Desvio Padrão	1,134
Variância	1,286
Erro Tolerável	3,857

Tabela 8 – Dados gerados com a análise da imagem apresentada na Figura 52 (d).

Análise dos dados com padrão de retas gerados com variação incremental de 3,5°					
Experimental (°)	Valor Real (°)	Erro Verdadeiro (°)	Erro Aparente (°)	Erro Relativo (°)	Erro Porcentual (%)
65,500	61,000	4,500	4,500	0,074	7,377
69,000	64,000	5,000	5,000	0,078	7,813
72,500	68,000	4,500	4,500	0,066	6,618
76,000	72,000	4,000	4,000	0,056	5,556
79,500	76,000	3,500	3,500	0,046	4,605
83,000	81,000	2,000	2,000	0,025	2,469
86,500	85,000	1,500	1,500	0,018	1,765
90,000	90,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 9 – Síntese da análise da Tabela 8.

Medidas	
Erro Médio Percentual	5,17
Desvio Médio	3,571
Desvio Quadrático Médio	1,237
Desvio Padrão	1,336
Variância	1,786
Erro Tolerável	5,357

Tabela 10 – Dados gerados com a análise da imagem apresentada na Figura 52 (e).

Análise dos dados com padrão de retas gerados com variação incremental de 5°					
Experimental (°)	Valor Real (°)	Erro Verdadeiro (°)	Erro Aparente (°)	Erro Relativo (°)	Erro Porcentual (%)
55,000	52,000	3,000	3,000	0,058	5,769
60,000	56,000	4,000	4,000	0,071	7,143
65,000	61,000	4,000	4,000	0,066	6,557
70,000	66,000	4,000	4,000	0,061	6,061
75,000	71,000	4,000	4,000	0,056	5,634
80,000	77,000	3,000	3,000	0,039	3,896
85,000	83,000	2,000	2,000	0,024	2,410
90,000	90,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 11 – Síntese da análise da Tabela 10.

Medidas	
Erro Médio Percentual	5,353
Desvio Médio	3,429
Desvio Quadrático Médio	0,728
Desvio Padrão	0,787
Variância	0,619
Erro Tolerável	1,857

4.3 Estudo de casos

No estudo de casos considerou-se a avaliação de quatro diferentes espécies florestais (*Amburana cearensis*, *Cedrela fissili*, *Eucalyptus saligna*, *Hymenaea stilbocarpa*) de forma a avaliar os parâmetros complementares de qualidade quanto aos seguintes elementos anatômicos microscópicos: vaso, fibra e raio.

Para as espécies que tiveram os elementos anatômicos microscópicos avaliados considerou-se três cortes e duas ampliações.

Os cortes foram obtidos conforme metodologia apresentada no capítulo 1 deste trabalho e resultaram em um conjunto de 24 imagens para análise cujos resultados estão reportados nos subitens 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4.

Adicionalmente considerou-se a avaliação de uma espécie florestal (*Eucalyptus saligna*) de forma a avaliar o parâmetro complementar de qualidade quanto ao elemento anatômico sub-microscópico dado pelo ângulo microfibrilar.

A caracterização do ângulo microfibrilar para a espécie (*Eucalyptus saligna*) é reportada no item 4.3.5.

4.3.1 Estudo de caso para a espécie *Amburana cearensis*

4.3.1.1 Sobre a espécie *Amburana cearensis*

A espécie *Amburana cearensis* Fr. Aliem. ocorre entre o Estado do Ceará e o norte da Argentina inclusive, sendo muito difundida nas caatingas nordestinas. Ocorre ainda nas florestas pluviais do vale do rio Doce, nos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Aparece com certa frequência no sul do Mato Grosso, principalmente na Serra Bodoquena. No sudoeste da Hiléia Amazônica, Estados do Amazonas, Acre e Rondônia aparece a espécie *Torresea acreana* Ducke, conhecida por Imburana-de-Cheiro, Cumaru-de-Cheiro, cuja madeira apresenta as mesmas características de *A. cearensis*;

no comércio, as madeiras das duas espécies têm o mesmo valor, pois são praticamente idênticas, tanto pelo aspecto como pela estrutura anatômica.

Além daqueles nomes vulgares, a espécie *A. cearensis* recebe os de Amburana-de-Cheiro, Imburana, Umburana, Cumaru-de-Cheiro etc., e o de Angelim no Estado do Mato Grosso (Mainieri & Chimelo, 1989).

Os caracteres anatômicos típicos da espécie de *Amburana cearensis* são: parênquima axial abundante, visível até a olho nu, vasicêntrico e aliforme, em faixas curtas, ligando 2 a 3 poros, em disposição oblíqua; seriado, com 2 células por série; cristais grandes, presentes. *Poros/Vasos* pouco notados a olho nu: solitários em maioria, 70 a 85% e múltiplos de 2 a 3; médios, diâmetro tangencial de 100 a 200 μm ; pontuações intervasculares em disposição alterna, poligonais, guarnecidas, pequenas. 5 a 7 μm de diâmetro; abertura inclusa; placa de perfuração simples. *Raios* no topo, finos, numerosos, irregularmente espaçados, visíveis só com lente: na face tangencial, pouco visíveis sob lente, irregularmente dispostos ou, em certos pontos, com tendência para a disposição estratificada; fracamente heterocelulares, geralmente com uma célula marginal quadrada; multisseriados, predominando os bi e trisseriados, raros unisseriados; extremamente baixos, geralmente de 150 a 300, raras até 400 μm de altura; poucos a pouco numerosos. 4 a 6 (80%), raramente até 7 raios por mm; pontuações radiovasculares do mesmo tipo das intervasculares: pouco óleo-resina. *Fibras* de paredes médias, lume grande; pontuações simples. Listrado de estratificação parcial e incompleto e camadas de crescimento correlacionadas.

4.3.1.2 Análise dos elementos anatômicos microscópicos

Foram analisados os elementos anatômicos microscópicos presentes nas imagens com ampliação de 100 vezes. Inicialmente, define-se a unidade a ser trabalhada nesta ampliação. A Figura 53 ilustra a definição da unidade apresentando uma escala micrométrica ampliada de 100 vezes.

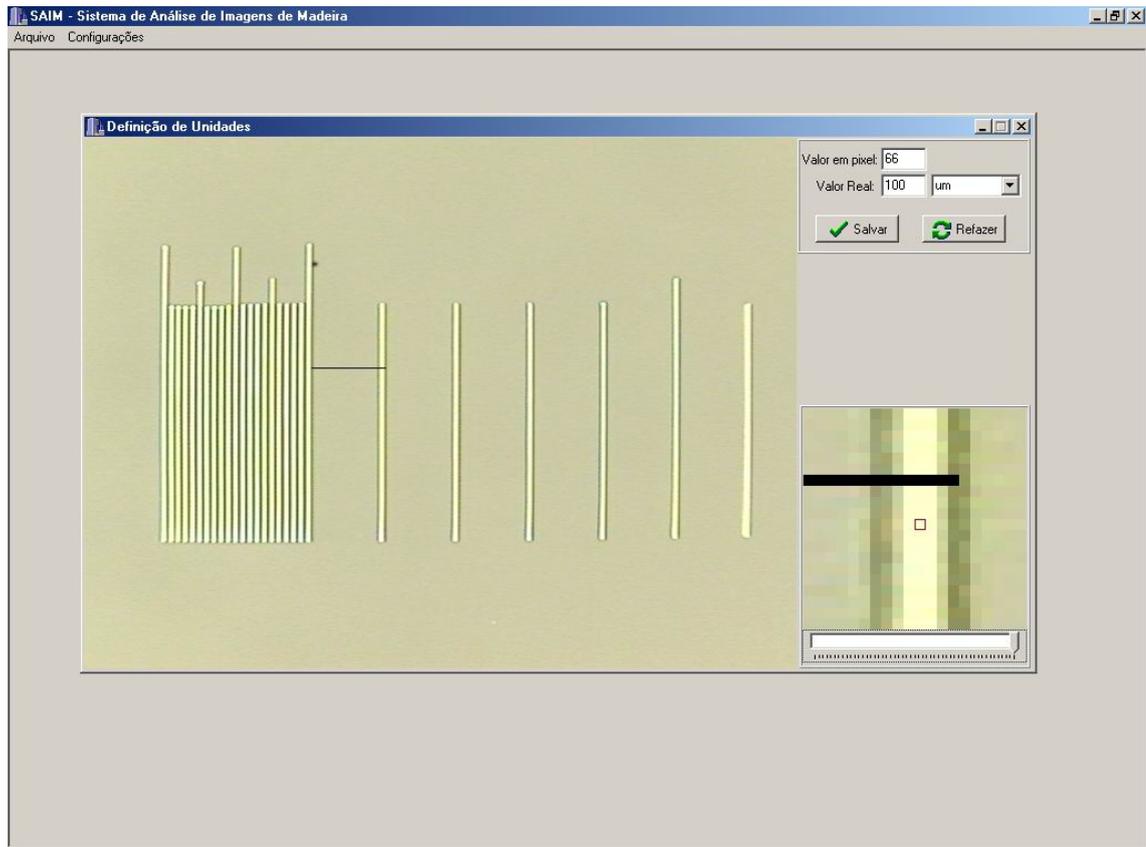


Figura 53 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 100 vezes.

Definida a unidade, inicia-se o processo de mensuração dos elementos. Iniciando a mensuração por elementos vasculares, abre-se a imagem do corte transversal de *Amburana cearensis* e utilizando-se do recurso de mensuração por retas, obtém-se os valores de diâmetro dos vasos, conforme ilustrado na Figura 54. O resultado da mensuração dos elementos vasculares de *Amburana cearensis* no corte transversal estão apresentados na Tabela 12.

A Figura 55 ilustra o corte radial de *Amburana cearensis* com ampliação de 100 vezes. Nessa imagem, baseado na literatura, não se mensurou nenhum elemento, pois os elementos (raios) que poderiam ser mensurados neste corte, foram mensurados no corte tangencial.

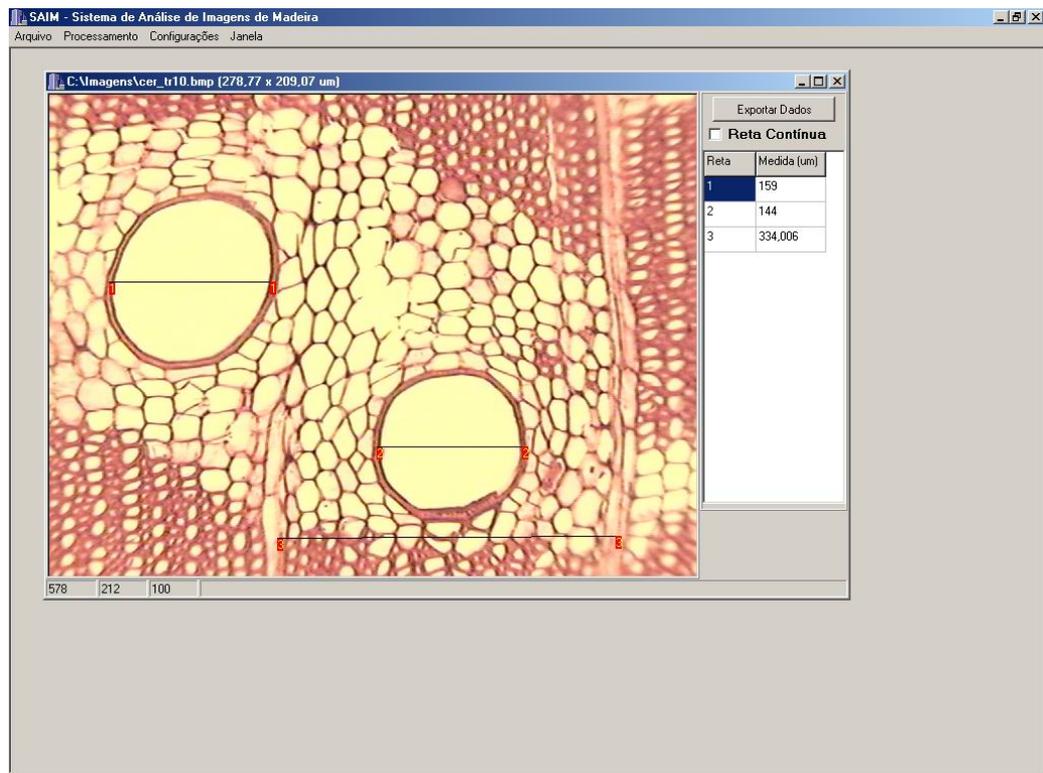


Figura 54 – Tela de apresentação da mensuração por retas no corte transversal de *Amburana cearensis* com ampliação de 100 vezes.

Tabela 12 – Resultado da mensuração de elementos vasculares de *Amburana cearensis* com ampliação de 100 vezes.

Vaso	Diâmetro (μm)
1	234,85
2	213,64

Para mensurar a altura e largura dos raios, utiliza-se o corte tangencial, conforme ilustrado na Figura 56. O resultado da mensuração de altura e largura dos raios encontram-se apresentados respectivamente nas Tabelas 13 e 14.

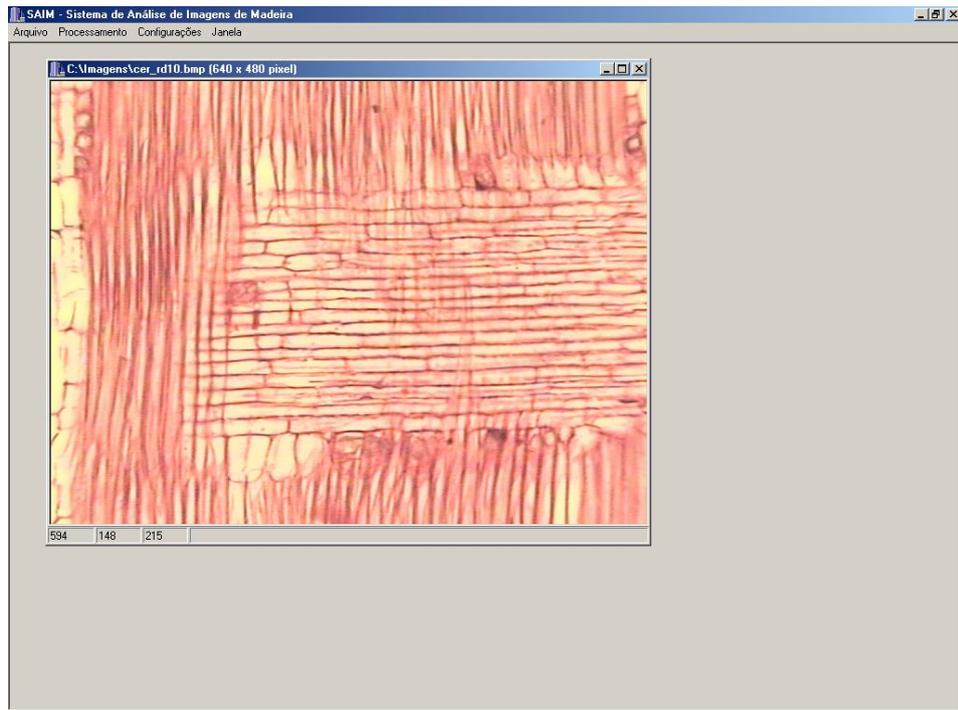


Figura 55 - Tela de apresentação do corte radial de *Amburana cearensis* com ampliação de 100 vezes.

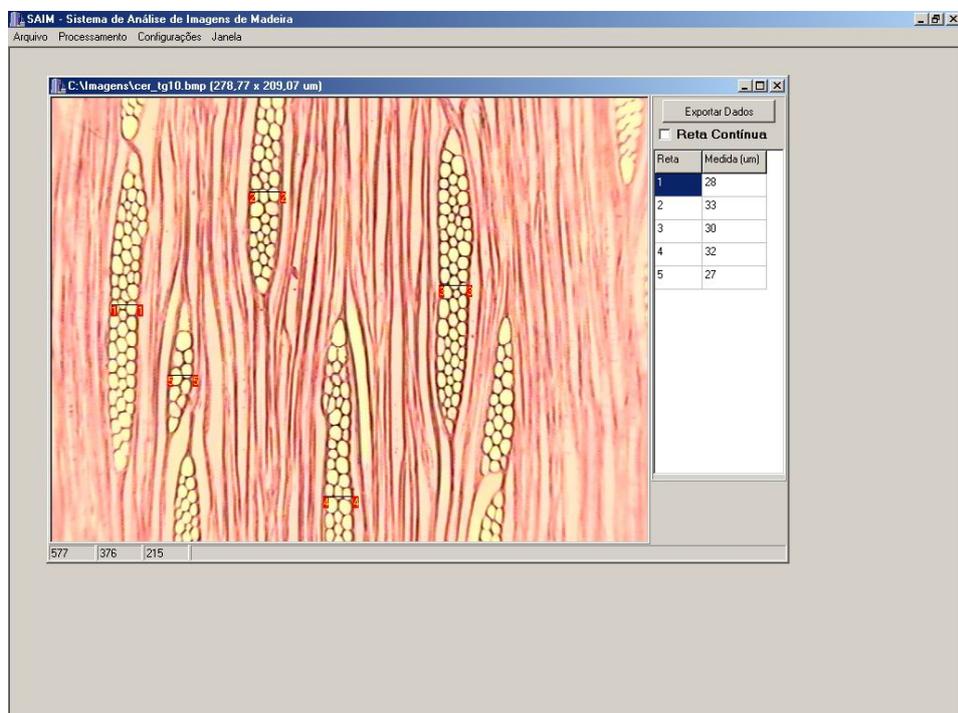


Figura 56 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de *Amburana cearensis* com ampliação de 100 vezes.

Tabela 13 – Resultado da mensuração de raios (Altura) para a espécie de *Amburana cearensis*.

Raio	Altura (μm)
1	522,73
2	224,24
3	509,09

Tabela 14 – Resultado da mensuração de raios (Largura) para a espécie de *Amburana cearensis*.

