

CARLOS DONISETE OLMO SOLANA

**RECONSTRUÇÃO DIGITAL DE DOCUMENTOS
POR APROXIMAÇÃO POLIGONAL**

CURITIBA

2005

CARLOS DONISETE OLMO SOLANA

**RECONSTRUÇÃO DIGITAL DE DOCUMENTOS
POR APROXIMAÇÃO POLIGONAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Informática Aplicada.

Área de Concentração: *Computação Forense e Biometria*

Orientador: Prof. Dr. Flávio Bortolozzi

Co-orientador: Prof. Dr. Edson José Rodrigues Justino

CURITIBA - PR

2005

Solana, Carlos Donisete Olmo

S684r Reconstrução digital de documentos por aproximação poligonal /
 2005 Carlos Donisete Olmo Solana ; orientador, Flávio Bortolozzi ; co-orientador,
 Edson José Rodrigues Justino. -- 2005.
 xviii, 88 f. : il. ; 30 cm

 Dissertação (mestrado) -- Pontifícia Universidade Católica do Paraná,
 Curitiba, 2005
 Inclui bibliografia

 1. Processamento de imagens (Técnicas digitais) 2. Sistemas imageadores
 de documentos. 3. Teoria da aproximação. I. Botolozzi, Flávio. II. Justino,
 Edson José Rodrigues. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
 Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada. IV. Título.

 CDD 20. ed. -- 621.367
 006.42



Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Informática

**ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA APLICADA
DA PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ**

DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 122

Aos 01 dias do mês de Agosto de 2005 realizou-se a sessão pública de defesa da dissertação **“Reconstrução Digital de Documentos por Aproximação Poligonal”**, apresentada por **Carlos Donisete Olmo Solana** como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Informática Aplicada**, perante uma Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Flávio Bortolozzi
PUCPR (orientador)

assinatura

parecer (aprov/ reprov.)

Prof. Dr. Edson José Rodrigues Justino
PUCPR

Profª. Drª. Cinthia O. de Alemandra Freitas
PUCPR

Prof. Dr. João Marques de Carvalho
UFCG - PB

Prof. Dr. Luiz Eduardo de Oliveira
PUCPR (suplente)

Conforme as normas regimentais do PPGIA e da PUCPR, o trabalho apresentado foi considerado aprovado (aprovado/reprovado), segundo avaliação da maioria dos membros desta Banca Examinadora. Este resultado está condicionado ao cumprimento integral das solicitações da Banca Examinadora registradas no Livro de Defesas do programa.


Prof. Dr. Dibio Leandro Borges,
Diretor do PPGIA PUCPR



Dedico esse trabalho à minha esposa Aparecida e aos meus filhos Gabriel, Isac e Luana pelo companheirismo e compreensão pelas horas ausentes.

Dedico ainda à memória de meu pai Domingos Solana, que deixou o convívio do mundo material para ir morar na pátria espiritual em Janeiro de 2004.

Agradecimentos

A Deus o Grande Arquiteto do Universo por ter me dado o ânimo e a força necessários para enfrentar essa jornada.

À minha família que compreendeu a minha ausência e sempre incentivou a luta pelos meus ideais.

Ao Professor Dr. Edson José Rodrigues Justino pela ajuda na construção do trabalho, com sua presença constante, sempre motivando, transmitindo seus conhecimentos com segurança, incentivando a pesquisa e criando uma amizade fraterna.

À Pontifícia Universidade Católica do Paraná, através do Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada (PPGIA), pelo apoio financeiro e estrutural que permitiu a minha participação no Mestrado e a realização desse trabalho.

Aos meus colegas de estudos, professores e demais funcionários do PPGIA.

Finalmente a todos aqueles que de alguma maneira me ajudaram na concretização desse trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
SUMÁRIO	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVI
RESUMO.....	XVII
ABSTRACT	XVIII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1. CONTEXTO.....	1
1.1. DESAFIO	4
1.2. MOTIVAÇÃO	6
1.3. PROPOSTA	7
1.4. CONTRIBUIÇÃO.....	7
1.5. ORGANIZAÇÃO	7
CAPÍTULO 2	9
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1. INTRODUÇÃO	9
2.2. AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....	9
2.2.1. <i>Pré-tratamento</i>	10
2.2.2. <i>Aproximação Poligonal</i>	20
2.3. RECONSTRUÇÃO DE DOCUMENTOS DIGITAIS.....	28

2.3.1. Sistema para reconstrução de fragmentos “Spaghetti”	28
2.3.2. Reconstrução de cerâmicas fragmentadas	31
2.3.3. Quebra-cabeças e aproximação de curvas	36
2.4. CONCLUSÃO	42
CAPÍTULO 3	43
METODOLOGIA.....	43
3.1. INTRODUÇÃO	43
3.2. BASE DE DOCUMENTOS	44
3.3. AQUISIÇÃO E PRÉ-TRATAMENTO	49
3.4. EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS	52
3.4.1. Ângulo no vértice	54
3.4.2. Distâncias entre vértices	55
3.4.3. Importância das distâncias entre vértices	56
3.5. ROTULAÇÃO DOS FRAGMENTOS	57
3.6. CLASSIFICAÇÃO DOS FRAGMENTOS	61
3.6.1. Classificação com repetição de fragmentos candidatos a parceiros	61
3.6.2. Classificação sem repetição de fragmentos candidatos a parceiros	62
3.6.3. Classificação com processo de convergência	62
3.6.4. Principais Algoritmos	65
3.7. CONCLUSÃO	68
CAPÍTULO 4	69
PROTOCOLO EXPERIMENTAL E RESULTADOS OBTIDOS	69
4.1. INTRODUÇÃO	69
4.2. CLASSIFICAÇÃO COM REPETIÇÃO DE CANDIDATOS A PARCEIROS	70
4.3. CLASSIFICAÇÃO SEM REPETIÇÃO DE FRAGMENTOS CANDIDATOS A PARCEIROS ..	71
4.4. CLASSIFICAÇÃO COM CONVERGÊNCIA	72
4.5. CONCLUSÃO	79
CONCLUSÃO.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

Lista de Figuras

Figura 1.1	Departamento de documentoscopia do FBI remontando documento mutilado [FBI, 2004].	3
Figura 1.2	Um documento mutilado	4
Figura 1.3	Fragmentos de cerâmica de um sítio Pré-Histórico na Grécia [GLOWACKI-2004]	5
Figura 1.4	Áreas de aplicação para reconstrução de documentos: (a) Ciência Forense - análise de documentos questionados; (b) recuperação de livros; (c) remontagem de afrescos, painéis, murais, azulejos, etc; (d) documentos históricos.	6
Figura 2.1	(a) fragmento original em cores; (b) fragmento convertido para níveis de cinza; (c) limiarizada por Kittler [KITTLER & ILLINGWORTH, 1986]; (d) limiarizada por entropia [KAPUR et al., 1985]; (e) limiarizada por Otsu [OTSU, 1979].	13
Figura 2.2	(a) Ampliação da sombra na borda do fragmento de documento (b)	14
Figura 2.3	Máscaras do algoritmo de Robinson.	15
Figura 2.4	Máscaras do algoritmo de Sobel.	16
Figura 2.5	Máscaras de algoritmos de detecção de bordas em 2 etapas.	16
Figura 2.6	Máscara estruturante cruz [FACON, 1996].	17
Figura 2.7	Lenna: (a) imagem original; (b) imagem cinza; (c) Algoritmo Canny; (d) Algoritmo Prewitt; (e) Algoritmo Sobel $G(y)$; (f) Algoritmo Sobel $G= G(x) + G(y) $.	17
Figura 2.8	(a) Código de Cadeia de 4 direções (b) Código de Cadeia com 8 direções.	18

Figura 2.9	(a) Grade e contorno; (b) Reamostragem; (c) Código de Cadeia direcional de 4 segmentos; (d) Código de Cadeia Direcional de 8 segmentos.	19
Figura 2.10	Aproximação com 3 linhas para curva com 8 pontos [PEREZ & VIDAL, 1992].	22
Figura 2.11	(A) - ponto de mudança de direção original; (B) - nova posição pelo algoritmo.	23
Figura 2.12	Imagem com 29 vértices em uso pelo algoritmo Douglas-Peucker.	25
Figura 2.13	Passo de seleção vértice 9.	26
Figura 2.14	Passo de eliminação vértice 2.	26
Figura 2.15	Resultado do Algoritmo Douglas-Peucker na Figura 2.12.	26
Figura 2.16	Aproximação poligonal Douglas & Peucker com baixa tolerância.	27
Figura 2.17	Aproximação poligonal Douglas & Peucker: (a) com média tolerância; (b) elevadíssima.	28
Figura 2.18	Documento fragmentado através do método “spaghetti”.	29
Figura 2.19	Simulação do processo da ChurchStreet Technology, Inc. (a) documento em tiras; (b) tiras digitalizadas; (c) documento reconstruído [CHURCHSTREET, 2003].	29
Figura 2.20	Simulação do processo da ChurchStreet Technology, Inc. de tiras recortadas na vertical e aleatoriamente na horizontal [CHURCHSTREET, 2005b].	30
Figura 2.21	Fragmentos de documento triturado através de furos redondos.	31
Figura 2.22	Fragmentos de cerâmica para teste [LEITÃO, 2000].	32
Figura 2.23	Exemplo de filtragem de curvas de um fragmento [LEITÃO, 2000].	33
Figura 2.24	Montagem manual: (a) fragmentos identificáveis; (b) resultado obtido [LEITÃO, 2000].	35
Figura 2.25	Montagem manual do resultado obtido teste 2B [LEITÃO, 2000].	36

Figura 2.26	Parte do mapa e o resultado obtido usando o método [KONG & KIMIA, 2001].	38
Figura 2.27	Cerâmica e o resultado obtido usando o método [KONG & KIMIA, 2001].	38
Figura 2.28	(a) mapa; (b) cerâmica [KONG & KIMIA, 2001].	39
Figura 2.29	Características usadas por [YAO & SHAO, 2003].	40
Figura 2.30	(a) Imagem de teste; (b) Características extraídas [YAO & SHAO, 2003].	41
Figura 3.1	Esquema geral da metodologia de reconstrução de documentos mutilados.	44
Figura 3.2	Base de imagens PUCPR - (a) fragmento manuscrito rasgado; (b) fragmento tabela rasgado; (c) fragmento texto com imagens rasgado; (d) fragmento manuscrito cortado com estilete; (e) fragmento texto cortado com tesoura; (f) fragmento texto com imagens cortado com estilete.	45
Figura 3.3	Base de imagens PUCPR – documentos variados.	46
Figura 3.4	Base de imagens PUCPR – documento manuscrito.	47
Figura 3.5	Base de imagens PUCPR – documentos textos com figuras e outros detalhes.	47
Figura 3.6	Base de imagens PUCPR – Documento da base montado manualmente.	48
Figura 3.7	Fragmento de documento conforme digitalização original da base de imagens.	49
Figura 3.8	Fragmento do documento convertido para níveis de cinza.	49
Figura 3.9	Máscara para eliminação de grupamento menor que 9 pixels pretos.	51
Figura 3.10	Fragmento do documento com fundo eliminado.	51
Figura 3.11	Contorno do fragmento do documento com 1 pixel na linha da borda.	52

Figura 3.12	Aproximação poligonal sobre o contorno do fragmento.	52
Figura 3.13	(b) Resultado do algoritmo Douglas-Peucker aplicado em (a).	53
Figura 3.14	Esquema para cálculo ângulo α .	54
Figura 3.15	Característica ângulo côncavo ou convexo.	55
Figura 3.16	Distância (d_{AB}).	56
Figura 3.17	Importância da distância.	56
Figura 3.18	Vértices dos quais são extraídas as características.	57
Figura 3.19	Similaridade de ângulo no vértice.	58
Figura 3.20	Similaridade da característica distância.	59
Figura 3.21	Vértice com características combinando todas as similaridades.	60
Figura 3.22	(a) Melhor combinação entre os fragmentos i e j e (b) novo fragmento F_{ij} com três vértices removidos.	62
Figura 3.23	Passos do processo de reconstrução.	63
Figura 3.24	Vértices candidatos a parceiros em remontagem manual.	64
Figura 4.1	(a) parte de documento, (b) com exclusão de um fragmento.	74
Figura 4.2	Nível de convergência de acordo com a quantidade de fragmentos, baixa tolerância.	74
Figura 4.3	Fragmento de documento com contorno irregular.	76
Figura 4.4	Fragmento de documento com forma regular.	76
Figura 4.5	Vértices da aproximação poligonal com identificação de similaridades parceiras.	77
Figura 4.6	Vértices da aproximação poligonal sem identificação de similaridades parceiras.	77
Figura 4.7	Fragmentos (1 a 6) do documento 62 da base de imagens.	78
Figura 4.8	Início da remontagem manual do documento.	79
Figura 4.9	Seqüência da remontagem usando resultado da rotulação dos fragmentos: 3; 1; 2; 4; 5; 6.	79

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Métodos para reconstrução digital de documentos.	41
Tabela 3.1	Características do fragmento 1 do documento 13.	57
Tabela 4.1	Resultado do experimento 1.	70
Tabela 4.2	Resultado do experimento 2.	71
Tabela 4.3	Resultado do experimento 3.	72
Tabela 4.4	Resultado considerando documentos que convergiram 100% dos fragmentos.	73
Tabela 4.5	Resultado do experimento 3 por tipo de mutilação.	75

Lista de Símbolos

r	Cor vermelha
g	Cor verde
b	Cor azul
N	Tons de cinza
x	Uma coordenada espacial
y	Uma coordenada espacial
p	Pixel de uma imagem
N	Número total de pixels de uma imagem
L	Níveis de cinza em uma imagem
f_i	Frequência dos níveis de cinza em uma imagem
∇	Gradiente de uma imagem
p_1, p_2	Pontos distintos no plano
α	Número real qualquer que formula uma reta no plano
V	Conjunto de pontos no plano
S	Seqüência de segmentos conectados no plano
L	Linha poligonal
R	Reta no plano
R^2	Espaço dimensional 2
N	Pontos no plano
V_i	Vértice inicial
V_f	Vértice flutuante
DP	Retorno do algoritmo Douglas-Peucker
T	Banda de tolerância
F_1, F_2	Faixas paralelas entre o vértice âncora e o vértice flutuante
d	Distância entre os vértices
d_i	Distância sob análise

V_d	Vértice mais distante
k	Curvatura
t	Instante
c'	Primeira derivada da curva
c''	Segunda derivada da curva
V	Conjunto de candidatos verdadeiros
F	Conjunto de candidatos falsos
a, b	Cadeia de dados circulares descritores de um contorno
d	Número de diagonais da grade toroidal
y	Tamanho de uma seqüência circular
r	Elemento de uma seqüência
t	Par de amostras
k	Índice de elemento da diagonal
$\mathcal{T}_k$	Resultado da busca da discriminante Δ negativo do índice k
Δ	Discriminante
$\mathcal{T}$	Vetor contendo os candidatos
M	Linhas de uma tabela
N	Colunas de uma tabela
A	Candidato a parceiro
B	Candidato a parceiro
D	Custo total
ψ	Resultado que representa o custo
η	Primeiro termo da função
γ	Segundo termo da função
l_{Aw}, l_{Bw}	Segmento da curva do primeiro termo
a	Conjunto de pontos do segmento da curva
b	Conjunto de pontos do segmento da curva
R	Importância relativa dos custos referente comprimento e curvatura
S_{Aw}, S_{Bw}	Segmento da curva do segundo termo
c	Custos intermediários
S_P	Resultado do quebra-cabeça

P_0, P_1, P_{N-1}	Peças do quebra-cabeça
P_i	Uma peça do quebra cabeça
P_j	Peça candidata a parceira de outra peça do quebra-cabeça
P_k	Os outros vizinhos de P_j
Va	Vértice atual
Vt_1	Vértice anterior
U	Vetor
Vt_2	Vértice posterior
V	Vetor
d_{AB}	Distância Euclidiana entre os vértices atual e anterior
$T\alpha$	Tolerância do ângulo
T_d	Tolerância da distância
F_i	Um fragmento de um documento
D_{a1}, D_{a2}	Distância entre dois vértices
D_{b1}, D_{b2}	Distância entre dois vértices
A, B, C	Vértices do contorno de um fragmento
$W_{matching}$	Melhor resultado
F_l, F_i, F_n	Fragmentos de um documento
D	Um documento

Lista de Abreviaturas

BMP	Microsoft Windows Bitmap
CAD	Computer Aided Drawing
CIE	Commission Internationale l'Eclairage (Comissão Internacional de Iluminação)
DPI	Dots Per Inch (pontos por polegada)
DPI	Divisão de Processamento de Imagens (quando se referir ao INPE)
FBI	Federal Bureau of Investigation
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
OCR	Optical Character Recognition (Reconhecimento óptico de caracteres)
PPGIA	Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
RGB	Red, Green e Blue - Sistema de cores de arquivo de imagem
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SVM	Support Vector Machines (máquinas de suporte vetorial)

Resumo

Este trabalho apresenta um método para a reconstrução digital de documentos mutilados através de imagens utilizando aproximação poligonal. A reconstrução de documentos mutilados está relacionada à Ciência Forense. A Ciência Forense dedica-se a esclarecer dúvidas associadas a provas judiciais. A documentoscopia é uma subárea da Ciência Forense destinada à análise de documentos questionados. Na documentoscopia a recuperação de documentos mutilados tendo como elemento físico de base o papel, é desenvolvida de forma artesanal e requer equipamentos e pessoal especializado. Este trabalho estabelece a criação de uma base de dados de laboratório composta por imagens digitalizadas coloridas dos fragmentos dos documentos. O processo de reconstrução começa com a conversão das imagens para nível de cinza e o pré-tratamento que visa à eliminação do fundo e extração do contorno do fragmento. As características para identificação do fragmento são extraídas após a aplicação de aproximação poligonal no contorno das imagens. Através dos vértices resultantes da aproximação poligonal busca-se a vizinhança existente entre os fragmentos visando à rotulação para posterior reconstrução digital do documento. Se existirem todos os fragmentos, com a identificação dos vizinhos dos mesmos, o documento poderá ficar inteiramente rotulado para a reconstrução. O principal objetivo deste trabalho é a aplicação em atividades forenses, na reconstrução digital do documento questionado. Todavia a mesma técnica poderá ser testada no auxílio e recuperação de documentos históricos, remontagem de afrescos, murais, painéis, azulejos e quadros. O melhor resultado obtido na base imagens da PUCPR foi com baixa tolerância na banda da aproximação poligonal com 45% dos documentos convergindo todos os fragmentos e dentro deles apenas 13.33% apresentando falsos candidatos.

Palavras-Chave: Ciência Forense, reconstrução, documentos, imagem digital, aproximação poligonal.

Abstract

This work presents a method for the digital reconstruction of mutilated documents using digital images and polygonal approximation. The mutilated document reconstruction is related to Forensic Science. Forensic Science is dedicated to clarifying questions for judicial proofs. Documentoscopy is a sub-area of Forensic Science concerned with the analysis of questioned documents. In Documentoscopy the reconstruction of mutilated documents having as media the paper, is done in artisan form and require specialized equipment and staff. This work was been initiated with the creation of the laboratory database, composed by digitalized color images of fragments of documents. The reconstruction process starts with the conversion of the images for gray level and a pre-processing that aims at eliminating background and extraction of the contour of the fragment. The characteristics for fragment identification are extracted after the application of polygonal modeling on the images contour. The resulting vertexes of the polygonal model are used to search the neighborhood between fragments aiming at rotation for digital reconstruction of the document. If all fragments are present, identification of their neighbors' will allow the document to be entirely labeled for reconstruction. The main objective of this work is the application in forensic activities, in the digital reconstruction of the questioned document. However the same technique could be tested in the help and recovery of historical documents, re-assembly of frescos, mural, panels, tiles and pictures. The best result obtained in the images base of the PUCPR was with low tolerance in the band of the polygon approach with 45% of documents converging all fragments and inside of them only 13,33% presenting false candidates.

Words-key: Forensic science, reconstruction, documents, digital image, polygonal approximation.

Capítulo 1

Introdução

1. Contexto

Considerando-se que ciência é a disciplina ou o conjunto organizado de conhecimentos relativo à determinada área do saber [LAROUSSE, 1998]. A aplicação do conhecimento técnico-científico com o objetivo de esclarecer questões associadas a alguma prova, na esfera do Judiciário (criminal, cível e trabalhista), é conhecida como Ciência Forense. O conhecimento adquirido através da Ciência Forense corroborará a convicção do juiz sobre os elementos necessários para a decisão em um processo judicial.

Dentro da Ciência Forense a documentoscopia é a disciplina que trata do estudo ou análise de documentos. A mesma está associada a várias outras ciências, como a física, química, matemática, estatística e história da arte. A documentoscopia possui um largo espectro de aplicações na Criminalística, Engenharia, Artes, Informática, Arqueologia, Biblioteconomia, entre outras.

Em aplicações forenses, a documentoscopia é normalmente utilizada para determinar os fatos relacionados a uma prova específica, apensa aos autos do processo. Tais fatos podem estar relacionados, entre outras, à autenticidade, associação ou dissociação da autoria e determinação da contemporaneidade.

Para a documentoscopia um documento pode ser qualquer objeto ou fato que serve como prova, confirmação ou testemunho [LAROUSSE, 1998]. Entre outras situações, a classificação do objeto ou fato pode estar associada ao material ou base onde o mesmo foi apostado. Assim sendo, o registro dos fatos pode estar presente em: papéis, fitas de áudio, fitas

de vídeo, fotos, discos magnéticos, discos óticos, pinturas ou quadros, entre outros. Também pode ser encontrado em um pequeno fragmento dos mesmos.

Assim, a documentoscopia representa uma área importante de pesquisa e que possui ainda um vasto campo em aberto. O Departamento de Justiça dos Estados Unidos, através do FBI (Federal Bureau of Investigation) [FBI, 2004], por exemplo, mantém um departamento destinado à análise de documentos questionados, onde são efetuadas atividades associadas a essa área do conhecimento. Tais atividades envolvem exames de escrita manuscrita, assinaturas, textos datilografados, impressos, rasuras, alterações e obliterações.

Os processos descritos anteriormente possuem por si só um elevado grau de complexidade, sem considerar que muitos documentos são intencionalmente destruídos com a finalidade de ocultar informações que podem ser usadas como prova, dificultando a identificação ou interpretação de seu conteúdo, ou ainda escondendo ou disfarçando a verdadeira identidade do seu autor.

O êxito na perícia de um documento questionado depende muitas vezes, do estado de conservação do mesmo. Em determinados casos, o interesse do perito recai na identificação de determinada característica do documento, que foi completamente mutilado. Nesse caso, o mau estado de conservação deste, provocado por diferentes razões, conduz a uma análise pericial inconcludente.

A reconstrução de um documento mutilado é executada, na maioria das vezes, de forma manual, através de um processo complexo e de difícil execução, conforme mostra a Figura 1.1. Outro problema encontra-se na aplicação de métodos de reconstrução que modifique as propriedades do documento original, como o uso de colas ou adesivos, os quais podem provocar interferência nas propriedades químicas ou em eventuais impressões digitais, por exemplo.

Além da área forense constata-se que, mesmo com o advento da comprovação digital, a exemplo de transações bancárias eletrônicas, emissão de duplicatas comerciais via operações por meio magnético, prontuários médicos eletrônicos, atos jurídicos automatizados como o protesto de títulos por meio magnético, ainda persiste a larga utilização de documentos em papel.



Figura 1.1 – Departamento de documentoscopia do FBI remontando documento mutilado [FBI, 2004].

Documentos comprobatórios de transações devem ser mantidos para provas fiscais, criminais, contestações jurídicas, conteúdo histórico cultural, enfim existem muitos motivos para conservá-los. Em algumas situações, os prazos legais exigidos ultrapassam mais de 20 anos. Os documentos históricos não são considerados neste caso, pois os mesmos devem ser mantidos por tempo indeterminado.

O processo de preservação de documentos em papel usando métodos computacionais e processamento de imagens pode colaborar para sua conservação. A disponibilização desses documentos na forma digital permite que os originais resistam ao tempo e manuseio por mais tempo. Por outro lado, quando danificados, poderão ser reconstituídos através de meios computacionais. A reconstrução usando as características originais preservadas digitalmente deve recompor a estrutura do documento, permitindo a análise do seu conteúdo.

1.1. Desafio

Durante a vida útil de um documento ele pode sofrer mutilações. Essas mutilações podem ser naturais ou involuntárias e intencionais ou voluntárias [UNB, 2004]. A maioria das mutilações naturais decorre de aspectos de conservação, quando o documento pode sofrer influência de fatores como umidade, temperatura, poeira, poluição, fungos, insetos, microorganismos, catástrofes (enchentes, incêndios), etc. Já as mutilações intencionais ou voluntárias são efetuadas por pessoas com a ajuda de objetos como tesoura, régua, estilete, máquinas fragmentadoras, ou utilizando apenas as mãos para quebrar ou rasgar o documento. São incluídas nesse contexto as mutilações intencionais realizadas com o objetivo de destruir ou inutilizar documentos que poderiam ser utilizados como provas em contestações judiciais.

O presente trabalho será desenvolvido utilizando exclusivamente documentos em papel, fragmentados com formas irregulares intencionalmente, embora os resultados possam ser testados em outros problemas contendo fragmentos com formas regulares.

A identificação e catalogação dos fragmentos parceiros é o maior desafio para a remontagem de um documento mutilado, conforme mostrado na Figura 1.1.



Figura 1.2 – Um documento mutilado.

Para se ter êxito na reconstrução de um documento mutilado o principal aspecto a ser considerado é a conservação física dos fragmentos. Em alguns casos, o mau estado de conservação destes conduz a uma análise pericial inconcludente.

Atualmente o processo de reconstrução de um documento mutilado é executado na maioria das vezes de forma manual, conforme mostrado na Figura 1.1. Este procedimento pode, dependendo da complexidade da mutilação, vide Figura 1.2, e do tipo do documento, vide Figura 1.3, consumir vários dias de trabalho ou mesmo semanas.



Figura 1.3 - Fragmentos de cerâmica de um sítio Pré-Histórico na Grécia [GLOWACKI-2004]

A reconstrução digital fornece recursos que permitem a remontagem estrutural de um documento (objeto ou fato que serve como prova, confirmação ou testemunho) e viabiliza a

análise pericial do mesmo, sem provocar modificações no documento original. O presente trabalho propõe um método não destrutivo para a reconstrução digital dos documentos mutilados. Tal procedimento pretende auxiliar a reconstrução de documentos reduzindo drasticamente o tempo consumido por esta atividade.

O presente trabalho considera documentos tendo como elemento físico de base o papel fragmentados intencionalmente. Os outros tipos de mídias e mutilações não são objeto desse estudo.

1.2. Motivação

O trabalho de recuperação de documentos mutilados traz à discussão um campo de pesquisa abrangente, em função da existência de inúmeros interesses nesta recuperação. Neste contexto, se destacam: a aplicação em Ciência Forense (documentoscopia); recuperação de livros; reconstrução de documentos históricos; remontagem de afrescos, murais, painéis, azulejos e quadros, conforme exemplos na Figura 1.4.

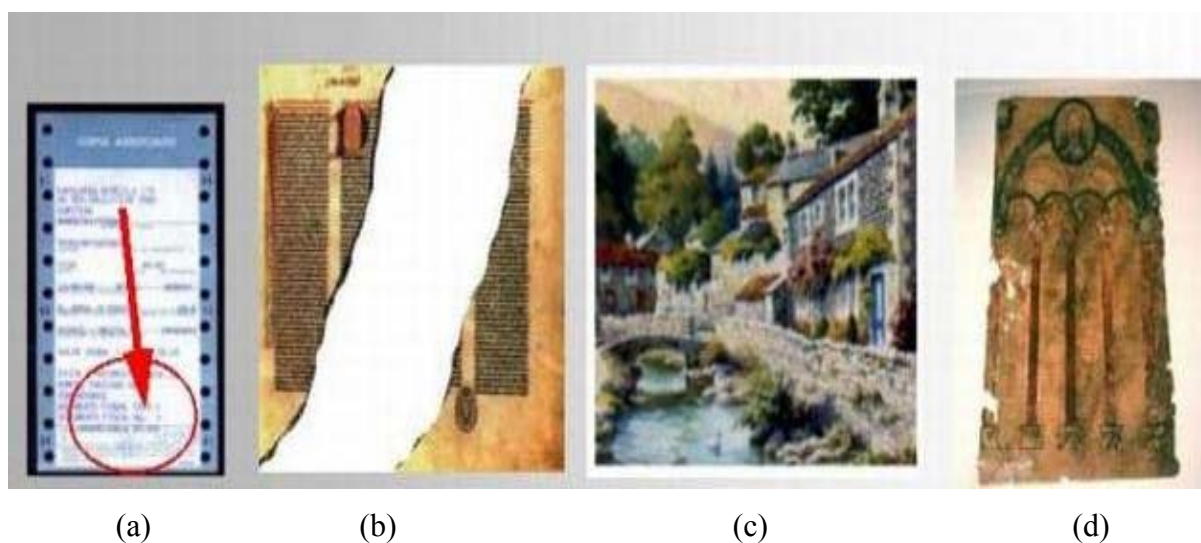


Figura 1.4 – Áreas de aplicação para reconstrução de documentos: (a) Ciência Forense - análise de documentos questionados; (b) recuperação de livros; (c) remontagem de afrescos, painéis, murais, azulejos, etc; (d) documentos históricos.

