

Jordan Boaz Rodrigues

**Processamento de Imagens de Obras de Arte  
Para Construção de Modelos 3D Acessíveis a  
Pessoas com Deficiência Visual**

São Luís - MA

2017

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Boaz Rodrigues, Jordan.

Processamento de Imagens de Obras de Arte Para  
Construção de Modelos 3D Acessíveis a Pessoas com  
Deficiência Visual / Jordan Boaz Rodrigues. - 2017.  
39 f.

Orientador(a): Anselmo Cardoso de Paiva.

Monografia (Graduação) - Curso de Ciência da  
Computação, Universidade Federal do Maranhão, São Luís,  
2017.

1. Acessibilidade visual. 2. Impressão em baixo  
relevo. 3. Prototipação 3D. I. Cardoso de Paiva,  
Anselmo. II. Título.

Jordan Boaz Rodrigues

**Processamento de Imagens de Obras de Arte Para  
Construção de Modelos 3D Acessíveis a Pessoas com  
Deficiência Visual**

Monografia apresentada ao curso de Ciência da Computação da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Cardoso de Paiva

São Luís - MA


2017

Jordan Boaz Rodrigues

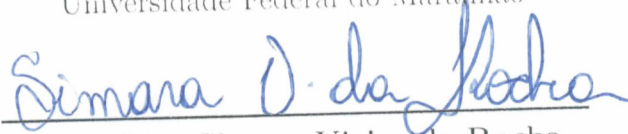
## **Processamento de Imagens de Obras de Arte Para Construção de Modelos 3D Acessíveis a Pessoas com Deficiência Visual**

Monografia apresentada ao curso de Ciência da Computação da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

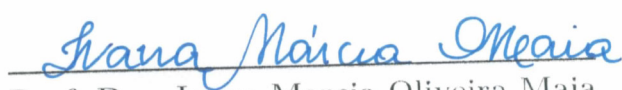
Trabalho aprovado em: São Luís - MA, 19 de Janeiro de 2017:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Anselmo Cardoso de Paiva  
Orientador

Universidade Federal do Maranhão

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Simara Vieira da Rocha  
Examinador 1

Universidade Federal do Maranhão

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Ivana Marcia Oliveira Maia  
Examinador 2

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Maranhão.

São Luís - MA

2017

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, por estarem sempre presentes em todas as fases da minha vida, iluminando meu caminho e sempre me apoiando em todas as decisões que tomei.

Sou grato às minhas irmãs, Joice e Júlia, por garantirem a felicidade necessária para seguir em frente nos bons e maus momentos. Aos meus primos, Alexandre, Vinícius, Naiane e Nailson, que são minhas fontes de inspiração.

Às minhas tias, Graça de Maria e Conceição Isabel, por oferecerem todo apoio a mim e a minha família nos momentos mais difíceis.

Agradeço à minha namorada, Jullyana, que está sempre ao meu lado, trazendo alegria para o meu dia e me incentivando a sempre buscar o meu melhor.

Ao meu professor orientador, Anselmo Cardoso de Paiva, pela confiança em mim depositada, seus conselhos, o apoio e dedicação que oferece a mim e a todos seus alunos.

Aos meus amigos, José Neto, Reginaldo, Drissana, Igor, Antônio Mourão, Antonio Raposo, Danilo, pelo companheirismo.

Aos meus amigos Roberto Matheus e Rodrigo Fumihiro, pela disposição e auxílio.

A todos os colegas do Núcleo de Computação Aplicada.

# Resumo

A dificuldade de criação de conteúdo que garanta acessibilidade a pessoas com deficiência visual e baixa visão tem os restringido de alcançar o pleno potencial de apreciação de material artístico.

Este trabalho visa a criação de uma metodologia para transformação de uma imagem 2D para um modelo em baixo relevo. O modelo prototipado será utilizado para garantir acessibilidade de visualização de obras de arte para pessoas cegas ou com baixa visão. Este trabalho implementa uma fase de reconstrução dos objetos sem que haja intervenção do usuário usando a técnica de *Displacement Mapping*, com o objetivo de manter características da textura da obra no modelo físico.