Raio	Largura (μm)
1	33,33
2	21,21
3	22,73
4	19,70
5	13,64
6	21,21
7	18,18
8	18,18
9	18,18
10	13,64
11	9,09
12	16,67
13	13,64
14	15,15
15	15,15
16	18,18
17	16,67
18	15,15

A Figura 57 ilustra a definição da unidade apresentando uma escala micrométrica ampliada de 400 vezes.

A mensuração por retas para a medida da espessura da parede das fibras e o diâmetro do lúmen, conforme ilustrado na Figura 58, apresentou resultados conforme os apresentados nas Tabelas 15 e 16 respectivamente.

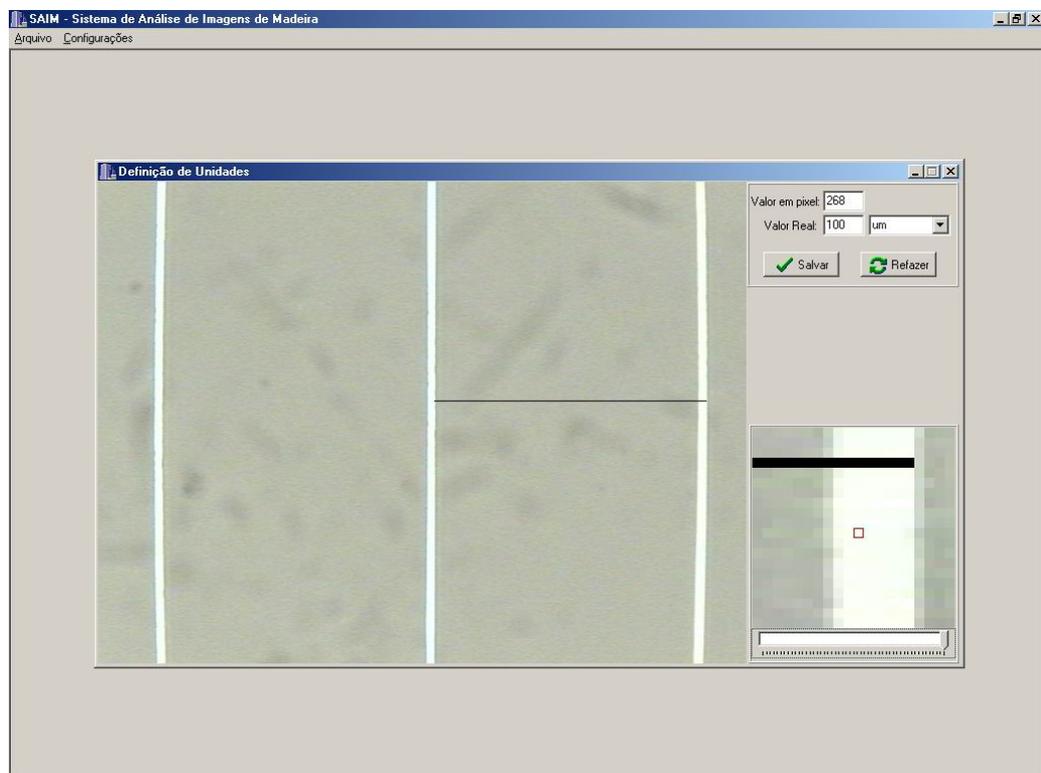


Figura 57 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 400 vezes.

Para mensurar a altura dos raios, utilizou-se também o corte radial, conforme ilustrado na Figura 59. O resultado da mensuração de altura dos raios encontra-se apresentados na Tabela 17.

Para se obter a largura da fibra, utilizou-se os valores obtidos nas Tabelas 15 e 16 e a metodologia detalhada no capítulo 3.

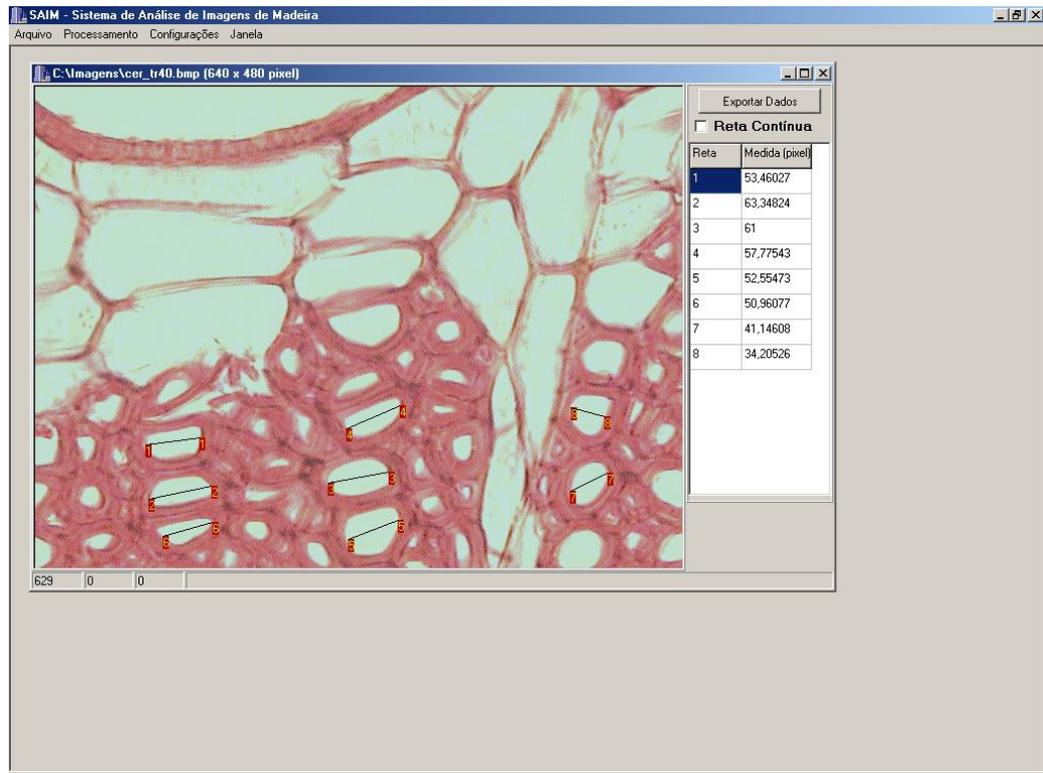


Figura 58 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte transversal de *Amburana cearensis* com ampliação de 400 vezes.

Tabela 15 – Resultado da mensuração de fibra (Espessura da Parede) para a espécie de *Amburana cearensis*.

Fibra	Espessura da Parede (μm)
1	3,36
2	3,17
3	5,22
4	4,48
5	3,92
6	3,73
7	3,92
8	3,36
9	3,54
10	4,29
11	2,92
12	4,29

A Figura 60 ilustra o corte tangencial de *Amburana cearensis* com ampliação de 400 vezes.

Nessa imagem, não se mensurou nenhum elemento, pois os elementos presentes que poderiam ser mensurados neste corte, foram mensurados no corte transversal.

Tabela 16 – Resultado da mensuração de fibra (Diâmetro do Lúmen) para a espécie de *Amburana cearensis*.

Fibra	Diâmetro do Lúmen (μm)
1	22,39
2	20,90
3	19,03
4	24,25
5	19,78
6	13,81
7	16,04
8	16,42
9	16,79
10	19,78

A Tabela 18 apresenta o resultado da análise dos elementos anatômicos microscópicos da espécie *Amburana cearensis*.

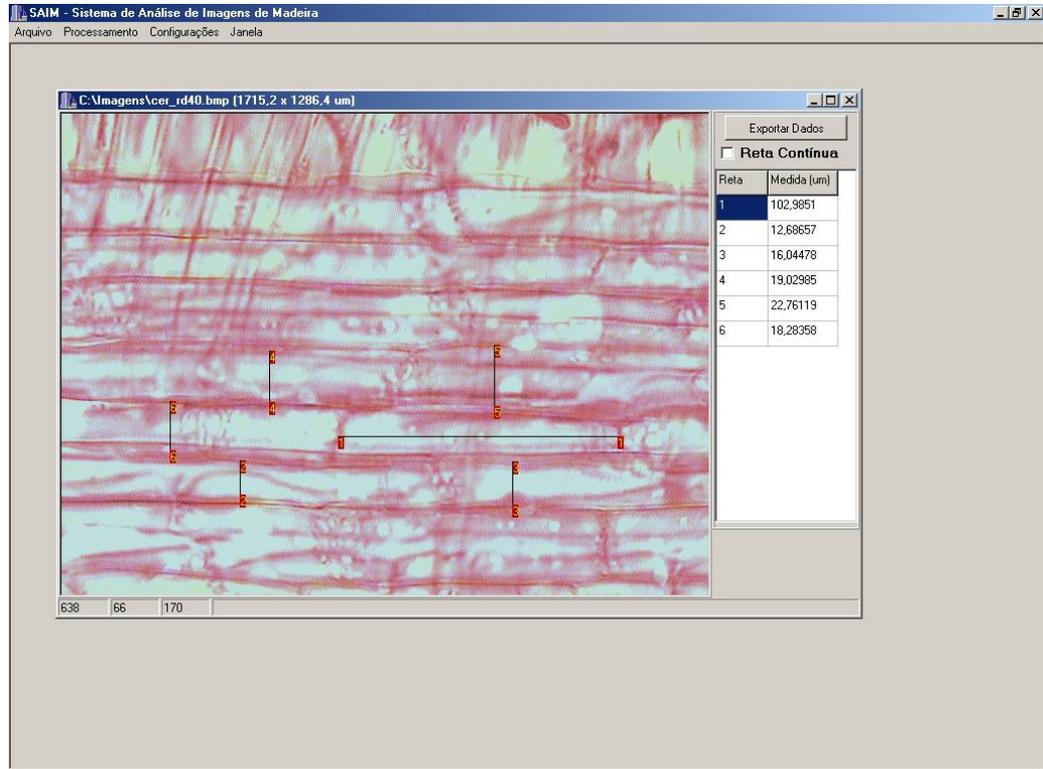


Figura 59 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte radial de *Amburana cearensis* com ampliação de 400 vezes.

Tabela 17 – Resultado da mensuração de raio (Altura) para a espécie de *Amburana cearensis*.

Raio	Altura (μm)
1	21,27
2	14,93
3	27,99
4	21,64
5	17,54
6	18,66
7	17,54
8	18,28
9	26,12

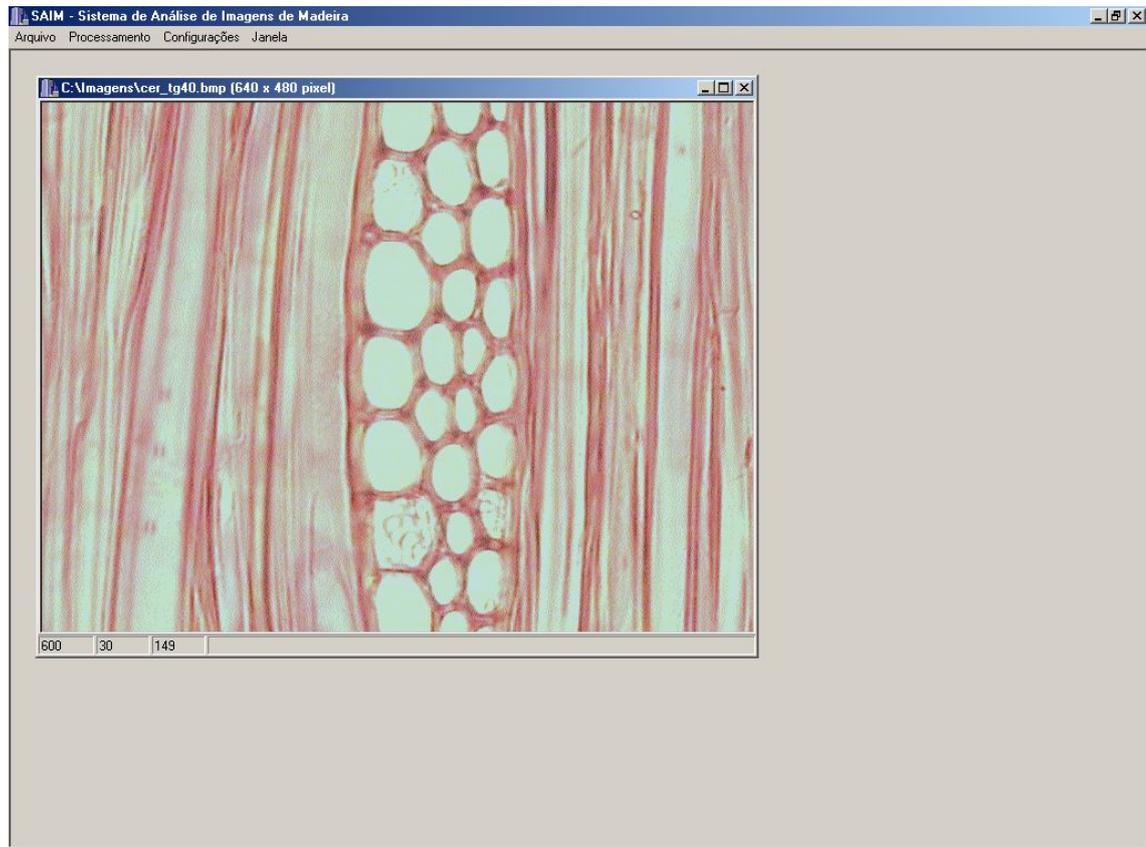


Figura 60 – Tela de apresentação do corte tangencial de *Amburana cearensis* com ampliação de 400 vezes.

Tabela 18 – Resultado da análise dos elementos anatômicos microscópicos de *Amburana cearensis*

Elemento anatômico		Dimensão
Vaso	diâmetro (μm)	224,25
	frequência(n. $^{\circ}$ /mm 2)	3
Raio	n. $^{\circ}$ /mm	2
	largura (μm)	17,76
	altura (μm)	418,68
Fibra	espessura de parede (μm)	4,00
	diâmetro do lúmen (μm)	18,92
	largura (μm)	26,92

4.3.2 Estudo de caso para a espécie *Cedrela fissili*

4.3.2.1 Sobre a espécie *Cedrela fissili*

O gênero *Cedrela* em nosso País, segundo os mais recentes trabalhos, é representado por várias espécies, sendo, porém, 3 as principais *C. odorata* L., comum

na floresta amazônica. em terra firme em várzeas altas, estendendo-se até o norte do Estado do Espírito Santo; *C. angustifolia* S. & Moc. em florestas úmidas da região costeira, desde o Estado do Espírito Santo até o sul do País e, finalmente, *C. fissilis* Vell., em matas do Interior, desde o Estado de Minas Gerais até o do Rio Grande do Sul (Mainieri & Chimelo, 1989).

Devido a grande diversificação nas aplicações da madeira de Cedro, torna-se uma das mais importantes para o Brasil.

Os caracteres anatômicos da espécie *Cedrela fissili* são: *Parênquima axial* apotraqueal marginal, em faixas regulares, afastadas e contrastadas, distintas a olho nu, com 1 a 7 células de largura e difuso escasso; seriados de 2 a 6 células por série; óleo-resina abundante. *Poros/Vasos* os de maior diâmetro, bem distintos a olho nu, freqüentemente dispostos em anéis porosos os demais distribuídos uniformemente nos anéis de crescimento; solitários em pequena maioria, e múltiplos radiais de 2 a 5; muito poucos a numerosos, 1 a 8 poros por mm²; pequenos a grandes, 80 a 260 µm de diâmetro tangencial; óleo-resina ou substância branca presentes; placa de perfuração simples; pontuações intervasculares alternas, poligonais, pequenas a médias, 5 a 10 µm de diâmetro; elementos vasculares, curtos a longos, 260 a 650 µm.

Linhas vasculares distintas, largas, contendo óleo-resina escura e pontos de substância branca. *Raios* no topo, irregularmente espaçados, finos, visíveis a olho nu; na face tangencial, irregularmente dispostas, notados a olho nu, pouco contrastados na face radial; homocelulares e heterocelulares, com uma fileira de células quadradas marginais; multisseriados, 2 a 4 células de largura, predominando os trisseriados (60%); extremamente baixos, 80 a 400 µm de altura, e em células, até 22 de altura: muito poucos a pouco numerosos, 2 a 6 raios por mm; pontuações radiovasculares semelhante às intervasculares; óleo-resina e cristais romboidais presentes. *Fibras* curtas (80%) a longas, de 1,0 a 1,7 mm de comprimento, estreitas a médias (85%), de 19 a 34 µm de largura, muito delgadas a delgadas (75%). *Canais secretores* traumáticos normalmente presentes. *Camadas de crescimento* demarcadas pelas faixas do parênquima marginal e pelos poros de maior diâmetro com tendência a formar anéis porosos.

4.3.2.2 Análise dos elementos anatômicos microscópicos

Foram analisados os elementos anatômicos microscópicos presentes nas imagens com ampliação de 100 vezes. Inicialmente, define-se a unidade a ser trabalhada nesta ampliação. A Figura 61 ilustra a definição da unidade apresentando uma escala micrométrica ampliada de 100 vezes.

Definida a unidade, inicia-se o processo de mensuração dos elementos. Iniciando a mensuração por elementos vasculares, abre-se a imagem do corte transversal de *Cedrela fissili* e utilizando-se do recurso de mensuração por retas, obtém-se os valores de diâmetro dos vasos, conforme ilustrado na Figura 62. O resultado da mensuração dos elementos vasculares de *Cedrela fissili* no corte transversal estão apresentados na Tabela 19.