A recuperação do documento é desenvolvida, em geral, de forma artesanal e requer equipamentos e pessoal especializado. Embora esses documentos recuperados fiquem com o formato igual ao original, as partes danificadas ficam com textura e cores diferentes, além de

que, os textos e figuras existentes nestas partes danificadas ficam incompletos. Com o avanço dos meios computacionais é possível viabilizar a execução dessas tarefas, parcial ou totalmente, de forma automatizada ou semi-automatizada [LEITÃO, 2000], [RADACK & BADLER, 1982], [KONG & KIMIA, 2001], [CHURCHSTREET, 2003].

As dificuldades existentes na reconstrução de documentos mutilados e a evolução constante da computação mostram o quanto é necessário desenvolver atividades de pesquisa para automatizar esses procedimentos. Isso ocorre principalmente na área forense, onde se encontra um grande volume de documentos em papel utilizados como prova, o que vem demonstrar a importância do desenvolvimento desse trabalho.

1.3. Proposta

Este trabalho propõe a reconstrução digital de documentos mutilados com formas irregulares, através de imagens utilizando aproximação poligonal. De posse das imagens dos fragmentos do documento mutilado, o presente trabalho descreve um método para sua reconstrução digital. Essa reconstrução ocorre pela rotulação de cada fragmento. Poderá resultar em um documento não totalmente reconstituído em virtude de eventual falta de algum fragmento. A recomposição de eventuais partes faltantes no documento não é objeto de estudo do presente trabalho. Embora façam parte da base de imagens da PUCPR, os fragmentos com formas regulares servirão apenas para experimentos não sendo objeto desse trabalho, conforme será mostrado no capítulo 4.

1.4. Contribuição

O presente trabalho apresenta um método para auxiliar na reconstrução digital de documentos, de modo a permitir o manuseio através de uma versão digital. A maior contribuição desse trabalho está na rotulação dos fragmentos para a recomposição de documentos mutilados. O principal objetivo é sua aplicação em atividades forenses, na reconstrução digital do documento questionado. Todavia a mesma técnica poderá ser aplicada no auxílio e recuperação de documentos históricos, remontagem de afrescos, murais, painéis, azulejos e quadros.

1.5. Organização

Este documento é composto por quatro capítulos. O Capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica e apresentação dos sistemas existentes na área de digitalização e reconstrução de documentos mutilados. O Capítulo 3 mostra as etapas do processo desenvolvido para a rotulação dos fragmentos visando à reconstrução digital do documento e, ainda, são mostradas a criação e aquisição da base de imagens. A base encontra-se sobre os cuidados do Laboratório de Direito e Tecnologia – LADITEC, do Programa de Pós-Graduação em Direito Econômico e Social - PPGDES, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR. O Capítulo 4 apresenta os experimentos realizados, com os comentários e resultados alcançados e finalmente, são apresentadas as conclusões, com indicações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1. Introdução

Neste Capítulo são apresentadas as revisões bibliográficas sobre os temas abordados e utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Este Capítulo se divide em duas partes. A primeira parte tratando dos métodos de aquisição e pré-tratamento de imagens, incluindo-se os métodos para simplificação do contorno. A segunda parte tratando dos métodos de reconstrução digital de documentos.

2.2. Aquisição de Imagens

Preliminarmente para composição da base de documentos foi necessário escolher a forma de aquisição das imagens, que poderia ocorrer através do uso de câmera fotográfica, ou *scanner*. Observou-se na pesquisa que para documentos com superfície lisa, a exemplo de folha de papel, a melhor forma de aquisição é através de *scanner* de mesa [LEITÃO, 2000] [MELLO, 2002]. Porém se o documento possui superfície irregular a aquisição deverá ser através de câmera fotográfica digital, com posicionamento previamente analisado de forma a não perder nenhum detalhe do contorno, parte fundamental para análise das vizinhanças [LEITÃO, 2000].

A digitalização de imagens em formato binário (preto e branco) é o meio mais simples de armazenar qualquer documento em papel. É recomendada como solução final para armazenamento de originais que serão visualizados e impressos, mas raramente alterados. A digitalização em preto e branco é também o primeiro estágio na conversão de bibliotecas de documentos em arquivos eletrônicos [AJS, 2004].

Digitalizações em preto e branco podem ser feitas em desenhos de engenharia, textos, microfilmes e em qualquer original de uma cor [AJS, 2004]. Também podem ser digitalizados fotos e imagens em preto e branco, desenhos em escala de cinza e até fotos coloridas, mas a qualidade nesses casos é drasticamente reduzida. Arquivos preto e branco digitalizados no formato *raster* podem ser utilizados como modelos para conversão em outros formatos. Documentos texto OCR ou até mesmo formatos CAD (vetorização) podem ser gerados a partir dos arquivos originais, sendo encontradas as seguintes aplicações: criação de bibliotecas de desenhos (mapoteca eletrônica); distribuição eletrônica de documentos; modelos para vetorização ou reconhecimento de texto; uso de *softwares* específicos para tratamento de imagens em formato *raster*.

A digitalização de imagens em tons de cinza e em cores pode gerar arquivos enormes [AJS, 2004]. Como praticamente todos os pixels têm um valor definido, compactar os arquivos resulta em pouca redução. Esse tipo de digitalização é utilizado quando as informações de contexto da imagem são importantes para o destino final, sendo encontradas as seguintes aplicações: imagem de fundo em projetos finais ou em *software* de mapeamento como uma base para o desenho final; aplicações *desktop publishing*; análise de frequência do espectro de cores, particularmente em fotos de vegetação e infravermelho; aerofotogrametria; base cartográfica, e outras aplicações que considerem a análise do contexto do documento importante para sua finalidade, a exemplo das análises periciais em documentos sob contestação.

2.2.1. Pré-tratamento

Conversão para níveis de cinza - Existem diversos métodos para conversão de imagens coloridas para níveis de cinza [GONZALES & WOODS, 2000], [FACON, 1996], [CENTENO, 2004], [O’GORMAN & KASTURI, 1998]. O método padrão citado por todos os autores pesquisados é:

$$Cor = (r + g + b) / 3 \quad (2.1)$$

sendo *Cor* o tom de cinza resultante e *r*, *g* e *b* os respectivos tons de vermelho, verde e azul (tanto *Cor*, quanto *r*, *g* e *b* são valores entre 0 e 255).

Esse método é simples e rápido no processamento, porém o resultado apresenta pequenas distorções em virtude da aplicação de pesos idênticos para os níveis *r*, *g* e *b*.

O método que garante maior fidelidade aos detalhes de cor e luminância no resultado, conforme definido pela CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage* - *Comissão Internacional de Iluminação*) [CIE, 1931] [GOMES & VELHO, 2002] [MELLO, 2002], calcula a luminância de cada pixel como:

$$Cor = 0,3 * r + 0,59 * g + 0,11 * b \quad (2.3)$$

Binarização por limiar – Um método global de limiarização largamente utilizado é o baseado no histograma da imagem. O histograma é uma forma de representar a distribuição estatística dos níveis de cinza dos pixels. Esta distribuição pode também ser dada em termos da percentagem do número total de pixels da imagem. O histograma é obtido pela somatória da quantidade de pixels, por nível de cinza, ou seja, cria-se um vetor com todos os níveis de cinza e contabiliza-se a quantidade de pixels por nível [FACON, 1996]. Para efetuar a binarização, todos os pixels abaixo de um limiar de referência, são convertidos para o nível preto. Os acima são convertidos para nível branco. Assim obtém-se, a partir de uma imagem em tons de cinza, uma nova imagem em duas cores (preto e branco). Nesse processo uma imagem de entrada $f(x, y)$ com N tons de cinza produz uma imagem de saída $g(x, y)$ chamada de imagem limiarizada ou binarizada:

$$g(x, y) = 1 \text{ se } f(x, y) \geq T \quad (2.4)$$

sendo T o valor do nível de cinza determinado como limiar.

O problema para efetuar uma limiarização perfeita, de uma imagem através do histograma, consiste em como estabelecer o valor do limiar de referência a ser utilizado na conversão. Também, é necessário determinar se esse limiar será utilizado globalmente na imagem, ou se um valor de referência deverá ser calculado para cada região da imagem.

O método de limiarização por entropia utiliza uma abordagem local para medir o conteúdo de informação [KAPUR et al., 1985] [ABUTALEB, 1989]. Supondo-se N como sendo o número total de pixels em uma imagem, e que existem L ($0, 1, \dots, L - 1$) níveis de cinza na imagem. Então a probabilidade de um dado pixel ser de um nível de cinza específico é:

$$p_i = \frac{f_i}{N}, i = 0, 1, \dots, L - 1 \quad (2.5)$$

sendo f_i ($i = 0, 1, \dots, L - 1$) o número de pixels com nível de cinza i .

Portanto, pode-se concluir que:

$$\sum_{i=0}^{L-1} f_i = N \quad (2.6)$$

Sankur e Sezgin efetuaram a comparação de 40 algoritmos de limiarização locais e globais [SEZGIN & SANKUR, 2001] [SANKUR & SEZGIN, 2004]. Eles foram englobados em seis categorias, baseadas nas informações utilizadas, tais como histograma, atributos da imagem e agrupamentos de pixels. Os resultados levaram em consideração a combinação de outros parâmetros complementares, os quais são:

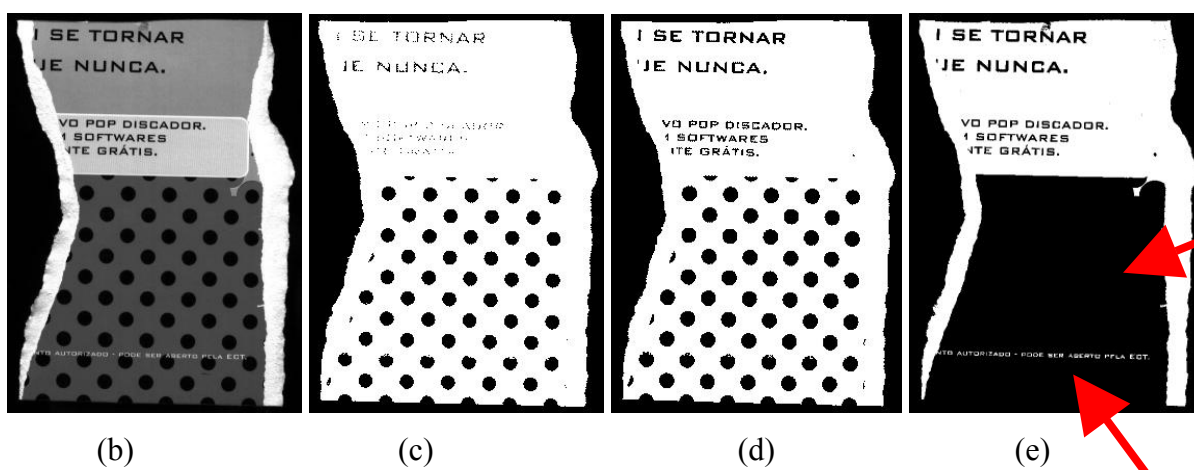
- Informações do histograma para detectar vales e planícies;
- Informação da entropia do histograma, com a maximização da soma das distribuições dos níveis de cinza da imagem sob análise;
- Agrupamento dos níveis de cinza através do algoritmo de Otsu [OTSU, 1979];
- Informação do atributo da imagem, aproximando a borda dos campos a partir do nível de cinza da imagem original;
- Informação espacial do contexto, pela sua probabilidade de co-ocorrência, e,
- Adaptação local, ou seja, adaptar o nível de cinza em conformidade com a sua variação local.

Na conclusão da análise, Sankur e Sezgin informam que o método de Kittler [KITTLER & ILLINGWORTH, 1986] é o melhor para imagens, ficando em segundo lugar o de entropia [KAPUR et al., 1985] e, para documentos com textos o método de Kittler foi o que obteve o melhor desempenho.

A Figura 2.1 apresenta os resultados de testes de limiarização efetuados com os melhores métodos sugeridos por Sankur e Sezgin aplicados em um documento mais complexo, contendo texto e imagens. Os métodos de Kitler, Figura 2.1(c), e Kapur, Figura 2.1(d) preservaram o contorno do fragmento de documento existente na imagem. O método de Kapur preservou mais informações do contexto do fragmento em comparação com o método de Kitler. Para comparação foi testada a limiarização usando a mesma imagem com o método de Otsu [OTSU, 1979]. O desempenho do método nessa imagem não foi bom. Parte da imagem do fragmento, que no original era vermelho, o método misturou com o fundo, conforme indicado pelas setas na Figura 2.1(e).



(a)



(b)

(c)

(d)

(e)

Figura 2.1 – (a) fragmento original em cores; (b) fragmento convertido para níveis de cinza; (c) limiarizada por Kittler [KITTLER & ILLINGWORTH, 1986]; (d) limiarizada por entropia [KAPUR et al., 1985]; (e) limiarizada por Otsu [OTSU, 1979].

A escolha de determinado método de limiarização depende do resultado que se deseja alcançar. Santos [SANTOS, 2004] ressalta em sua dissertação que no processo de binarização das imagens em níveis de cinza são utilizados métodos diferenciados dependendo da primitiva extraída. Continua Santos, o método global por entropia de Abutaleb [ABUTALEB, 1989] é previamente aplicado na base em níveis de cinza com o intuito de tornar o traçado mais espesso, juntamente com os processos morfológicos de abertura e fechamento, sendo esses últimos aplicados para retirada de pequenos ruídos existentes. A aplicação deste método

favorece as características estáticas e os segmentos mais relevantes. Finalmente, Santos ressalta que o método global de Otsu [OTSU, 1979], é usado mais especificamente para as características pseudodinâmicas, pois fornece uma representação mais fiel do traçado original.

Como visto até aqui a limiarização é um dos métodos para eliminação do fundo das imagens dos fragmentos. Porém, na aquisição das imagens, ocorrem interferências que dificultam o uso direto desse processo, como a introdução de sombras nas bordas dos fragmentos e a existência de informações relevantes adjacentes à borda do contorno, conforme mostrado na Figura 2.2(b).

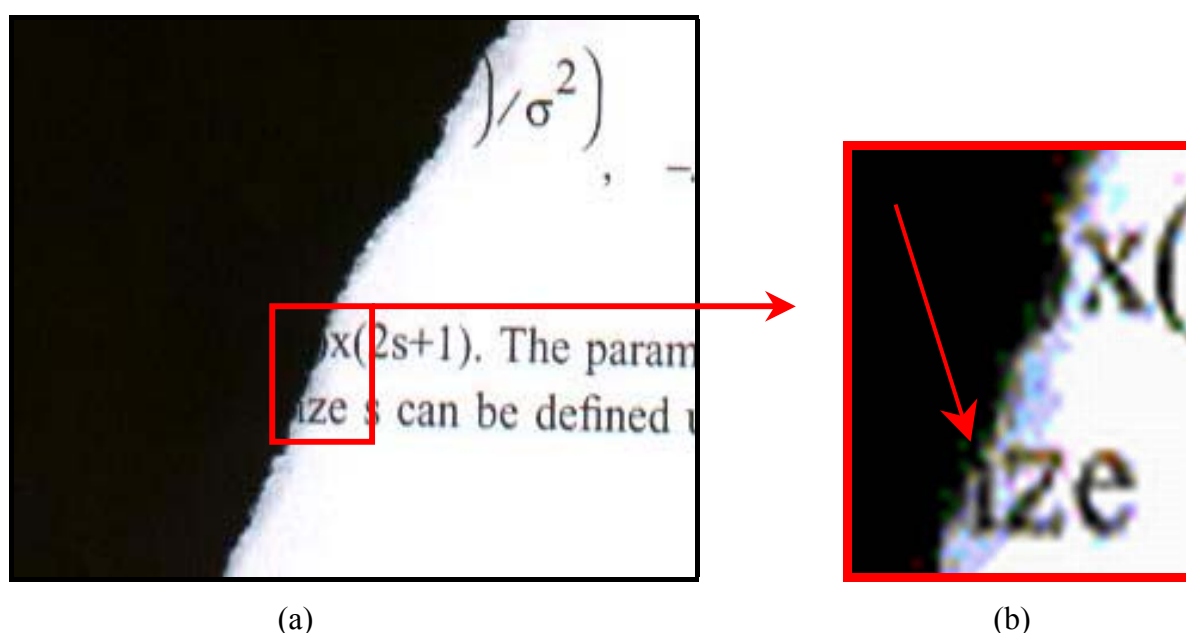


Figura 2.2 – (b) Ampliação da sombra na borda do fragmento de documento (a).

Realce de bordas - Além da binarização por limiar, outra maneira para se determinar o contorno dos fragmentos é através da detecção de bordas na imagem sob análise. Essa é uma das técnicas básicas utilizadas pela visão humana no reconhecimento de objetos [WANGENHEIM, 2004]. É o processo de localização e realce dos pixels de borda, aumentando o contraste entre o objeto e o fundo. Este processo verifica a variação dos valores de luminosidade de uma imagem, analisando a diferença de valores entre pixels vizinhos, para realçar as discontinuidades nos níveis de cinza.

Borda é a região da imagem na qual ocorre uma transição abrupta de níveis de cinza, entre um objeto e o fundo da imagem. Variações de intensidade complexas, que ocorrem em

uma região da imagem, são geralmente chamadas de textura. Um contorno é uma linha fechada formada pelas bordas de um objeto dentro de uma imagem.

Desde que uma borda é definida por uma mudança no nível de cinza, quando ocorre uma descontinuidade na intensidade, ou quando o gradiente da imagem tem uma variação abrupta, um operador que é sensível a estas mudanças, operará como um detector de bordas.

Cada operador possui uma metodologia de análise da variação de intensidade e apresenta resultado distinto, conforme ocorre a variação dos níveis de cinza, como mostra a Equação 2.7 [GONZALES & WOODS, 2000].

Neste caso o operador envolvido é o gradiente, e se a imagem é vista como uma função de duas variáveis $A(x, y)$ então o gradiente é definido como:

$$\nabla A(x, y) = \frac{\partial A}{\partial x} \cdot \frac{\partial A}{\partial y} \quad (2.7)$$

Alguns algoritmos para detecção de bordas são: Roberts, Sobel, Robinson e Marr-Hildreth [WANGENHEIM, 2004]. Esses algoritmos usam uma máscara para o operador com espaço de pixels iniciando em 2 x 2, e variando na seqüência para outros espaços. Na Figura 2.3 são mostradas 4 máscaras de Robinson das 8 que ele utiliza [WANGENHEIM, 2004]. As outras 4 máscaras são as negações dessas 4 apresentadas.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Figura 2.3 – Máscaras do algoritmo de Robinson.

Na Figura 2.4 estão apresentadas as máscaras $G(x)$ e $G(y)$ utilizadas pelo algoritmo de Sobel.

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \end{pmatrix}$$

$G(x)$ $G(y)$

Figura 2.4 – Máscaras do algoritmo de Sobel.

Outro método semelhante a Sobel é o de Prewitt, que também realça bordas onde a primeira derivada da intensidade da imagem se aproxima de máxima (ou mínima). Estes métodos executam o realce de bordas em duas etapas e são sensíveis a bordas horizontais e verticais, conforme mostrado nas máscaras da Figura 2.5.

$$\begin{array}{cc} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \\ \text{Vertical} & \text{Horizontal} \end{array}$$

Figura 2.5 – Máscaras de algoritmos de detecção de bordas em 2 etapas.

Mais complexo e mais preciso, o método de Canny [CANNY, 1986] se propõe a suavizar os ruídos e realçar mais eficientemente as bordas existentes na imagem. Conforme Equação 2.8, a função gaussiana de duas dimensões é utilizada como operador. Sendo x representado através de coordenadas polares (distância radial da origem ao ponto), o operador é dado por:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta} e^{\frac{-x^2}{2\delta^2}} \quad (2.8)$$

Para imagens binárias, bordas fechadas (contornos) de boa qualidade podem ser obtidas através dos processos morfológicos de erosão ou dilatação, usando o elemento estruturante cruz [FACON, 1996], apresentado na Figura 2.6. O elemento estruturante em cruz permite obter um contorno da espessura de um pixel. O contorno obtido por erosão situa-se exatamente na borda do conjunto de pixels processado, enquanto o obtido por dilatação se localiza um pixel fora desta borda. Este método de obtenção de bordas de imagens binárias efetua a extração de todas as bordas existentes na imagem, e não apenas do contorno externo que define a forma do fragmento.

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Figura 2.6 – Máscara estruturante cruz [FACON, 1996].

A exemplo dos métodos de limiarização, também a escolha de determinado método para detecção de bordas, depende do resultado que se deseja alcançar. Canny é o método que produz mais detalhes de bordas, conforme exemplos na Figura 2.7. A desvantagem é que ele tem pouca chance de apresentar um contorno fechado do documento. Os citados por [WANGENHEIM, 2004], apresentam mais definição nas bordas, porém apresentam a desvantagem de identificar menos bordas.



Figura 2.7 – Lenna: (a) imagem original; (b) imagem cinza; (c) Algoritmo Canny; (d) Algoritmo Prewitt; (e) Algoritmo Sobel $G(y)$; (f) Algoritmo Sobel $G=|G(x)|+|G(y)|$.

Como visto, a detecção de bordas através de operadores gradiente realçam todos os contornos existentes na imagem, não apenas o contorno externo do fragmento, o que nem sempre permite a extração de um contorno fechado do objeto.

Representação do contorno – Uma região pode ser representada em termos das características de perímetro, área, centróide, momento, pelos pixels que compõem a região, ou

por seu contorno [GONZALES & WOODS, 2000] [CENTENO, 2004] [SOLANA et al., 2002]. Uma vez escolhida uma das representações, o próximo passo é descrever a região baseada na representação escolhida. Para representar uma região da imagem por seu contorno, existem características específicas que podem ser utilizadas, tais como: tamanho (soma do número de pixels da linha que compõem o contorno do fragmento), orientações das retas que ligam os pontos extremos da região, número de mudanças de direções do contorno e distâncias entre elas, concavidades, etc.

O código de cadeia de Freeman [FREEMAN, 1974] é a técnica de representação mais fiel possível da forma da região. O mesmo é usado na representação do contorno por uma sequência conectada de segmentos de 4 ou de 8 segmentos, conforme mostra a Figura 2.8.

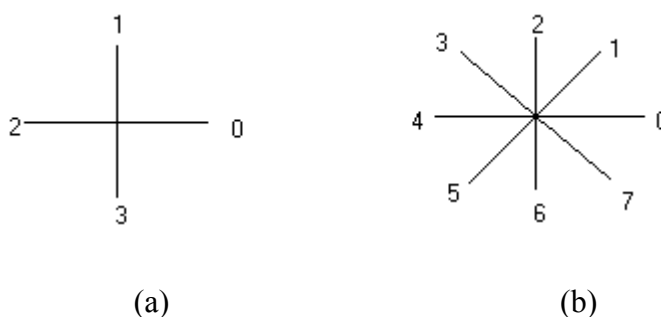


Figura 2.8 – (a) Código de Cadeia de 4 direções (b) Código de Cadeia com 8 direções.

Para fragmentos de forma completamente irregular esta codificação apresenta uma sequência muito longa e pode sofrer interferências devido a pequenas perturbações ao longo da borda, devido a ruído ou segmentação imperfeita.

Uma abordagem para contornar esse problema [GONZALES & WOODS, 2000] consiste em fazer a reamostragem do contorno da imagem, através de uma grade com espaçamento maior, conforme Figura 2.9(a). A nova representação é traçada atribuindo-se a cada nó da grade, um ponto de acordo com a proximidade do contorno, que está sendo percorrido, conforme Figura 2.9(b).

A partir desses pontos é traçado o novo contorno, usando um código de cadeia de 4 direções, conforme Figura 2.9(c), ou código de cadeia de 8 direções, conforme Figura 2.9(d).

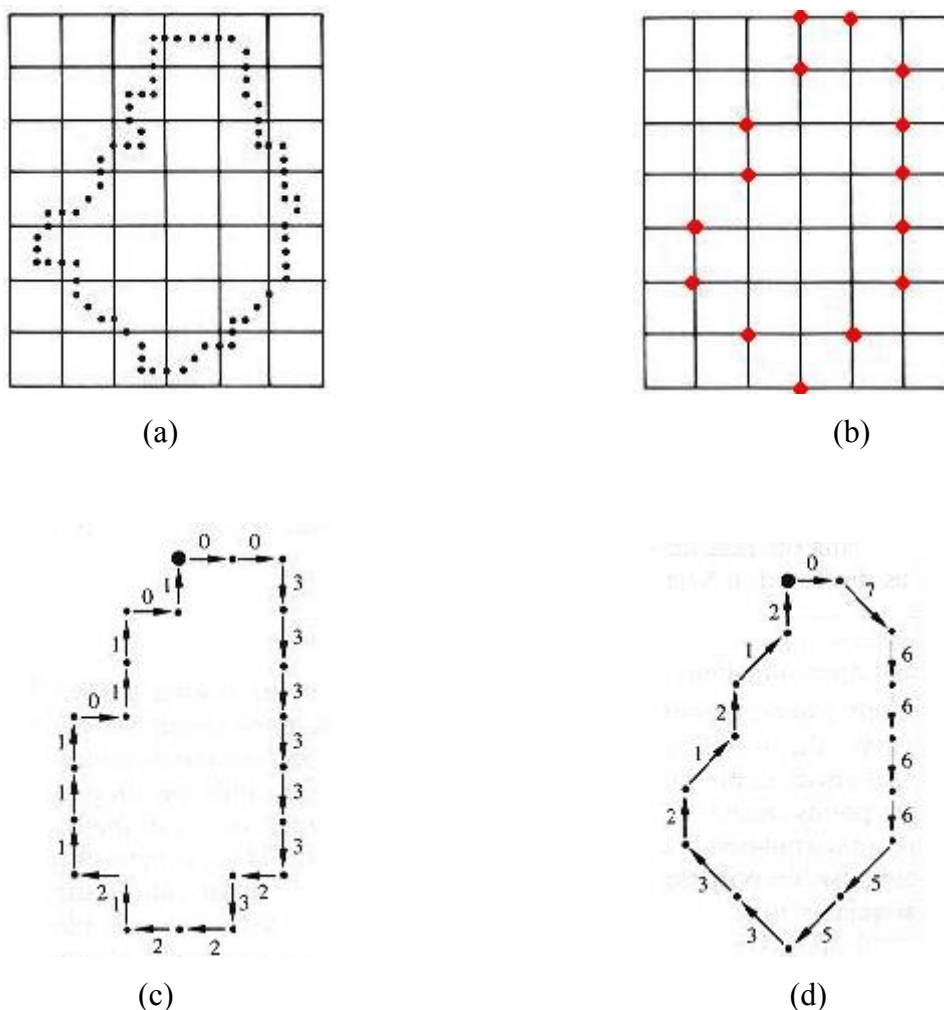


Figura 2.9 – (a) Grade e contorno; (b) Reamostragem; (c) Código de Cadeia direcional de 4 segmentos; (d) Código de Cadeia Direcional de 8 segmentos [GONZALES & WOODS, 2000].

Os pixels de um contorno podem ser percorridos por um caminho, e é possível escolher um caminho fechado para a travessia [GATO, 2000]. Para perseguição desse contorno e apresentação de sua imagem, um dos algoritmos mais utilizado é o proposto por Pavlidis [PAVLIDIS, 1982].

Este algoritmo possui um método para rastrear os pixels do contorno, percorrendo todo o seu comprimento e retornando ao ponto de partida. Através dele é possível identificar as coordenadas (x, y) da imagem, onde se localizam os pontos do contorno do fragmento sob análise.

O algoritmo de Pavlidis pode ser resumido assim:

Entrada: Imagem do contorno do fragmento;

Saída: conjunto de pontos com as coordenadas (x, y) da imagem;

Define P -> pixel corrente (*Varrendo a imagem da esquerda para direita e de cima para baixo*)

Define Inicio = P

Define P1; P2; P3 (*pixels em frente a P, sendo que P2 é o pixel diretamente em frente a P; P1 é o pixel à esquerda de P2; e P3 é o pixel à direita de P2*)

- **Se** P1 é preto -> Arquiva P1 em Saída e P=P1; **Senão**;
- **Se** P2 é preto -> Arquiva P2 em Saída e P=P2; **Senão**;
- **Se** P3 é preto -> Arquiva P3 em Saída e P=P3;
- **Se** P1, P2 e P3 não são preto - Gira 90 graus no sentido horário e reinicia as comparações;
- **Se** estes pixels forem brancos de novo – Gira 90 graus e reinicia as comparações;
- **Se** pela terceira vez todos forem brancos – Encerra o algoritmo porque significa que é um pixel isolado não conectado a outro pixel preto;
- **Se** P = Inicio -> **FIM.** (*Retornou ao ponto inicial*).