As pinturas utilizadas no estudo de casos deram origem à representações táteis satisfatórias que preservaram todas as características da obra original.

**Palavras-chaves:** Acessibilidade visual, Prototipação 3D, Impressão em baixo relevo.

# Abstract

The adversity of creating content that grants accessibility to the visually impaired has restricted them from reaching the full potential of appreciation of artistic material.

This work aims to create a methodology for transforming 2D images into a bass relief model. The prototyped model will be used to ensure accessibility of the artwork for blind or low vision people. This work implements a reconstruction phase of the objects without any user intervention using the technique of Displacement Mapping, in order to maintain texture characteristics of the artwork in the physical model.

The paintings used in the case studies have created satisfactory tactile representations that preserved all the characteristics of the original work.

**Keywords:** Visual accessibility, 3D Prototyping, Embossed printing

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Aplicação da binarização . . . . .	17
Figura 2 – Exemplo de um <i>trimap</i> . . . . .	18
Figura 3 – Representações da Gaussiana . . . . .	19
Figura 4 – Exemplo de <i>kernel</i> do filtro da Gaussiana . . . . .	19
Figura 5 – Representações do filtro bilateral . . . . .	20
Figura 6 – Exemplo da Triangulação de Delaunay . . . . .	21
Figura 7 – Exemplo do algoritmo <i>Ray Casting</i> . . . . .	22
Figura 8 – Aplicação do <i>Displacement Mapping</i> . . . . .	23
Figura 9 – Visão geral da metodologia desenvolvida. . . . .	24
Figura 10 – Segmentação usando GrabCut . . . . .	25
Figura 11 – Segmentação por limiarização . . . . .	26
Figura 12 – Resultado da recuperação de contornos . . . . .	27
Figura 13 – Triangulação de Delaunay aplicada a um conjunto de pontos . . . . .	27
Figura 14 – Remoção de triângulos indesejados na triangulação de Delaunay . . . . .	28
Figura 15 – Replicação da base do objeto para gerar um sólido fechado . . . . .	29
Figura 16 – Resultado do <i>Displacement Mapping</i> . . . . .	30
Figura 17 – Menu principal do sistema . . . . .	30
Figura 18 – Exemplo - Segmentos presentes na pintura Abaporu . . . . .	31
Figura 19 – Visualização do resultado da metodologia . . . . .	32
Figura 20 – Interpretação 3D do quadro Abaporu . . . . .	32
Figura 21 – Modelo da obra 'Abaporu' . . . . .	33
Figura 22 – Modelo da obra 'A Lua' . . . . .	34
Figura 23 – Modelo da obra 'A Cuca' . . . . .	34



# Lista de abreviaturas e siglas

2D	2 dimensões
3D	3 dimensões
API	Application Programming Interface - Interface de Programação de Aplicativos
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage - Comissão Internacional de Iluminação
OpenGL	Open Graphics Language
PI	Processamento de Imagens
CG	Computação Gráfica
GPU	Graphics Processing Unit

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo</b>	<b>13</b>
1.1.1	Objetivos Específicos	13
<b>1.2</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Técnicas de Processamento de Imagem</b>	<b>15</b>
2.1.1	CIE L*a*b	15
2.1.2	Segmentação	16
2.1.2.1	Binarização	16
2.1.2.2	GrabCut	17
2.1.3	Filtros e Melhoramento	17
2.1.3.1	Suavização Gaussiana	18
2.1.3.2	Filtro Bilateral	18
2.1.4	Recuperação de contornos	20
<b>2.2</b>	<b>Técnicas de Computação Gráfica</b>	<b>20</b>
2.2.1	Aproximação de Polígono	20
2.2.2	Triangulação de Delaunay	21
2.2.3	Ray casting Algorithm	22
2.2.4	Displacement Mapping	22
2.2.5	OpenGL	23
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>Segmentação da imagem</b>	<b>24</b>
<b>3.2</b>	<b>Aquisição dos poligonos</b>	<b>25</b>
<b>3.3</b>	<b>Triangulação dos segmentos</b>	<b>27</b>
<b>3.4</b>	<b>Extrusão em baixo relevo</b>	<b>28</b>
<b>3.5</b>	<b>Interação com Cena</b>	<b>29</b>
3.5.1	Segmentar Imagem	30
3.5.2	Carregar Segmentos	31
3.5.3	Manipulação dos objetos	31
3.5.4	Exportação para impressão	32
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASOS</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>35</b>