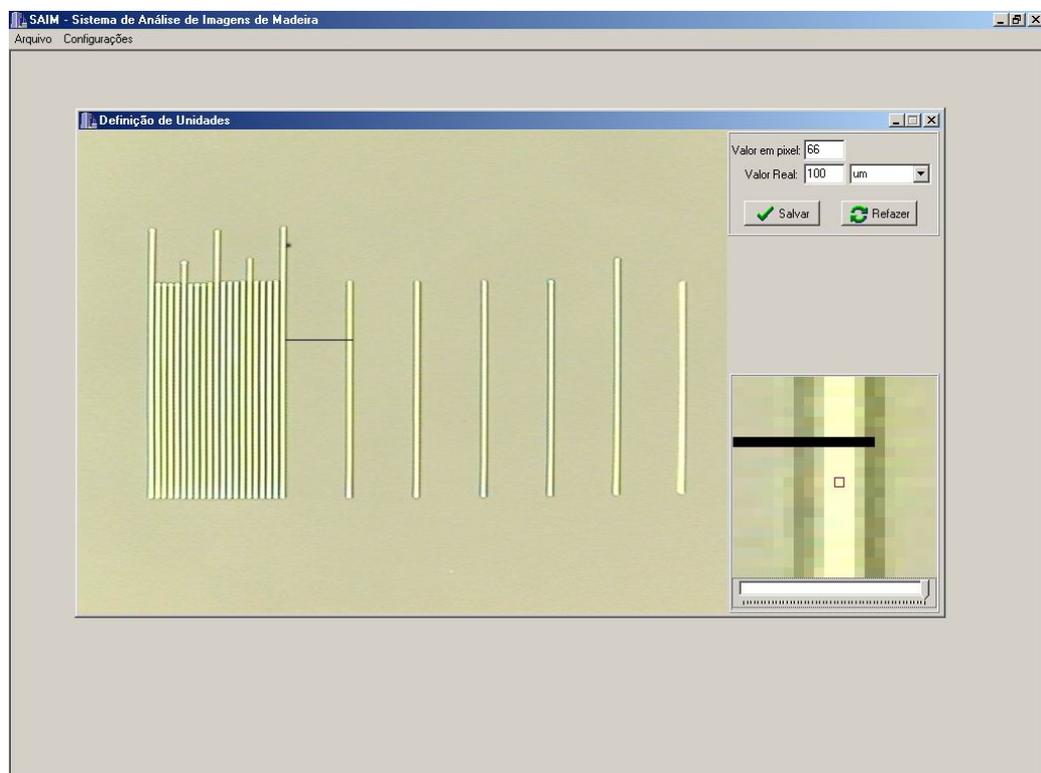


Figura 61 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 100 vezes.

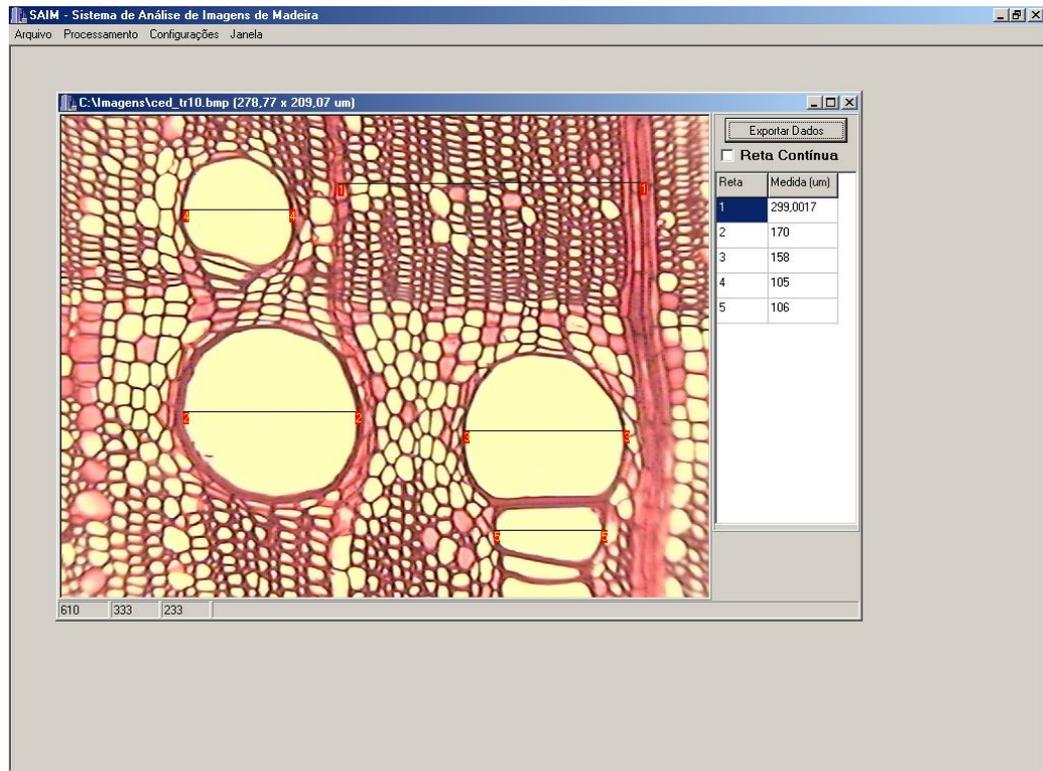


Figura 62 – Tela de apresentação da mensuração por retas no corte transversal de *Cedrela fissili* com ampliação de 100 vezes.

Tabela 19 – Resultado da mensuração de elementos vasculares de *Cedrela fissili* com ampliação de 100 vezes.

Vaso	Diâmetro (μm)
1	237,88
2	162,12
3	162,12
4	262,12

Para mensurar a largura dos raios, utiliza-se o corte radial, conforme ilustrado na Figura 63. O resultado da mensuração de largura dos raios encontra-se apresentado na Tabela 20.

Para mensurar a altura dos raios, utiliza-se o corte tangencial, conforme ilustrado na Figura 64. O resultado da mensuração de altura dos raios encontra-se apresentado na Tabela 21.

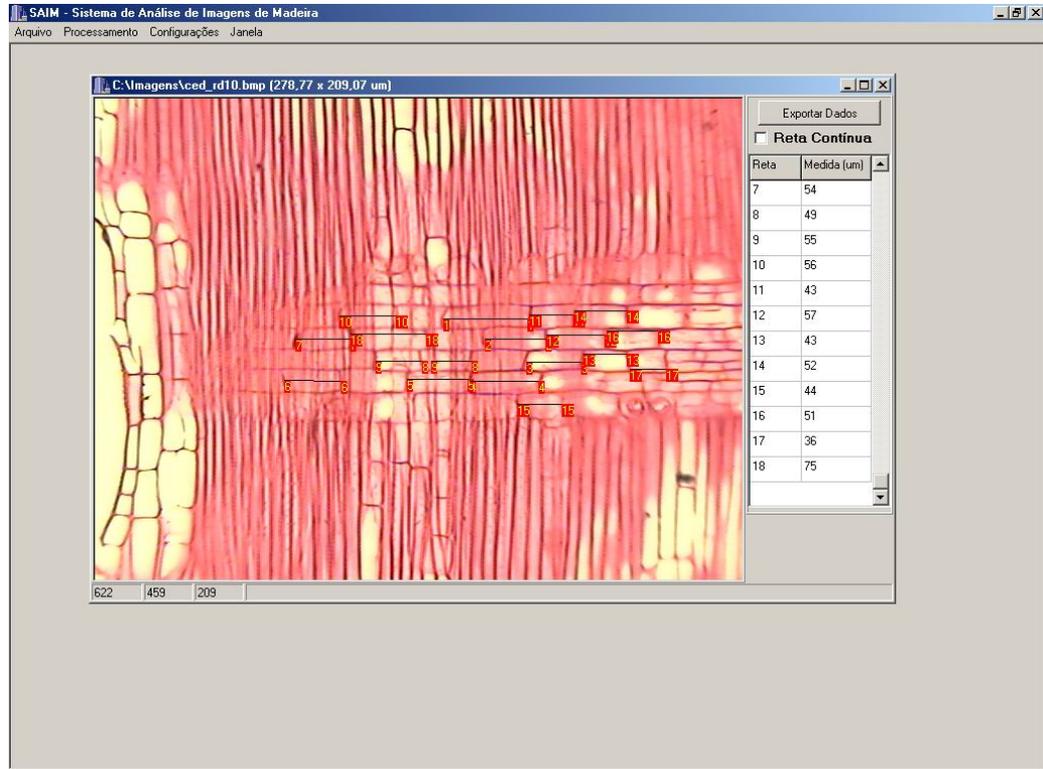


Figura 63 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte radial de *Cedrela fissili* com ampliação de 100 vezes.

Tabela 20 – Resultado da mensuração de raios (Largura) para a espécie de *Cedrela fissili*.

Raio	Largura (µm)
1	48,48
2	33,33
3	34,85
4	37,88
5	39,39

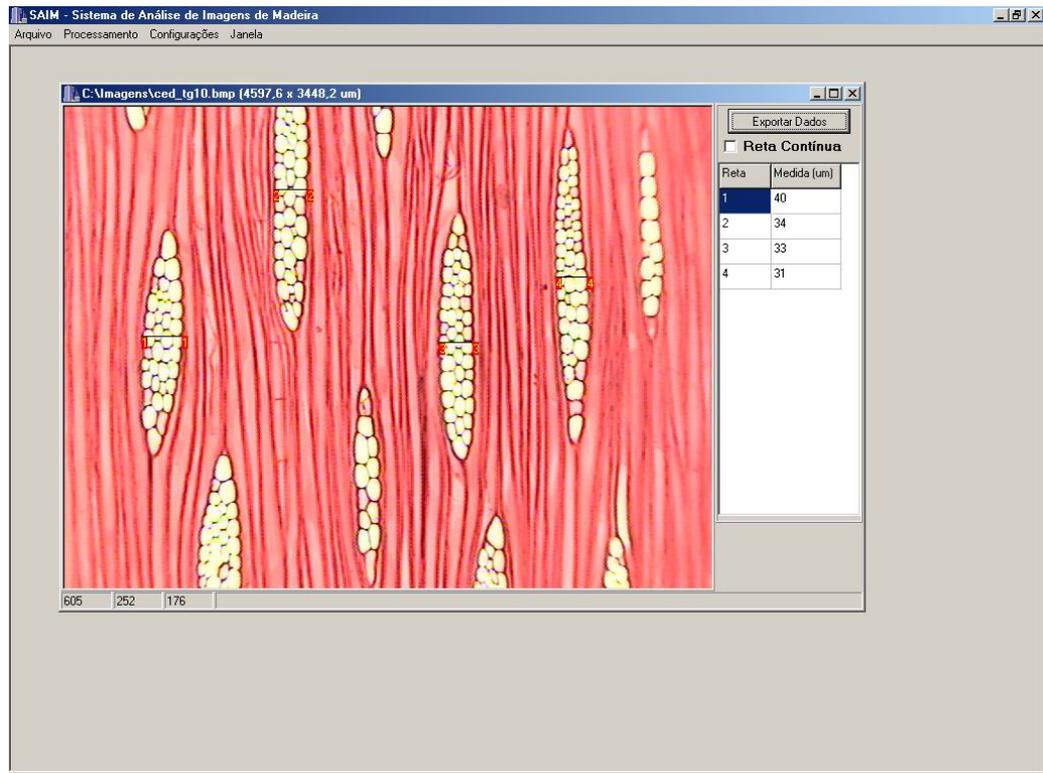


Figura 64 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de *Cedrela fissili* com ampliação de 100 vezes.

Tabela 21 – Resultado da mensuração de raios (Altura) para a espécie de *Cedrela fissili*.

Raio	Altura (μm)
1	22,73
2	21,21
3	24,24
4	21,21
5	10,61
6	19,70
7	15,15
8	30,30
9	21,21
10	21,21
11	24,24

A Figura 65 ilustra a definição da unidade apresentando uma escala micrométrica ampliada de 400 vezes.

A mensuração por retas para a medida da espessura da parede das fibras e o diâmetro do lúmen, conforme ilustrado na Figura 66, apresentou resultados conforme os apresentados nas Tabelas 22 e 23 respectivamente.

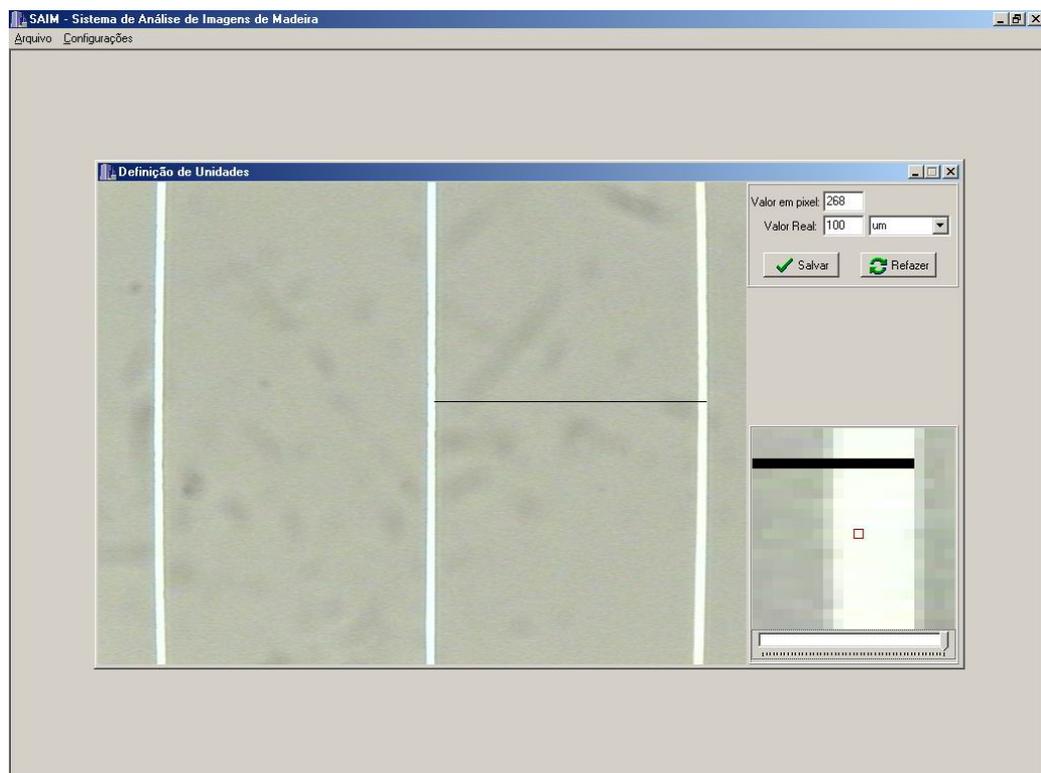


Figura 65 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 400 vezes.

Para se obter a largura da fibra, utilizou-se os valores obtidos nas Tabelas 22 e 23 e a metodologia detalhada no capítulo 3. Para este estudo de caso, a título de ilustração, a largura da fibra pode ser visualizada na Tabela 24.

Para mensurar a altura dos raios, utilizou-se também o corte radial, conforme ilustrado na Figura 67. O resultado da mensuração de altura dos raios encontra-se apresentados na Tabela 25.

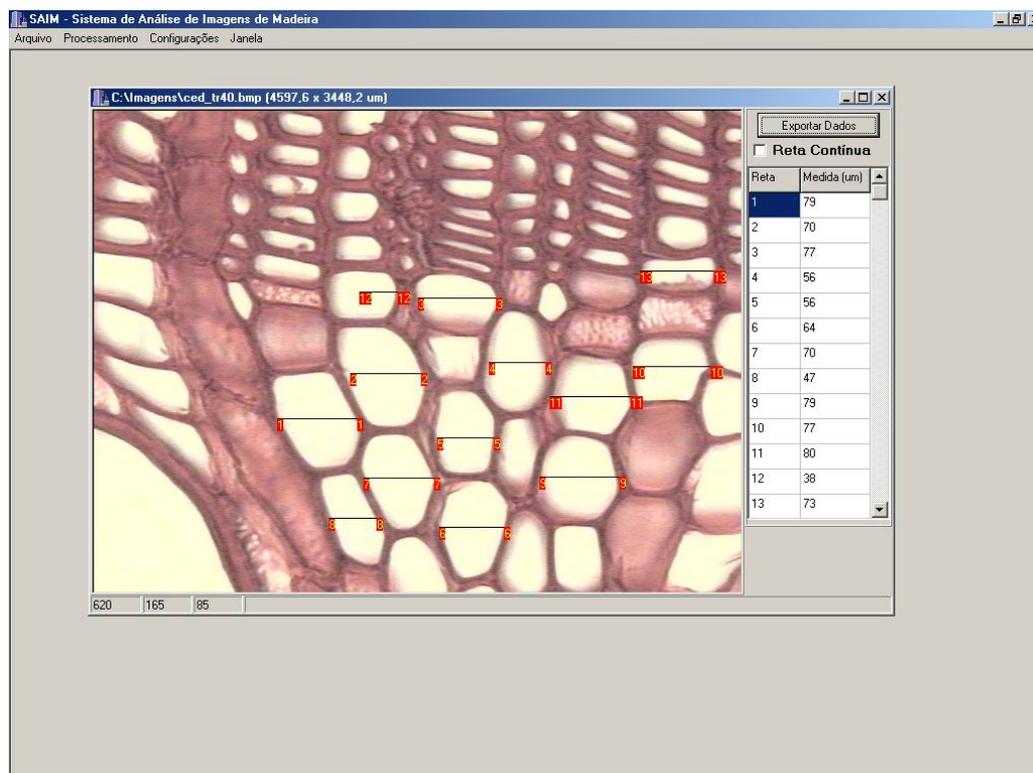


Figura 66 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte transversal de *Cedrela fissili* com ampliação de 400 vezes.

Tabela 22 – Resultado da mensuração de fibra (Espessura da Parede) para a espécie de *Cedrela fissili*.

Fibra	Espessura da parede (μm)
1	2,05
2	2,24
3	1,86
4	2,05
5	1,86
6	1,86
7	2,24
8	2,05
9	2,05
10	2,80

Para mensurar o diâmetro dos raios, utilizou-se o corte tangencial, conforme ilustrado na Figura 68. O resultado da mensuração do diâmetro dos raios encontra-se apresentados na Tabela 26.

A Tabela 27 apresenta o resultado da análise dos elementos anatômicos microscópicos da espécie *Cedrela fissili*.