2.2.2. Aproximação Poligonal

Uma área de interesse na representação de figuras geométricas é dos Sistemas de Informações Geográficas – SIG, que analisam os dados armazenados através da forma vetorial.

Os SIG geralmente estão ligados ao uso de informação georreferenciada, em geral visualizável graficamente. Duas áreas da computação adquirem grande importância nesse contexto: processamento digital de imagens e computação gráfica. A primeira é essencial para o uso de imagens em SIG, em aplicações que vão desde a conversão de dados até o sensoriamento remoto. A segunda reúne as técnicas de tratamento e visualização de dados vetoriais, utilizando recursos da área de geometria computacional, que num sentido amplo compreende o estudo de algoritmos para resolver problemas geométricos em um computador [CÂMARA et al., 2004].

A geometria computacional procura desenvolver e analisar algoritmos e estruturas de dados para resolver problemas geométricos. Neste contexto, tem um ponto importante de contato com a área de projeto e análise de algoritmos, uma vez que também procura caracterizar a dificuldade de problemas específicos, determinando a eficiência computacional dos algoritmos e usando técnicas de análise de complexidade assintótica [KNUT, 1973].

Em um SIG vetorial, cada objeto é codificado usando um ou mais pares de coordenadas, o que permite determinar sua localização e aparência visual. Adicionalmente, os objetos são também caracterizados por atributos não-espaciais, que os descrevem e identificam univocamente. Este tipo de representação não é exclusivo do SIG, pois sistemas CAD (*Computer Aided Drawing*) e outros tipos de sistemas gráficos também utilizam representações vetoriais.

A maioria dos SIG comerciais considera apenas duas dimensões, e para isso utilizam as seguintes definições:

- **Ponto:** um *ponto* é um par ordenado (x, y) de coordenadas no plano R^2 ;
- **Reta e segmento de reta:** Sejam p_1 e p_2 dois pontos distintos no plano. A combinação linear $\alpha * p_1 + (1 - \alpha) p_2$, sendo α qualquer número real, é uma *reta* no plano. Quando $0 \leq \alpha \leq 1$ se tem um *segmento de reta* no plano, que tem p_1 e p_2 como *pontos extremos*. Assim, partimos para o conceito de *linha poligonal*, que é composta por uma seqüência de segmentos de reta. O mais comum, no entanto, é definir a linha poligonal através da seqüência dos pontos extremos de seus segmentos, ou seja, seus *vértices*;
- **Linha poligonal:** Sejam $v_0, v_1, \dots, v_{n-1}$ n pontos no plano. Sejam $s_0 = v_0, v_1, s_1 = v_1, v_2, \dots, s_{n-2} = v_{n-2}, v_{n-1}$ uma seqüência de $n-1$ segmentos, conectando estes pontos. Estes segmentos formam uma poligonal L se, e somente se, a interseção de segmentos consecutivos é o ponto extremo compartilhado por eles ($s_i \cap s_{i+1} = v_{i+1}$), segmentos não consecutivos não se interceptam ($s_i \cap s_j = \emptyset$ para todo i, j tais que $j \neq i + 1$), e $v_0 \neq v_{n-1}$. Ou seja, a poligonal não é fechada. Os segmentos que compõem a poligonal se tocam nos vértices. Formalmente, poligonais que não obedecem a este critério são chamadas poligonais *complexas*;
- **Polígono:** Um polígono é a região do plano limitada por uma linha poligonal fechada. Observe-se também que o polígono divide o plano em duas regiões: o interior, que convencionalmente inclui a fronteira (a poligonal fechada) e o exterior. Assim, quando

utilizamos a expressão *vetores* nos referindo a SIG, estamos mencionando alguma combinação de pontos, linhas poligonais e polígonos.

O contorno de um fragmento de documento, em uma imagem digital, pode ser aproximado com uma precisão arbitrária, de acordo com a necessidade de detalhamento que o processo exigir para sua análise. No caso de uma curva, a aproximação será tanto mais exata quanto mais o número de segmentos se aproximar do número de pontos que a compõem. Porém o objetivo da aproximação poligonal é exatamente o inverso, porque pretende representar o contorno do objeto com o menor número possível de pontos.

Existem várias abordagens para conseguir uma descrição do contorno através de aproximações [PEREZ & VIDAL, 1992]. Uma delas é a de se ligar os pontos ao longo do contorno, até que o erro mínimo entre o contorno e uma linha ajustada aos pontos ligados, exceda um determinado limiar. Essa abordagem pode ser definida em como achar um conjunto R de linhas $(y = a_1 + b_1x)$, $(y = a_2 + b_2x)$,... $(y = a_r + b_rx)$ em R^2 , que se ajustam num conjunto ordenado de N pontos (x_1, y_1) , (x_2, y_2) ,... (x_n, y_n) , veja exemplo na Figura 2.10.

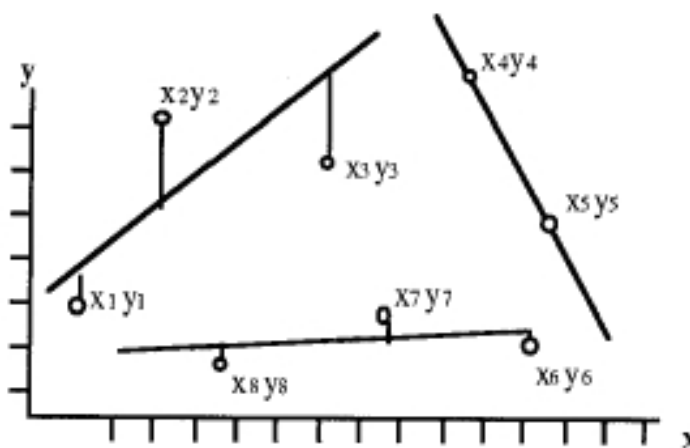


Figura 2.10 - Aproximação com 3 linhas para curva com 8 pontos [PEREZ & VIDAL, 1992].

Essa abordagem tem o inconveniente de não representar os pontos máximos de inflexão onde eles realmente se localizam. Exemplificando, se a linha sob análise passar por um canto do contorno do fragmento, a mudança de direção somente irá ocorrer quando os pontos absorvidos atingirem o limiar do erro mínimo considerado, conforme mostra a Figura 2.11.

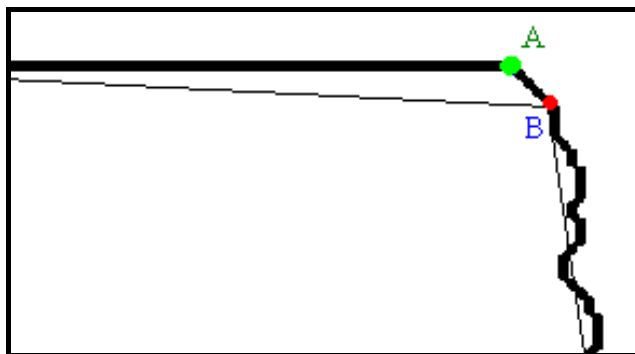


Figura 2.11 – (A) - ponto de mudança de direção original; (B) - nova posição pelo algoritmo.

Cortez [CORTEZ, 1996] em seus estudos de mestrado e doutorado fez várias pesquisas sobre aproximação poligonal [CORTEZ & CARVALHO, 1993], [CORTEZ & CARVALHO, 1995], [CORTEZ et al., 1995], [CORTEZ et al., 1996] e [CORTEZ & CARVALHO, 1997]. As pesquisas dele iniciaram com Ayache e Faugeras [AYACHE & FAUGERAS, 1986]. Prosseguindo as pesquisas Cortez dividiu os algoritmos em duas classes: iterativos e seqüenciais [JUNIOR & LINHARES, 1990]. Os algoritmos iterativos citados por Cortez são: Ramer [RAMER, 1972], Pavlidis e Horowitz [PAVLIDIS & HOROWITZ, 1974] e Sato [SATO, 1992]. Os seqüenciais são: Kung e Kaswand [KUNG & KASWAND, 1983], Cortez e Carvalho [CORTEZ & CARVALHO, 1992], e, Ray e Ray [RAY & RAY, 1993].

Cortez também propôs um algoritmo seqüencial de modelagem poligonal de contornos bidimensionais [CORTEZ & CARVALHO, 1994], criado a partir do método não convencional desenvolvido por Cheng e Hsu [CHENG & HSU, 1988].

A literatura apresenta outros métodos para o problema de aproximação poligonal, nos quais diferentes aspectos são observáveis, tais como: grau de correção, eficiência computacional e generalização dinâmica [DAVIS JR, 1998].

Alguns desses algoritmos citados por Davis Jr:

- k-ésimo vértice - [TOBLER, 1964];
- Vértice aleatório - [ROBISOM et al., 1978];
- Jenks - [JENKS, 1981];
- Reumann-Witkam - [REUMANN & WITKAM, 1974];
- Lang - [LANG, 1969];
- Douglas-Peucker - [DOUGLAS & PEUCKER, 1973];
- Zhao-Saalfeld - [ZHAO & SAALFELD, 1997];
- Visvalingam-Whyatt - [VISVALINGAM & WHYATT, 1993].

Davis fez um estudo destes algoritmos e destaca a existência de muitos com boa eficiência computacional e comportamento geométrico aceitável dentro de limites desejados para o método a ser desenvolvido [DAVIS JR, 1998].

O algoritmo de Douglas-Peucker [DOUGLAS & PEUCKER, 1973] se destaca por ser o mais utilizado nos sistemas comerciais e por viabilizar a construção de uma árvore binária para estruturar o resultado do processamento. É também um algoritmo que apresenta bons resultados na simplificação com tolerâncias baixas, com a manutenção de uma parcela significativa dos vértices. No entanto, seu comportamento geométrico deixa a desejar em situações de simplificação mais radical, com mudanças de escala relativamente grandes. Este algoritmo é o mais conhecido e utilizado na simplificação de poligonais, e já foi alvo de aprofundados estudos [HERSBERGER & SNOEYINK, 1992], [EBISCH, 2002]. É reconhecidamente o melhor em termos de preservação das características da poligonal original [MARINO, 1979] [McMASTER, 1987]. Tem sido o mais utilizado em aplicações de geoprocessamento.

O algoritmo Douglas-Peucker é recursivo. A cada passo o mesmo processa um intervalo contido entre um vértice inicial V_i (chamado de âncora) e um vértice final V_f (denominado flutuante) $DP = (V_i, \dots, V_f)$. É estabelecido um corredor de largura igual ao dobro da banda de tolerância T , formando duas faixas paralelas $\{F_1, F_2\}$ ao segmento entre o âncora e o flutuante, confira na Figura 2.12. A seguir, são calculadas as distâncias de todos os pontos intermediários ao segmento básico, ou seja, contidos entre o âncora e o flutuante. Considerando cada ponto como $A = (x_o, y_o)$ a distância em relação a $L := \alpha x + \beta y = \kappa$ (segmento básico), é dada por:

$$d(A, L) = \frac{|\overrightarrow{A'A}|}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} = \frac{|\alpha x_o + \beta y_o - \kappa|}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (2.9)$$

Caso nenhuma das distâncias calculadas ultrapasse a tolerância $\{d_{ij}\} \leq T$, ou seja, nenhum vértice fica fora do corredor; então os vértices intermediários são descartados.

Caso alguma distância seja maior que a tolerância $\{d_{ij}\} > T$, o vértice mais distante V_d é preservado, e o algoritmo é reiniciado em duas partes: entre o âncora e o vértice mais distante (novo flutuante) $DP = (V_i, \dots, V_d)$; e entre o vértice mais distante (novo âncora) e o flutuante original $DP = (V_d, \dots, V_f)$. Pelo algoritmo Douglas-Peucker, no exemplo da Figura

2.12, na primeira iteração são calculadas as distâncias dos vértices 2 a 28 até o segmento de reta L definida pelos vértices 1 (V_i) e 29 (V_f). O vértice mais distante nesta primeira iteração é o 15, a uma distância muito superior à tolerância T , conforme mostra V_d na Figura 2.12.

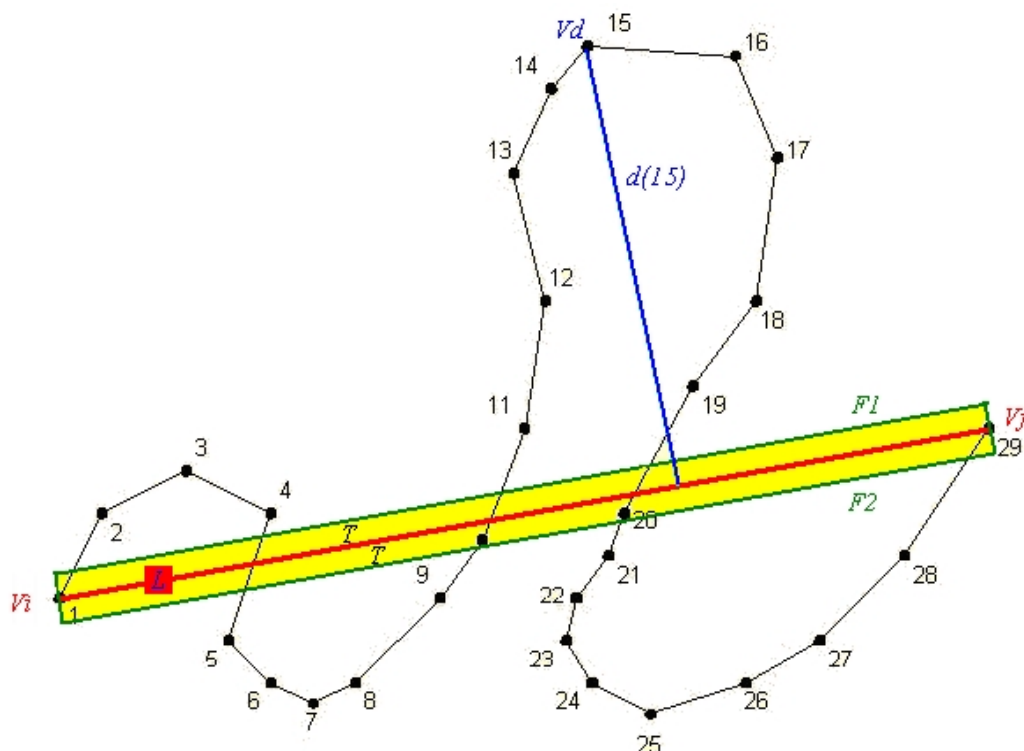


Figura 2.12 – Imagem com 29 vértices em uso pelo algoritmo Douglas-Peucker.

A Figura 2.13 mostra quando o algoritmo cria um novo segmento no vértice 9 e a Figura 2.14 mostra quando o algoritmo elimina o vértice 2 por estar dentro da faixa de tolerância.

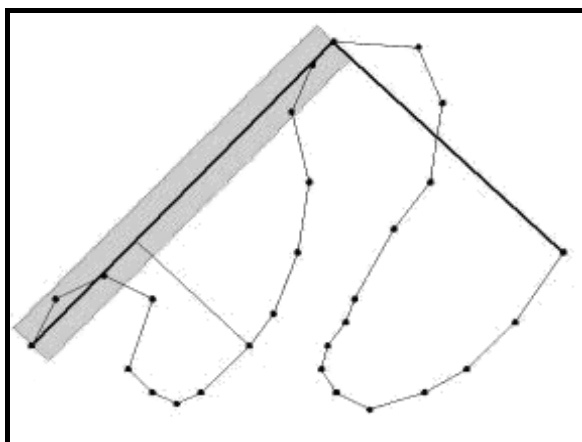


Figura 2.13 – Passo de seleção vértice 9.

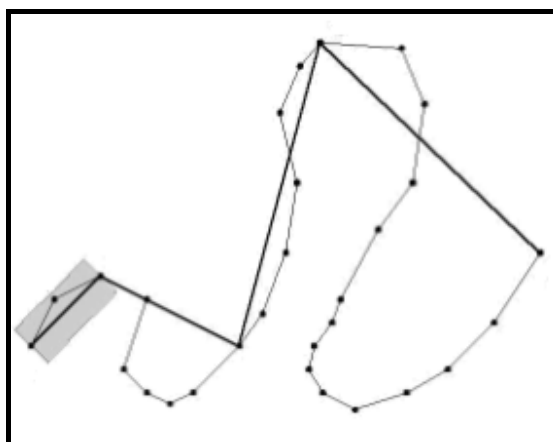


Figura 2.14 – Passo de eliminação vértice 2.

comportamento da aproximação poligonal conforme a variação da tolerância através das Figuras 2.16, 2.17a, e 2.17b.

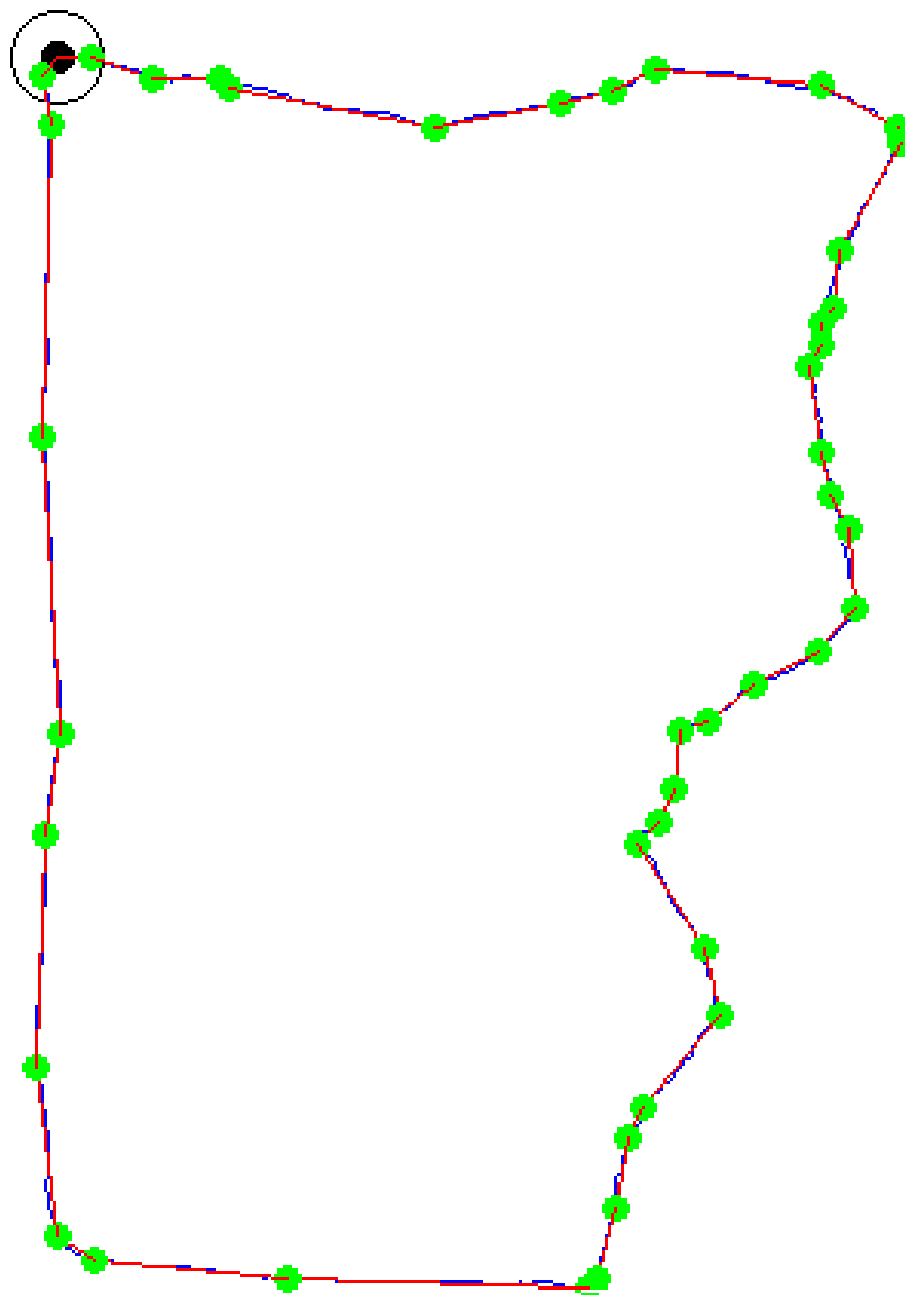


Figura 2.16 – Aproximação poligonal Douglas & Peucker com baixa tolerância.

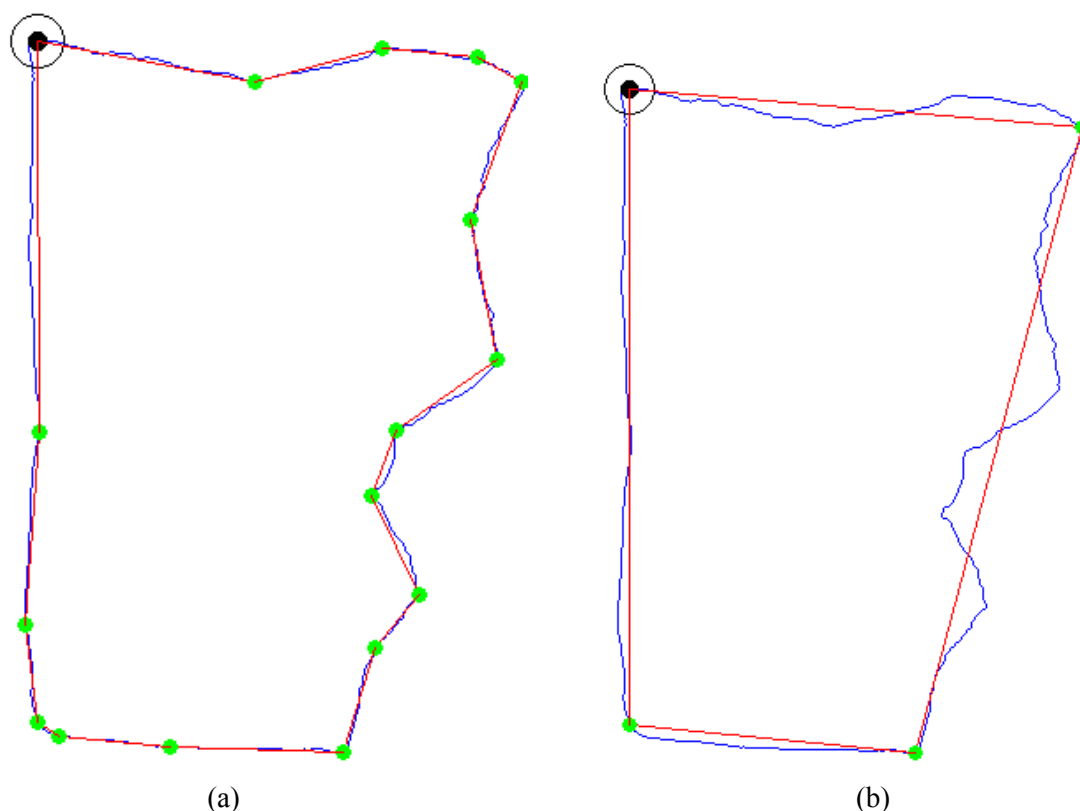


Figura 2.17 – Aproximação poligonal Douglas & Peucker: (a) com média tolerância; (b) elevadíssima.

2.3. Reconstrução de documentos digitais

Na área de reconstrução digital de documentos já existe sistema que efetua a reconstrução semi-automática de documentos fragmentados conforme mostrado a seguir.

2.3.1. Sistema para reconstrução de fragmentos “Spaghetti”

O sistema desenvolvido pela ChurchStreet Technology, Inc. [CHURCHSTREET, 2003] é destinado à reconstrução semi-automática de documentos triturados em formas regulares. Estes documentos são produzidos por máquinas que cortam o documento em tiras, também conhecido como triturador “*spaghetti*”, conforme Figura 2.18. O sistema funciona em três etapas:

- digitalização – conversão das tiras em imagens digitais;
- catalogação – busca das características gráficas no contexto da tira;
- reconstrução – colocação das tiras na ordem correta.

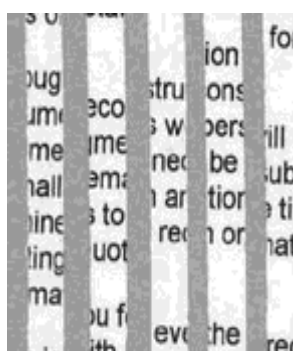


Figura 2.18 – Documento fragmentado através do método “spaghetti”.

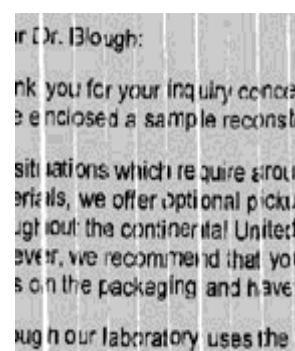
O processo inicia lendo e atribuindo um identificador eletrônico único a cada tira; depois compila as tiras que contêm traços similares. A tarefa seguinte é colocar as tiras na ordem apropriada para reconstrução da página [CHURCHSTREET, 2003], conforme mostra a simulação da Figura 2.19.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.19 – Simulação do processo da ChurchStreet Technology, Inc. (a) documento em tiras; (b) tiras digitalizadas; (c) documento reconstruído [CHURCHSTREET, 2003].

Por outro lado, em decorrência do desenvolvimento desse sistema automático de reconstrução de documentos, os fabricantes de trituradores de papéis desenvolveram novos

equipamentos. Esses novos trituradores fazem o corte das tiras na vertical e aleatoriamente na horizontal, resultando em pequenos retângulos de papel, de tamanhos variados e formas regulares.

Da mesma forma, no final de 2004, a ChurchStreet Technology, Inc. informa ter desenvolvido nova tecnologia [CHURCHSTREET, 2005a], sobre a qual não publicou a metodologia. A partir daí passou a trabalhar com esse novo tipo de fragmento através do envio das tiras dos documentos para seu laboratório com a devolução do resultado através de arquivos magnéticos, veja na Figura 2.20.

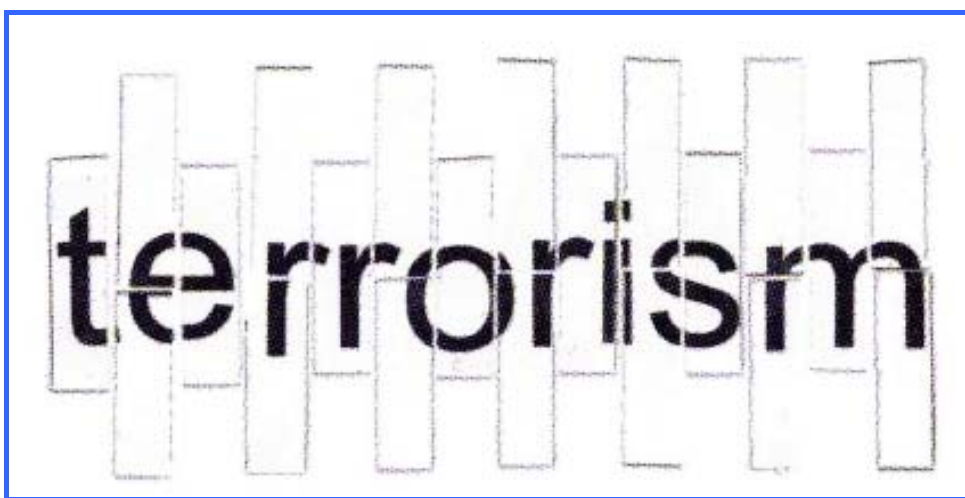


Figura 2.20 – Simulação do processo da ChurchStreet Technology, Inc. de tiras recortadas na vertical e aleatoriamente na horizontal [CHURCHSTREET, 2005b].

O sistema da ChurchStreet Technology, Inc. tem a vantagem de fazer a reconstrução automática de documentos triturados em tiras, de formas regulares, usando as características do contexto do fragmento. A desvantagem é que, para ele funcionar corretamente, devem existir todos os fragmentos do documento, que precisam ser separados e preparados manualmente para digitalização. Se houver partes de diversos documentos misturadas o sistema não efetua a separação e conseqüentemente não reconstrói o documento. Outra desvantagem é que o método não preserva a integridade do documento, em virtude do manuseio dos fragmentos. Essa manipulação pode interferir na análise forense de outras características importantes, tais como impressões digitais, elementos químicos, etc. [CHURCHSTREET, 2005a]. Este processo trata especificamente de documentos triturados em tiras com formas regulares.

Existe perigo na utilização desse triturador de papel do modelo “*spaghetti*” para destruição de documentos importantes em virtude da facilidade com que se recupera a informação existente nos fragmentos regulares resultantes dessa trituração [MURRAY, 2003].