<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>36</b>
--------------------------	-----------

# 1 Introdução

As primeiras manifestações consideradas artísticas datam do período Paleolítico (40000-3000 a.C.) (AGUIAR, 2013), as chamadas Pinturas Rupestres, onde o homem registrava figuras de animais, plantas, pessoas e gráficos abstratos no teto, parede ou outras superfícies das cavernas. Observa-se que a arte está presente na vida do ser humano desde os tempos mais remotos, servindo como meio de comunicação para expressar ideias, emoções e percepções do meio em que vive. A arte tem também a função de contribuir para a construção da linguagem e do conhecimento cultural acerca do mundo. Isto se dá pela transmissão de informações e mensagens.

No mundo, é estimado um número de 285 milhões de pessoas com deficiência visual, sendo 39 milhões cegas e 246 milhões com baixa visão, segundo dados da Organização Mundial de Saúde (OMS) (WHO, 2014). Estas pessoas encontram uma série de dificuldades na igualdade de acesso à cultura mundial visual, sendo impedidas de alcançar os benefícios de uma educação artística, ou experimentar completamente o poder da arte (FURFERI et al., 2014). Diversos autores tem proposto, segundo alguns aspectos, métodos que garantam a acessibilidade à pessoas com deficiência visual, como por exemplo Santos et al. (2012) e Wataya et al. (2013).

Visando amenizar essa desigualdade, alguns museus desenvolveram programas especiais para cegos e pessoas com baixa visão, como o *Programa Educativo para Públicos Especiais* em São Paulo (Brasil) (TOJAL, 1999), *The Tactile Museum “Omero”* em Ancona (Itália); *The Victoria Albert Museum* em Londres (Reino Unido); *Tactile Museum for the Blind*, em Atenas (Grécia); *The Kids Museum* em São Francisco (EUA). Nesses programas, ao lado das obras de arte originais, há também uma representação tátil manufaturada por outros artistas. Tais programas foram concebidos a partir da observação de que a utilização do tato é a primeira ação executada por pessoas privadas da visão para exploração de objetos. O reconhecimento se inicia a partir do contato da mão para a investigação de características e padrões presentes no objeto (busca por contornos, texturas, elevações) (KLATZKY; LEDERMAN; REED, 1987).

As várias formas de representações táteis foram analisadas por Carfagni et al. (2012). Nesse trabalho, os autores concluíram que a matriz tátil em baixo relevo é a representação que melhor traduz o conteúdo das imagens para uma superfície tateável. Adicionalmente, os autores destacaram os problemas na produção dessas representações: por serem manufaturadas por artistas, a sua criação é um processo custoso financeiramente e consome muito tempo. Isto dificulta a replicação dos programas de acessibilidade para outros museus ao redor do mundo.

Métodos computacionais para construção de cenas 3D a partir de imagens 2D já vêm sendo estudados, como por exemplo, [Horry, Anjyo e Arai \(1997\)](#), que desenvolveram um método para gerar uma cena 3D simples de uma imagem a partir de um ponto de fuga e identificação do plano principal e planos secundários. Há também [Hoiem, Efros e Hebert \(2005\)](#), que em seu trabalho, classificava os objetos em planos verticais, horizontais, céu e o chão e a partir disso, gerava um modelo 3D das fotografias. Vale lembrar que o objetivo tais estudos era gerar uma cena onde todos os objetos estão separados espacialmente um do outro, não uma cena 3D em baixo relevo, também chamada de 2.5D.