Tabela 23 – Resultado da mensuração de fibra (Diâmetro do Lúmen) para a espécie de *Cedrela fissili*

Fibra	Diâmetro do Lúmen (μm)
1	18,28
2	17,16
3	19,78
4	18,66
5	18,66
6	13,81
7	19,03
8	20,90
9	24,63
10	16,79

Tabela 24 - Resultado do cálculo da largura de fibra para espécie de *Cedrela fissili*

2 (espessura da parede)	Diâmetro de Lúmen	Largura da Fibra
4,10	18,28	22,38
4,48	17,16	21,64
3,78	19,78	23,56
4,10	18,66	22,76
3,78	18,66	22,44
3,78	13,81	17,59
4,48	19,03	23,51
4,10	20,90	25,00
4,10	24,63	28,73
5,60	16,79	22,39

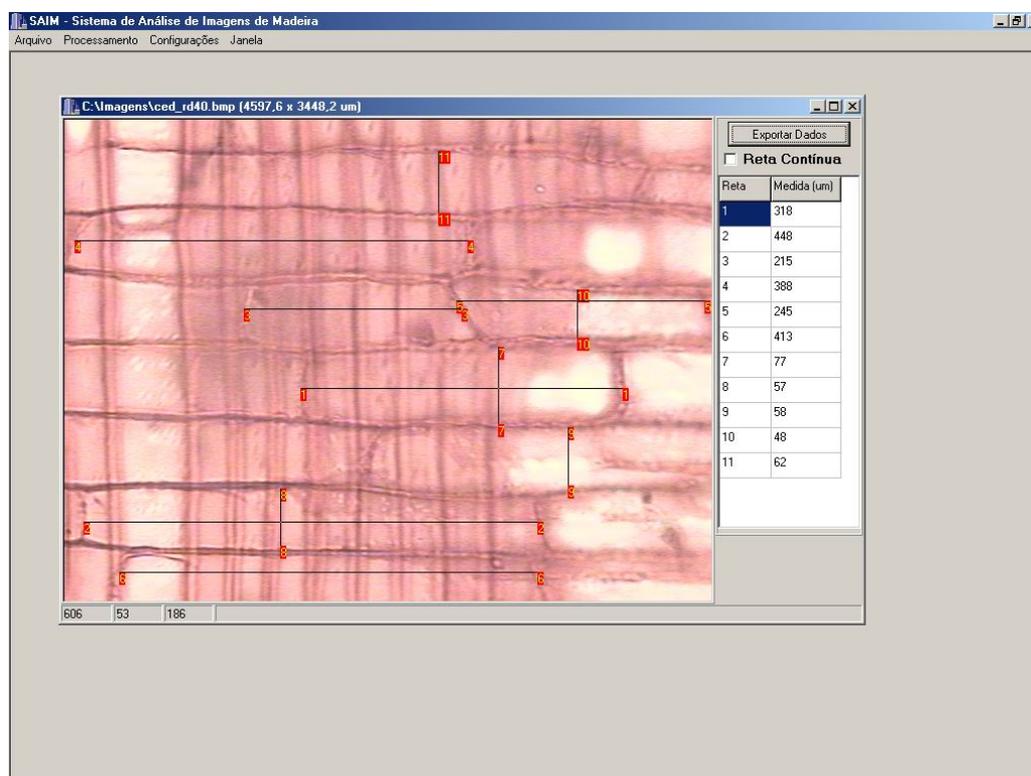


Figura 67 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte radial de *Cedrela fissili* com ampliação de 400 vezes.

Tabela 25 – Resultado da mensuração de raio (Largura) para espécie de *Cedrela fissili*.

Raio	Largura (µm)
1	146,27
2	80,22
3	88,43
4	167,16

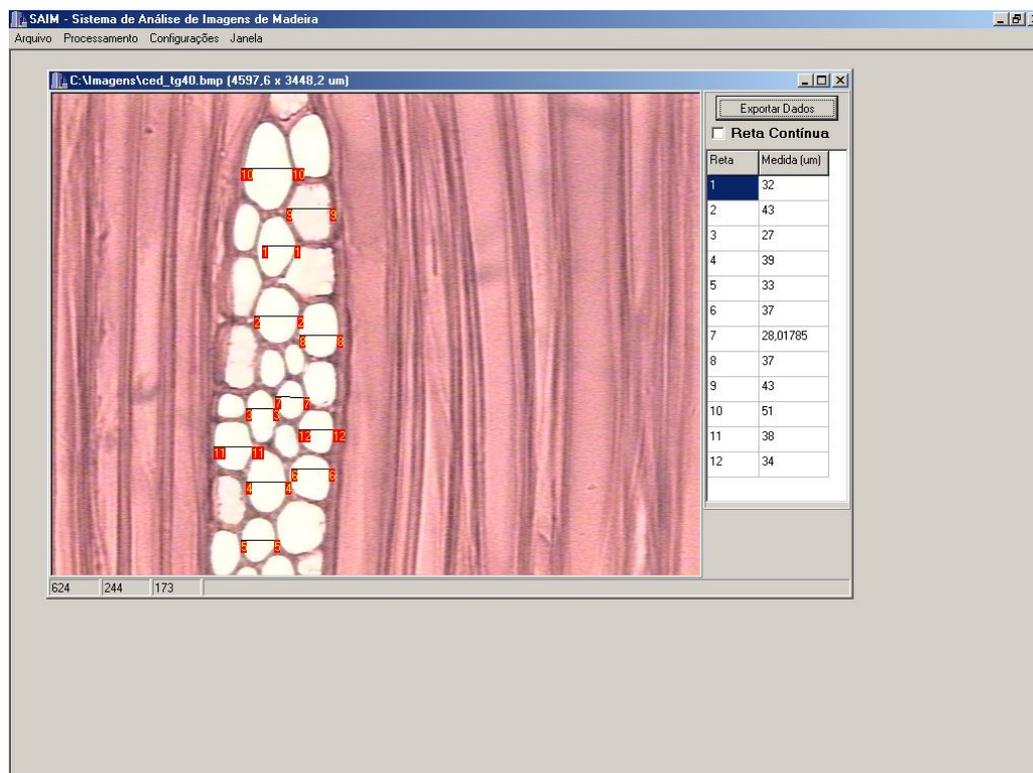


Figura 68 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de *Cedrela fissili* com ampliação de 400 vezes.

Tabela 26 – Resultado da mensuração de raio para a espécie de *Cedrela fissili*.

Raio	Diâmetro (µm)
1	17,91
2	14,18
3	14,93
4	16,04
5	18,28
6	16,79
7	14,93
8	9,33
9	12,69
10	13,81
11	14,55

Tabela 27 – Resultado da análise dos elementos anatômicos microscópicos de *Cedrela fissili*

Elemento anatômico		Dimensão
Vaso	diâmetro (μm)	206,06
	frequência (n. ^o /mm ²)	7
Raio	n. ^o /mm	35
	largura (μm)	30
	altura (μm)	21,01
Fibra	espessura de parede (μm)	2,11
	diâmetro do lúmen (μm)	18,77
	largura (μm)	22,99

4.3.3 Estudo de caso para a espécie *Eucalyptus saligna*

4.3.3.1 Sobre a espécie *Eucalyptus saligna*

O eucalipto é a espécie florestal de maior importância econômica do mundo. Estimativas do ano de 1985 indicaram que a área cultivada mundialmente com *Eucalyptus* era superior a seis milhões de hectares, sendo certamente muito maior nos dias atuais. Cerca de 40% da área plantada no mundo encontra-se no Brasil (Tomazello Filho, 1985a).

O eucalipto não é uma espécie nativa e por isso, não se pode indicar uma localização de crescimento nativo dessa espécie.

Os caracteres anatômicos espécie *Eucalyptus saligna* são: *Parênquima axial*, pouco visível mesmo sob lente; pouco abundante; paratraqueal vasicêntrico, com 2 a 4 células de largura, formando confluências curtas e oblíquas; seriado com 2 a 7 células por série. *Poros/Vasos* notados a olho nu; seção ovalada a circular; distribuição difusa; exclusivamente solitários; disposição diagonal; poucos (20%) a numerosos (20%), predominando os pouco numerosos (60%), com variação de 4-8-13 poros/mm²; médios (110-147-186 μm); conteúdo: obstruídos por tilas. Elementos vasculares muito curtos (8%) a muito longos (6%), predominando os curtos (37%) e longos (52%), com variação de 276-520-812 μm ; apêndices ausentes e presentes em uma ou ambas

extremidades, curtos e longos; placa de perfuração simples; pontuações intervasculares pequenas (41%) e médias (59%), com variação de 6-8-10 μ m, alternas, circulares e ovaladas, de abertura horizontal a oblíqua, lenticular e guarnecida; pontuações raio-vasculares pequenas (6-8-9 μ m), arredondadas, simples e eventualmente com aréolas incompletas. *Raios*, visíveis apenas sob lente; espelhado dos raios pouco contrastado; homogêneos e menos freqüente heterogêneos tipo III; unisseriados (60%), localmente bisseriados (23%) e bisseriados (17%); extremamente finos (14%) e finos (23%), predominando os muito finos (63%), com variação de 13-21-33 μ m; extremamente baixos (0,16-0,32-0,42mm), com 4-12-23 células de altura; pouco numerosos (4%), numerosos (54%) e muito numerosos (42%), com variação de 7-11-15 raios/mm; conteúdo: substância tanífera. *Fibrotraqueídes*: extremamente curtas (8%), e curtas (42%), predominando as muito curtas (50%), com variação de 0,57-1,01-1,35mm; estreitas (12-18-24 μ m); lume com 3-8-14 μ m de largura; paredes delgadas (19%), espessas (67%) e muito espessas (14%), com variação de 4-5-7 μ m de espessura. *Traqueídes*, vasicêntricas presentes. Camadas de crescimento, demarcadas por zonas fibrosas, caracterizadas por um maior espessamento das paredes das fibrotraqueídes.

4.3.3.2 Análise dos elementos anatômicos microscópicos

Foram analisados os elementos anatômicos microscópicos presentes nas imagens com ampliação de 100 vezes. Inicialmente, define-se a unidade a ser trabalhada nesta ampliação.

A Figura 69 ilustra a definição da unidade apresentando uma escala micrométrica ampliada de 100 vezes.

Definida a unidade, inicia-se o processo de mensuração dos elementos. Iniciando a mensuração por elementos vasculares, abre-se a imagem do corte transversal de *Eucalyptus saligna* e utilizando-se do recurso de mensuração por retas, obtém-se os valores de diâmetro dos vasos, conforme ilustrado na Figura 70. O resultado da mensuração dos elementos vasculares de *Eucalyptus saligna* no corte transversal estão apresentados na Tabela 28.

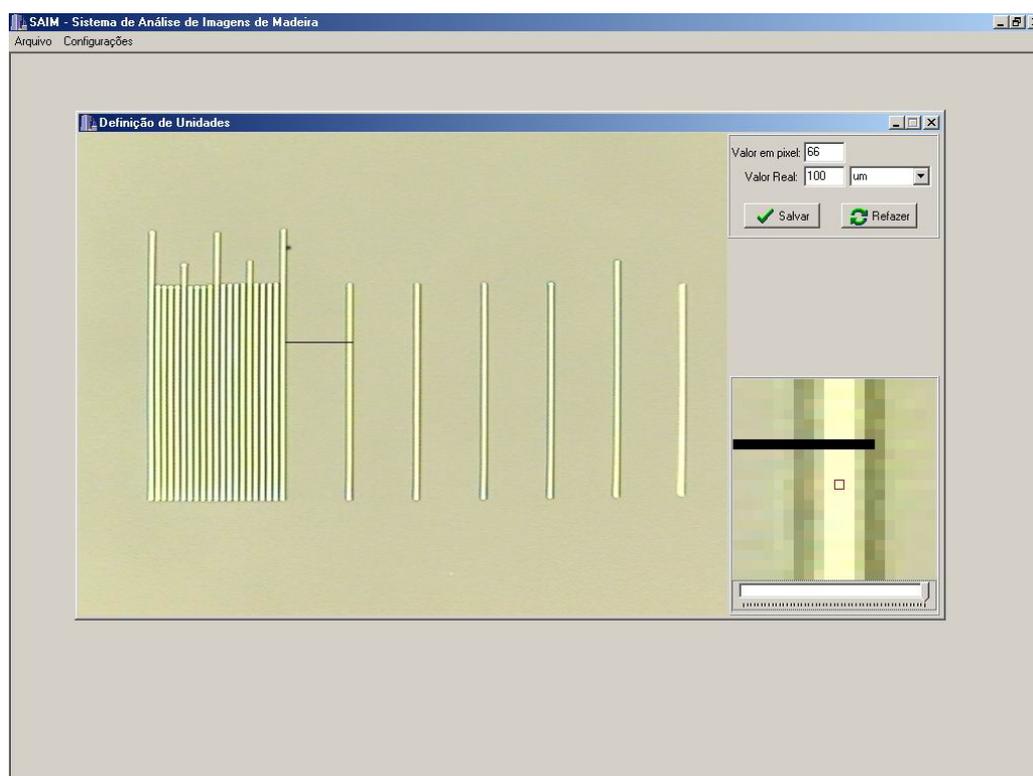


Figura 69 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 100 vezes.

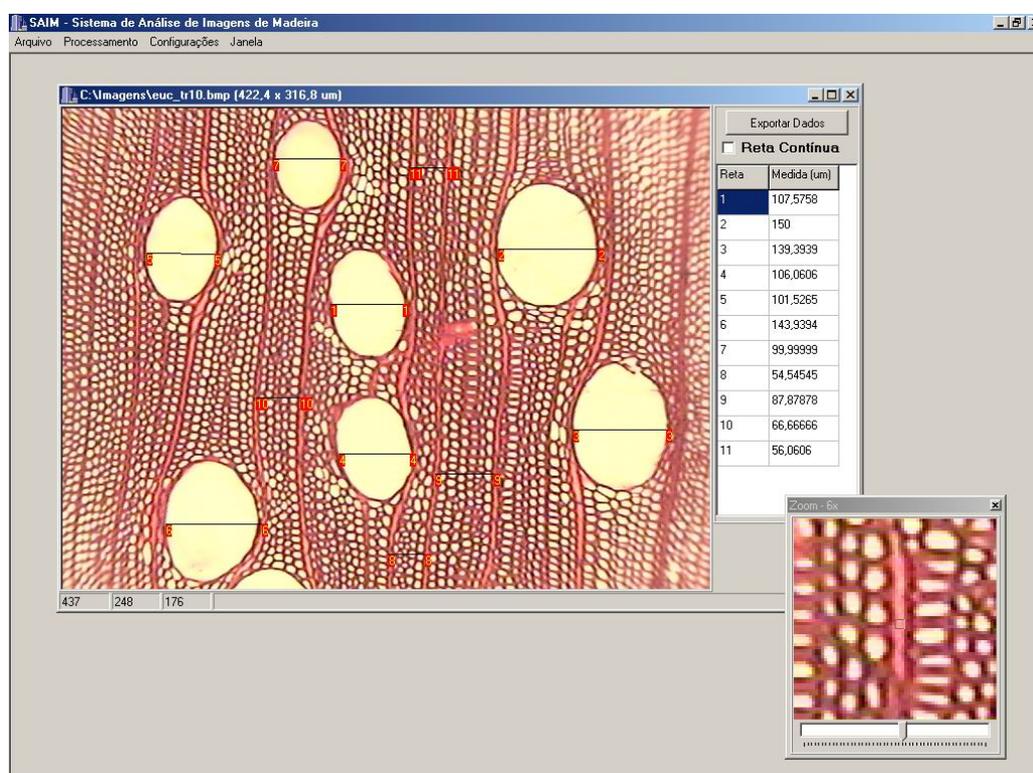


Figura 70 – Tela de apresentação da mensuração por retas por retas no corte transversal de *Eucalyptus saligna* com ampliação de 100 vezes.

Tabela 28 – Resultado da mensuração de elementos vasculares de *Eucalyptus saligna*

Vaso	Diâmetro (μm)
1	106,06
2	100,00
3	109,09
4	150,00
5	113,64
6	140,91
7	142,42

A Figura 71 ilustra o corte radial de *Eucalyptus saligna* com ampliação de 100 vezes. Nessa imagem, como pode ser observado, não se mensurou nenhum elemento, pois os elementos (raios) não são distinguíveis.

Para mensurar a altura e largura dos raios, utiliza-se o corte tangencial, conforme ilustrado na Figura 72.

O resultado da mensuração de altura e largura dos raios encontram-se apresentados respectivamente nas Tabelas 29 e 30.

A Figura 73 ilustra a definição da unidade apresentando uma escala micrométrica ampliada de 400 vezes.

A mensuração por retas para a medida da espessura da parede das fibras e o diâmetro do lúmen, conforme ilustrado na Figura 74, apresentou resultados conforme os apresentados nas Tabelas 31 e 32 respectivamente.

Para mensurar a altura e largura dos raios, utilizou-se também o corte radial, conforme ilustrado na Figura 75. O resultado da mensuração de altura e largura dos raios encontram-se apresentados respectivamente nas Tabelas 33 e 34.