Já existem outros modelos de triturador que faz o recorte redondo, resultando em inúmeros fragmentos circulares ou de formas irregulares, conforme mostra a Figura 2.21. Este tipo de triturador é utilizado por bancos, para destruir os cheques emitidos por seus clientes, 60 dias após a microfilmagem dos mesmos. Também é utilizado pelo Banco Central do Brasil para fragmentar as notas de dinheiro que foram retiradas de circulação em virtude de estarem mutiladas, para o reaproveitamento do papel moeda.

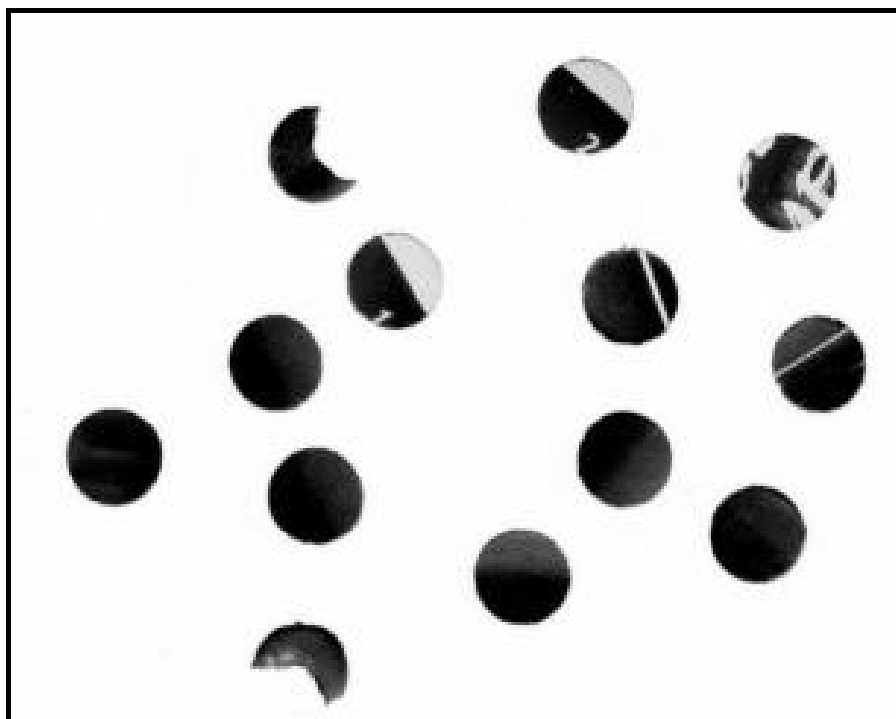


Figura 2.21 – Fragmentos de documento triturado através de furos redondos.

2.3.2. Reconstrução de cerâmicas fragmentadas

Leitão apresenta um método para achar os pares adjacentes de objetos cerâmicos quebrados ou partidos com formas irregulares [LEITÃO, 2000]. As Figuras 1.3 e 2.22 mostram a complexidade existente na reconstrução desse tipo de artefato.

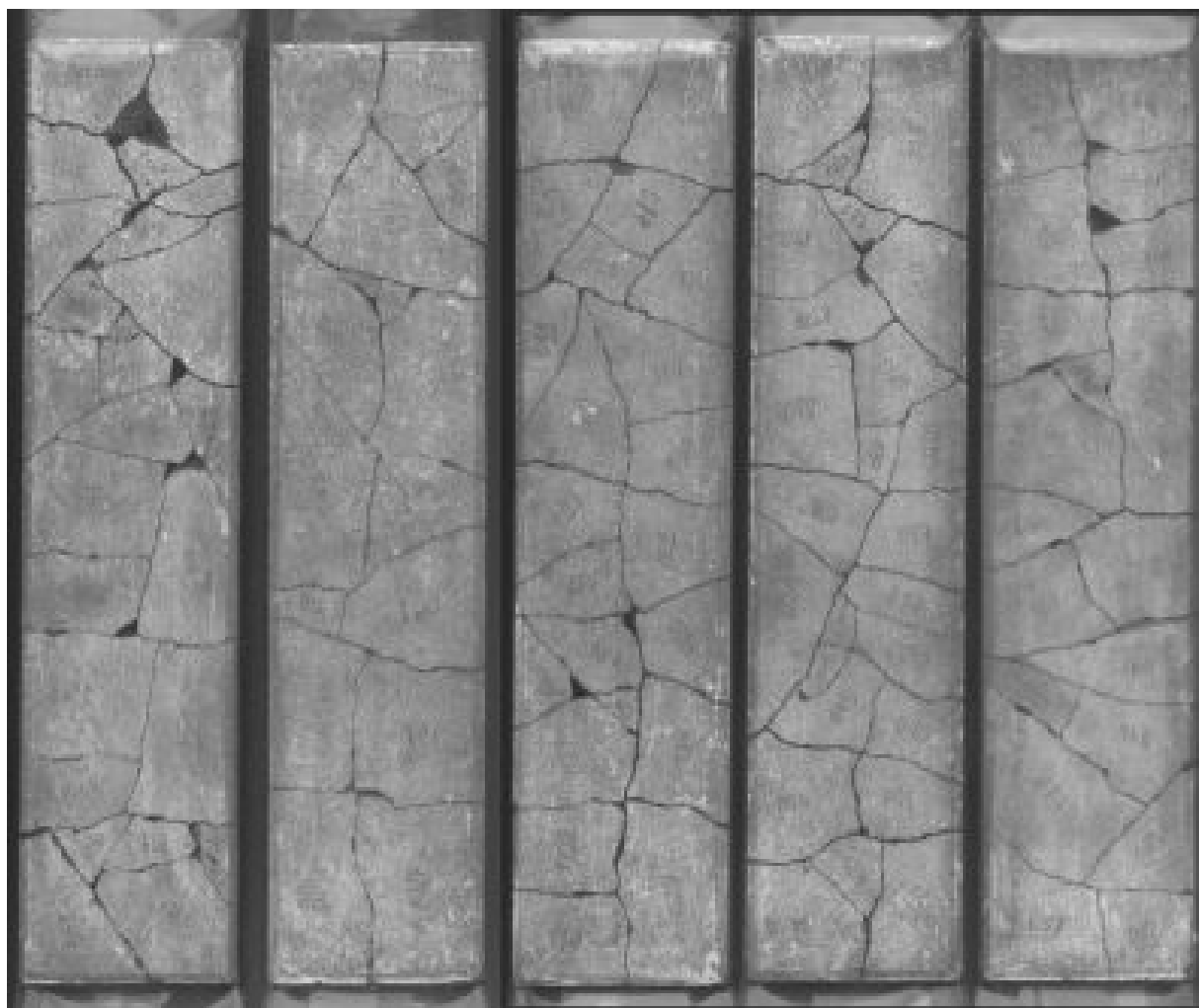


Figura 2.22 – Fragmentos de cerâmica para teste [LEITÃO, 2000].

O método de reconstrução pode ser dividido conceitualmente em duas etapas: a identificação de fragmentos adjacentes e a montagem propriamente dita. O trabalho de Helena Leitão foi desenvolvido visando apenas o primeiro passo, em que são identificados os pares de fragmentos adjacentes, baseado na comparação das curvaturas codificadas, Equação 2.10, dos contornos dos fragmentos, conforme mostra a Figura 2.23.

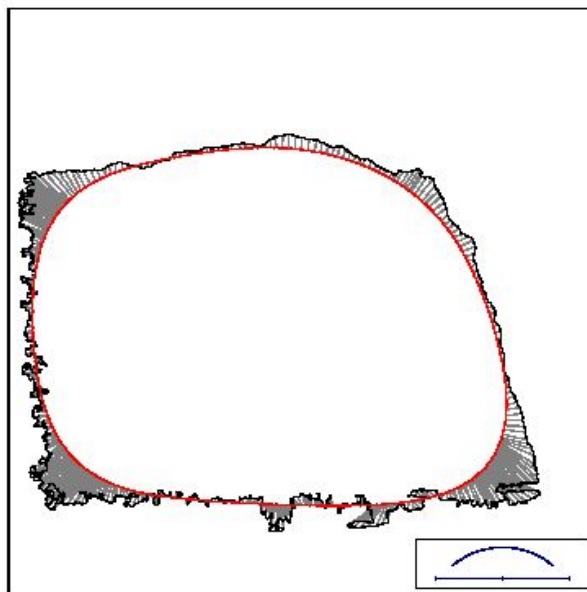


Figura 2.23 – Exemplo de filtragem de curvas de um fragmento [LEITÃO, 2000].

A curvatura num instante t é dada pela seguinte expressão:

$$k(t) = \frac{|c'(t) \times c''(t)|}{|c'(t)|^3} \quad (2.10)$$

sendo $c'(t)$ a primeira derivada da curva e $c''(t)$ a segunda derivada.

Uma desvantagem do uso da curvatura é que curvas muito distintas podem ter gráficos de curvatura parecidos [LEITÃO, 2000].

Para desenvolvimento do trabalho Leitão utilizou-se dos seguintes conceitos: “Suponha que cada contorno é uma curva simples fechada, representada por uma sequência de *amostras*. Cada amostra pode ser um ponto do contorno – ou qualquer outra propriedade local, geométrica ou física. Também suponha que as amostras são uniformemente espaçadas ao longo do contorno, e que o intervalo de amostragem δ é aproximadamente o mesmo para todos os contornos”. E, ainda, que “Um *candidato* é um par de segmentos pertencentes a contornos diferentes. Diz-se que um candidato é *verdadeiro* se os seus segmentos correspondem à mesma linha de fratura ideal, e diferem somente pelos erros de aquisição da imagem ou pela perda de migalhas. Caso contrário, diremos que o candidato é *falso*. Denotam-se por V e F os conjuntos de todos os candidatos verdadeiros e falsos, respectivamente, que existem no conjunto de contorno dados”.

A autora enfatiza que: “Note que quando se extrai o contorno de um fragmento segue-se sua fronteira no sentido anti-horário. Sendo assim, dois segmentos, que compartilham uma mesma linha de fratura são percorridos em direções opostas. Sempre que se comparam dois segmentos, supõe-se que um deles foi invertido, para compensar este fato” [LEITÃO, 2000].

O método utilizado por Leitão consiste em: Dadas duas cadeias circulares $a = a_0, \dots, a_{n_a-1}$ e $b = b_0, \dots, b_{n_b-1}$, sendo que cada uma descreve o contorno de um fragmento (circular) distinto, consideramos o conjunto de pares (i, j) , sendo i um índice em a e j é um índice em b . Estes pares podem ser interpretados como os vértices de uma grade toroidal com períodos n_a e n_b . Um casamento perfeito é então uma sequência de pares (i, j) ao longo de uma mesma diagonal desta grade.

O número de diagonais d da grade toroidal é o máximo divisor comum de n_a e n_b . Cada diagonal é uma sequência circular de tamanho $\gamma = n_a n_b / d$. Numeramos as diagonais de 0 a $d - 1$, e indexamos os elementos de cada diagonal de 0 a $\gamma - 1$. O elemento de índice r da diagonal de número t corresponde ao par de amostras (a_i, b_j) sendo $i = k$ e $j = (t - k)$ módulo n_b . Cada diagonal t é processada em separado. Para cada elemento da diagonal de índice k , calculamos um valor booleano $\mathcal{T}_k$ que informa se os pares a_i e b_j correspondentes aos $n_{\min}$ elementos consecutivos da diagonal, a partir do elemento k , têm discriminante Δ negativo conforme Equação:

$$\Delta(a, b; r, s) = \sum_{k=0}^{p-1} d^2(a, b; r_k, s_k, r_{k+1}, s_{k+1}) + \delta n_{\min} \xi^2 \quad (2.11)$$

Finalmente, percorre-se o vetor $\mathcal{T}$, devolvendo como candidatos iniciais todos os trechos maximais de elementos verdadeiros [LEITÃO, 2000]. A solução apresentada é um conjunto de candidatos supostamente verdadeiros, que deve corresponder aos pares dos fragmentos adjacentes do objeto original.

Para validação Leitão [LEITÃO, 2000] realizou dois testes: No primeiro teste foi utilizado um fragmento de papel com 20 pedaços, sendo que o algoritmo devolveu 28 pares de possíveis candidatos a parceiros. Destes, após análise, resultaram 11 verdadeiros, dentre os 15 pares considerados reconhecíveis pelos parâmetros utilizados no teste. Os outros 17 foram considerados falsos positivos; No segundo teste, que por sua vez foi dividido em duas etapas,

foram utilizados 5 ladrilhos retangulares de cerâmica não vitrificada, mostrados na Figura 2.22, os quais foram quebrados em 112 pedaços.

No 2º. teste parte A o parâmetro de comprimento mínimo para cada pedaço foi estabelecido em 250 pixels o que permitiria identificar os pedaços assinalados na Figura 2.24a. O algoritmo retornou 22 pares de candidatos, dos quais 3 foram considerados falsos positivos. Esse resultado foi montado manualmente conforme demonstrado na Figura 2.24b, com os grafos de adjacências.

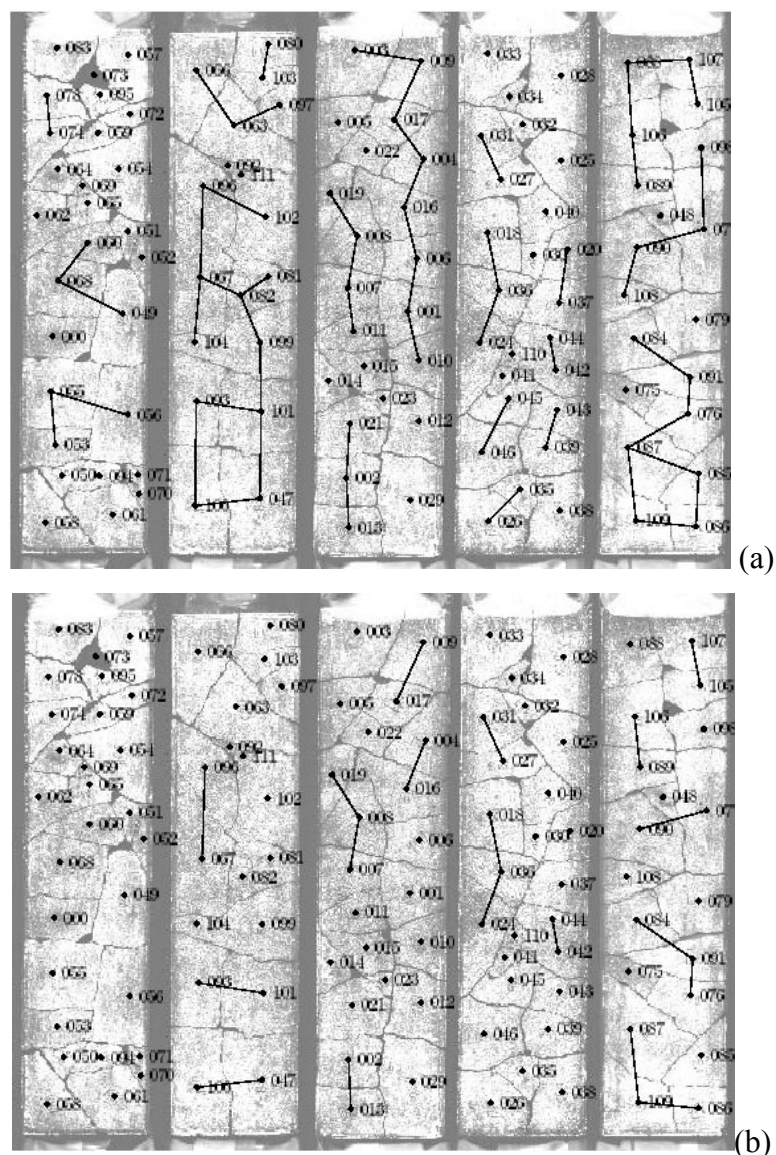


Figura 2.24 – Montagem manual: (a) fragmentos identificáveis; (b) resultado obtido [LEITÃO, 2000].

No 2º. teste parte B foram utilizados critérios mais relaxados, o que resultou num número inicial de 166.626 pares de candidatos. Com o refinamento dos parâmetros e considerando a escala de 2 pixels, chegou-se a um resultado de 277 pares candidatos. Destes

pares candidatos, dos 60 primeiros retornados, os primeiros 30 pares foram considerados verdadeiros, já nos 30 seguintes apareceram 21 falsos verdadeiros. Este teste permitiu a remontagem da cerâmica conforme mostrado na Figura 2.25.

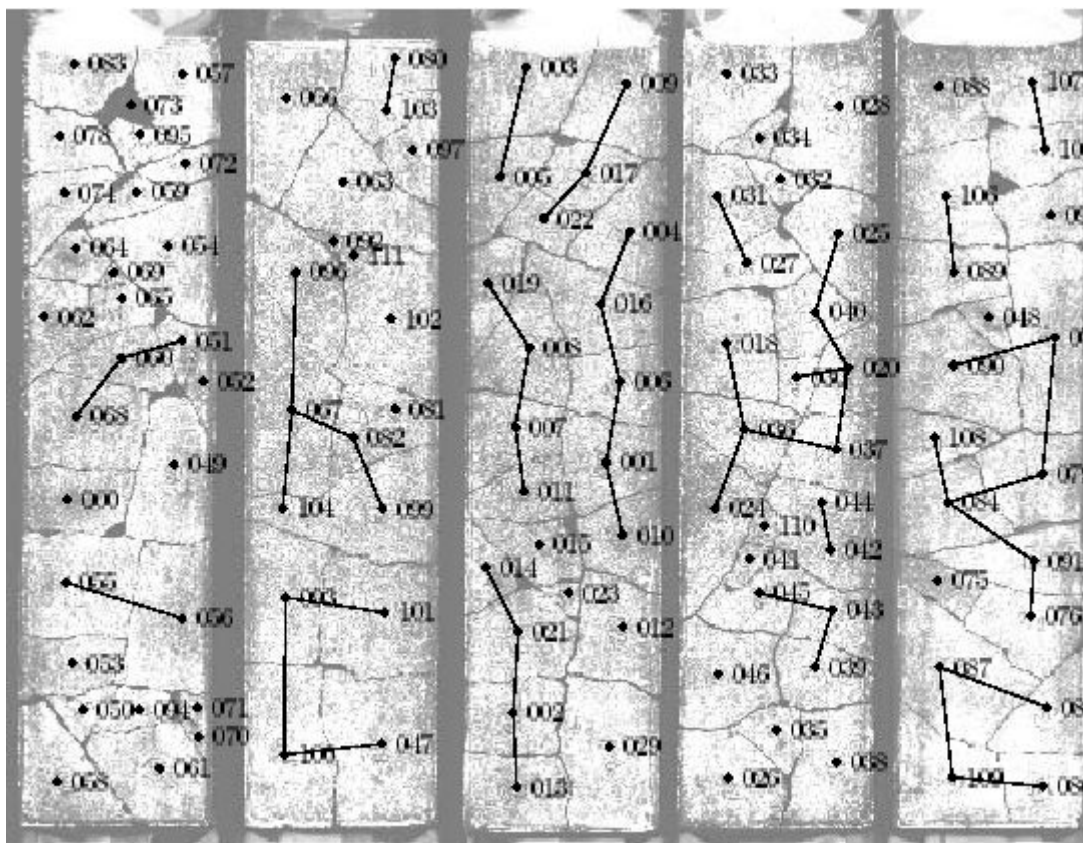


Figura 2.25 – Montagem manual do resultado obtido teste 2B [LEITÃO, 2000].

Na conclusão Leitão conclui que os resultados não são expressivos, mas apresentam potencial de pesquisa [LEITÃO, 2000]. Leitão continua a desenvolver atividades nessa área de pesquisa.

O trabalho de Leitão foi analisado detalhadamente porque trabalha com fragmentos de cerâmica que possuem formas irregulares semelhantes ao formato dos fragmentos de papel quando mutilados manualmente.

2.3.3. Quebra-cabeças e aproximação de curvas

Diversos trabalhos apresentam propostas de métodos para automatizar o processo de resolução de quebra-cabeças e aproximação de curvas [KONG & KIMIA, 2001]

[SEBASTIANB et al., 2001] [SEBASTIANB et al., 2003] [BUNKE & KAUFMANN, 1993] [WOLFSON et al., 1988] [XU et al., 2004] [YAO & SHAO, 2003].

Radack e Badler criaram um método que consiste em rotacionar e translacionar cada peça do quebra-cabeça de modo que as partes encaixem em uma região, sem nenhuma área significativa faltando ou partes sobrepondo [RADACK & BADLER, 1982].

Kong e Kimia [KONG & KIMIA, 2001] apresentam um método dividido em duas etapas. A primeira para diminuir a complexidade se aplica aproximação poligonal. Na segunda são extraídas as características que são os vértices resultantes da aproximação poligonal. Para comparação das curvas é considerado que uma delas é o reverso da outra. Para comparação dos dois contornos conhecidos é utilizada a programação dinâmica com uma tabela com M linhas e N colunas, conforme os vértices da aproximação poligonal de cada peça. Para escolha dos candidatos A e B é considerado um custo $D(A, B, i, j)$ representado por:

$$D(A, B, i, j) = \sum_{w=1}^l \psi(a(m_{w-1} | m_w), b(n_{w-1} | n_w)) \quad (2.12)$$

onde a função $\psi(a(m_{w-1} | m_w), b(n_{w-1} | n_w))$ representa o custo e consiste em dois termos:

$$\psi(a, b) = \eta(a, b) + R\gamma(a, b) \quad (2.13)$$

O primeiro termo representa o custo relativo ao comprimento da curva denotado por l_{Aw} e l_{Bw} do segmento $a(m_{w-1} | m_w)$ e $b(n_{w-1} | n_w)$ respectivamente. O cálculo do custo fica como:

$$\eta(a(m_{w-1} | m_w), b(n_{w-1} | n_w)) = \begin{cases} -2.0 / (c_w + 1 / c_w), & c_1 < c_w < c_2; (c_w + 1 / c_w) / 2, \\ \text{senão é utilizado } c_1 = 0.8, c_2 = 1.2. \end{cases} \quad (2.14)$$

O segundo termo representa o custo relativo à direção do segmento da curva denotado por S_{Aw} e S_{Bw} para os ângulos dos segmentos $a(m_{w-1} | m_w)$ e $b(n_{w-1} | n_w)$, respectivamente. A diferença de orientação é calculada por $\alpha_w = (S_{Aw} - S_{Aw-1}) - (S_{Bw} - S_{Bw-1})$

$$\gamma(a(m_{w-1} | m_w), b(n_{w-1} | n_w)) = \begin{cases} -\cos/(\alpha_w), & c_3 < \alpha_w < c_4; |\alpha_w|, \\ \text{senão é utilizado } c_3 = -\pi/6, c_4 = \pi/6. \end{cases} \quad (2.15)$$

A constante R representa a importância relativa dos custos referente ao comprimento e curvatura. Finalmente, os dois segmentos são considerados similares quando o custo for negativo.

Os experimentos realizados por Kong e Kimia [KONG & KIMIA, 2001] visavam à reconstituição de parte do quebra-cabeça de um mapa, conforme Figura 2.26; e a remontagem de uma cerâmica com 7 peças conforme Figura 2.27.

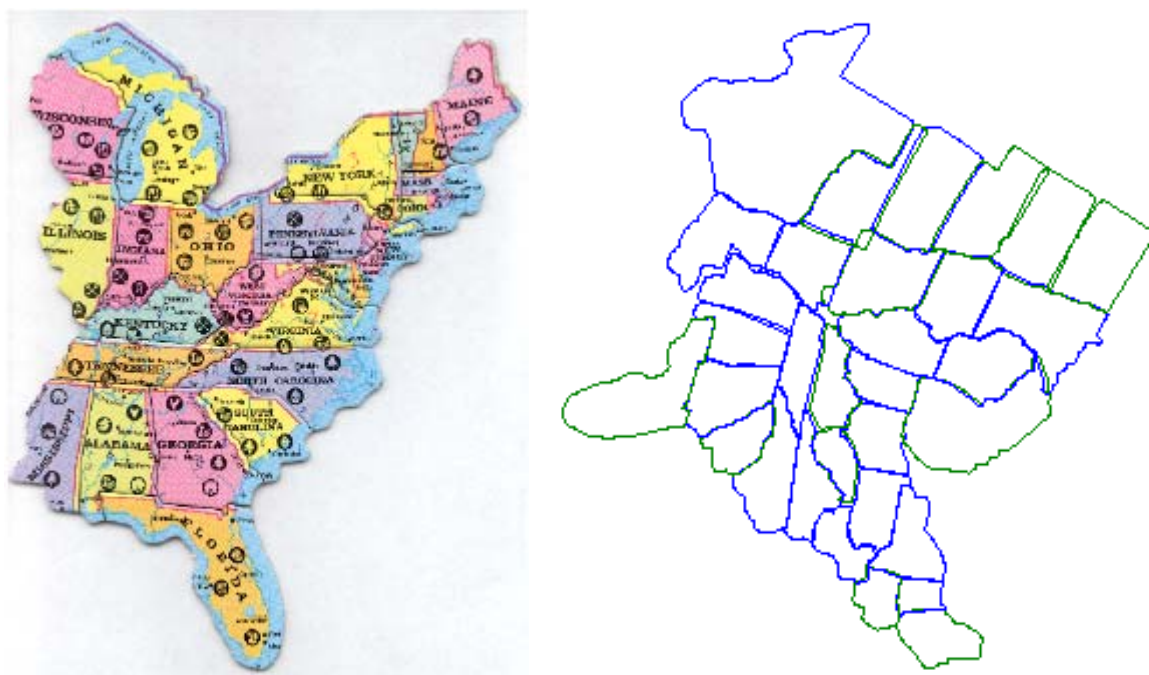


Figura 2.26 – Parte do mapa e o resultado obtido usando o método [KONG & KIMIA, 2001].

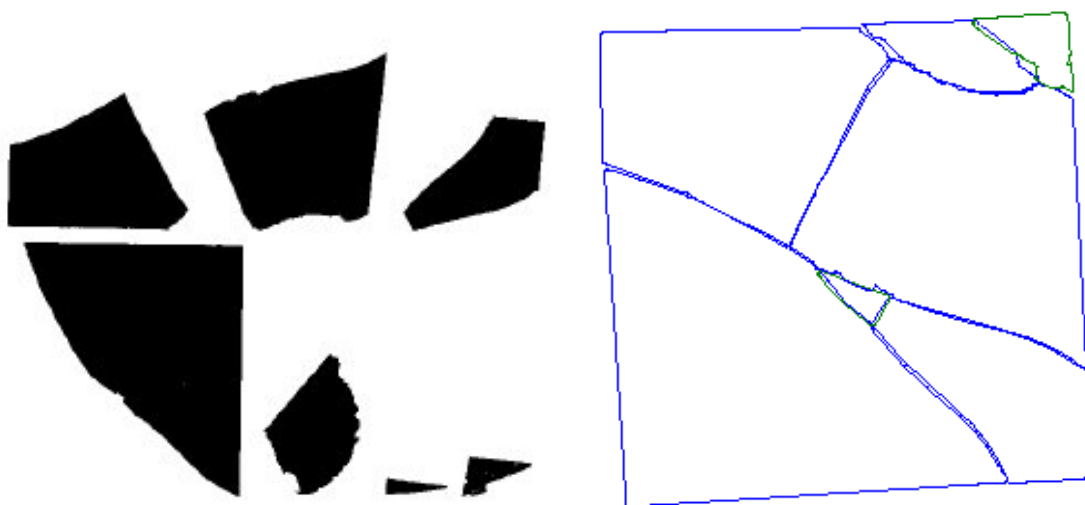


Figura 2.27 – Cerâmica e o resultado obtido usando o método [KONG & KIMIA, 2001].

A Figura 2.28(a) mostra na cor cinza clara as 20 peças do mapa que foram identificadas corretamente, de um total de 32. A Figura 2.28(b) mostra as 5 peças da cerâmica que foram identificadas corretamente, de um total de 7 peças.