A capacidade de identificação de contornos e formas simples de objetos (como casas, árvores, carros) por pessoas com deficiência visual já foi extensivamente testada e validada por muitos autores [([KLATZKY et al., 1993](#)), ([HELLER, 1989](#)), ([KENNEDY; BAI, 2002](#))]. Um número menor de estudos se especializou em verificar o desempenho no reconhecimento de objetos mais complexos e padrões táteis por pessoas com e sem visão [([BAILES; LAMBERT, 1986](#)), ([BEHRMANN; EWELL, 2003](#)), ([KENNEDY; BAI, 2002](#))].

O trabalho desenvolvido por [Picard et al. \(2010\)](#) identificou que não existe diferença nas técnicas memoriais executadas por pessoas com visão, cegueira congênita (CC) e cegueira adquirida (CA) no reconhecimento de padrões táteis.

Ao longo dos anos, várias maneiras de traduzir figuras para uma superfície tateável já foram surgindo. Pensando nisso, [Carfagni et al. \(2012\)](#) fez uma análise das quatro representações táteis mais conhecidas: *contorno tátil*, *textura padronizada*, *baixo relevo plano* e *baixo relevo*. Seu trabalho concluiu que a melhor representação foi o *baixo relevo*, com aprovação de 92% de pessoas com CC e 65% de pessoas com CA.

[Ortí, Mira e Pitarch \(2015\)](#), em seu trabalho, faz uma revisão das técnicas tradicionais e técnicas de *Prototipação Rápida* para produção de *Gráficos Tangíveis*, assim como uma descrição de alguns aspectos da Teoria de Desenho que podem auxiliar na criação de tais gráficos.

Dos autores que focaram na geração de modelos em baixo relevo, pode-se citar [Wu et al. \(2013\)](#), que utilizou uma técnica de visão computacional chamada *Shape From Shade* (SFS) e várias imagens para geração de um modelo em baixo relevo de faces humanas. O problema de seu trabalho foi que muitas vezes o resultado obtido saía deformado, devido à reconstrução de profundidade incorreta dos objetos. [Furferi et al. \(2014\)](#) também empregou técnicas de SFS, obtendo resultados melhores ao criar uma interface gráfica que permite o usuário intervir manualmente na reconstrução do baixo relevo. Porém, a interação excessiva do usuário na construção da cena tornou-se um problema. O emprego de uma técnica de reconstrução diferenciada, que reduz a necessidade de entrada de dados do usuário pode promover uma ferramenta mais viável do que a utilizada atualmente.

O trabalho desenvolvido resultou na publicação de dois artigos científicos: ([SANTOS](#)

et al., 2016) e (RODRIGUES et al., 2016).

## 1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia computacional assistiva para processamento de imagem de obras de arte visuais (pinturas) e a criação de representações destas como objetos 2.5D ou 3D de forma a permitir a compreensão do ambiente pictórico na sua forma e profundidade. Almeja-se assim, permitir ao cego ou pessoa com baixa visão, contato tátil com obras de arte, possibilitando acesso ao conhecimento necessário à educação em arte, além de prazeroso lazer. O estudo se dá com o suporte da modelagem tridimensional por computador associada à pesquisa das características de cada obra, no que tange a sua textura, volumetria e profundidade.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho seguem abaixo:

- Desenvolver e aplicar técnicas de segmentação de imagens para imagens de obras de arte;
- Desenvolver uma metodologia para o processamento de obras de arte e sua geração em modelos de baixo relevo;
- Desenvolver uma interface gráfica para o usuário que permita, com o auxílio de técnicas de segmentação de imagens, que uma representação em baixo relevo de uma imagem seja gerada.

## 1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em capítulos, de modo que o capítulo 1 apresentou a introdução do problema e o interesse no desenvolvimento da metodologia.

O capítulo 2 apresenta toda a fundamentação teórica necessária para a aplicação do trabalho proposto. Este capítulo está separado em duas principais seções, uma seção para cada subárea da computação, Processamento de Imagem e Computação Gráfica.