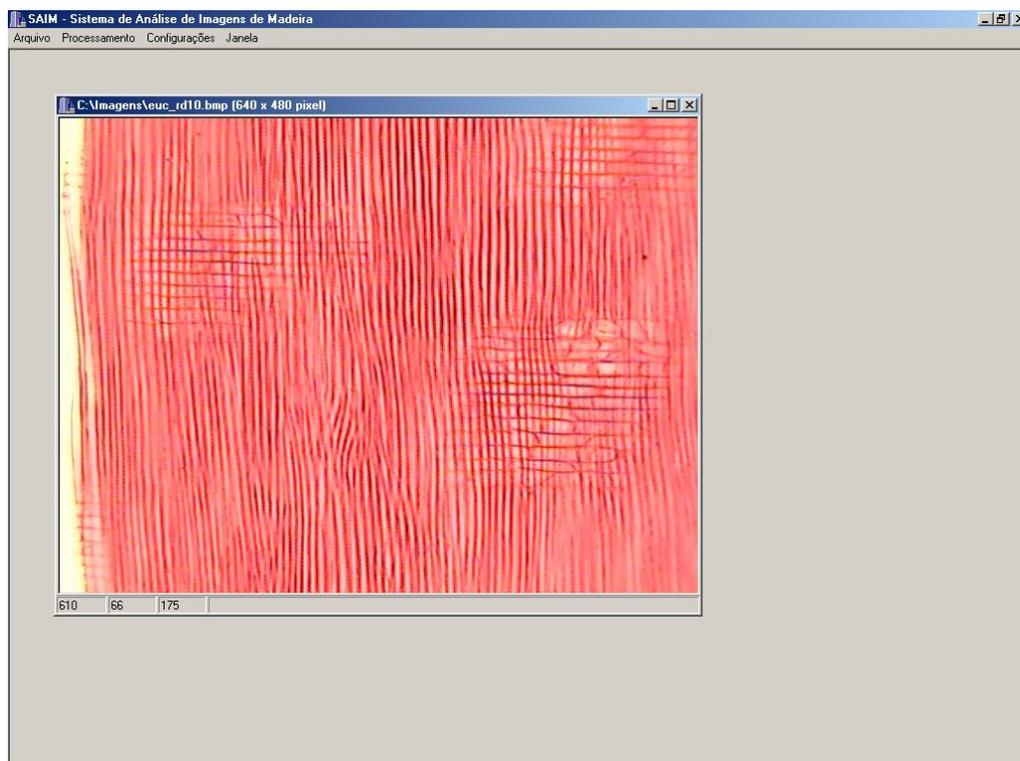


Figura 71 – Tela de apresentação do corte transversal de *Eucalyptus saligna* com ampliação de 100 vezes.

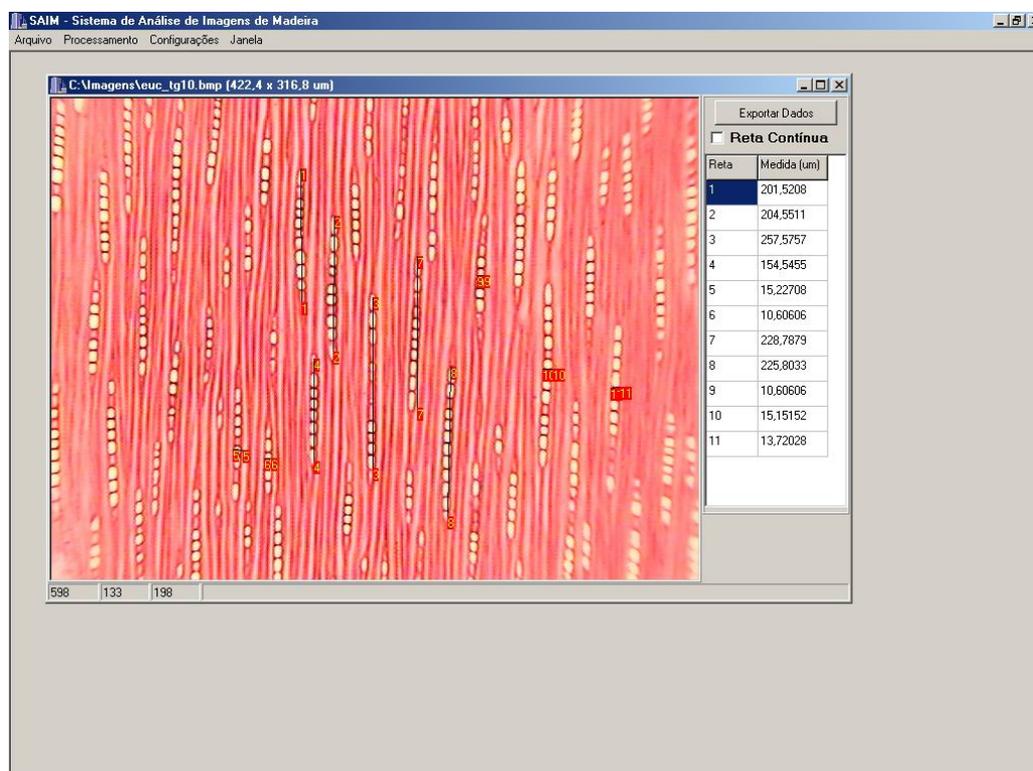


Figura 72 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de *Eucalyptus saligna* com ampliação de 100 vezes.

Tabela 29 – Resultado da mensuração de raios (Altura) para a espécie de *Eucalyptus saligna*.

Raio	Altura (μm)
1	169,70
2	221,21
3	131,82
4	236,36
5	237,88
6	133,33
7	104,55
8	178,79
9	210,61
10	145,45
11	212,12
12	136,36
13	222,73
14	171,21

Tabela 30 – Resultado da mensuração de raios (Largura) para a espécie de *Eucalyptus saligna*.

Raio	Largura (μm)
1	10,61
2	12,12
3	13,64
4	7,58
5	12,12
6	10,61
7	10,61
8	12,12
9	10,61
10	15,15

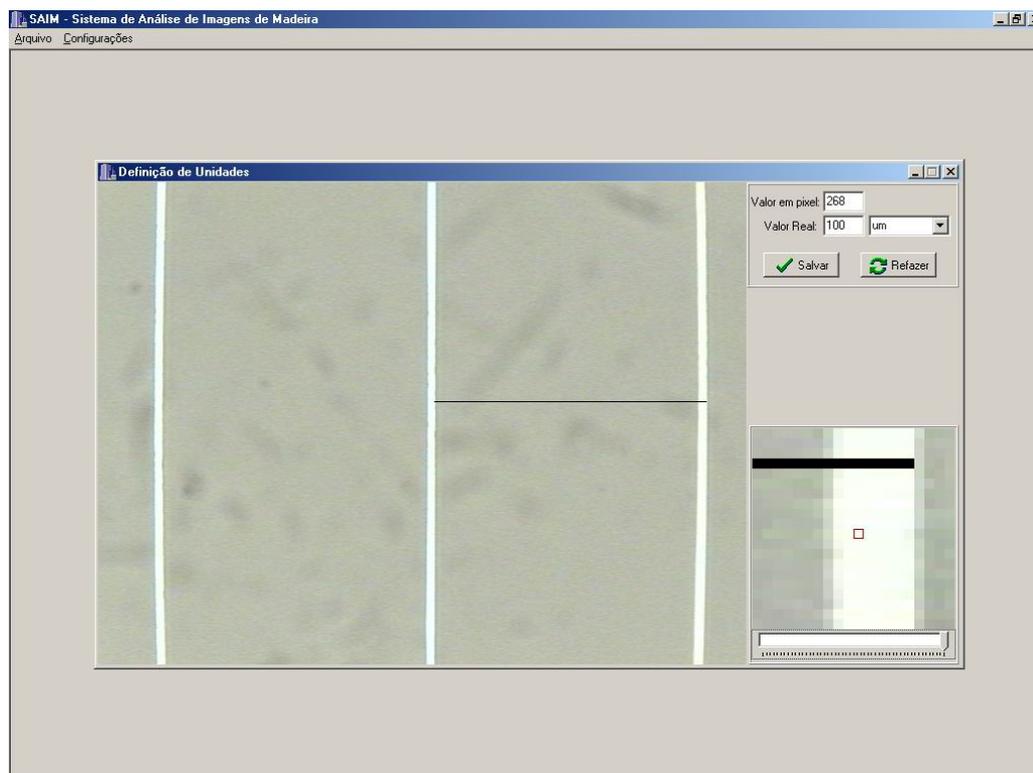


Figura 73 – Tela de apresentação da definição de unidade para ampliação de 400 vezes.

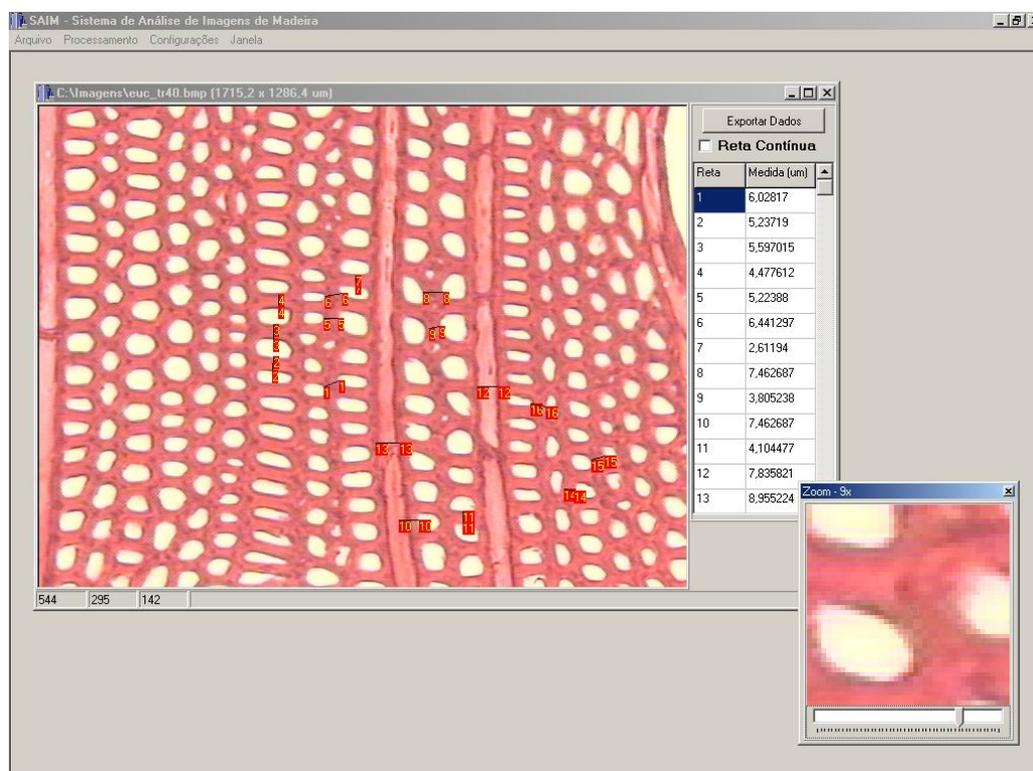


Figura 74 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte transversal de *Eucalyptus saligna* com ampliação de 400 vezes.

Tabela 31 – Resultado da mensuração de fibra (Espessura da Parede) para a espécie de *Eucalyptus saligna*.

Fibra	Espessura da Parede (μm)
1	2,80
2	2,61
3	2,24
4	2,80
5	2,24
6	2,24
7	2,24
8	2,42
9	2,42
10	2,42
11	2,61
12	2,61
13	2,42
14	2,61
15	2,24
16	2,98
17	2,42
18	2,05
19	2,42

Tabela 32 – Resultado da mensuração de fibra (Diâmetro de Lúmen) para a espécie de *Eucalyptus saligna*.

Fibra	Diâmetro de Lúmen (μm)
1	12,69
2	13,06
3	11,57
4	12,31
5	14,18
6	12,31
7	10,07
8	10,45
9	11,19
10	10,45
11	11,57
12	10,82
13	9,70
14	12,31
15	9,70
16	11,94
17	11,94
18	10,82
19	12,69
20	7,09
21	7,09
22	7,46

Para mensurar a largura dos raios, utilizou-se o corte tangencial, conforme ilustrado na Figura 76. O resultado da mensuração da largura dos raios encontra-se apresentados na Tabela 35.

Para se obter a largura da fibra, utilizou-se os valores obtidos nas Tabelas 32 e 33 e a metodologia detalhada no capítulo 3.

A Tabela 36 apresenta o resultado da análise dos elementos anatômicos da espécie *Eucalyptus saligna*

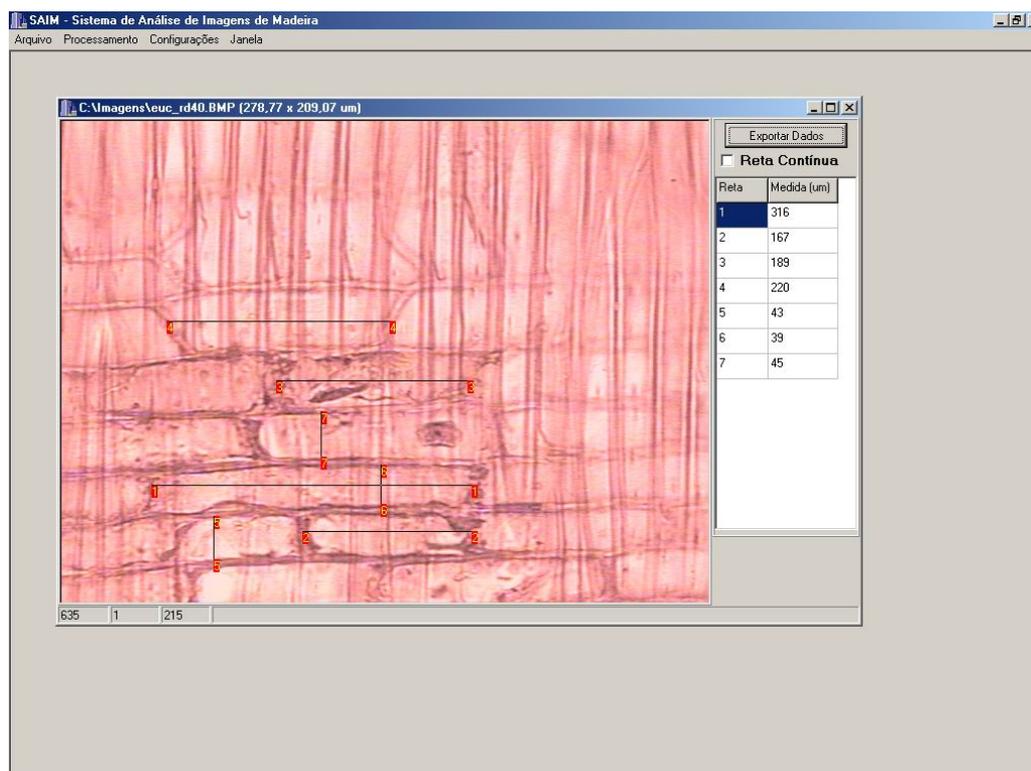


Figura 75 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte radial de *Eucalyptus saligna* com ampliação de 400 vezes.

Tabela 33 – Resultado da mensuração de raio (Largura) para a espécie de *Eucalyptus saligna*.

Raio	Largura (µm)
1	80,60
2	89,55
3	62,31
4	85,82

Tabela 34 – Resultado da mensuração de (Altura) para a espécie de *Eucalyptus saligna*.

Raio	Altura (μm)
1	20,15
2	18,28
3	17,91
4	18,28
5	17,54
6	20,90
7	21,27

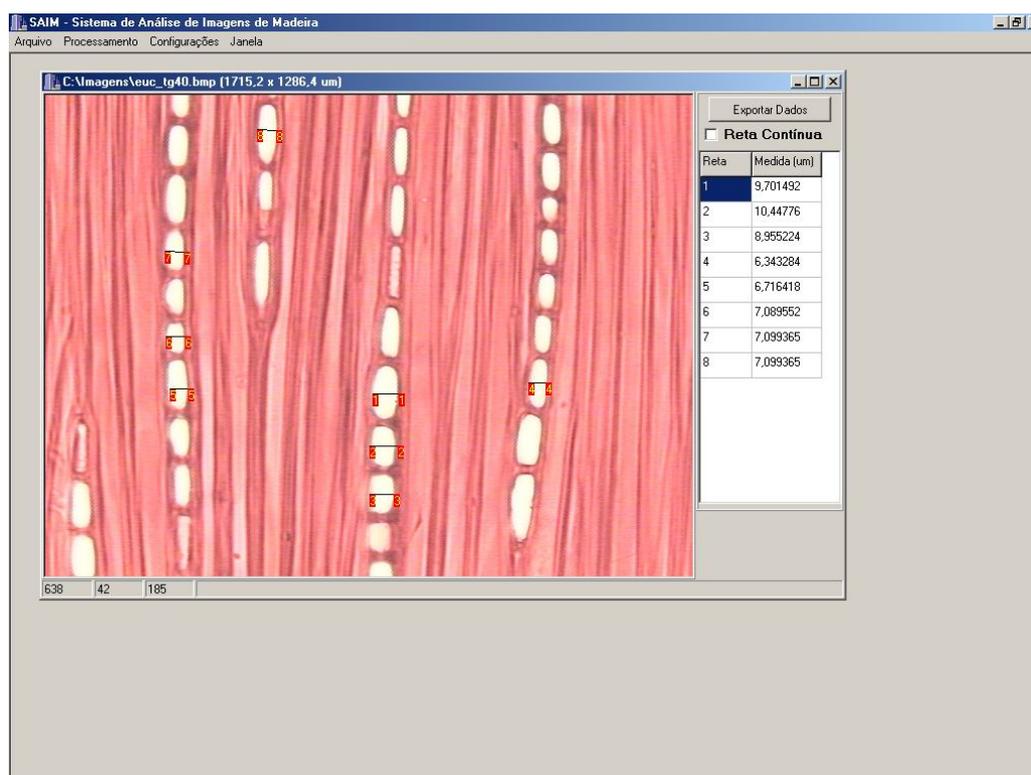


Figura 76 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de *Eucalyptus saligna* com ampliação de 400 vezes.

Tabela 35 – Resultado da mensuração de (Largura) para a espécie de *Eucalyptus saligna*.

Raio	Largura (µm)
1	23,00
2	22,00
3	21,00
4	20,00
5	19,00
6	20,00
7	21,00
8	16,00
9	20,00
10	25,00
11	15,00
12	19,00
13	16,00
14	18,00
15	28,00
16	26,00
17	25,00
18	24,00
19	18,00
20	18,00
21	17,00
22	19,00
23	19,00
24	19,00

Tabela 36 – Resultado da análise dos elementos anatômicos microscópicos de *Eucalyptus saligna*

Elemento anatômico		Dimensão
Vaso	diâmetro (μm)	142,42
	freqüência (n. ^o /mm ²)	10
Raio	n. ^o /mm	13
	largura (μm)	11,89
	altura (μm)	179,44
Fibra	espessura de parede (μm)	2,46
	diâmetro do lúmen (μm)	10,97
	largura (μm)	15,90

4.3.4 Estudo de caso para a espécie *Hymenaea stilbocarpa*

4.3.4.1 Sobre a espécie *Hymenaea stilbocarpa*

O gênero *Hymenaea*, representado por 13 espécies, ocorre em todo o País, tanto em matas pluviais como em matas secas. Ocorre, também, desde a México até a Bolívia e Paraguai, onde as suas espécies são conhecidas mais comumente por Guapinol, Jatayvá e Timbary-Avatí. A Maioria das espécies fornece madeira de valor comercial, sendo muito apreciada tanto no âmbito nacional como no internacional (Mainieri & Chimelo, 1989).