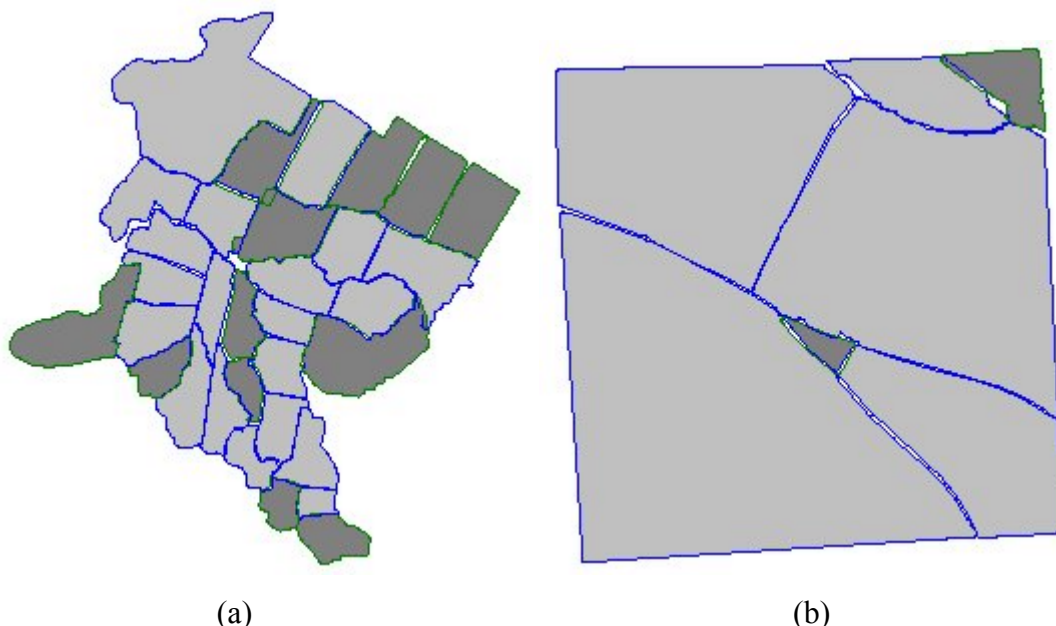


Figura 2.28 – (a) mapa; (b) cerâmica [KONG & KIMIA, 2001].

O trabalho de Kong e Kimia é um avanço sobre o de Radack e Badler.

Mas nem Radack e Badler, ou Kong e Kimia, consideraram que no quebra-cabeça comum existem muitas peças com o contorno semelhante e a diferença entre elas serão as informações de cor e textura.

A resolução de quebra-cabeças segundo Yao e Shao [YAO & SHAO, 2003] tem que observar as seguintes condições:

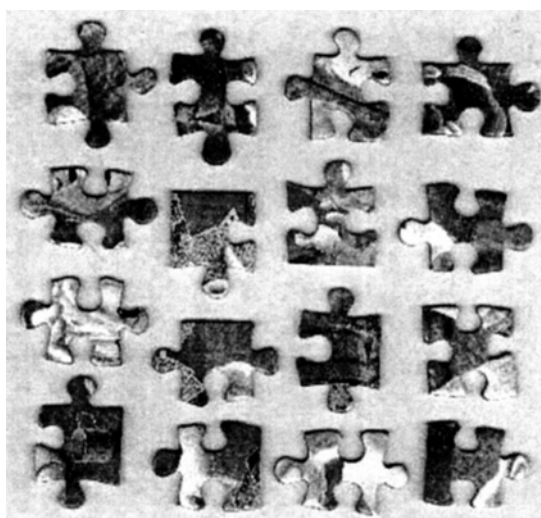
- Para $S_P = \{P_0, P_1, \dots, P_{N-1}\}$, quando P_i representa a i -ésima peça do quebra-cabeça ($i \in \{0, 1, \dots, N-1\}$) e deve possuir características de contorno fechado e textura sólida;
- Para P_i deve existir um P_j ($i \neq j$; $i, j \in \{0, 1, \dots, N-1\}$) cuja uma parte do contorno de P_i é completamente idêntica a uma parte do contorno de P_j , e a textura e cor próximas dessas duas partes do contorno são muito similares;
- Assim P_i e P_j são vizinhos (ou podem ser anexados);
- Depois são buscados os vizinhos para P_k ($k \in \{0, 1, \dots, N-1\}$) até serem anexadas todas as peça em S_P formando apenas uma grande peça.

Para sistematizar a resolução Yao e Shao criaram uma seqüência de características, conforme apresentado na Figura 2.29.

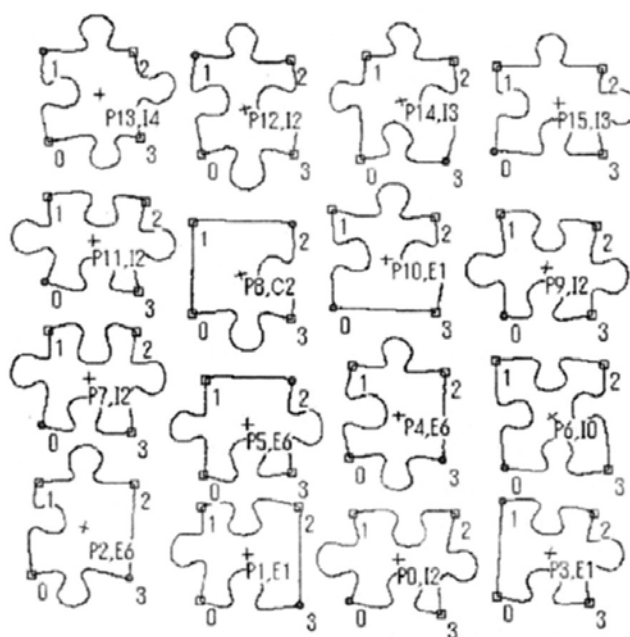
	Piece type	Boundary description	Edge 0	Edge 1	Edge 2	Edge 3
<i>R</i>	 R_0	<i>CCLL</i>	<i>E.V</i>	<i>E.V</i>	None	None
	 R_1	<i>VCLL</i>	<i>E.C</i>	<i>E.V</i>	None	None
	 R_2	<i>CVLL</i>	<i>E.V</i>	<i>E.C</i>	None	None
	 R_3	<i>VLL</i>	<i>E.C</i>	<i>E.C</i>	None	None
<i>E</i>	 E_0	<i>CCCL</i>	<i>E.V, R.V</i>	<i>I.V</i>	<i>E.V, R.V</i>	None
	 E_1	<i>CVCL</i>	<i>E.V, R.V</i>	<i>I.C</i>	<i>E.V, R.V</i>	None
	 E_2	<i>VCCL</i>	<i>E.C, R.C</i>	<i>I.V</i>	<i>E.V, R.V</i>	None
	 E_3	<i>CCVL</i>	<i>E.V, R.V</i>	<i>I.V</i>	<i>E.C, R.C</i>	None
	 E_4	<i>WCVL</i>	<i>E.C, R.C</i>	<i>I.C</i>	<i>E.V, R.V</i>	None
	 E_5	<i>CVL</i>	<i>E.V, R.V</i>	<i>I.C</i>	<i>E.C, R.C</i>	None
	 E_6	<i>VCVL</i>	<i>E.C, R.C</i>	<i>I.V</i>	<i>E.C, R.C</i>	None
	 E_7	<i>VWL</i>	<i>E.C, R.C</i>	<i>I.C</i>	<i>E.C, R.C</i>	None
<i>I</i>	 I_0	<i>CCCC</i>	<i>E.V, I.V</i>	<i>E.V, I.V</i>	<i>E.V, I.V</i>	<i>E.V, I.V</i>
	 I_1	<i>VCCC</i>	<i>E.C, I.C</i>	<i>E.V, I.V</i>	<i>E.V, I.V</i>	<i>E.V, I.V</i>
	 I_2	<i>VCVC</i>	<i>E.C, I.C</i>	<i>E.V, I.V</i>	<i>E.C, I.C</i>	<i>E.V, I.V</i>
	 I_3	<i>CWC</i>	<i>E.V, I.V</i>	<i>E.C, I.C</i>	<i>E.C, I.C</i>	<i>E.V, I.V</i>
	 I_4	<i>VWC</i>	<i>E.C, I.C</i>	<i>E.C, I.C</i>	<i>E.C, I.C</i>	<i>E.V, I.V</i>
	 I_5	<i>VWV</i>	<i>E.C, I.C</i>	<i>E.C, I.C</i>	<i>E.C, I.C</i>	<i>E.C, I.C</i>

Figura 2.29 – Características usadas por [YAO & SHAO, 2003].

Essas características mostradas na Figura 2.29 permitirão a catalogação das peças para montagem do quebra-cabeça conforme mostrado na Figura 2.30(a) e (b).



(a)



(b)

Figura 2.30 – (a) Imagem de teste; (b) Características extraídas [YAO & SHAO, 2003].

A maior parte dos trabalhos citados na literatura exploram o fato de que as peças dos quebra-cabeças comuns têm extremidades e cantos lisos e bem definidos. Este fato diminui a complexidade para resolução de sua montagem.

A Tabela 2.1 apresenta a principal funcionalidade e a principal desvantagem dos métodos de reconstrução digital analisados.

Tabela 2.1 - Métodos para reconstrução digital de documentos.

Autor	Método	Observações
[CHURCHSTREET, 2003]	Reconstrução “ <i>spaghetti</i> ” usando características do contexto de tiras regulares.	Funcionalidade: Remontagem digital de documento fragmentado em tiras. Desvantagem: Só trabalha com tiras que devem ser preparadas e digitalizadas na posição correta.
[LEITÃO, 2000]	Objetos cerâmicos quebrados usando características das curvas do contorno dos pedaços.	Funcionalidade: Aplicado em qualquer tipo de fragmento. Desvantagem: curvas distintas podem ter gráficos de curvatura parecidos.

Autor	Método	Observações
[RADACK & BADLER, 1982]	Quebra-cabeça por rotação e translação.	Funcionalidade: Remontagem do quebra-cabeça considerando a forma das peças. Desvantagem: O método não distingue várias peças com a mesma forma.
[KONG & KIMIA, 2001]	Quebra-cabeça usando aproximação poligonal e características das bordas das peças.	Funcionalidade: Remontagem de quebra-cabeça considerando a formas das peças. Desvantagem: O método não distingue várias peças com a mesma forma.
[YAO & SHAO, 2003]	Quebra-cabeça com características padrões da forma das peças e informações de contexto.	Funcionalidade: Método de montagem de quebra-cabeça considerando as formas e o contexto das peças. Desvantagem: Trabalha com peças de formas homogêneas para analisar as características globais.

2.4. Conclusão

No presente capítulo foi apresentada a revisão bibliográfica dos temas utilizados no desenvolvimento desse trabalho. Foram analisados o sistema desenvolvido pela ChurchStreet Technology, Inc. [CHURCHSTREET, 2003] destinado à reconstrução semi-automática de documentos triturados em formas regulares; o método apresentado por Leitão para achar os pares adjacentes de objetos cerâmicos quebrados ou partidos com formas irregulares [LEITÃO, 2000]; e os métodos para resolução de quebra-cabeça de Radack e Badler [RADACK & BADLER, 1982], Kong e Kimia [KONG & KIMIA, 2001] e Yao e Shao [YAO & SHAO, 2003]. No Capítulo 3 é abordada a metodologia desenvolvida e aplicada para concretização do trabalho.

Capítulo 3

Metodologia

3.1. Introdução

Os fragmentos de documentos existentes na base da PUCPR possuem bordas complexas para representar com fidelidade o aspecto dos documentos que geralmente são submetidos à perícia forense. Essa complexidade das bordas é o aspecto primordial da diferença entre os fragmentos e as peças de quebra-cabeças que geralmente possuem extremidades e cantos bem definidos.

Este Capítulo apresenta um método para a reconstrução digital de documentos, que opera em dois passos. O primeiro passo consiste na aplicação da aproximação poligonal nos contornos dos fragmentos para reduzir a complexidade das bordas e superar problemas específicos da reconstrução de documentos. O segundo passo consiste na extração das características relevantes dos vértices da aproximação poligonal. Desse modo a complexidade global é drasticamente reduzida porque poucas características são usadas para representar o fragmento no processo de comparação.

As ambigüidades resultantes da reconstrução local são resolvidas e os pedaços são juntados buscando uma solução global para a reconstrução do documento. Assim, o método está organizado em 6 partes:

- Aquisição das imagens dos fragmentos;
- Pré-tratamento dos fragmentos;
- Extração das características dos fragmentos;
- Classificação das características;
- Rotulação dos fragmentos; e,
- Classificação dos vizinhos parceiros.

A Figura 3.1 mostra o diagrama esquemático da metodologia do presente trabalho, para a reconstrução de documentos mutilados. Cada uma das etapas é descrita posteriormente neste capítulo.

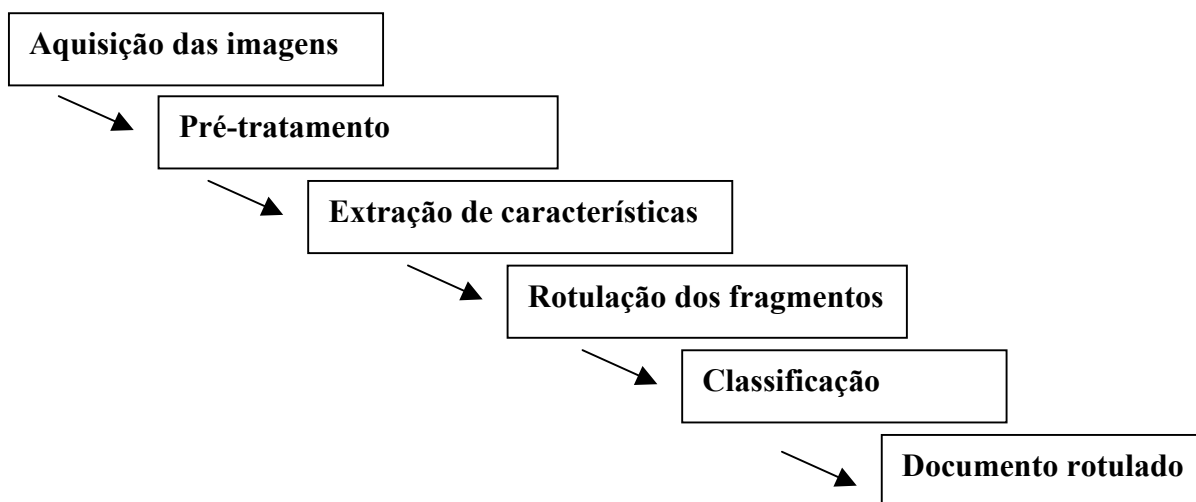


Figura 3.1 – Esquema geral da metodologia de reconstrução de documentos mutilados.

3.2. Base de documentos

Para o desenvolvimento do trabalho foi criada uma base de documentos em papel, fragmentados intencionalmente com formas aleatórias. Como o trabalho na área de reconstrução digital de documentos mutilados é pioneiro na PUCPR a montagem da base foi a primeira atividade necessária ao desenvolvimento do projeto. Buscou-se a fidelidade com os documentos submetidos à perícia forense que geralmente são mutilados visando destruir ou inutilizar provas em contestações judiciais.

Um documento intencionalmente mutilado apresenta características próprias e individuais, de acordo com as mutilações sofridas. Um documento que foi rasgado apresenta características diferentes de um documento que foi cortado com tesoura ou estilete. Os fragmentos de cada documento da base buscam representar essas características, simulando, cada um, uma origem para sua mutilação, conforme fragmentos mostrados na Figura 3.2.

A base é composta de documentos rasgados manualmente, documentos recortados com auxílio de tesoura, régua ou estilete. As formas dos fragmentos variam em todos os documentos, bem como o número de fragmentos de cada documento. As imagens foram digitalizadas em cores, com 24 bits por pixel, 150 dpi de resolução, e fundo preto. As imagens

foram armazenadas no formato BMP. O uso de cores prevê a utilização da base em trabalhos posteriores.

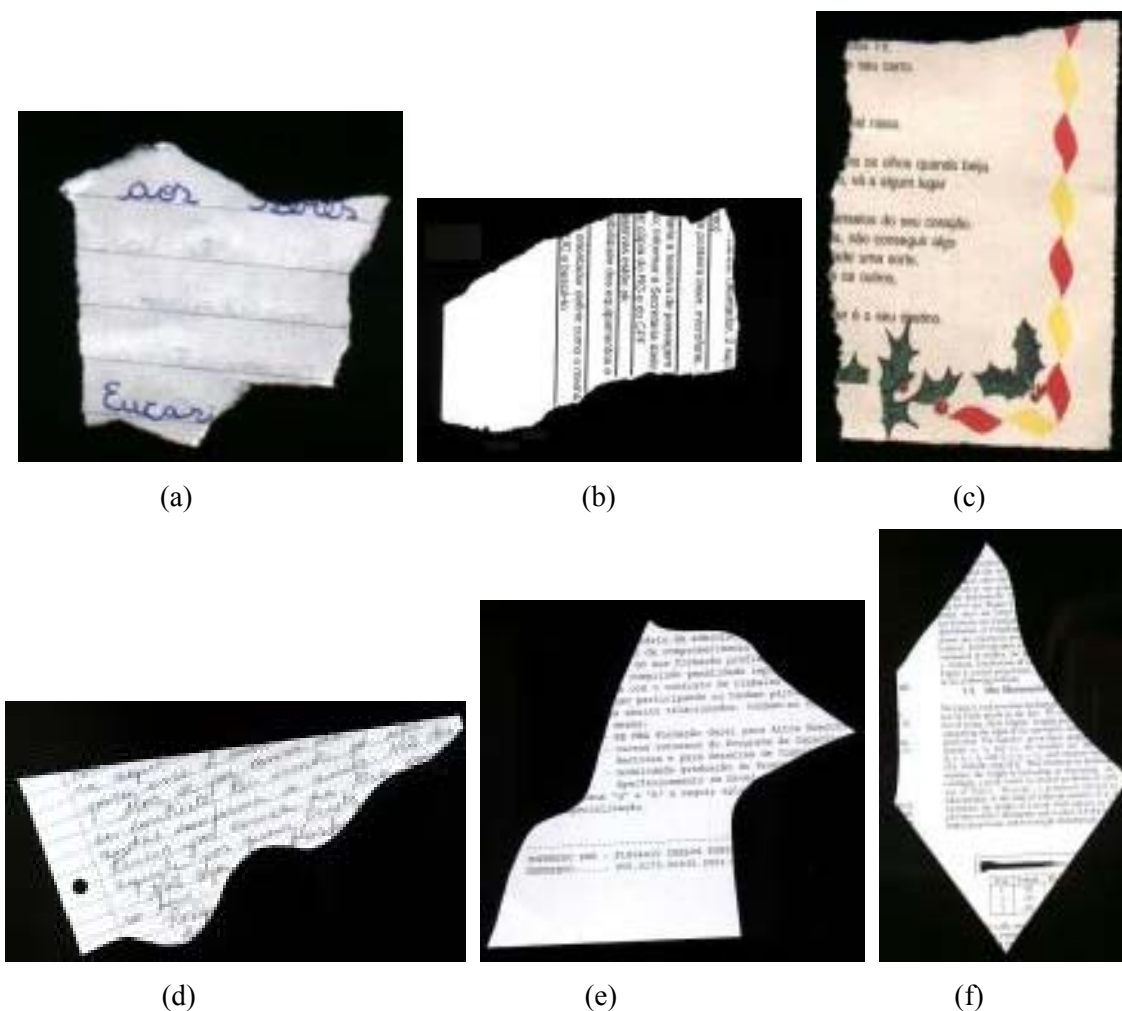


Figura 3.2 – Base de imagens PUCPR - (a) fragmento manuscrito rasgado; (b) fragmento tabela rasgado; (c) fragmento texto com imagens rasgado; (d) fragmento manuscrito cortado com estilete; (e) fragmento texto cortado com tesoura; (f) fragmento texto com imagens cortado com estilete.

A base contendo 855 imagens foi constituída a partir de 100 documentos, sendo: 25% documentos variados; 25% documentos manuscritos; 25% documentos textos tipografados; e 25% documentos textos com imagens. Cada documento possui de 4 a 16 fragmentos. Para testes foram utilizados mais 5 documentos variando de 14 até 35 fragmentos cada um.

A seguir apresenta-se uma descrição dos tipos de documentos que compõem a base, a saber:

- **Documentos variados** - documentos que possuem características variadas de tamanho e formato e no conteúdo apresentam tabelas, textos, figuras e outro detalhes, veja exemplos na Figura 3.3;



Figura 3.3 – Base de imagens PUCPR – documentos variados.

- **Documentos manuscritos** - documentos manuscritos originados de trabalhos escolares, provas, exercícios, folhas de cadernos com e sem remalinas, folhas avulsas e outros conforme Figura 3.4;



Figura 3.4 – Base de imagens PUCPR – documento manuscrito.

- **Documentos de textos tipografados** - documentos contendo exclusivamente textos tipografados, sendo páginas de livros, páginas de documentos digitais, páginas avulsas impressas e outros;
- **Documentos de textos com imagens** - documentos que possuem predominantemente textos, mas possuem também imagens, tabelas e outras características que os diferenciam daqueles que possuem apenas textos, veja Figura 3.5.

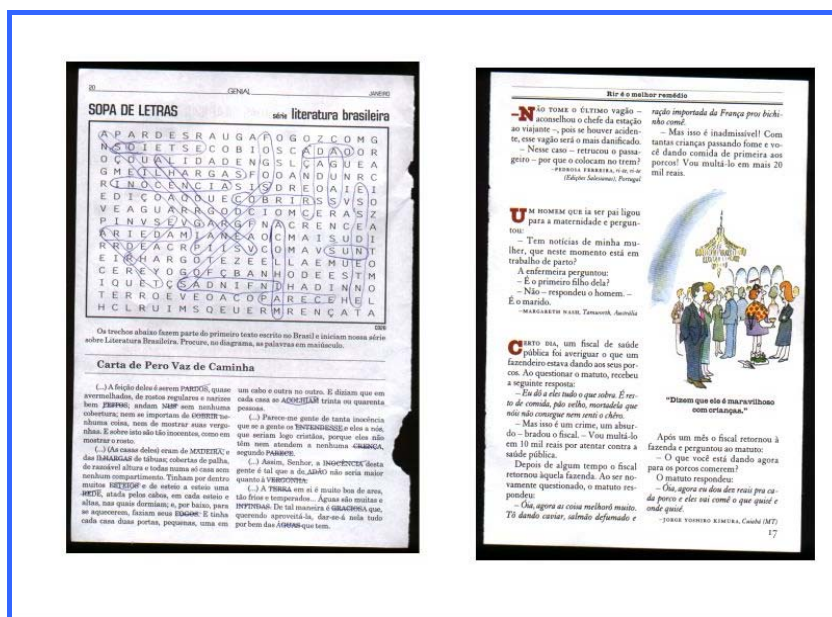


Figura 3.5 – Base de imagens PUCPR – documentos textos com figuras e outros detalhes.

Para garantir a diversidade da base de imagens cada documento foi mutilado em vários fragmentos com o uso de tesoura, estilete, com auxílio de régua ou simplesmente rasgados manualmente. Todos os documentos da base de imagens apresentam fragmentos com formas individuais compostas aleatoriamente sem repetição intencional de formato, conforme mostrado nas Figuras 3.2 e 3.6, e foram digitalizados, sempre que possível, com as informações de texto em posição vertical, podendo ou não conter eventual inclinação.



Figura 3.6 – Base de imagens PUCPR – Documento da base montado manualmente.

3.3. Aquisição e Pré-Tratamento

A aquisição das imagens dos fragmentos foi realizada através da digitalização em cores, com 24 bits por pixel, 150 dpi de resolução, e fundo preto, no formato BMP, com o objetivo de servir também de base para outros trabalhos que utilizarão as informações do contexto para desenvolvimento das pesquisas, conforme exemplo da Figura 3.7.



Figura 3.7 – Fragmento de documento conforme digitalização original da base de imagens.

Com o objetivo de reduzir a complexidade e permitir a aplicação de filtros de pré-tratamento as imagens foram convertidas para níveis de cinza.

As imagens coloridas foram transpostas para imagens com 256 tons de cinza. Faz-se o cálculo da luminância de cada pixel utilizando a Equação 2.3, observando as orientações da CIE, como mostra Figura 3.8.



Figura 3.8 – Fragmento do documento convertido para níveis de cinza.

Neste trabalho as características são extraídas do contorno dos fragmentos que compõem o documento. Para tanto, foi necessário eliminar o fundo da imagem e extrair o contorno do fragmento, de onde são computadas as características para o processo de rotulação dos fragmentos.

A primeira tentativa para separação do fragmento do documento do fundo da imagem, foi através de processos de limiarização, utilizando vários métodos dentre os citados por Sezgin e Sankur [SEZGIN & SANKUR, 2001] [SANKUR & SEZGIN, 2004], conforme visto na Seção 2.1.1. Os resultados não foram plenamente satisfatórios, porque a limiarização algumas vezes deixava ruídos, outras vezes eliminava parte do fragmento, conforme a variação do conteúdo do fragmento.

Como a limiarização não atende as necessidades do projeto para eliminação do fundo foram executados testes com algoritmos de extração de bordas, descritos na seção 2.1.1.

Os algoritmos de detecção de bordas nem sempre permitem a extração de um contorno fechado de um objeto existente na imagem.

Após essas tentativas optou-se pela adoção de método próprio para a eliminação do fundo preto, onde é aplicado um processo semelhante à erosão, com elemento estruturante em cruz [FACON, 1996].

O processo para eliminação do fundo adotado consiste na aplicação, na imagem do fragmento em níveis de cinza, da máscara mostrada na Figura 2.6. O pixel central é convertido para branco quando a soma dos valores dos níveis de cinza dos 5 pixels forem inferior a 144. Todas as imagens possuem fundo preto padrão obtido através da digitalização dos fragmentos com a tampa do scanner aberta. Este limiar permite a eliminação do fundo das imagens digitalizadas através de scanner. Se a imagem for adquirida através de máquina fotográfica digital esse limiar deverá ser o dobro, para cobrir a interferência de eventuais reflexos luminoso no fundo preto.

Após este processo é feita a varredura em toda a imagem e são convertidos para branco eventuais pixels pretos ainda existentes e que estejam encostados nas bordas da imagem. Na sequência é aplicado um processo de erosão com elemento estruturante 3 x 3, visando eliminar os pixels pretos que possuam apenas um vizinho. Esse procedimento é repetido enquanto existir pixels pretos com apenas 1 vizinho porque eles indicam final de linha, sem pertencer propriamente ao contorno do fragmento.

Finalmente é aplicado um novo filtro com elemento estruturante quadrado 5 x 5, conforme Figura 3.9, para eliminar todas as aglutinações de pixels pretos menor que nove pixels. Se todos os pixels existentes no contorno da máscara forem brancos os pixels internos também são convertidos para branco porque são pequenos grupamentos que representam ruídos da aquisição da imagem.

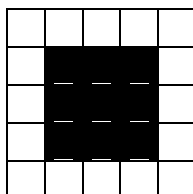


Figura 3.9 – Máscara para eliminação de grupamento menor que 9 pixels pretos.

Essa última filtragem complementa a eliminação de eventuais ruídos ainda existentes, em decorrência da digitalização, resultando em imagem conforme Figura 3.10.



Figura 3.10 – Fragmento do documento com fundo eliminado.

Uma vez pré-processada a imagem do fragmento, é extraído o contorno através do algoritmo de Freeman [FREEMAN, 1974] resultando na imagem conforme mostrado na Figura 3.11.

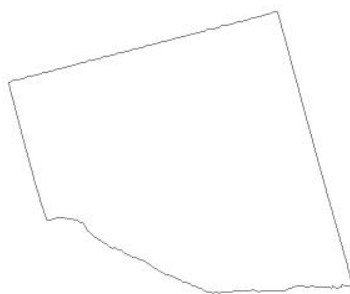


Figura 3.11 – Contorno do fragmento do documento com 1 pixel na linha da borda.

O algoritmo de Freeman foi escolhido porque extrai os contornos exatos da figura, contendo apenas um pixel na linha resultante, o que é conveniente por facilitar as próximas etapas do processo. A imagem resultante da extração do contorno é salva em arquivo. Para a rotulação do fragmento são feitas a aplicação da aproximação poligonal e a extração das características dela.

3.4. Extração de características

Os fragmentos são rotulados para identificação dos prováveis vizinhos a serem agrupados. Para efeito de rotulação dos fragmentos são utilizadas características que identificam a forma de cada um deles extraídas do contorno. Através do algoritmo de perseguição de contorno de Pavlidis [PAVLIDIS, 1982] são extraídas as coordenadas (x, y) dos pixels do contorno do fragmento, que são repassados como entrada para o algoritmo de aproximação poligonal de Douglas e Peucker [DOUGLAS & PEUCKER, 1973], como mostrado na Figura 3.12.

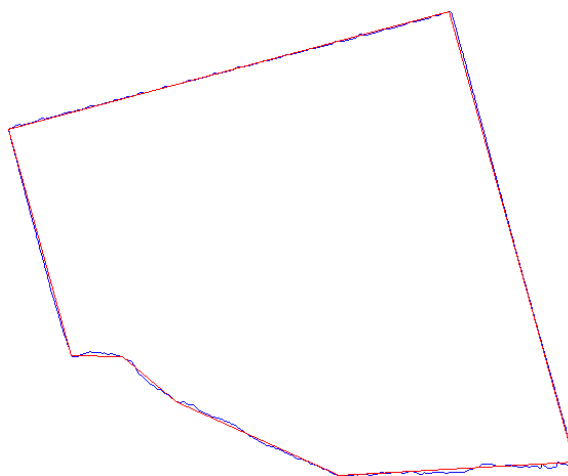


Figura 3.12 – Aproximação poligonal sobre o contorno do fragmento.