A descrição da metodologia e o passo a passo desenvolvido para alcançar o objetivo final se encontra no capítulo 3. Todas as imagens utilizadas neste capítulo são da obra 'Abaporu' de Tarsila do Amaral e são apresentadas seguindo o fluxo do passo a passo.

O estudo de casos é apresentado no capítulo 4. Lá são exibidos os resultados da aplicação proposta para outras obras de Tarsila do Amaral.

Finalmente, no capítulo 5, apresentamos a conclusão obtida na realização deste trabalho.

## 2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão abordados os fundamentos e técnicas utilizados para o desenvolvimento da metodologia proposta. Tais técnicas foram organizadas em seções com o objetivo de melhorar a sua compreensão.

### 2.1 Técnicas de Processamento de Imagem

A imagem é a forma de representação que traduz algo do mundo real para um estrutura computacional. Técnicas de processamento de imagem são empregadas com o objetivo de transformar a imagem de maneira sucessiva até conseguir extrair mais facilmente as informações nela presente (ALBUQUERQUE, 2000).

#### 2.1.1 CIE L\*a\*b

É um modelo de representação de cores de uma imagem, assim como *RGB*, *HSV*, *XYZ*. L\*a\*b foi criado por *The Commission Internationale d'Eclairage*(CIE) em 1976 com a intenção de criar um modelo baseado na percepção humana das cores. O diferencial na utilização do espaço L\*a\*b, é o canal *L*, pois ele aproxima a iluminação de acordo com a visão humana (ADOBE, 2007).

Não existe uma maneira de transformar a imagem em RGB diretamente para o espaço L\*a\*b. É necessário transformá-lo primeiro para o espaço CIE XYZ e depois para o CIE L\*a\*b. A equação 2.1 demonstra como é realizado essa transformação.

$$\begin{aligned} L^* &= 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a^* &= 500\left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right) \\ b^* &= 200\left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right) \end{aligned} \tag{2.1}$$

onde

$$\delta = \frac{6}{29}$$

$$f(t) = \begin{cases} \sqrt[3]{t} & \text{se } t > \delta^3 \\ \frac{t}{3\delta^2} + \frac{4}{29} & \text{caso contrário} \end{cases}$$



$$\begin{aligned}X_n &= 95.047 \\Y_n &= 100.000 \\Z_n &= 108.883\end{aligned}$$

## 2.1.2 Segmentação

Segmentação é o processo de particionar a imagem em pedaços menores que consistem em objetos ou regiões, a fim de encontrar uma área de interesse (GONZALEZ; WOODS, 2006). Não existe uma técnica de segmentação que sempre consegue capturar um objeto desejado, por isso, várias técnicas foram criadas por vários autores ao decorrer dos anos, mas, em geral, podemos dividi-las em três grupos:

- Manuais: Forma de segmentação mais trabalhosa e que necessita de um acompanhamento humano para definir todas as fronteiras do objeto alvo.
- Semiautomáticas: Método de segmentação que apresenta um bom desempenho na identificação de fronteiras de um objeto, mas que precisa de interação com um usuário para auxiliar nas suas definições.
- Automáticas: São técnicas que não precisam do acompanhamento humano para detectar e separar o objeto alvo.

Na metodologia deste trabalho, são utilizados dois algoritmos de segmentação, em etapas diferentes.