A espécie *Hymenaea stilbocarpa* Hayne, que ocorre desde o Estado do Piauí até o Paraná, além de receber os nomes de Jatobá e Jataí é conhecida ainda por Jataíba, Farinheira, Burandã etc.

A espécie mais comum na Amazônia é *H. courbaril* L. que, juntamente com as demais espécies dessa região, é conhecida por Jutaí, Jutaí-Açu. Jutaí-Mirim. Jutaí-Vermelho etc. e. no comércio internacional, por Courbaril e Locust-Tree, indistintamente.

Os caracteres anatômicos da espécie *Hymenaea stilbocarpa* são: *Parênquima axial em faixas marginais afastadas, visíveis a olho nu, intercaladas por parênquima aliforme, escasso, visível só sob lente; cristais romboidais em células subdivididas*

presentes. *Poros/Vasos* visíveis sob lente; solitários e múltiplos de até 4, predominando os primeiros; poucos, média de 3 poros por mm², médios. média de 190 µm de diâmetro tangencial; óleo-resina presente; placa de perfuração simples; elementos vasculares muito curtos a longos, média de 410 µm de comprimento; pontuações médias, média de 8 µm de diâmetro tangencial, alternas, poligonais, com aberturas horizontais inclusas e guarneçadas. *Raios* visíveis sob lente no topo e nas faces longitudinais; pouco numerosos, média de 5 raios por mm; extremamente baixos, média de 37 mm de altura, média de 20 células de altura; de 1 a 7 células de largura, sendo mais comuns os de 5 a 6; homocelulares multisseriados, com células marginais procumbentes diferenciadas; pontuações radiovasculares semelhantes às intercelulares. *Fibras* libriformes, muito longas, média de 2,1 mm de comprimento; estreitas a médias, média de 21 µm de largura e de paredes espessas a muito espessas predominantes; óleo-resina presente. *Camadas de crescimento* distintas demarcadas pelo parênquima marginal.

4.3.4.2 Análise dos elementos anatômicos microscópicos

Foram analisados os elementos anatômicos microscópicos presentes nas imagens com ampliação de 100 vezes. Inicialmente, define-se a unidade a ser trabalhada nesta ampliação. A Figura 77 ilustra a definição da unidade apresentando uma escala micrométrica ampliada de 100 vezes.

Definida a unidade, inicia-se o processo de mensuração dos elementos. Iniciando a mensuração por elementos vasculares, abre-se a imagem do corte transversal de *Hymenaea stilbocarpa* e utilizando-se do recurso de mensuração por retas, obtém-se os valores de diâmetro dos vasos, conforme ilustrado na Figura 78. O resultado da mensuração dos elementos vasculares de *Hymenaea stilbocarpa* no corte transversal estão apresentados na Tabela 37.

A Figura 79 ilustra o corte radial de *Hymenaea stilbocarpa* com ampliação de 100 vezes. Nessa imagem, como pode ser observado, não se mensurou nenhum elemento, pois os elementos (raios) não são distinguíveis.

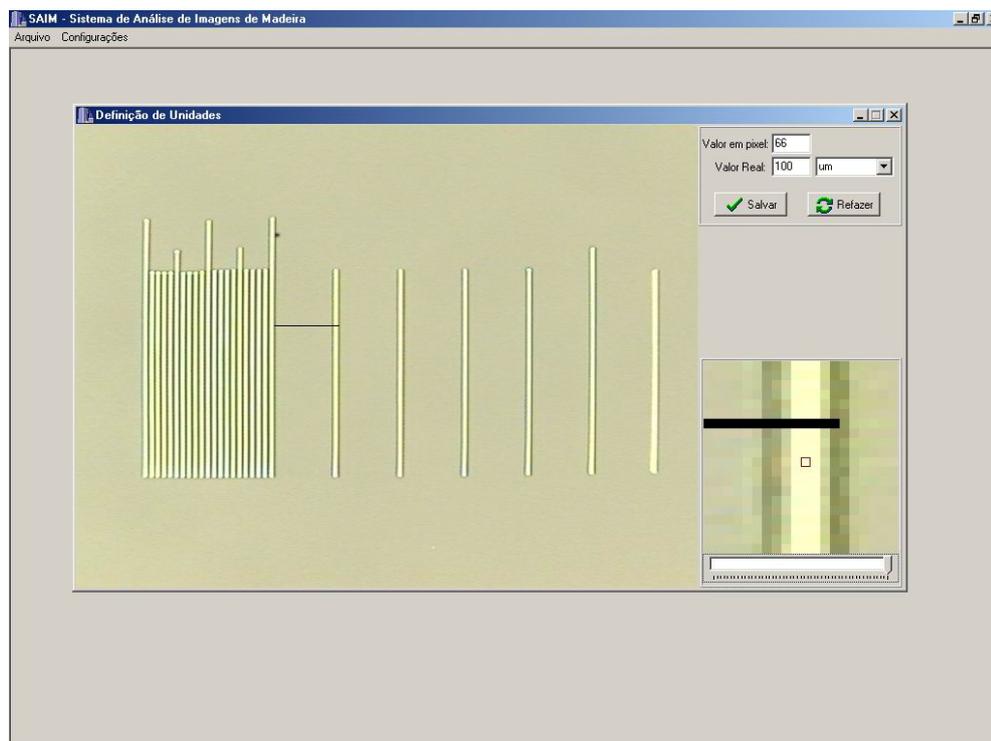


Figura 77 – Tela de resultado da definição de unidade para ampliação de 100 vezes.

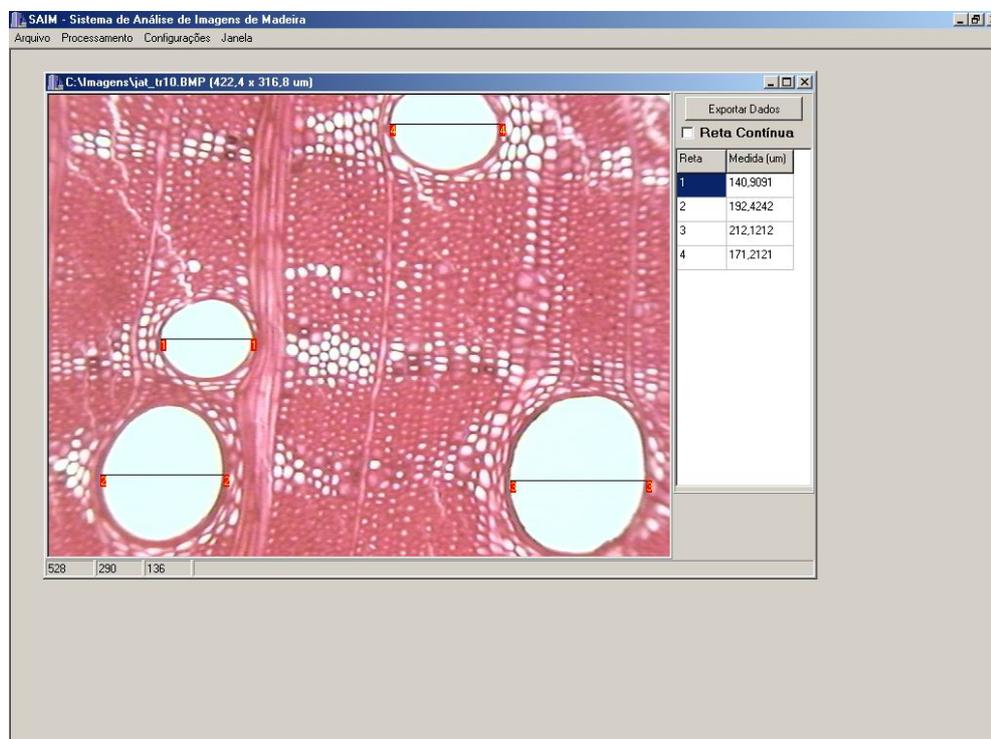


Figura 78 – Tela de apresentação da mensuração por retas por retas no corte transversal de *Hymenaea stilbocarpa* com ampliação de 100 vezes.

Tabela 37 – Resultado da mensuração de elementos vasculares de *Hymenaea stilbocarpa*.

Vaso	Diâmetro (μm)
1	146,97
2	192,42
3	213,64
4	166,67

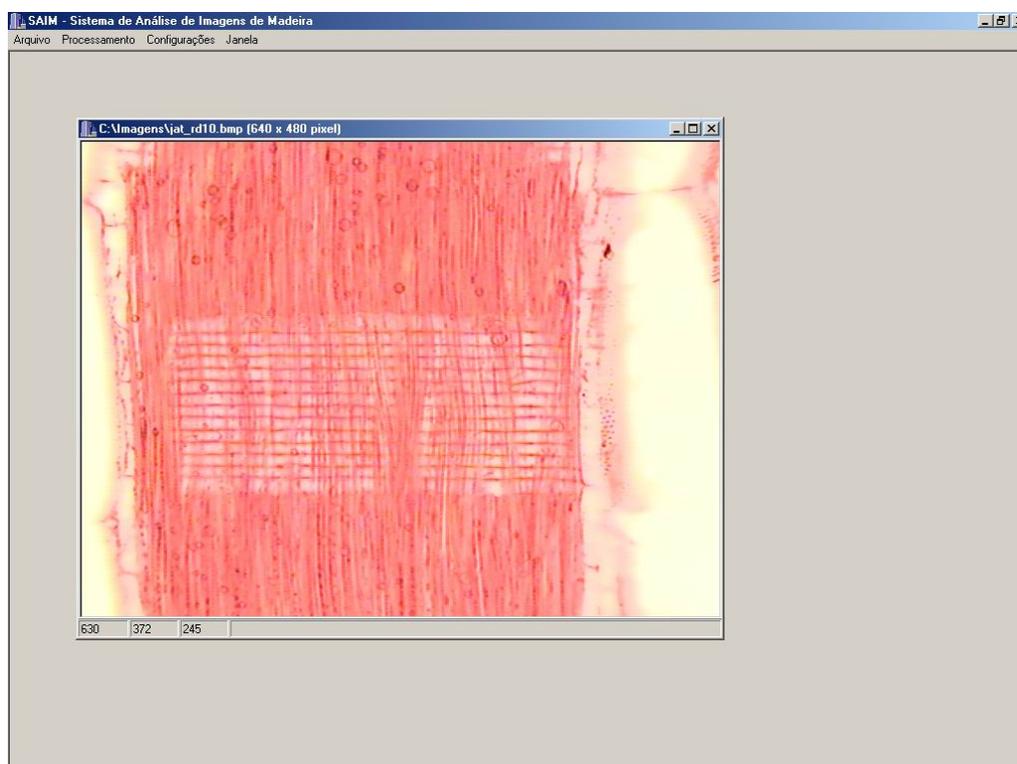


Figura 79 – Tela de apresentação da mensuração por do corte radial de *Hymenaea stilbocarpa* com ampliação de 100 vezes.

Para mensurar a altura e largura dos raios, utiliza-se o corte tangencial, conforme ilustrado na Figura 80. O resultado da mensuração de altura e largura dos raios encontram-se apresentados respectivamente nas Tabelas 38 e 39.

A Figura 81 ilustra a definição da unidade apresentando uma escala micrométrica ampliada de 400 vezes.

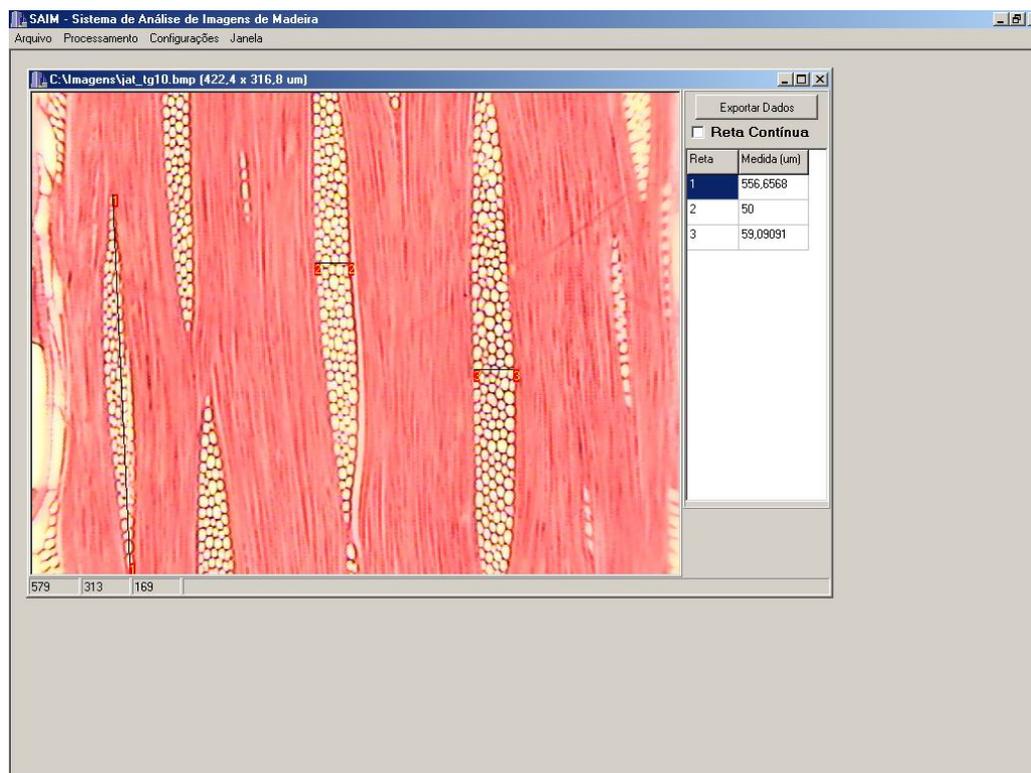


Figura 80 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte tangencial de *Hymenaea stilbocarpa* com ampliação de 100 vezes.

Tabela 38 – Resultado da mensuração de raios (Altura) para a espécie de *Hymenaea stilbocarpa*.

Raio	Altura (μm)
1	571,21
2	268,18
3	115,15

Tabela 39 – Resultado da mensuração de raios (Largura) para a espécie de *Hymenaea stilbocarpa*.

Raio	Largura (μm)
1	40,91
2	53,03
3	66,67
4	40,91
5	18,18

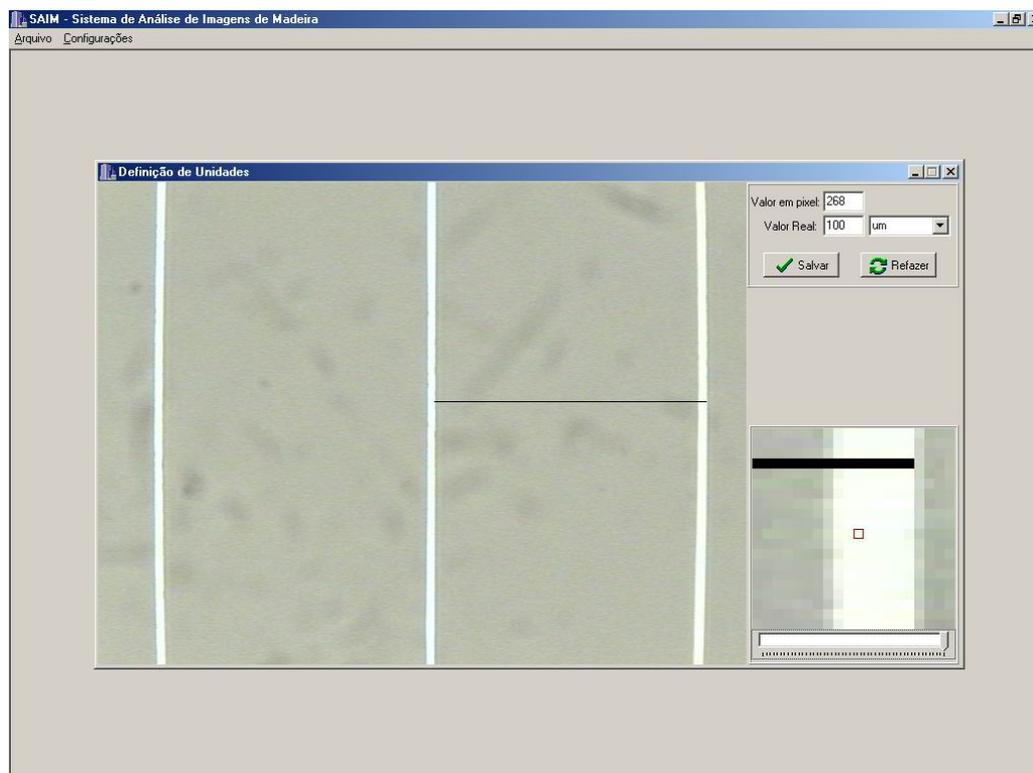


Figura 81 – Tela de resultado da definição de unidade para ampliação de 400 vezes.

A mensuração por retas para a medida da espessura da parede das fibras e o diâmetro do lúmen, conforme ilustrado na Figura 82, apresentou resultados conforme os apresentados nas Tabelas 40 e 41 respectivamente.

Para mensurar a altura dos raios, utilizou-se também o corte radial, conforme ilustrado na Figura 83. O resultado da mensuração de altura dos raios encontra-se apresentado na Tabela 42.

Para mensurar a largura dos raios, utilizou-se o corte tangencial, conforme ilustrado na Figura 84. O resultado da mensuração da largura dos raios encontra-se apresentado na Tabela 43.

Para se obter a largura da fibra, utilizou-se os valores obtidos nas Tabelas 40 e 41 e a metodologia detalhada no capítulo 3.