Dentre os diversos algoritmos de aproximação poligonal testados, o de Douglas & Peucker mostrou-se mais conveniente para o trabalho por preservar os pontos mais distantes entre si existentes no contorno do fragmento, garantindo assim a manutenção da estrutura básica do documento com todas as características originais, e também por ter um bom desempenho no tempo de processamento conforme testes efetuados por Davis [DAVIS JR, 1998]. O que não ocorre, por exemplo, com o de Peres e Vidal [PEREZ & VIDAL, 1992], que demanda muito tempo de processamento, para um resultado que não preserva integralmente todas as feições e os pontos limites do contorno do documento. O mesmo provoca, muitas vezes, a mudança de um vértice de lugar por inserir novos pontos do contorno até que se atinja o limiar de erro mínimo.

A extração de primitivas de cada fragmento começa por identificar o ponto de partida para início do percurso do contorno pelo algoritmo de Pavlidis [PAVLIDIS, 1982]. Por definição, é iniciada a pesquisa no canto superior esquerdo da imagem, seguindo a primeira linha até o final e depois a segunda linha, assim sucessivamente, até identificar o primeiro pixel do esqueleto de contorno da imagem, quando então, é identificado o ponto de início com suas coordenadas (x, y) na imagem. Partindo desse ponto é percorrido o contorno, identificando todas coordenadas (x, y) até encontrar novamente o ponto de partida.

Este conjunto de pontos (x, y) do contorno é a entrada para o algoritmo de Douglas & Peucker; que no final do processamento apresenta um novo conjunto de pontos (x, y) , que contém apenas os pontos indispensáveis para representar todos os segmentos de reta que compõem o novo traçado do contorno do documento, como apresentado na Figura 3.13(b), ou seja, os vértices da aproximação poligonal.

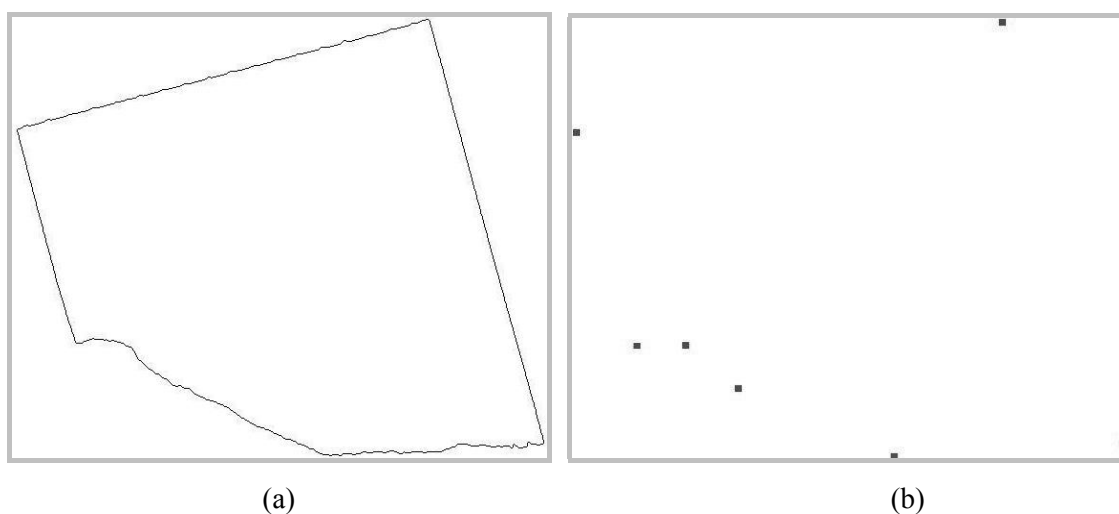


Figura 3.13 – (b) Resultado do algoritmo Douglas-Peucker aplicado em (a).

3.4.1. Ângulo no vértice

Com o cálculo da aproximação poligonal são obtidos os vértices dos quais serão extraídas as características para rotulação dos fragmentos. A característica principal, extraída do novo contorno e resultante da aplicação da aproximação poligonal, é o ângulo formado pelos dois vetores u e v que definem cada vértice. Para o cálculo desse ângulo α são utilizadas as coordenadas (x, y) do vértice atual V_a e as coordenadas do vértice anterior V_{t1} , formando um vetor u , e novamente as coordenadas do vértice atual V_a com a do vértice posterior V_{t2} ao vértice atual, formando o segundo vetor v , conforme Figura 3.14.

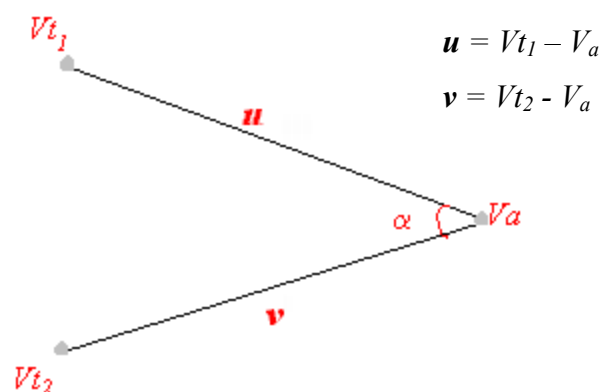


Figura 3.14 – Esquema para cálculo ângulo α .

Com os dois vetores u e v calcula-se o ângulo α aplicando:

$$\cos(\alpha) = \frac{u \cdot v}{|u| |v|} \quad (3.1)$$

Os ângulos identificados no fragmento podem ser côncavos ou convexos, dependendo das coordenadas (x, y) dos vértices anterior, atual e posterior. Para determinar se o ângulo é côncavo ou convexo em relação ao fragmento, é traçado um segmento de reta ligando o vértice anterior ao vértice posterior, do qual então é calculada a mediana. Depois é identificado se o segmento de reta que liga esse ponto da mediana, ao vértice atual do contorno, é interno ou externo ao esqueleto do fragmento. Veja Figura 3.15 exemplo em que os vértices $V1$, $V2$ e $V3$ formam um ângulo côncavo e os vértices $V2$, $V3$ e $V4$ formam outro ângulo convexo.

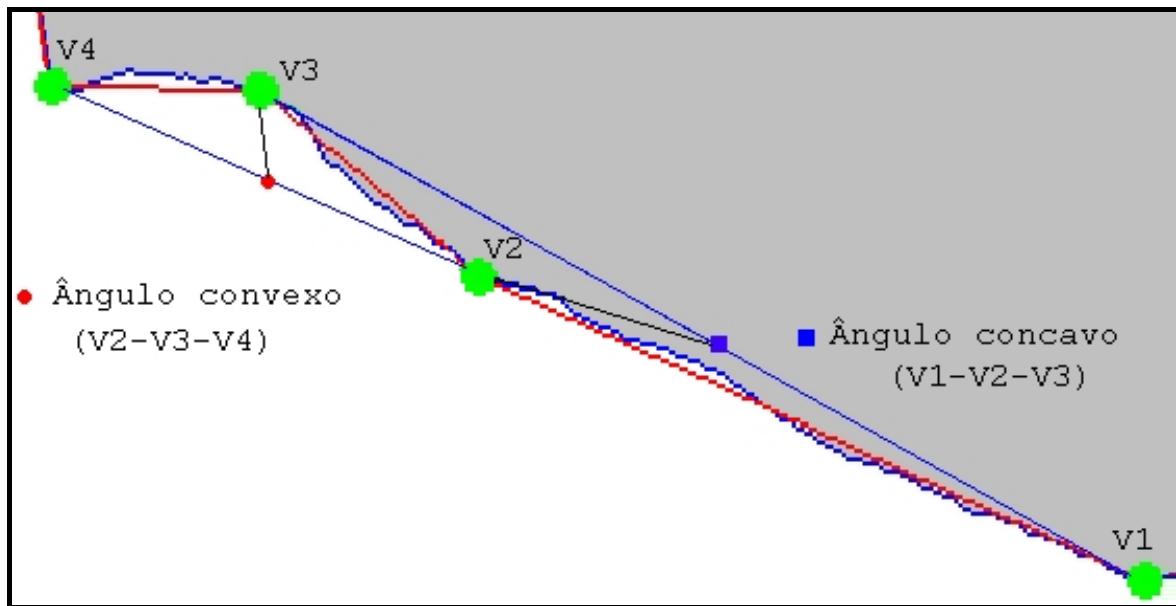


Figura 3.15 – Característica ângulo cônico ou convexo.

Caso esse ponto da mediana seja externo ao esqueleto do fragmento do documento, o ângulo a ser considerado é o complementar, de modo que a soma dos possíveis ângulos candidatos a parceiros perfaçam 360° .

3.4.2. Distâncias entre vértices

As outras características calculadas são a distância euclidiana d_{AB} existente entre o vértice atual $A(x, y)$ e o vértice anterior $B(x, y)$, que representa o comprimento do segmento de reta do modelo poligonal. Também a mesma distância euclidiana calculada entre o vértice atual e o vértice posterior, do contorno do fragmento do documento.

Essas distâncias são calculadas através de:

$$d_{AB} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (3.2)$$

Confira na Figura 3.16 a localização das variáveis para efetivação dos cálculos.

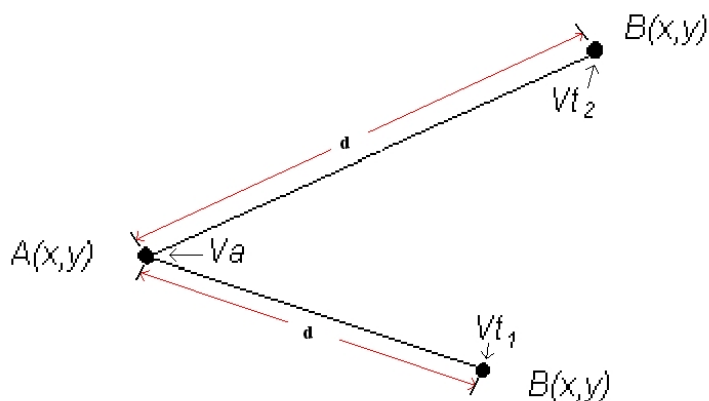


Figura 3.16 – Distância (d_{AB}).

3.4.3. Importância das distâncias entre vértices

Quando houver coincidência do ângulo e das distâncias é calculada através da Equação 3.3 a importância (*impA ou B*) das distâncias no vértice sob análise:

$$impA = (D_{AB} * 100) / tamanho \quad (3.3)$$

onde d_{AB} é a distância euclidiana entre dois vértices e tamanho é a quantidade total de pixels que compõe o contorno do fragmento.

Na Figura 3.17 é identificado um vértice (dentro do círculo) para comparação de sua importância em relação ao contorno total do fragmento.

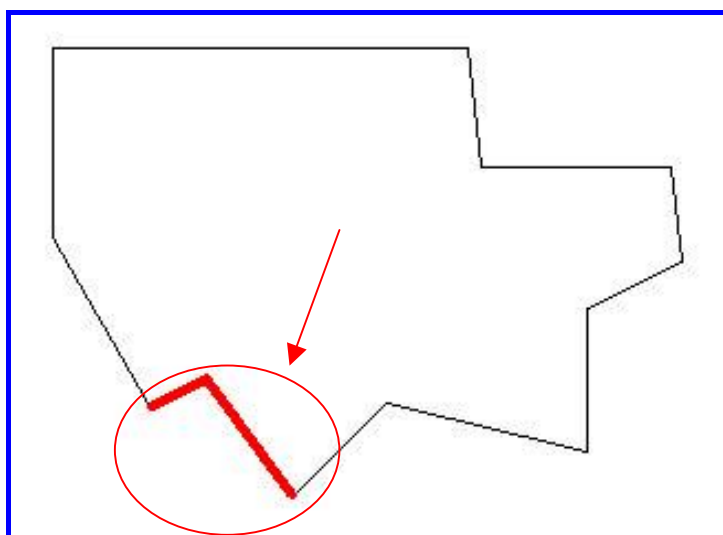


Figura 3.17 – Importância da distância.

3.5. Rotulação dos fragmentos

A rotulação dos fragmentos inicia-se a partir da extração das características dos vértices, veja Figura 3.18, de todos os fragmentos candidatos a pertencer ao documento.

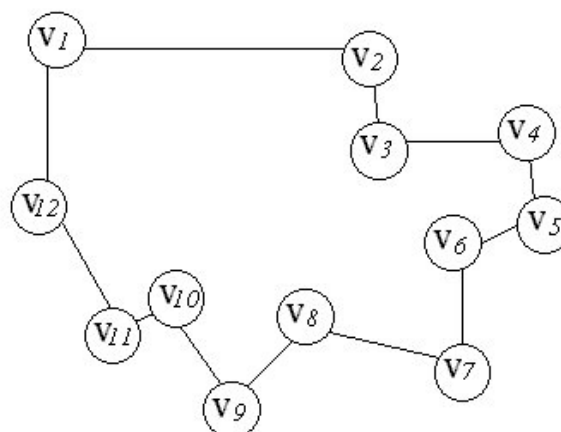


Figura 3.18 - Vértices dos quais são extraídas as características.

Depois de identificados os ângulos, e as demais características do contorno de cada fragmento, elas são armazenadas em uma estrutura individual para cada fragmento conforme exemplo na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características do fragmento 1 do documento 13.

1	90	444	27	456	28	455	42
2	78	456	28	229	14	577	482
3	152	229	14	174	10	348	495
4	164	174	10	68	4	189	423
5	219	68	4	50	3	137	379
6	107	50	3	229	14	87	378
7	90	229	14	444	27	26	157
vértice	ângulo	distA	ImpA	distB	ImpB	X	Y
Pedaco: .\Resultados\PriNO\d0013n01.rdm							

Na Tabela 3.1 os valores são armazenados de acordo com as definições:

Ângulo = ângulo de um vértice da aproximação poligonal;

$distA$ = Distância A entre o ponto de origem (um vértice qualquer) da aproximação poligonal e o vértice anterior;

$ImpA$ = Importância da distância A em relação ao tamanho do contorno do fragmento em pixels;

$distB$ = Distância B entre o ponto de origem (um vértice qualquer) da aproximação poligonal e o vértice posterior;

$ImpB$ = Importância da distância B em relação ao tamanho do contorno do fragmento em pixels;

X e Y = coordenadas do ponto na imagem;

$vértice$ = seqüência numérica para identificar a quantidade de vértices retornados pela aproximação poligonal.

A tabela pode ser lida assim: o ângulo do vértice 2, calculado usando vértices vizinhos 1 e 3, é 78 graus. A distância Euclidiana entre o vértice 2 e 1 é 456 e a importância dessa distância dentro do fragmento é 28. A distância Euclidiana entre o vértice 2 e 3 é 229 e a sua importância dentro fragmento é 14. As coordenadas do vértice 2 na imagem são (577;482).

Por intermédio dessa estrutura representativa do fragmento é feita a identificação da de um fragmento parceiro, através do nível de similaridade existente entre eles.

O grau de similaridade das características é calculado conforme a seguir:

- **ângulo:** para haver similaridade a soma do ângulo de um vértice da aproximação poligonal do fragmento A com o ângulo do vértice do fragmento B , deve perfazer 360° , confira na Figura 3.19. Em virtude de ser utilizado o ângulo em graus é introduzida uma tolerância $T\alpha$. Esta tolerância tem o valor de 2 para absorver o arredondamento, quando do cálculo da abertura dos dois ângulos sob análise. Verificada a complementaridade $W_{angulo} = 1$.

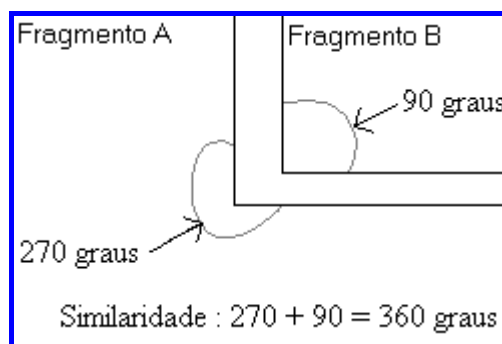


Figura 3.19 – Similaridade de ângulo no vértice.

- **distância:** A similaridade da distância do vértice sendo analisado aos seus dois vértices vizinhos é comparada conforme mostrado na Figura 3.20. D_{b1} é a distância Euclidiana entre o vértice A e seu vizinho anterior C , a qual é comparada com a distância D_{a1} , com tolerância T_d . Esta tolerância tem o valor de 2 para absorver o arredondamento do cálculo das duas distâncias quando da extração da primitiva. As similaridades das distâncias D_{b2} , que é a distância Euclidiana entre o vértice A e seu vizinho posterior B , é comparada com a distância D_{a2} da mesma maneira.

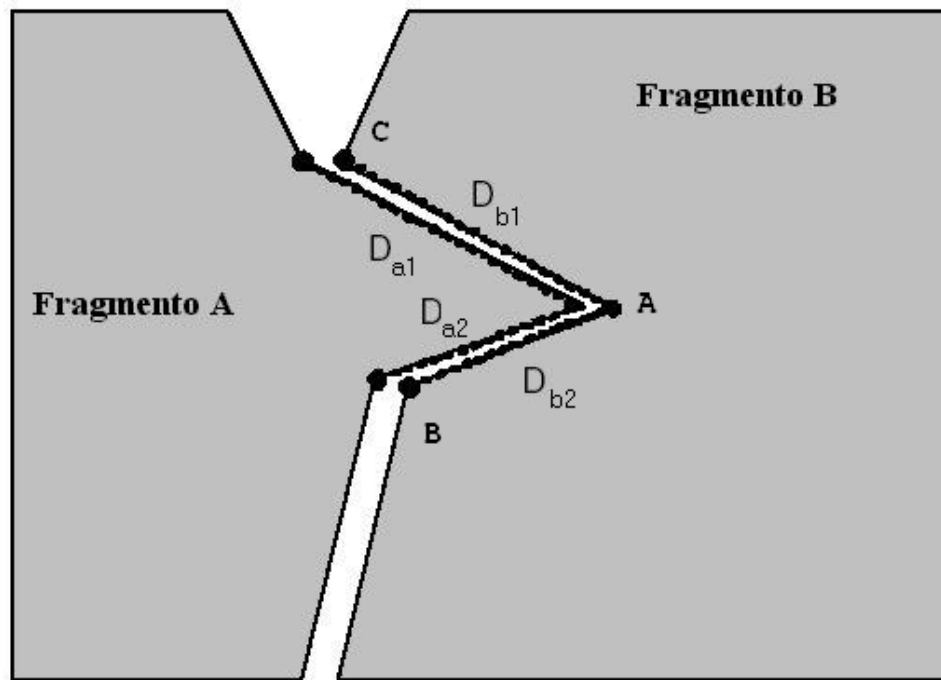


Figura 3.20 – Similaridade da característica distância.

Depois de computar tais distâncias, uma medida de semelhança $W_{matching}$ é calculada usando a Equação 3.4:

$$\begin{aligned}
 W_{matching} &= 1 \quad \text{se} \quad \left\{ \left[(D_{b1} \cong D_{a1} \text{ OU } D_{b2} \cong D_{a2}) \text{ E } W_{angulo} = 1 \right] \right. \\
 W_{matching} &= 5 \quad \text{se} \quad \left\{ \left[(D_{b1} \cong D_{a1} \text{ E } D_{b2} \cong D_{a2}) \text{ E } W_{angulo} = 1 \right] \right.
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Se uma das distâncias for similar o peso atribuído para similaridade será 1. Quando ambas as distâncias forem semelhante o peso é muito mais relevante, sendo atribuído nesse caso o valor 5. Os valores 1 e 5 foram determinados

empiricamente através de várias experiências e mostraram-se os mais adequados para o projeto.

- **importância das distâncias:** quando houver coincidência do ângulo e das distâncias no vértice sob análise é calculada a importância do tamanho das distâncias desse vértice em comparação ao contorno total do fragmento (*tamanho*), observando as seguintes regras:
 - Se a distância analisada representa mais de 0,2 do tamanho do fragmento, então $W_{matching} < W_{matching} + 2$;
 - Se a distância analisada representa mais de 0,1 do tamanho do fragmento, então $W_{matching} < W_{matching} + 1$;
 - Caso contrário, $W_{matching}$ nada é acrescentado.

Estas regras permitem uma comparação mais confiável das características de similaridades do contorno dos fragmentos.

A Figura 3.21 mostra um exemplo de um ângulo onde as características calculadas são similares.

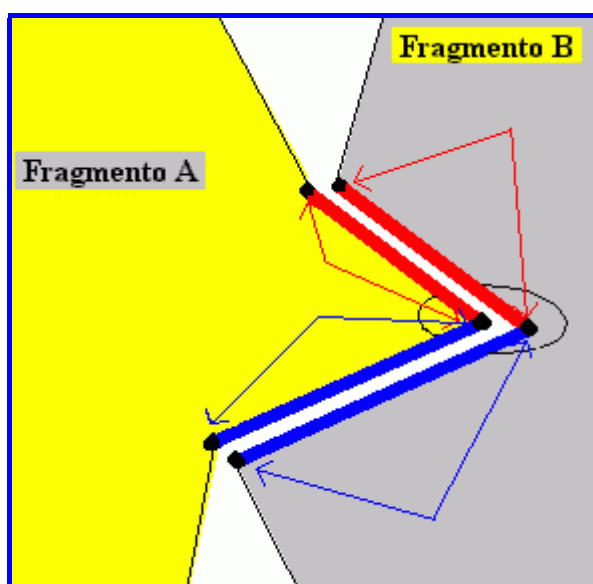


Figura 3.21 – Vértice com características combinando todas as similaridades.

3.6. Classificação dos fragmentos

Como já mostrado até aqui, o processo inicia com a conversão da imagem colorida do fragmento para imagem em níveis de cinza; passando depois pela eliminação do fundo, extração do contorno, aplicação da aproximação poligonal e extração das características dos vértices do fragmento.

Com as características dos fragmentos candidatos a pertencer ao documento, conforme exemplo da Tabela 3.1, a etapa seguinte é buscar as similaridades para rotulação individual de cada fragmento. A partir dessa etapa são utilizadas apenas as características para o processamento das similaridades e rotulação dos fragmentos.

O uso da aproximação poligonal diminui significativamente o número de pontos, que indicam mudanças de direção do contorno e formam os vértices de onde são extraídas as características. A diminuição de pontos simplifica o processamento, permitindo a comparação através das rotações dos fragmentos.

Para reconstrução de um documento $D = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$, onde F_i é um de seus n fragmentos, é aplicado o algoritmo baseado no método proposto por Leitão [LEITÃO, 2000], buscando a melhor combinação entre dois fragmentos de cada vez. O algoritmo compara o fragmento F_1 com todos os outros fragmentos na busca da melhor combinação, isto é, o valor máximo de $W_{matching}$ definido anteriormente.

Usando essa sistemática foram desenvolvidos três métodos de classificação para a rotulação dos fragmentos do documento, apresentados a seguir.

3.6.1. Classificação com repetição de fragmentos candidatos a parceiros

No primeiro método foram analisadas as similaridades de cada fragmento em relação a todos os demais que compunham o documento, independentemente se o fragmento analisado já foi escolhido como parceiro de outro fragmento anteriormente. A comparação inicia-se entre os fragmentos F_1 e F_2 , guardando-se o $W_{matching}$ entre eles. Em seguida, compara-se F_1 com F_3 , e assim sucessivamente, até que sejam comparados entre si todos os F_n fragmentos candidatos. Quando a comparação é concluída é escolhido o melhor parceiro do fragmento F_1 , através do maior $W_{matching}$ anotado. Na sequência, repetem-se as análises para F_2, F_3 até o F_n , escolhendo-se o melhor parceiro para cada um deles. O resultado consiste numa lista contendo as melhores duplas. Nessa lista pode existir a repetição de parceiros. Por exemplo: O fragmento F_3 poderá ser parceiro de F_5 , e F_8 poderá ser parceiro de F_3 ao mesmo tempo.

3.6.2. Classificação sem repetição de fragmentos candidatos a parceiros

Este método inicia as comparações de maneira idêntica ao método anterior. A diferença neste caso é que são excluídos, para as próximas comparações a dupla que combinou. Na sequência reiniciam-se as análises para o próximo fragmento, que pode ser o F_2 , se ele não for o candidato a parceiro de F_1 , e assim sucessivamente até comparar F_{n-1} com o fragmento F_n do documento. O resultado final consiste numa lista contendo os melhores candidatos a parceiros, para cada um dos fragmentos do documento, sem repetição de fragmentos.

3.6.3. Classificação com processo de convergência

A classificação com processo de convergência baseia-se no princípio utilizado na montagem de quebra-cabeça.

A exemplo dos métodos anteriores de classificação a comparação inicia-se entre os fragmentos F_1 e F_2 , guardando-se $W_{matching}$ entre eles. Depois F_1 e F_3 , e assim sucessivamente até F_1 ser comparado com F_n ; quando então é escolhido o melhor parceiro do fragmento F_1 , através do máximo $W_{matching}$.

Nesse momento é analisado o vértice associado ao máximo $W_{matching}$ e quantos vértices antes e depois dele apresentaram similaridades. Através do resultado dessa análise é feita a junção dos dois fragmentos, com a exclusão dos vértices onde houveram similaridades, formando um novo fragmento, conforme mostra a Figura 3.22. Os dois fragmentos originais são excluídos.

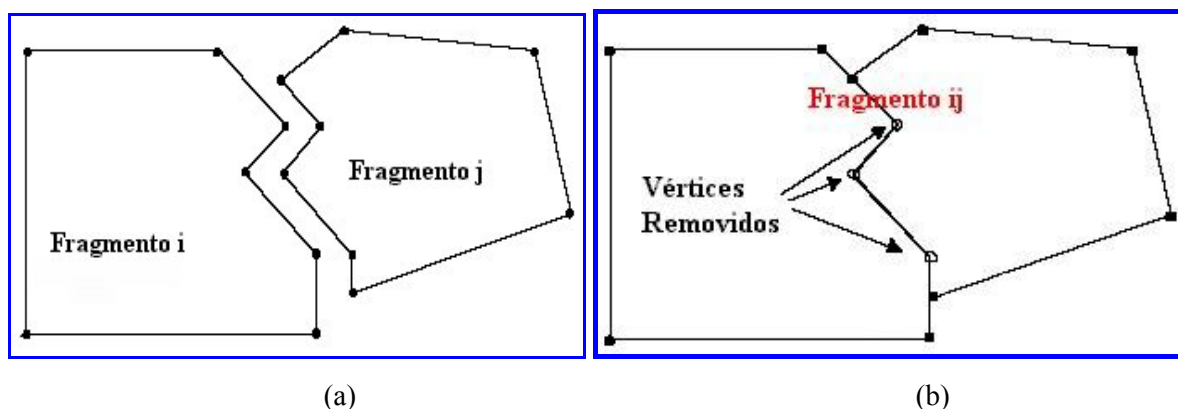


Figura 3.22 – (a) Melhor combinação entre os fragmentos i e j e (b) novo fragmento F_{ij} com três vértices removidos.

As próximas comparações são efetuadas tomando esse novo fragmento como sendo o fragmento F_1 , conforme mostra a Figura 3.23. Repete-se o processo de escolha e junção de outro melhor candidato a parceiro para esse fragmento. O processo continua até que não existam mais fragmentos para serem anexados, ou quando não existir mais candidato a parceiro, quando então é interrompido sem convergir.