A Tabela 44 apresenta o resultado da análise dos elementos anatômicos da espécie *Hymenaea stilbocarpa*.

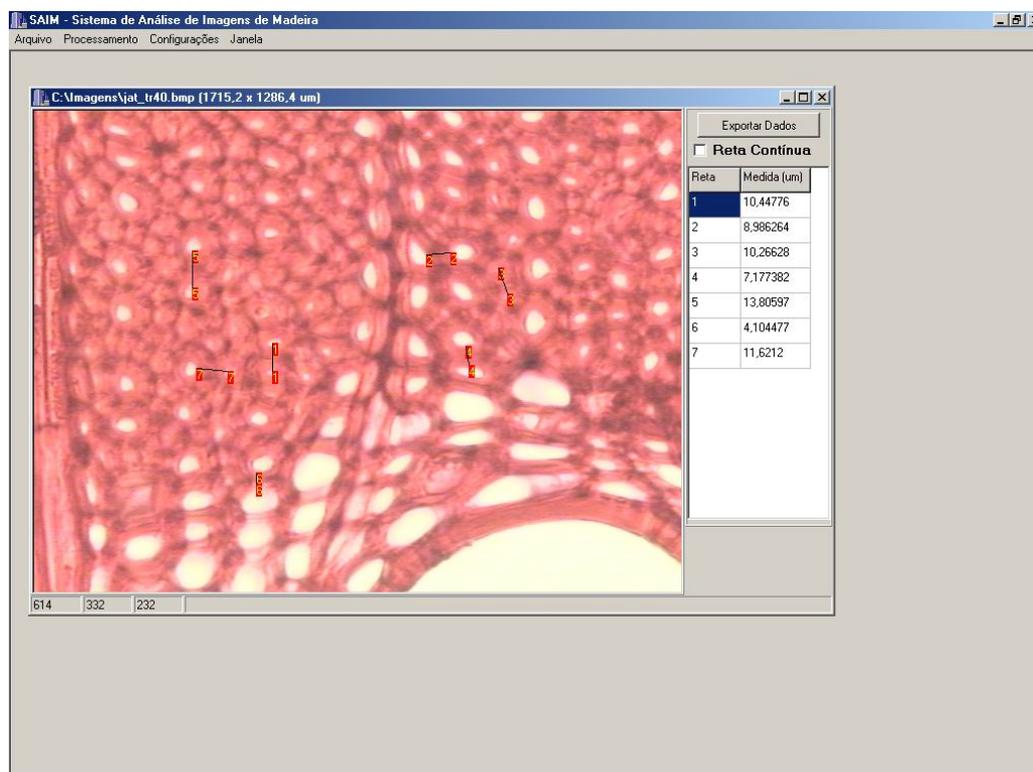


Figura 82 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte transversal de *Hymenaea stilbocarpa* com ampliação de 400 vezes.

Tabela 40 – Resultado da mensuração de fibra (Espessura da Parede) para a espécie de *Hymenaea stilbocarpa*.

Fibra	Espessura da Parede (μm)
1	5,83
2	4,10
3	4,10
4	5,22
5	5,49
6	5,03
7	5,03
8	4,85
9	5,03
10	4,85
11	4,29

Tabela 41 – Resultado da mensuração de fibra (Diâmetro de Lúmen) para a espécie de *Hymenaea stilbocarpa*.

Fibra	Diâmetro do Lúmen (μm)
1	5,60
2	7,46
3	4,85
4	5,97
5	5,22
6	7,46
7	4,48
8	6,72
9	7,46
10	7,84

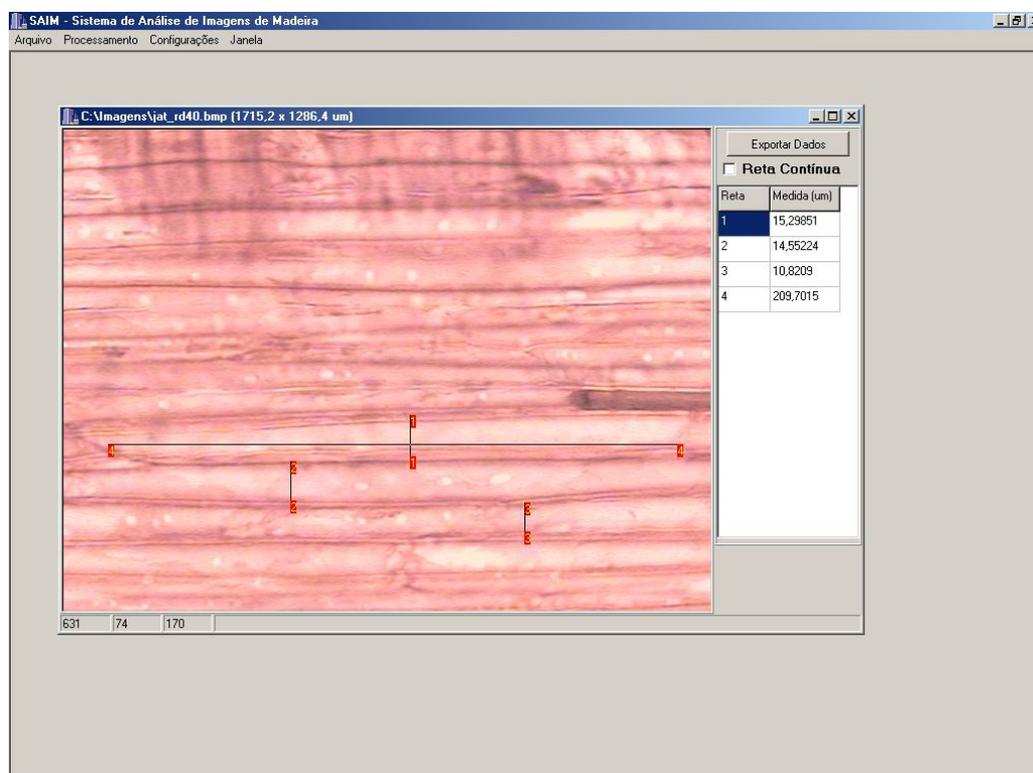


Figura 83 – Tela de apresentação da mensuração por reta no corte radial de *Hymenaea stilbocarpa* com ampliação de 400 vezes.

Tabela 42 – Resultado da mensuração de raios (Altura) para a espécie de *Hymenaea stilbocarpa*.

Raio	Altura (μm)
1	19,03
2	16,79
3	13,81
4	14,18
5	12,69
6	29,10
7	29,10
8	16,04

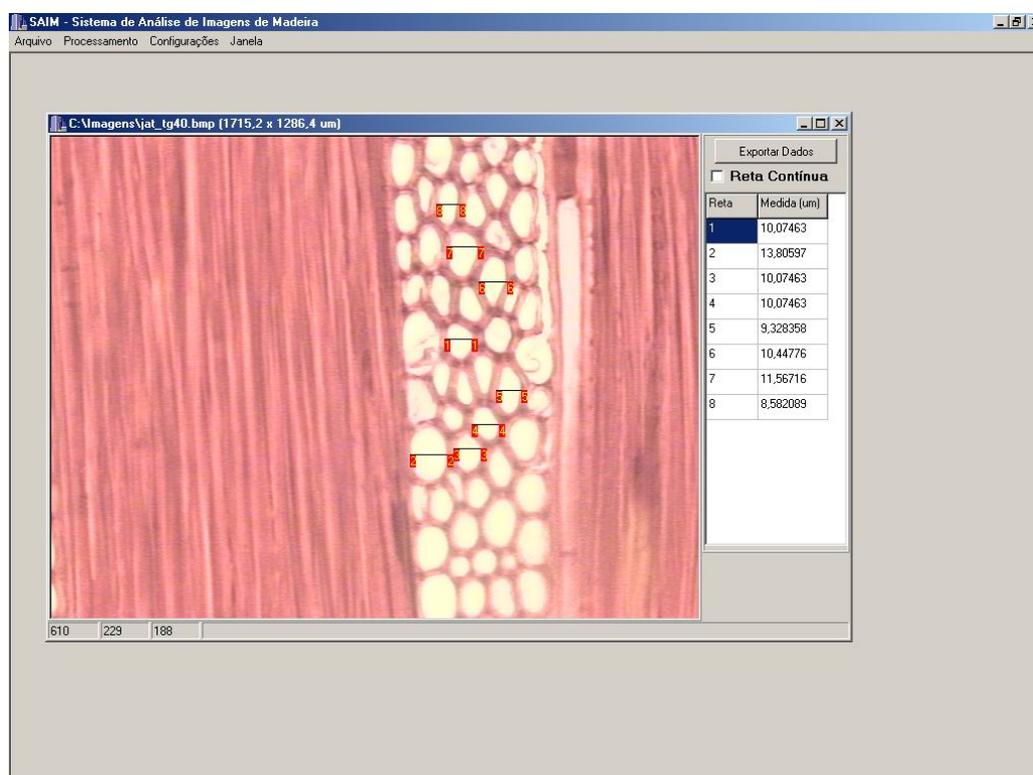


Figura 84 – Tela do resultado da mensuração por reta no corte tangencial de *Hymenaea stilbocarpa* com ampliação de 100 vezes.

Tabela 43 – Resultado da mensuração de raios (Largura) para a espécie de *Hymenaea stilbocarpa*.

Raio	Largura (μm)
1	13,43
2	10,45
3	7,84
4	11,57
5	12,31
6	10,45
7	12,69
8	8,21
9	9,71
10	9,33
11	10,07
12	14,18
13	7,46
14	6,73
15	6,34
16	11,19
17	7,46
18	10,82

Tabela 44 – Resultado da análise dos elementos anatômicos microscópicos de *Hymenaea stilbocarpa*.

Elemento anatômico		Dimensão
Vaso	diâmetro (μm)	179,93
	freqüência (n. $^{\circ}$ /mm 2)	6
Raio	n. $^{\circ}$ /mm	4
	largura (μm)	38,64
	altura (μm)	318,18
Fibra	espessura de parede (μm)	4,91
	diâmetro do lúmen (μm)	6,31
	largura (μm)	16,13

4.3.5 Estudo de caso para a espécie *Eucalyptus saligna* analisando o ângulo microfibrilar.

Para mensurar os elementos anatômicos sub-microscópicos, especificamente o ângulo microfibrilar, obteve-se imagens por microscopia de força atômica de *Eucalyptus saligna*. A Figura 85 ilustra a imagem aberta para a análise de angulações.

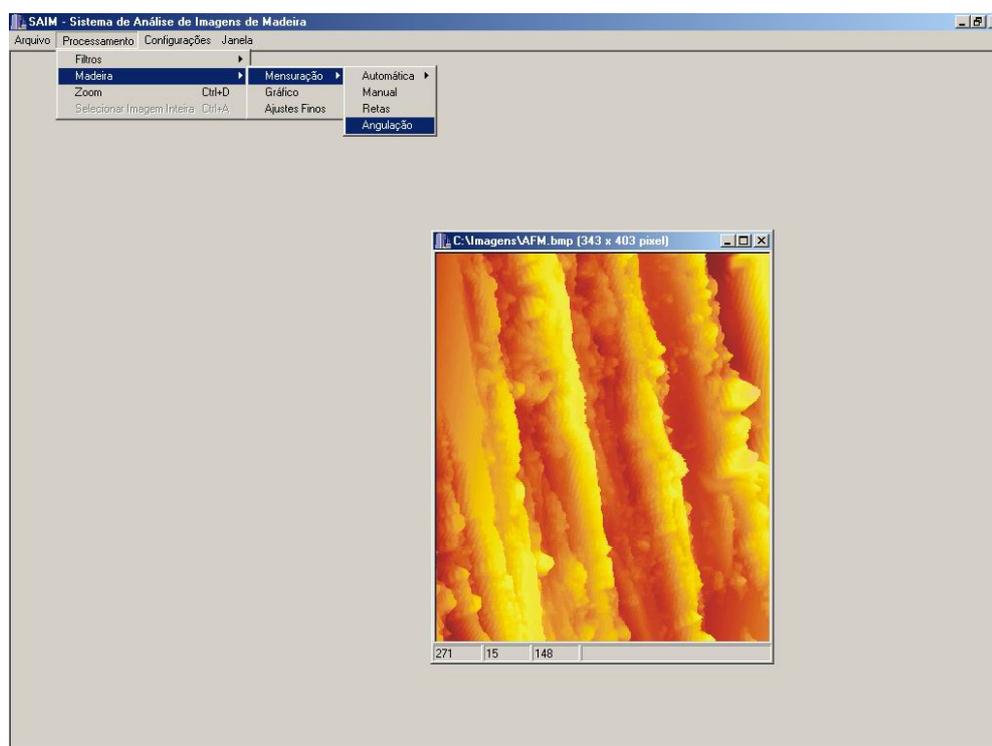


Figura 85 – Tela de apresentação da imagem para mensurar a angulação.

Após aberta a imagem, aplica-se a filtragem Sobel XY e a imagem resultante da filtragem é então limiarizada, conforme ilustra a Figura 86. Após a limiarização, aplica-se o afinamento com o objetivo de reduzir os objetos a linhas, conforme ilustra a Figura 87.

Terminado o afinamento, o sistema inicia uma varredura procurando pelas linhas existentes na imagem. Para cada linha encontrada, o sistema obterá a angulação correspondente.

No processo de análise, para se referenciar à cama S2 da parede celular, buscou-se atribuir um sistema de eixos de coordenadas (x,y) de forma que o eixo com angulação de 0° (eixo x) fique em paralelo ao lado esquerdo da imagem a ser analisada.

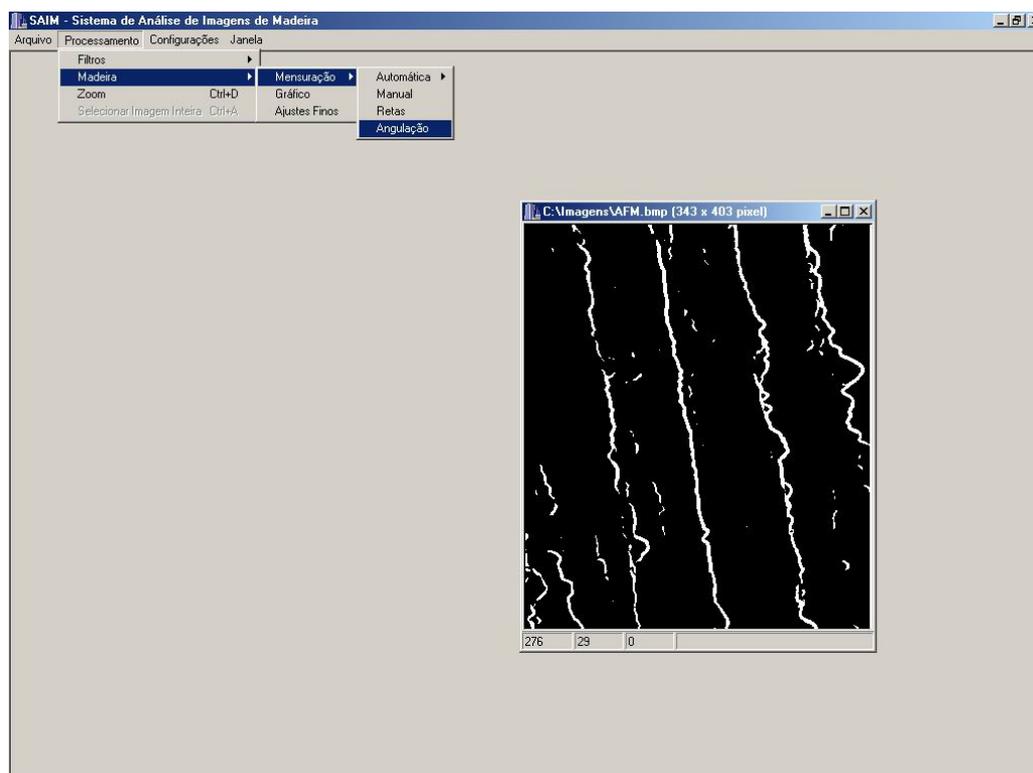


Figura 86 – Tela de apresentação do resultado da técnica de limiarização.

Após analisar todas as linhas existentes na imagem, o sistema apresenta dois histogramas de frequência acumulada, sendo que em um deles são apresentadas todas as angulações encontradas e no outro, as angulações são agrupadas para uma melhor visualização e verificação do ângulo microfibrilar, conforme ilustra a Figura 88.

Conforme observado para este estudo de caso o histograma resultante apresentou uma maior incidência de retas com angulação na faixa de 0 a 10° . Observa-se que é considerado como um bom resultado, conforme literatura clássica do segmento, ângulos microfibrilares que estejam nesta faixa encontrada.

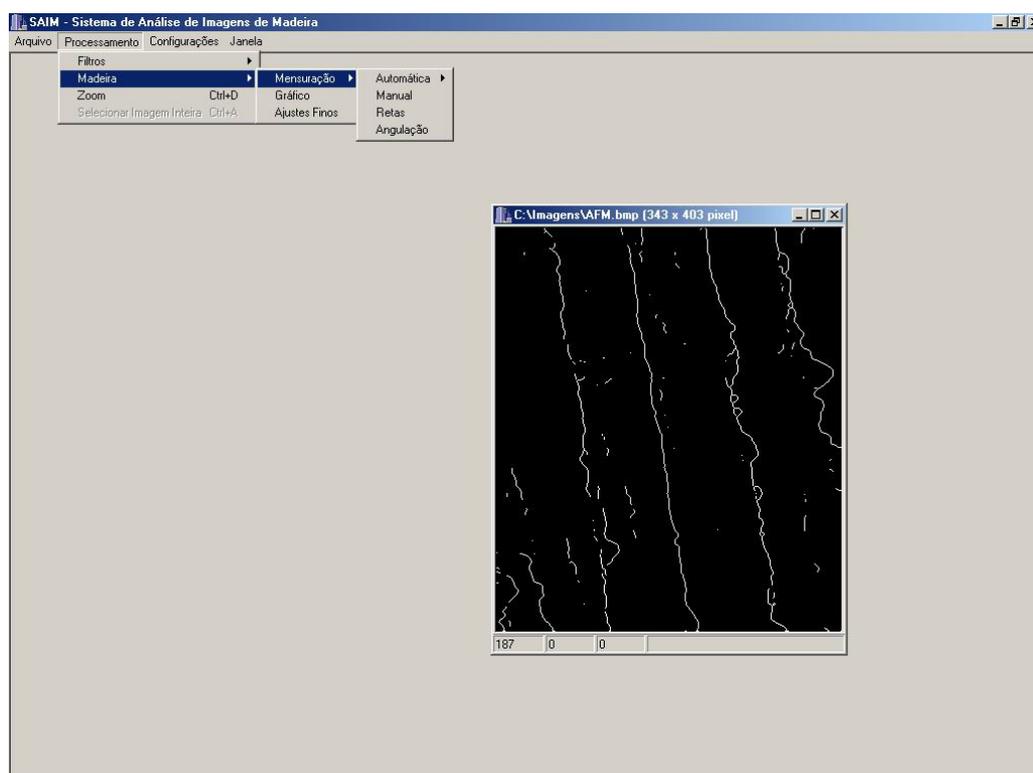


Figura 87 – Tela de apresentação do resultado da técnica de afinamento.

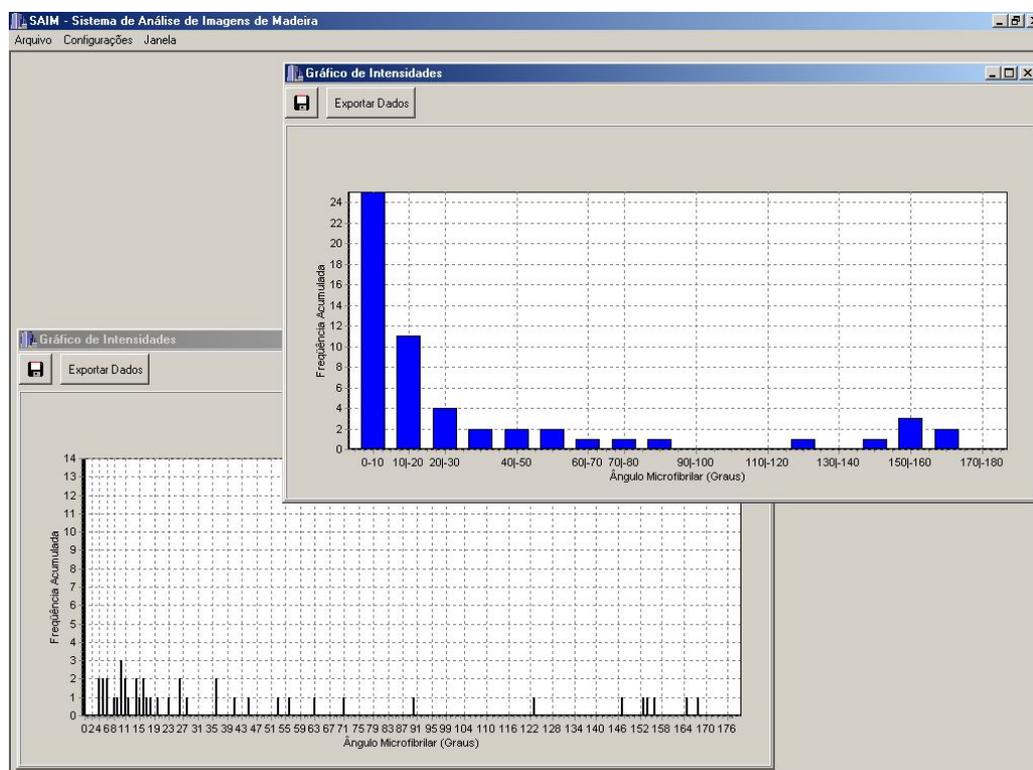


Figura 88 – Tela de apresentação do histograma da frequência acumulada.

4.4 Conclusões

O desenvolvimento do método complementar de análise da qualidade de madeira com técnicas do processamento digital de imagens encontra utilidade na análise da qualidade de madeiras em processos agro-florestais como também em outros processos decorrentes.

Quanto a interface com o usuário, a opção do desenvolvimento no ambiente Builder C++ 5.01 forneceu funcionalidades como a criação de interface com o usuário e a facilidade de interação de código de programa com esta interface. Não existindo limitações quanto a capacidade de alocação de memória utilizando-se ponteiros dinâmicos, este desenvolvimento trouxe diferencial para a metodologia desenvolvida dentro da área de processamento digital de imagens.

O uso de menus na interface com o usuário tornou o sistema amigável e auto-explicativo. A opção de implementação de análise de regiões da imagem (ROI) flexibilizou a seleção de elementos das amostras de madeira e a otimização do processo de avaliação dos parâmetros selecionados para o vetor complementar de qualidade.

Os testes realizados para a validação do método desenvolvido, conforme resultados apresentados ilustram a potencialidade para a exclusão de objetos impróprios presentes nas imagens ou a correção de defeitos em uma fase de pré-análise com recursos de ajuste fino obtidos através do sub-menu <madeiras>.

Os testes realizados para a validação do método de medida do ângulo microfibrilar com o uso de padrões previamente calibrados em ângulos de 0°, 45°, 90° e 135° não apresentaram erros.

Adicionalmente testes realizados com padrões que apresentam variação angular incremental de 0,5°, 1°, 2°, 3,5° e 5° apresentam erro médio percentual variando na faixa de 1,16 a 5,35 %; desvio médio variando na faixa de 1,000° a 3,429°; desvio padrão

variando na faixa de $0,408^\circ$ a $0,787^\circ$; variância na faixa de $0,167^\circ$ a $0,619^\circ$ e erro tolerável variando na faixa de $0,500^\circ$ a $1,857^\circ$.

Estes valores obtidos indicam um erro médio percentual máximo da ordem de 5,35 %, o que é considerado um bom resultado visto estar na classe do limiar de 5% estabelecido na definição de um bom sistema de medida.

Os estudos de casos analisados ilustram a potencialidade do método e mostram a sua sensibilidade para a obtenção de parâmetros complementares que qualificaram e quantificaram a qualidade de madeiras brasileiras. Para as espécies analisadas, conforme resultados obtidos e apresentados nas Tabelas 18, 27, 36 e 44 os elementos anatômicos tais como vaso, raio e fibra encontram suas caracterizações em sintonia com os dados apresentados na literatura do segmento o que ilustra a precisão e confiabilidade do método de análise desenvolvido baseado em técnicas do processamento digital de imagens.

Quanto ao estudo de caso utilizando a espécie de *Eucalyptus saligna* para análise do ângulo microfibrilar conclui-se que o método desenvolvido possibilita análises com resolução da ordem de 1° e viabiliza análise da camada S2 da parede celular, o que certifica a hipótese do plano de pesquisa desenvolvido.

A opção pela geração de histogramas conforme o resultado apresentado na Figura 88 viabiliza a interpretação da distribuição angular das microfibrilas em classes em função da frequência de ocorrência observada.

Adicionalmente, este trabalho mostrou que é viável se complementar o método de análise da qualidade de madeiras baseado na composição de técnicas do processamento digital de imagens para um melhor aproveitamento e melhor atribuição de valor a produtos do contexto agro-florestal brasileiro.

4.5 Sugestão de trabalho futuro

1 – Ampliar o método desenvolvido com o uso de técnicas do processamento digital de imagens buscando integrar em um único ambiente componentes microscópicos, sub-microscópicos, mecânicos, físicos e químicos.

Referências Bibliográficas

ALFONSO, V. A. **Caracterização anatômica do lenho e da casca das principais espécies de *Eucalyptus* L'Herit. cultivadas no Brasil.** 1987. 188f. Tese (Doutorado) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BINNING, G.; QUATE, C. F.; GERBER, C. H. Atomic force microscopy. **Phys. Ver. Lett.** v. 56, p.930-953, 1986.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira.** São Paulo: Nobel, 1991. 151 p.

BUTTERFIELD, B. G. **Microfibril angle in wood.** London: International Association of Wood Anatomists, 1997. 410 p.

CHNIEWIND, A. P.; BARRET, J. D. The wall model with complete shear distance. **Wood and Fiber.** v. 1, p.205-214, 1969.

CLAUSON, M. L.; WILSON, J. B. Comparison of video and X-ray for scanning wood density. **Forest Products Journal,** v. 41, n. 3, p.58-62, 1991.

CRUVINEL, P. E. et al. Image processing in automated measurements of raindrop size and distribution. **Computers and Eletronics in Agriculture,** v. 23, p.205-217, 1999.

CUTTER, E. G. **Anatomia vegetal.** 2. ed. São Paulo: Roca, 1986.

DENES, A. R. et al. Hexamethyldisiloxane-plasma coating of wood surfaces for creating water repellent characteristics. **Holzforschung,** v. 53, n. 3, p.318-326, 1999.

DUDA, R. O.; HART, P. E. **Pattern Classification and Scene Analysis.** New York: John Wiley & Sons, 1973.

FISHER, R. A., **The use of multiple measurements in taxonomic problems.** Annual Eugenics, v. 7, p. 179-188, 1936.

FLORSHEIM, M. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Dendrologia e anatomia da madeira de aroeira - *Myracrodruon urundeuva* F.F. & M.F.Allemão (Anacardiaceae). **Revista Instituto Florestal**, v. 6, p.75-85. 1994.

FONGA, H. Pattern recognition in gray level images by fourier analysis. **Pattern Recognition Letters**, v. 17, n. 14, p.1477 – 1489, 1996.

FUKUNAGA, K. The estimation of the bayes error by the K-Nearest neighbor approach. In: KANAL, L. N.; ROSEMFIELD, A. (Ed.). **Progress in patern recognition.** Amsterdan: North Holland, 1985.

FUKUNAGA, K. **Introduction to statistical pattern recognition.** 2 nd. ed. New York: Academic Press, 1990.

GIACINTO, G.; PAOLUCCI, R.; ROLI, F. Application of neural networks and statistical pattern recognition algorithms to earthquake risk evaluation. **Pattern Recognition Letters**, v. 18, n. 11/13, p.1353 – 1362, 1997.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing.** 2nd. ed. Massachusetts: Addison-Wesley, 1992.

HANLEY, S. J; GRAY, D. G. Atomic force microscope images of black spruce wood sections and pulp fibres. **Holzforschung**, v. 48, n. 1, p.29-34, 1994.

HELLMEISTER, J. C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira.** 1973. 122f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

HERRMANN, P. S. P. et al. Microscopia de Varredura por Força: uma Ferramenta Poderosa no Estudo de Polímeros. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 7, n. 4, p. 51-61, 1997.

JUNQUEIRA, L. C.; CARNEIRO, J. **Biologia Celular e Molecular**. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 2000.

KIM, J. H.; YOON, S. H.; LEE, C. W; SOHN, K. **A robust solution for object recognition by mean field annealing techniques**. Pattern Recognition, Ezmsford, v. 34, n. 4, p. 885-902, 2001.

LEWIS, M. A video technique for imaging the three-dimensional architecture of wood. **IAWA Journal**, v. 16, n. 1, p.81-86, 1995.

MAINIERI, C.; PEREIRA, J. A. **Madeiras do Brasil: sua caracterização macroscópica, usos comuns e índices qualitativos físicos e mecânicos**. São Paulo: IPT, 1965. 282 p.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J. P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. São Paulo: IPT, 1989. 418 p.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento digital de imagens**. São Paulo: Brasport, 1999.

MASCARENHAS, N. D. A. Processamento digital de imagens: um resumo das principais técnicas. In: SEMINÁRIO DE INFORMÁTICA EM SAÚDE (INPE-4404-pre/1220), 1987, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Inpe, 1987.

OLIVEIRA, J. T. S.; DELLA LUCIA, R. M. **Propriedades físicas e mecânicas das madeiras de *Araucaria cunninghamii* de *Pinus caribaea* e de *P. oocarpa***. Viçosa: SIF, 1994. 7 p. (Boletim Técnico, 8)

OLIVEIRA, J. T. S. et al. Estudo comparativo do comportamento higroscópico e da retratibilidade das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *caribaea*. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 1995, Rio de Janeiro, **Resumos**.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. New York: MacGraw, 1970. 705 p.

PESZLEN, I. Influence of age on selected anatomical properties of populus clones. **IAWA Journal**, v. 15, n. 3, p.311-21. 1994.

PITAS, I.. **Digital image processing algorithms**. New York: Prentice Hall, 1993.

RIBEIRO, T. P.; TOMAZELLO, M. G. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Análise de Imagem da Estrutura Anatômica da Madeira de Espécies Florestais Nativas e Introduzidas no Brasil. . In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA UNIMEP/CNPq, 7., 1999a, Piracicaba. **Anais..** p.161-162.

RIBEIRO, T. P.; TOMAZELLO, M. G. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Análise de Imagem da Estrutura Anatômica da Madeira de Espécies Florestais Nativas e Introduzidas no Brasil. . In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 7., 1999b. Piracicaba. **Anais.** 1 CD.

RIBEIRO, T. P.; TOMAZELLO, M. G. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Metodologia para obtenção de fotomacro e fotomicro da estrutura anatômica de madeiras por meio de reprodução de imagens digitalizadas. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 1., 1999c, Piracicaba. **Anais.** 1 CD.

RIBEIRO, T. P.; TOMAZELLO FILHO, M.; CRUVINEL, P. E. Algorithm for analyzing anatomical structure of wood from brazilian forest species based on digital imaging processes techniques In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING (SIBGRAPI 2001), 14., 2001, Florianópolis. **Resumos**. Florianópolis: IEEE Computer Society, 2001, v. 1, p. 276.

RIBEIRO, T. P.; TOMAZELLO FILHO, M.; CRUVINEL, P. E. Análise da estrutura anatômica de madeiras de espécies florestais brasileiras baseada em técnicas do processamento digital de imagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA (CONBEA 2002), 31., 2002, Salvador. **Anais**. 1 CD.

STOKKE, D.; MANWILLER, F. G. Proportions of wood elements in stem, branch, and root wood of black oak (*Quercus velutina*). **IAWA Journal**, v. 15, n. 3, p.301-10, 1994.

TOMAZELLO FILHO, M. Estrutura anatômica da madeira de oito espécies de eucalipto no Brasil. **Revista IPEF**, v. 29, p.25-36, 1985a.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. **Revista IPEF**, v. 29, p.37-45, 1985b.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica da madeira de *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides*. **Revista IPEF**, v. 36, p.35-42, 1987.

TOMAZELLO FILHO, M.; AZZINI, A. Variação da estrutura dos colmos de bambu - *Bambusa vulgaris*. **0 Papel**, v. 49, n. 12, p.155-161, 1988.

TOMAZELLO FILHO, M. (Colaborador). **Multilingual Glossary of Dendrochronology - Terms and Definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian**. KENNEL, M.; SCHWEINGRUBER, F. H.(Compilers). Swiss Federal Institute for Forest Research and Paul Haupt. Beme. 1995. 467p.

YOUNG, T. Y.; FU, K. S. **Handbook of pattern recognition and image processing**. New York: *Academic Press*, 1986.

Glossário

Axial – vide eixo axial;

Cisalhamento - separação das fibras, resultando num deslizamento de um plano sobre outro, devido a um esforço no sentido paralelo ou oblíquo as mesmas (um esforço no sentido normal as fibras também pode provocar o cisalhamento, mas em geral isto não chega a ocorrer, pois a ruptura ocorre por esmagamento das fibras).

Compressão paralela às fibras - determina o limite de resistência da madeira em estudo, quando submetida à compressão axial;

DAP - Diâmetro à Altura do Peito - Diâmetro do tronco da árvore medido sobre a casca a 1,30 metros do solo;

Dureza - avalia a resistência da madeira à penetração de ferramentas, fornecendo informações sobre sua resistência ao desgaste;

Elementos vasculares - conjunto normalmente axial de células sobrepostas;

Fendilhamento - utilizado para avaliar a resistência da madeira ao fendilhamento, deslocando gradualmente as camadas de crescimento do corpo de prova;

Fibras – tipos de células que normalmente desempenham a função de sustentação. Estas células existentes no lenho das angiospermas, alongadas. Muitas das propriedades físicas e mecânicas do caule dependem da morfologia destas células.

Flexão estática - possibilita a determinação do limite de resistência da madeira em estudo, quando submetida à esforço de flexão;

Massa específica - É a razão entre a quantidade de massa por unidade de volume. Algumas espécies são naturalmente mais pesadas que outras mesmo apresentando dimensões iguais. Geralmente, espécies mais pesadas, apresentam características

mais duradouras. Os índices de massa específica variam de espécie para espécie e dependem de uma série de fatores estruturais bem como dos compostos orgânicos e inorgânicos presentes no lenho;

Medula: Porção central do tronco, formada basicamente de células parenquimáticas, não lignificadas e de pouca resistência. Na medula encontram-se geralmente feixes vasculares;

Parênquima axial – Células que possuem como função principal acumular substâncias nutritivas, o parênquima confere baixa resistência a esforços mecânicos, pois possui baixo nível de lignina em sua constituição;

Parênquima Radial: Conjunto de células dos raios de natureza parenquimática, que constitui o sistema de condução no sentido da casca para a medula nas árvores;

Pixel – menor elemento de exibição de intensidade ou cor;

Raio - Os raios são células parenquimáticas que se prolongam no sentido da casca para a medula. Possuem a função de alimentar o tecido neste sentido e costumam acumular muitas substâncias nutritivas, além de inclusões. É chamado também de parênquima radial.

Retratibilidade - É o fenômeno de variação nas dimensões e no volume em função da perda ou ganho de umidade que provoca contração em uma peça de madeira. Está relacionada às e aos defeitos de secagem;

Tração normal às fibras - utilizada para determinar a resistência da madeira, quando submetida a esforço de tração perpendicular às fibras; consiste na separação total das camadas de crescimento da peça de madeira em consequência de esforços dirigidos no sentido radial;

Vaso – Os vasos são estruturas formadas por uma junção de células perfuradas, chamadas de elementos de vaso, que se comunicam entre si, formando longos dutos que conduzem a seiva no sentido axial;