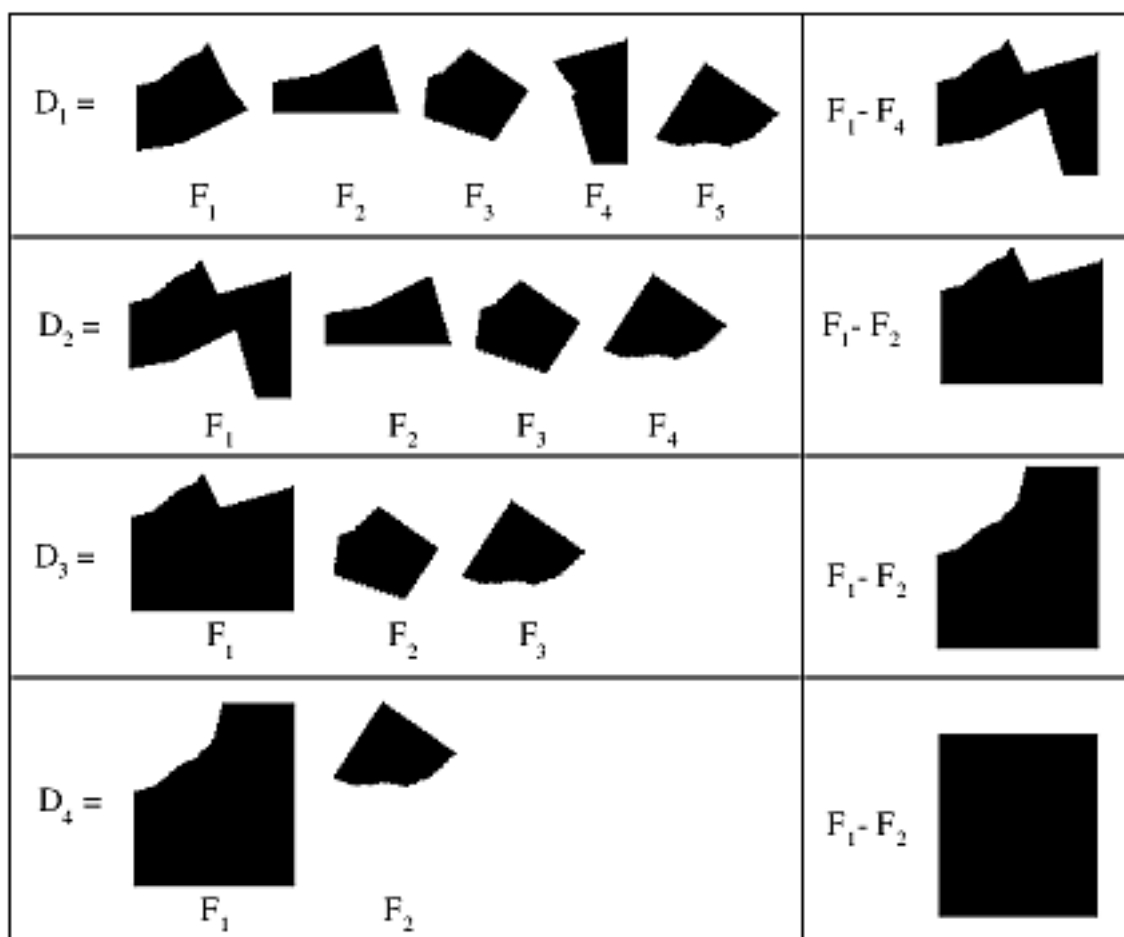


Figura 3.23 – Passos do processo de reconstrução.

Para cada documento o resultado final consistirá numa lista contendo em seu início os dois melhores candidatos a parceiros, seguidos pelos demais fragmentos, na ordem que foram anexados ao fragmento principal. Finalizando essa lista, estão os fragmentos que eventualmente não foram anexados ao documento em rotulação. Tais fragmentos possuem a identificação de serem fragmentos avulsos desse documento.

O método é descrito no algoritmo 1 apresentado a seguir:

Algoritmo 1 – Busca Global

 $D = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$
repeat

best = NULL

for $i = 2$ to n **do** Compute all possible $W_{matching}$ for F_1 and F_i **if** there is a $W_{matching} > 0$ **then** best = i that maximizes $W_{matching}$ **end if** **end for** **if** best $\neq$ NULL **then** $F_{new} = F_1 \cup F_{best}$ Remove F_1 and F_{best} from D Insert F_{new} into D $n = n - 1$ **end if****until** $n = 1$ OR best $\neq$ NULL**return** F_{new}

Depois de rotulados os fragmentos, a reconstituição física do documento pode ser efetivada através da anexação das partes. Isso deverá ser realizado de acordo com a indicação dos resultados utilizados para a rotulação de todos os fragmentos, conforme sugerido na Figura 3.24.

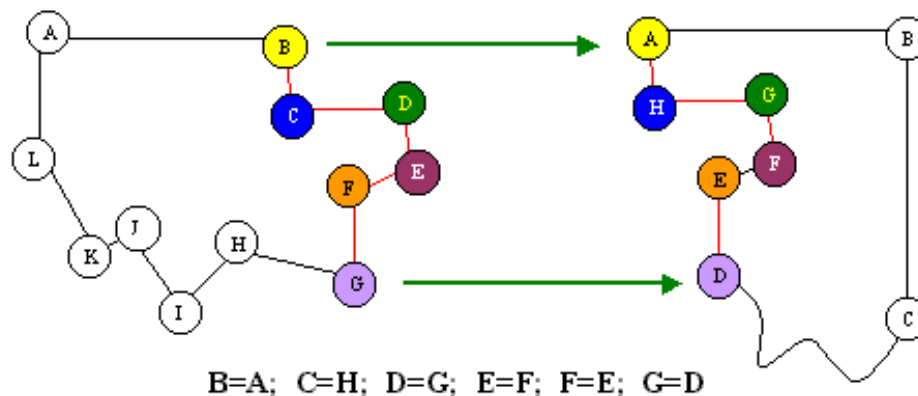


Figura 3.24 - Vértices candidatos a parceiros em remontagem manual.

3.6.4. Principais Algoritmos

Nesta parte final do Capítulo 3 são apresentados os principais algoritmos utilizados no projeto.

O primeiro algoritmo mostra a síntese do processo.

RDM(número documento original)

```
{
    Enquanto existir fragmentos
    {
        lê imagem(número documento):imagem colorida
        converte cinza(imagem colorida):imagem cinza
        elimina fundo(imagem cinza):imagem sem fundo
        //algoritmo de Freeman [FREEMAN, 1974]
        extrai contorno(imagem sem fundo):imagem contorno
        //algoritmo Pavlidis [PAVLIDIS, 1982]
        lê contorno(imagem contorno):vetor pontos(x,y)
        //algoritmo Douglas & Peucker[DOUGLAS & PEUCKER, 1973]
        aproximação poligonal(vetor pontos):vetor vértices(x,y)
        extrai caracter(vetor vértices):arquivo características
        salva arquivo características()
    }
    Enquanto existir fragmentos
    {
        Lê arquivos características(número documento)
        Armazena matriz memória()
    }
    Enquanto existir fragmentos
    {
        busca parceiros(matriz memória):dupla selecionada
        junta pedaços(dupla selecionada):novo pedaço
    }
    salva resultado()
}
```

```
extraí características(vetor vértices)
```

```
{
    Enquanto houver vértices
    {
        calcula ângulo;
        calcula distância distA;
        calcula distância distB;
        calcula importância vértice;
    }
    salva características()
}
```

```
calcula ângulo(int xo, int yo, int xa, int ya, int xp, int yp, int local )
```

```
{
    //xa, ya = coordenadas ponto anterior
    //xo, yo = coordenadas ponto origem
    //xp, yp = coordenadas ponto posterior
    //local = ângulo côncavo ou convexo
    int ux, uy, vx, vy, ang;
    float arccos, PI = 3.14159265358979;
    ux = (xa-xo);
    uy = (ya-yo);
    vx = (xp-xo);
    vy = (yp-yo);
    //ângulo em radianos
    arccos = acos(((ux*vx)+(uy*vy)) / (sqrt((ux*ux)+(uy*uy)) *
        sqrt((vx*vx)+(vy*vy))));
    //converter radianos para graus com arredondamento
    ang = (arccos*180/PI)+0.5;
    //Verifica se ângulo convexo
    if(local == 0)
        ang = 360 - ang;
    return ang;
}
```

calcula distância(int x1, int y1, int x2, int y2)

```
{
    //distância entre dois pontos A(x1,y1) B(x2,y2)
    return (int)sqrt(((x2-x1)*(x2-x1)) + ((y2-y1)*(y2-y1)));
}
```

calcula importância(int dist, imp tamanho)

```
{
    //dist = distância entre os vértices
    //tamanho = número pixels do contorno
    return (int)(dist*100)/tamanho;
}
```

Busca parceiros(arquivo características)

```
{
    Enquanto houver fragmentos candidatos
        Enquanto houver vértice em A // rotacionamento A
            Enquanto houver vértice em B // translacionamento B
                calcula similaridade vértice A x B
                guarda similaridade do vértice;
            guarda similaridade do giro;
        guarda melhor giro(combinação A x B)
    guarda melhor combinação(A x X)
}
```

calcula similaridade(vértices A, B)

```
{
    compara o ângulo dos vértices
    se ângulo é parceiro
        compara a distância de um lado do vértice
        compara a distância do outro lado do vértice
        se distâncias similares
            calcula importância do vértice
}
```

Junta pedaços (melhor combinação de busca parceiros (A,X))

```
{  
    verifica vértice de maior importância  
    verifica se existem vizinhos com similaridades  
    anexa fragmento eliminando vértices com similaridades  
    retorna novo fragmento  
}
```

3.7. Conclusão

Este Capítulo 3 mostrou a montagem da base de documentos mutilados. O desenvolvimento da metodologia para extração das características dos fragmentos. O funcionamento dos métodos desenvolvidos para a busca dos fragmentos parceiros e os principais algoritmos utilizados. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos na aplicação dessa metodologia.

Capítulo 4

Protocolo Experimental e Resultados Obtidos

4.1. Introdução

Este Capítulo mostra os testes realizados com as metodologias apresentadas no Capítulo 3. Também mostra o protocolo experimental e os resultados alcançados, com as conclusões de cada experimento.

O trabalho abrangeu vários experimentos durante as fases de aquisição da imagem, pré-tratamento e segmentação, extração do contorno e aplicação da aproximação poligonal sobre o contorno. A extração de características dos vértices também demandou várias experiências, que culminaram com a montagem do arquivo de características conforme Tabela 3.1.

Como experimentos práticos destaca-se a seguir os três que apresentaram melhor desempenho, na base de imagens descrita no Capítulo 3. Esses experimentos foram realizados com vários níveis de tolerância na aproximação poligonal, conforme apresentado no Capítulo 2 na Seção 2.2, sendo aqui mostrados os resultados das tolerâncias baixa (6 a 10) e média (11 a 32) [DAVIS JR, 1998]. Esses foram os níveis que melhor desempenho apresentaram no conjunto de documentos da base de imagens. Convém salientar que na base de documentos da PUCPR existem documentos, que em virtude da forma de seus fragmentos, não permitem a identificação de seus parceiros através dos algoritmos implementados. Esses documentos foram incluídos intencionalmente para testar mais efetivamente os métodos desenvolvidos.

4.2. Classificação com repetição de candidatos a parceiros

Nesse experimento foi testada a rotulação dos fragmentos, para identificação dos vizinhos, através das similaridades entre características dos vértices da aproximação poligonal, conforme metodologia descrita em 3.5.1. Este experimento foi realizado utilizando algoritmo baseado no trabalho de Leitão [LEITÃO, 2000]. O que o diferencia é que naquele, a identificação dos pares foi realizada através da curvatura interna fechada do fragmento, enquanto este experimento usa as similaridades das características dos vértices extraídos através da aproximação poligonal.

No resultado podem aparecer candidatos repetidos como, por exemplo, fragmento F_1 é candidato a vizinho do fragmento F_6 , ao mesmo tempo em que o fragmento F_3 também é candidato a vizinho do fragmento F_6 . Porém isso não significa propriamente erro, porque na realidade um fragmento pode possuir mais de um vizinho.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados do teste aplicado em toda a base. Com tolerância baixa na aproximação poligonal o resultado apresentou 15% de documentos com erros antes de finalizar o processo. Dentre os 85% dos documentos que concluíram integralmente o processo, 34% apresentaram fragmentos falsos candidatos no resultado e 51% classificaram corretamente os fragmentos candidatos.

Tabela 4.1 – Resultado do experimento 1.

Tolerância da aproximação poligonal	Erros durante o processo	Falsos candidatos	Candidatos corretos
Baixa	15%	34%	51%
Média	17%	40%	43%

Nota-se que conforme a tolerância da aproximação poligonal aumenta, o nível de acerto diminui. Com baixa tolerância os fragmentos candidatos a parceiros classificados corretamente representam 51% dos documentos da base, enquanto com a média tolerância esse nível de acerto desce para 43%.

O comportamento observado, em que o aumento dos erros cresce na medida em que a tolerância da aproximação poligonal é aumentada, foi notado em todos os experimentos realizados, mesmo naqueles que não estão aqui documentados.

Observa-se também que o nível de acerto das duplas parceiras de fragmentos diminui quando a tolerância da aproximação poligonal vai assumindo um valor muito próximo de 1 pixel. Essa diminuição é verificada em virtude do aumento significativo de vértices após a aplicação da aproximação poligonal nos fragmentos, observando essas condições para tolerância.

4.3. Classificação sem repetição de fragmentos candidatos a parceiros

Este método é semelhante ao experimento anterior, com a diferença de que cada fragmento identificado como parceiro vai sendo eliminado nas próximas comparações. O resultado é uma lista de candidatos a parceiros sem repetição de fragmentos candidatos.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados do teste aplicado em toda a base. Com tolerância baixa na aproximação poligonal o resultado apresentou 19% de documentos com erros antes de finalizar o processo. Dentre os 81% dos documentos que concluíram integralmente o processo 24% apresentaram fragmentos falsos candidatos no resultado e para 57% foram classificados corretamente todos os fragmentos candidatos a parceiros.

Tabela 4.2 – Resultado do experimento 2.

Tolerância da aproximação poligonal	Erros durante o processo	Falsos candidatos	Candidatos corretos
Baixa	19%	24%	57%
Média	20%	31%	49%

Em comparação ao experimento anterior nota-se que os documentos que não concluíram o processo por erro aumentaram de 15% para 19%, com baixa tolerância na aproximação poligonal. Em compensação o número fragmentos falsos candidatos caiu de 34% para 24%, indicando maior confiabilidade para este método.

A diminuição dos falsos candidatos foi em virtude de que neste experimento não se permite a repetição de fragmentos candidatos a parceiros.

Com baixa tolerância na aproximação poligonal aumentaram de 51% para 57% os documentos com todos os fragmentos candidatos a parceiros corretos, em comparação com o experimento anterior. Usando média tolerância, os acertos foram de 43% para 49% e os erros aumentaram somente em 3%.

Nesse experimento os resultados demonstraram também que a variação significativa da tolerância da aproximação poligonal, para mais ou para menos, influencia no resultado final da mesma maneira que no experimento anterior.

4.4. Classificação com convergência

A classificação com processo de convergência baseia-se no princípio utilizado em quebra-cabeça. A classificação dos fragmentos vizinhos começa com a escolha dos dois melhores candidatos a parceiros, os quais são anexados formando um novo fragmento. A busca reinicia-se a partir desse novo fragmento para um novo melhor parceiro que também será anexado. Assim sucessivamente até a reconstrução total do documento, conforme metodologia descrita em 3.5.3.

A Tabela 4.3 mostra que o resultado da aplicação deste método usando baixa tolerância na aproximação poligonal permitiu a rotulação de todos os fragmentos em 45% dos documentos da base de teste. Se analisado apenas o valor de 45%, ele é inferior aos 51% do primeiro e 57% do segundo experimento. Porém, nos experimentos anteriores era feita apenas a rotulação dos fragmentos em duplas e nesse experimento é realizada a convergência para a rotulação da reconstrução total do documento mutilado, facilitando assim a sua eventual remontagem física.

Tabela 4.3 – Resultado do experimento 3.

Tolerância da aproximação poligonal	Nenhuma convergência	Convergência parcial	Convergência completa
Baixa	5%	50%	45%
Média	6%	48%	46%

Para média tolerância na aproximação poligonal este método propiciou a convergência de todos os fragmentos em 46% dos documentos. A primeira vista poder-se-ia concluir que o desempenho foi melhor que com baixa tolerância, porém deve-se considerar que a taxa de falsos parceiros aumentou, conforme mostrado na Tabela 4.4, e o número de erros também aumentou de 5% para 6%.

A junção dos fragmentos parceiros para criação de um novo fragmento, a cada ciclo do processo, provoca distorção na estrutura temporária do documento que está sendo remontado. Essa distorção provoca elevação da taxa de falsos candidatos e afeta a composição final do documento.

A Tabela 4.4 mostra que para 45% dos documentos da base, convergiram todos os fragmentos com baixa tolerância na aproximação poligonal. Sendo que, em 86,67% desses documentos foram classificados corretamente todos os fragmentos e em 13,33% apareceram falsos parceiros entre os fragmentos classificados. Também é mostrado na Tabela 4.4 que o percentual de documentos convergentes sob para 46% com média tolerância para a aproximação poligonal. Porém dentro desse resultado os documentos com todos os fragmentos classificados corretamente desce para 80,44%, enquanto que os documentos com fragmentos falsos parceiros sob para 19,56%.

Tabela 4.4 – Resultado considerando documentos que convergiram 100% dos fragmentos.

Tolerância da aproximação poligonal	Documentos da base com convergência	Nível de acerto na convergência	
		<i>Parceiros corretos</i>	<i>Falsos parceiros</i>
Baixa	45	86.67%	13.33%
Média	46	80.44%	19.56%

O comportamento mostrado através da Tabela 4.4 mostra mais uma vez que a variação da tolerância na aproximação poligonal influi no resultado final, da mesma maneira que nos experimentos anteriores.

A eventual falta de um fragmento do documento, como mostrado na Figura 4.1, interfere nos resultados do processo de convergência, dependendo da ordem em que ele é anexado ao documento durante o processo de rotulação. Só não haverá interferência se o fragmento faltante for o último candidato a parceiro na rotulação dos demais fragmentos.

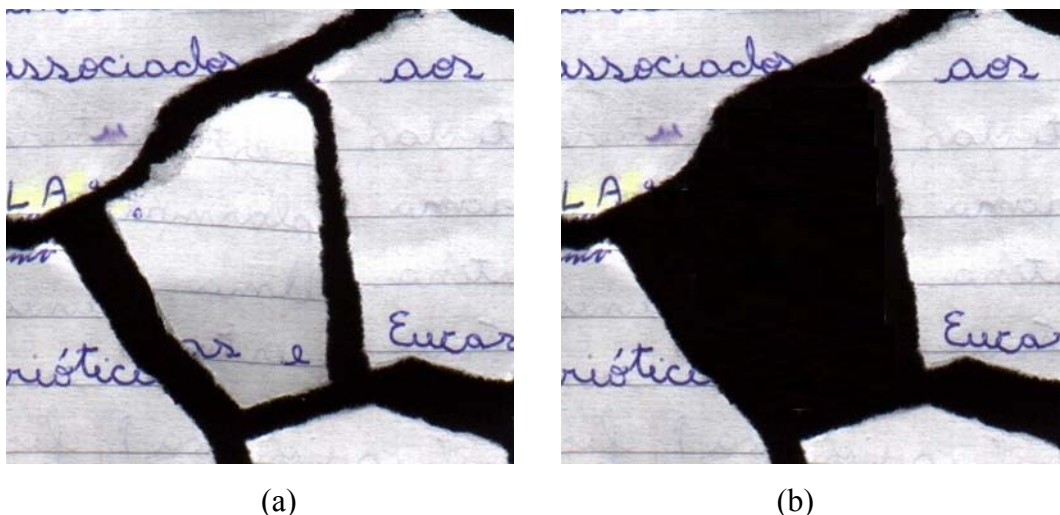


Figura 4.1 – (a) parte de documento, (b) com exclusão de um fragmento.

A Figura 4.2 mostra um gráfico do desempenho de acordo com o número de fragmentos dos documentos analisados. Como mostrado, à medida que o número de fragmentos aumenta o desempenho do método diminui. Esse é um comportamento natural em todos os processos de convergência, ainda mais com o uso da aproximação poligonal. Ela reduz consideravelmente a complexidade do processo de comparação, mas dificulta manter o nível de performance para documentos com grande quantidade de fragmentos.

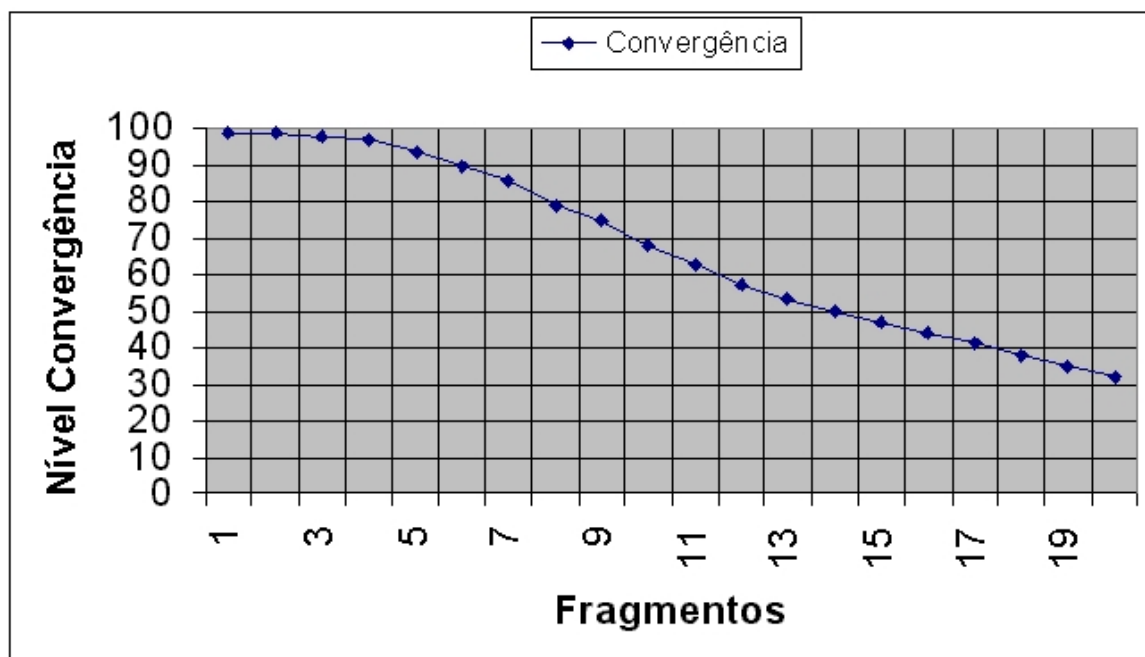


Figura 4.2 – Nível de convergência de acordo com a quantidade de fragmentos, baixa tolerância.

Esse desempenho pode variar também conforme o tipo de mutilação do documento ou da variação da banda de tolerância da aproximação poligonal. Um documento com 9 fragmentos, por exemplo, pode apresentar diferentes níveis de convergência, dependendo do instrumento utilizado para sua fragmentação, ou a banda de tolerância aplicada na aproximação poligonal.

Os testes demonstraram que existem algumas características nos contornos dos fragmentos que interferem e, algumas vezes, comprometem um bom resultado. Uma característica que permite que os resultados sejam mais significativos é o formato irregular das bordas, conforme mostrado na Tabela 4.5. Quando a mutilação é provocada com o auxílio de uma régua, no contorno do fragmento aparecem mais linhas retas do que vértices. Isso diminui os locais onde se pode efetuar a extração de características. O uso de estilete também provoca linhas retas e poucos vértices. O uso de tesoura aumenta um pouco número de vértices. Portanto, a maneira de fragmentação que gera um maior número de vértices e aumenta a possibilidade de extração de características do contorno do fragmento é a mutilação efetuada de forma manual.

Tabela 4.5 – Resultado do experimento 3 por tipo de mutilação.

Tipo de mutilação	Erros	Convergência dos fragmentos
Régua	25%	27%
Estilete	19%	34%
Tesoura	9%	40%
Manual	4%	51%
<i>Geral</i>	<i>5%</i>	<i>45%</i>

Quanto mais irregular for o formato do contorno dos fragmentos mais características são extraídas o que permite uma melhor catalogação de seu parceiro, a exemplo do documento constante na Figura 4.3. Um fragmento que possua linhas retas em seu contorno diminui o número de vértices e, conseqüentemente, a possibilidade de extração de características que permitiriam a busca de similaridades com outros fragmentos parceiros.

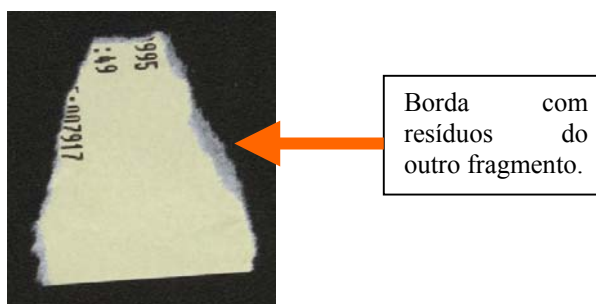


Figura 4.3 – Fragmento de documento com contorno irregular.

Porém, esse mesmo fragmento mostrado na Figura 4.3 também apresenta elementos que interferem no resultado do cálculo das características e na busca dos parceiros. A sua borda apresenta partes onde a mutilação tem um rasgo irregular deixando parte da espessura do papel em um fragmento e outra parte dessa mesma espessura no outro fragmento. Esses elementos, que interferem na extração do contorno do fragmento, são atenuados com a aplicação da aproximação poligonal.

Já o fragmento da Figura 4.4 possui bordas com formatos retos o que permitirá a extração de poucas características. Esse fragmento após a aplicação da aproximação poligonal resultará em uma forma geométrica de um triângulo. Os fragmentos com forma de figuras geométricas regulares a exemplo de triângulos, quadrados ou retângulos apresentam dificuldades para serem catalogados em virtude de que seus lados são formados por linhas retas das quais não podem ser extraídas características. O método funciona através da busca de similaridades das características existentes em cada vértice. Um fragmento que não contenha vértices que combinem com vértices de outro fragmento não permitirá a busca dessas similaridades.

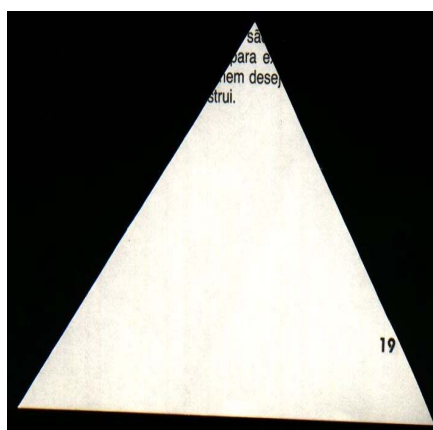


Figura 4.4 – Fragmento de documento com forma regular.

A maioria dos vértices resultantes da aproximação poligonal permite a extração de características para a busca dos candidatos a parceiros, porque formam encaixes quando comparados em 2 fragmentos distintos, conforme mostra a Figura 4.5.

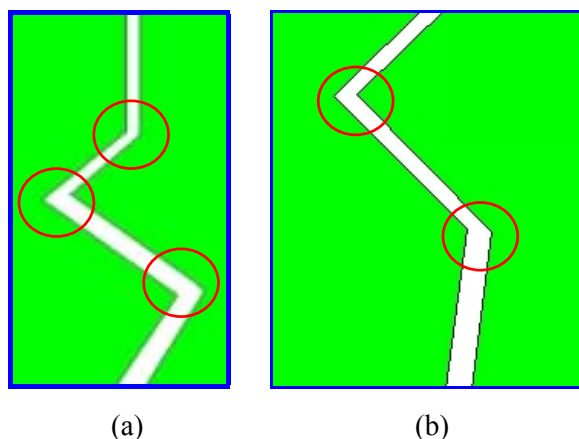


Figura 4.5 – Vértices da aproximação poligonal com identificação de similaridades parceiras.

No entanto, existem vértices que depois de extraídas as primitivas não permitem essa busca de candidatos a parceiros entre dois fragmentos do documento porque não existem vértices parceiros para serem comparadas similaridades. Na Figura 4.6(a) um fragmento encosta-se em uma reta de outro fragmento não permitindo a comparação de qualquer similaridade. Na Figura 4.6(b) existe o encontro de 3 fragmentos o que não permite o cálculo de similaridade entre 2 deles. Da mesma maneira na Figura 4.6(c) existe o encontro de 4 fragmentos que também não permite a comparação de similaridades entre eles.

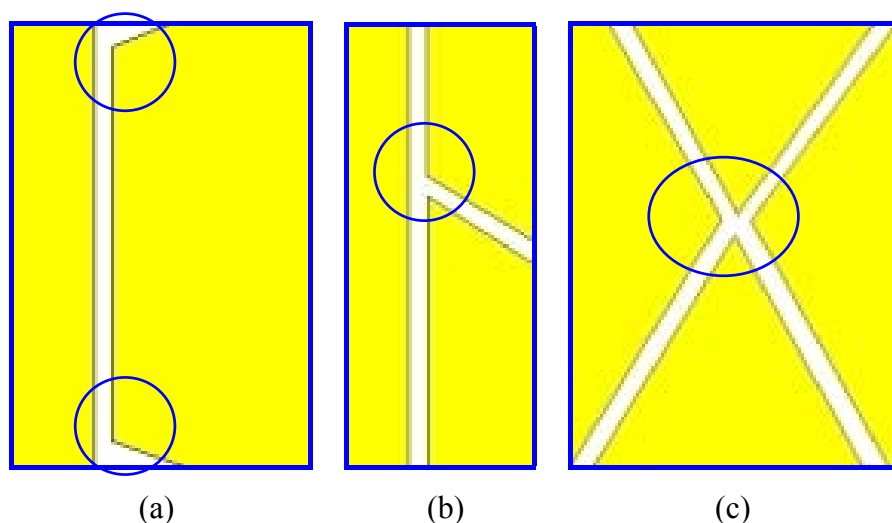


Figura 4.6 – Vértices da aproximação poligonal sem identificação de similaridades parceiras.

Através da análise dos resultados apresentados nos testes, nota-se que a aplicação da aproximação poligonal, para extração de características dos fragmentos dos documentos mutilados, representa uma forma de catalogação e reconstrução de documentos com resultados promissores.

Outro fato importante é que não existe uma tolerância ideal para a aproximação poligonal, que possa ser aplicada em toda a base. A eficiência do método de convergência está diretamente ligada à irregularidade das bordas, e da extração das características.

A Figura 4.7 mostra os fragmentos de um documento da base de imagens com a remontagem manual dos pedaços apresentada nas Figuras 4.8 e 4.9, de acordo com o resultado apresentado pela aplicação do método proposto.

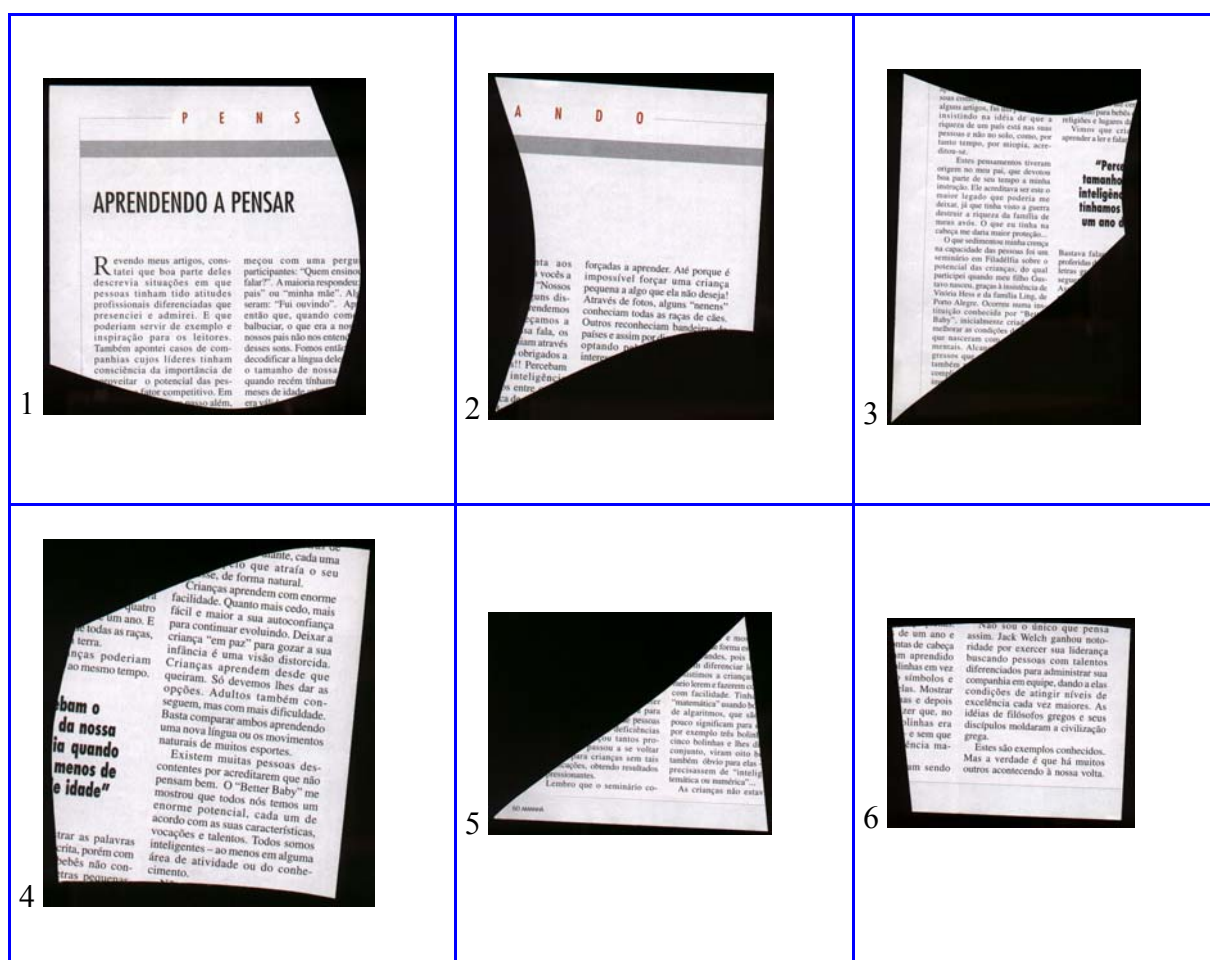


Figura 4.7 – Fragmentos (1 a 6) do documento 62 da base de imagens.

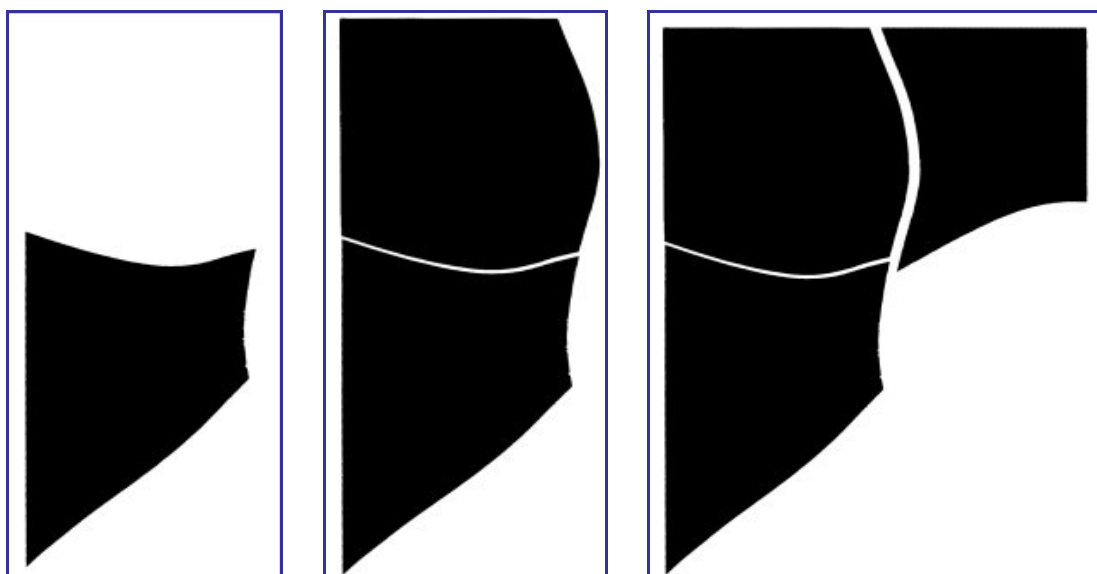


Figura 4.8 – Início da remontagem manual do documento.

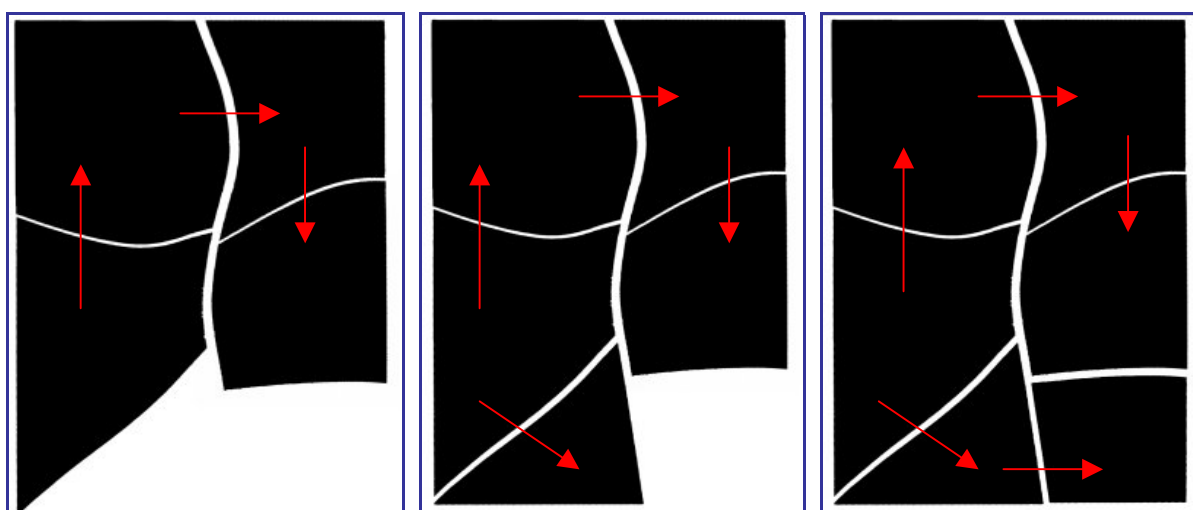


Figura 4.9 – Sequência da remontagem usando resultado da rotulação dos fragmentos: 3; 1; 2; 4; 5; 6.

4.5. Conclusão

Este Capítulo 4 apresentou o protocolo experimental e os resultados obtidos nos experimentos realizados durante o desenvolvimento da metodologia. Também foram analisados os fatores que contribuem para melhoria ou interferem nos resultados dos testes. O próximo capítulo é a conclusão deste trabalho.

Conclusão

Este é um trabalho pioneiro na área de documentoscopia desenvolvido pelo Laboratório de Computação Forense e Biometria da PUCPR. Neste trabalho foi desenvolvido um método para reconstrução digital de documentos mutilados utilizando aproximação poligonal e características das formas dos fragmentos. A reconstrução digital de documentos fragmentados através de características da forma é muito mais complexa do que a simples remontagem de um quebra-cabeça. As peças do quebra-cabeça possuem formas e contornos perfeitamente definidos. Os fragmentos de documentos mutilados possuem formas e contornos com interferências nas bordas conforme o tipo de mutilação sofrida. Em decorrência disso o fragmento de um documento mutilado exige trabalhos específicos desde sua digitalização, pré-tratamento e extração de seu contorno. Depois, para diminuir a complexidade, é necessária a aplicação de um método para simplificação do contorno, onde foi utilizada a aproximação poligonal.

Os resultados demonstram que as características usadas pelo método para identificar os fragmentos são suficientes para reconstruir documentos mutilados manualmente [SOLANA et al., 2005].

Embora ainda possam ser aprimorados, os resultados alcançados nesse projeto justificam a continuidade das pesquisas nessa área e demonstram que existe um campo em aberto para outros trabalhos.

As maiores contribuições desse trabalho podem ser destacadas como:

- Desenvolvimento de um método para auxílio na perícia documentoscópica através da reconstrução de documentos mutilados sendo o pioneiro na área de Ciências Forenses desenvolvido na PUCPR;
- Abertura de espaço para pesquisas na área de documentoscopia permitindo o desenvolvimento de outros projetos abrangendo um largo espectro de aplicações nas áreas de Criminalística, Informática, Biblioteconomia, entre outras.

- Criação de uma base de conhecimentos fundamentais dentro da equipe envolvida, permitindo o prosseguimento das pesquisas na área de Ciências Forenses e Biometria da PUCPR;
- Outro fator relevante do projeto foi o trabalho desenvolvido para montagem da primeira base de dados de documentos mutilados na PUCPR. Criada durante o andamento do projeto para propiciar as pesquisas de laboratório. A base encontra-se sobre a responsabilidade do Laboratório de Direito e Tecnologia - LADITEC, do Programa de Pós-Graduação em Direito Econômico e Social - PPGDES, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR.

Como futuros trabalhos podem ser destacados:

- criação de características globais para identificar os fragmentos candidatos a parceiros pertencentes a um mesmo documento;
- aumento das características utilizadas com o uso das informações de contexto do fragmento a exemplo de textura e cor;
- estudar a variação da banda de tolerância da aproximação poligonal para criar processo automático de detecção da melhor banda de tolerância a ser aplicada a cada tipo de mutilação/fragmento;
- automatizar a aplicação de métodos de práticas periciais forenses nos fragmentos;
- analisar o desempenho do método usando Redes Neurais e SVM para classificação dos fragmentos;
- estudar o comportamento do método em outros tipos de fragmentos diferentes do elemento físico de base papel;
- estudar o comportamento do método conforme o instrumento utilizado para fragmentação do documento visando estabelecer padrões para convergência por tipo de mutilação;
- ampliar e renovar a base de imagens conforme o direcionamento/ necessidade das futuras pesquisas.

Referências Bibliográficas

- [ABUTALEB, 1989] ABUTALEB, A. S., *Automatic Thresholding of Gray-Level Pictures Using Two Dimensional Entropy*. Computers Graphics & Image Processing, No. 47, pp 22-32, 1989.
- [AJS, 2004] AJS, *FAQ*, Disponível em <<http://www.ajs.com.br>>, consultado em 28/01/05.
- [AYACHE & FAUGERAS, 1986] AYACHE, N. e FAUGERAS O. D., *Hyper: A New approach for the recognition and Positioning of Two-Dimensional Objects*. IEEE – Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 8(1):44-54, Janeiro de 1986.
- [BUNKE & KAUFMANN, 1993] BUNKE, H. e KAUFMANN, G., *Jigsaw puzzle solving using approximate string matching and best-first search*, Procs of the 5th International Conference on computer Analysis of images and Patterns, pp 299-308, 1993.
- [CÂMARA et al., 2004] CÂMARA, G.; DAVIS JUNIOR, C. A.; MONTEIRO, A. M., *Geoprocessamento: Teoria e Aplicações - Volume IV - Geometria Computacional para Sistemas de Informação Geográfica*, disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/>, INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, acessado em 11/11/2004.
- [CANNY, 1986] CANNY, J. F., *A computational approach to edge detection*, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 8(6), pp 679 – 698, 1986.
- [CENTENO, 2004] CENTENO, T. M., *Processamento de Imagens*. CPGEI - Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR, disponível em <http://www.cpgei.cefetpr.br/~mezzadri/PDI/PDI.html>, acessado em 11/11/2004.
- [CHENG & HSU, 1988] CHENG, F. H. e HSU, W. H., *Parallel Algorithm for Corner Finding on Digital Curves*. Pattern Recognition Letters. (8):47-53, Julho de 1988.
- [CHURCHSTREET, 2003] CHURCHSTREET TECHNOLOGY, Inc. Disponível em: <<http://www.churchstreet-technology.com>>, acessado em 25/03/2003.
- [CHURCHSTREET, 2005a] CHURCHSTREET TECHNOLOGY, Inc. *ChurchStreet's Current Advertisement*, Disponível em: <<http://www.churchstreet-technology.com>>, acessado em 12/02/2005.

- [CHURCHSTREET, 2005b] CHURCHSTREET TECHNOLOGY, Inc. *ChurchStreet's Software Suite Brochure* Disponível em: <<http://www.churchstreet-technology.com>>, acessado em 12/02/2005.
- [CIE, 1931] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. *Proceedings of the eighth session, Cambridge, Inglaterra*. Bureau Central de La Commission Internationale de l'Eclairage. 326p. 1931.
- [CORTEZ & CARVALHO, 1992] CORTEZ, P. C. e CARVALHO, J. M., *Algoritmo para Modelagem Poligonal de Objetos em 2D*. 9º. Congresso Brasileiro de Automática. Vitória, Espírito Santo, Setembro de 1992.
- [CORTEZ & CARVALHO, 1993] CORTEZ, P. C. e CARVALHO, J. M., *Avaliação de Três Algoritmos de Modelagem Poligonal de Contornos Bidimensionais*. VI Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens – SIBGRAPI, Recife, Pernambuco, Outubro de 1993.
- [CORTEZ & CARVALHO, 1994] CORTEZ, P. C. e CARVALHO, J. M., *Método Sequencial de Modelagem Poligonal Baseado em Algoritmo não Convencional*. VII Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens - SIBGRAPI. 1994.
- [CORTEZ & CARVALHO, 1995] CORTEZ, P. C. e CARVALHO, J. M., *Modelagem poligonal de Contornos 2D Usando a Transformada de Hough*. 13º. Simpósio Brasileiro de Telecomunicações. Páginas 605-610, Águas de Lindóia, São Paulo, 03 a 06 de setembro de 1995.
- [CORTEZ et al., 1995] CORTEZ, P. C. ; MELCHER, E. ; CARVALHO, J. M. ; BARROS, M.; NAVINER, L., NAVINER, J. F. ; SILVA, V. R.; PAES, F. H. S.; MOREIRA, R. A. S. ; BRAQUEHAIS, J. E. P., *A 2D Shape Boundary Detection Algorithm for VLSI Implementation*. VIII Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens. Páginas 191-196, São Carlos, São Paulo, Outubro de 1995.
- [CORTEZ, 1996] CORTEZ, P. C., *Reconhecimento de Formas 2D Usando uma Técnica Sequencial Integrada e Modelos Poligonais*. Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Tese de Doutorado, Julho de 1996.
- [CORTEZ et al., 1996] CORTEZ, P. C. ; MELCHER, E. ; CARVALHO, J. M. ; NAVINER, L., NAVINER, J. F., *A Vertex Detection Algorithm for VLSI Implementation*. IX Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens - SIBGRAPI. Páginas 367-368, Outubro de 1996.
- [CORTEZ & CARVALHO, 1997] CORTEZ, P. C. e CARVALHO, J. M., *Reconhecimento de Formas 2D: Usando uma Técnica Sequencial Integrada e Modelos Poligonais*. 3º. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Vitória, Espírito Santo, 3 a 5 de setembro de 1997.

- [DAVIS JR, 1998] DAVIS JUNIOR, C. A., *O Problema de simplificação de poligonais*. II Semana de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, disponível em: <<http://www.dcc.ufmg.br/pos/html/spg98/anais/clodoveu/clodoveu.html>>, acessado em 11/11/2004.
- [DOUGLAS & PEUCKER, 1973] DOUGLAS, D. e PEUCKER, T., *Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature*, The Canadian Cartographer 10(2), 112-122, 1973.
- [EBISCH, 2002] EBISCH, K., *A correction to the Douglas-Peucker line generalization algorithm*, Computers & Geosciences, Volume 28, Número 8, Outubro, pp. 995-997, 2002.
- [FACON, 1996] FACON, J., *Morfologia Matemática: Teoria e Exemplos*. Editora Universitária Champagnat da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Paraná, 1996.
- [FBI, 2004] Federal Bureau of Investigation. *FBI Laboratory 2003 Report*. FBI Laboratory Publication – www.fbi.gov/hq/lab/labannual03.pdf, Quantico, Virginia, 2004.
- [FREEMAN, 1974] FREEMAN, H., *Computer processing of line-drawing images*. Computing Surveys (CSUR), v. 6 n. 1, p. 57-97, Março 1974.
- [GATO, 2000] GATO, H. E. R., *Uma abordagem semi-automática para extração de feições por crescimento de regiões em imagens digitais*. Dissertação de Mestrado, Ciências Cartográficas, Unesp, Presidente Prudente, 2000.
- [GLOWACKI, 2004] GLOWACKI, K.T., *Franchthi Excavations*, disponível em <http://www.indiana.edu/~archaeol/franchthi/pot.html>, acessado em 13/11/2004.
- [GOMES & VELHO, 2002] GOMES, J. e VELHO, L., *Computação Gráfica: Imagem*. Série de Computação e Matemática do Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada - IMPA, 2002 ISBN 85-244-0088-9, Segunda Edição, 421 páginas.
- [GONZALES & WOODS, 2000] GONZALES, R.C. e WOODS, R.E. *Processamento de Imagens Digitais*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, New York, 1992, Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo SP, 2000.
- [HERSBBERGER & SNOEYINK, 1992] HERSBBERGER, J. e SNOEYINK, J., *Speeding Up the Douglas-Peucker Line-Simplification Algorithm*, Proceedings of the Fifth International Symposium on Spatial Data Handling, Vol. 1, 134-143, 1992.
- [ISKANDAR, 2000] ISKANDAR, J. I., *Normas da ABNT Comentadas para Trabalhos Científicos*. Editora Champagnat, PUCPR, Curitiba, Paraná, 2000.

- [JENKS, 1981] JENKS, G. F., *Lines, Computers and Human Frailties*. In Annals of the Association of American Geographers 71(1): 1-10, 1981.
- [JENKS, 1989] JENKS, G. F., *Geographic Logic in Line Generalization*. Cartographica 26(1): 27-42, 1989.
- [JUNIOR & LINHARES, 1990] JUNIOR, R. M. C. e LINHARES, O. D., *Métodos Numéricos de Aproximação Poligonal: uma Análise Comparativa de 3 métodos*. Jornada EPUSP/IEEE em Computação Visual, Páginas 191-199, 1990.
- [KITTLER & ILLINGWORTH, 1986] KITTLER, J. e ILLINGWORTH, J., *Minimum error thresholding*, Pattern Recognition Letters 19: 41-47, 1986.
- [KNUT, 1973] KNUT, D. E., *The Art of Computer Programming, Volume 1: Fundamental Algorithms*, 2^a Edição, Addison-Wesley, 1973.
- [KONG & KIMIA, 2001] KONG, W. e KIMIA, B. B., *On solving 2D and 3D puzzles using curve matching*, IEEE, Computer Society. Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Hawaii, USA, Dezembro de 2001.
- [KUNG & KASWAND, 1983] KUNG, S. H. Y. e KASWAND, T., *Critical Points on a Perfectly 8- or 6-Connected thin Binary Line*. Pattern Recognition, (3):297-306, 1983.
- [LANG, 1969] LANG, T., *Rules for Robot Draughtsmen*. Geographical Magazine 22: 50-51, 1969.
- [LAROUSSE, 1998] GRANDE ENCICLOPÉDIA LAROUSSE CULTURAL. Editora Nova Cultural Ltda. Pinheiros. São Paulo (SP), 1998.
- [LEITÃO, 2000] LEITÃO, H. C. G., *Reconstrução automática de objetos fragmentados*, Tese de Doutorado de 21/10/1999, Instituto de Educação, Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2000.
- [LI & OPENSHAW, 1992] LI, Z. e OPENSHAW, S., *Algorithms for Automated Line Generalization Based on a Natural Principle of Objective Generalization*. International Journal of Geographic Information Systems 6(5): 373-389, 1992.
- [MARINO, 1979] MARINO, J. S., *Identification of Characteristic Points Along Naturally Occurring Lines: An Empirical Study*. The Canadian Cartographer 16:70-80, 1979.
- [McMASTER, 1987] McMASTER, R. B., *Automated Line Generalization*. Cartographica 24(2):74-111, 1987.
- [MELLO, 2002] MELLO, CARLOS A. B., *Filtragem, Compressão e Síntese de Imagens de Documentos Históricos*, Tese de Doutorado de 27 de Maio de 2002, Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco UFPE, Recife, Pernambuco, 2002.

- [MURRAY, 2003] MURRAY ASSOCIATES. Disponível em: <<http://www.spybusters.com/unshredder.html>>, acessado em 25/03/2003.
- [O’GORMAN & KASTURI, 1998] O’GORMAN, L. e KASTURI, R., *Document image analysis*. IEEE Computer Society Press, USA, 1998.
- [OTSU, 1979] OTSU, N., *A Threshold Selection Method from Gray-level Histograms*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. SMC 9, no. 1, pp. 62-66, janeiro 1979.
- [PAVLIDIS, 1982] PAVLIDIS, T., *Algorithms for Graphics and Image Processing*, Computer Science Press, Rockville, Maryland, 1982, 416 páginas.
- [PAVLIDIS & HOROWITZ, 1974] PAVLIDIS, T. e HOROWITZ, S. I., *Segmentation of Plane Curves*. IEEE – Transactions on Computers, 23(8):860-870, Agosto de 1974.
- [PEREZ & VIDAL, 1992] PEREZ, J. C. E VIDAL, H., *An Algorithm for the Optimum Piecewise Linear Approximation of Digital Curves*, 11th IAPR - International Conference on Pattern Recognition, Conference C: Image, Speech, and Signal Analysis, IEEE Computer Society Press, Volume 3, pp 167-170, Los Alamitos, California, August 30 - September 3, 1992.
- [QUANDT, 1996] QUANDT, A. B., *Recent Developments in the Conservation of Parchment Manuscripts*, Book and Paper specialty group session, AIC 24^a Annual Meeting, Norfolk, Virginia, 1996.
- [RADACK & BADLER, 1982] RADACK, G. M. e BADLER, N. I., *Jigsaw puzzle matching using a boundary-centered polar encoding*. Computer Graphics Image Process. (CGIP). Processing, vol. 19, pp 1-17, may 1982.
- [RAMER, 1972] RAMER, U., *An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves*. COMGP, (1):224-256, Janeiro de 1972.
- [RAY & RAY, 1993] RAY, B. K. e RAY, K. S., *Determination of Optimal Polygon from Digital Curve Using L_1 Norm*. Pattern Recognition, (4):505-509, 1993.
- [REUMANN & WITKAM, 1974] REUMANN, K. e WITKAM, A. P. M., *Optimizing Curve Segmentation in Computer Graphics*. In Proceedings of the International Computing Symposium 1973, 467-472, North-Holland, 1974.
- [ROBISOM et al., 1978] ROBINSON, A. H.; SALE, R. D.; MORRISON, J. L., *Elements of Cartography*, 4th Edition, John Wiley & Sons, 1978.
- [SANKUR & SEZGIN, 2004] SANKUR, B. e SEZGIN, M., *A Survey Over Image Thresholding Techniques And Quantitative Performance Evaluation*, Journal of Electronic Imaging, 13(1), 146-165, Janeiro, 2004.

- [SANTOS, 2004] SANTOS, C. R., *Análise de Assinaturas Manuscritas Baseada nos Princípios de Grafoscopia*, Dissertação de Mestrado de 07/05/2007, no Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada da Pontifícia Universidade Católica do Paraná PUCPR, Curitiba, Paraná, 2004.
- [SATO, 1992] SATO, Y., *Piecewise Linear Approximation of Plane Curves by Perimeter Optimization*. Pattern Recognition, 25(12):1535-1543, Maio de 1992.
- [SEBASTIAN et al., 2000] SEBASTIAN, T. B.; CRISCO, J. J.; KLEIN, P. N.; KIMIA, B. B., *Constructing 2D curve atlases*, In IEEE Workshop on Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis (MMBIA00), June 11-12, Hilton Head, South Carolina, pp 70-77, 2000.
- [SEBASTIAN et al., 2003] SEBASTIAN, T. B.; KLEIN, P. N.; KIMIA, B. B., *On aligning curves*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence archive Volume 25, Issue 1 (January 2003) Pages: 116 - 125, 2003.
- [SEZGIN & SANKUR, 2001] SEZGIN, M.; SANKUR, B., *Quantitative Evaluation and Comparison of Image Thresholding Techniques for Non-Destructive Testing Applications*, ICIP'2001: International Conference on Image Processing, Thessalonica, 2001.
- [SOLANA et al., 2005] SOLANA, C. D. O.; JUSTINO, E.; OLIVEIRA, L.; BORTOLOZZI, F., *Document Reconstruction Based on Feature Matching*. A ser publicado no Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, SIBGRAPI, October 9-12, Natal, RN, 2005.
- [SOLANA et al., 2002] SOLANA, C. D. O.; CARVALHO, C. P. M.; KAPP, M. N., *Um estudo sobre recuperação de imagens através de sua forma*. Revista SPEI, Vol. 3, Fasc. 2, páginas 39-47, ISSN 1676-4579, Curitiba, PR, 2002.
- [TOBLER, 1964] TOBLER, W. R., *An Experiment in the Computer Generalization of Maps*. Technical Report No. 1, Office of Naval Research Task No. 389-137, Contract No. 1224 (48), Office of Naval Research, Geography Branch, 1964.
- [UNB, 2004] UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, *Conservação/Preservação de Documentos*, Centro de Documentação, disponível em: <<http://www.unb.br/cedoc/conservacao.htm>>, consultado em 11/11/2004.
- [VISVALINGAM & WHYATT, 1993] VISVALINGAM, M.; WHYATT, J. D., *Line Generalization by Repeated Elimination of Points*, Cartographic Journal 30 (1): 46-51, 1993.
- [WANGENHEIM, 2004] WANGENHEIM, A. V., *Encontrando a Linha Divisória: Detecção de Bordas*, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~visao/bordas.pdf>> acessado em 15/11/2004.

- [WOLFSON et al., 1988] WOLFSON, H.; SCHONBERG, E.; KALVIN, A. e LAMDAN, Y., *Solving jigsaw puzzles by computer vision*. Annals of Operations Research, vol. 12 pp. 51-64, 1988.
- [XU et al., 2004] XU, X.; LEE, D. J.; ANTANI, S.; LONG, L. R., *Curve Matching for Spine X-Ray Image Retrieval Using Dynamic Programming*, The 8th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics; Vol. 12; International Institute of Informatics and Systemics July 18 - 21, Orlando, Florida, USA, 2004.
- [YAO & SHAO, 2003] YAO, F.; SHAO, G., *A shape and image merging technique to solve jigsaw puzzles*, Pattern Recognition Letters (PRL), Vol. 24, Nr. 12, August 2003, pp. 1819-1835, 2003.
- [ZHAO & SAALFELD, 1997] ZHAO, Z.; SAALFELD, A., *Linear-Time Sleeve-Fitting Polyline Simplification Algorithms*, In Proceedings of AutoCarto 13, 1997.