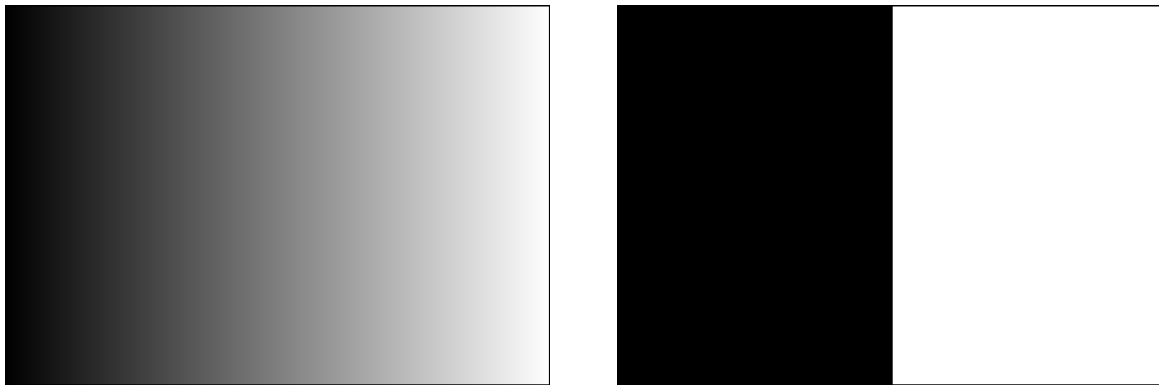
### 2.1.2.1 Binarização

Técnica de segmentação automática que utiliza o valor de intensidade dos *pixels* para separar a área de interesse das demais. A imagem resultante da binarização é uma imagem binária e definida pela Equação 2.2.

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{SE } f(x, y) \geq T \\ 0 & \text{SE } f(x, y) < T \end{cases} \quad (2.2)$$

Onde T é um valor real que especifica a intensidade mínima que um *pixel* deve ter para fazer parte do objeto almejado. A Figura 1 mostra o funcionamento da binarização em uma imagem.

Figura 1 – Aplicação da binarização



- (a) Imagem em níveis de cinza em que os *pixels* variam de 0 a 255 proporcional ao eixo das abscissas. (b) Imagem binária resultante com limiar  $T = 128$ .

Fonte: Acervo do autor

### 2.1.2.2 GrabCut

É um algoritmo de segmentação semiautomático desenvolvido por [Rother, Kolmogorov e Blake \(2004\)](#); um aprimoramento do *Graph Cut*. O *Graph Cut* transforma a imagem para sua representação em níveis de cinza e trata todos os *pixels* como vértices de um grafo. Todos os vértices são conectados a seus vizinhos e a dois vértices de rotulação, *source* e *sink*. O peso das arestas que ligam os *pixels* a esses dois vértices é computado a partir de um cálculo de similaridade com os *pixels* vizinhos e determinam sua probabilidade de ser *background*, ou *foreground*. A segmentação dos dois rótulos acontece usando um algoritmo de *mincut* ([BOYKOV; JOLLY, 2001](#)). A Figura 2 representa um exemplo da máscara de entrada para o *Graph Cut*, com os rótulos associados a cores.

O processo de segmentação usando o *GrabCut* se inicia com a seleção de uma região retangular que enquadra o objeto desejado. O usuário pode, a cada passo do processo, realizar a marcação das áreas que pertencem e não pertencem ao objeto até que a segmentação convirja. [Salvador \(2014\)](#) explica que o aprimoramento do *GrabCut* em relação ao *Graph cut* se dá a partir da substituição da imagem em níveis de cinza por um Modelo de Misturas Gaussianas; adição de um processo iterativo para estimação do corte *mincut*; e um relaxamento na rotulação, tornando-a facultativo a cada iteração, reduzindo a necessidade de interação com o usuário.

### 2.1.3 Filtros e Melhoramento

Melhorar uma imagem é transformá-la de modo a obter algo mais apropriado para uma aplicação específica do que a imagem original. Apesar desse tipo de transformação nem sempre melhorar o aspecto visual, ela sempre facilita e propulsiona o desempenho de

Figura 2 – Exemplo de um *trimap* onde a região em azul representa o *background*, a região em vermelho o *foreground* e a região em verde os *pixels* não rotulados.



Fonte: Wang (2006)

outras técnicas do processamento da imagem.

Filtros são técnicas de melhoramento que foram criados para diversos objetivos. Eles exercem funções variadas e o emprego de cada um deles depende do objetivo da aplicação.

#### 2.1.3.1 Suavização Gaussiana

O filtro da Gaussiana é abundantemente utilizado para diminuir ruídos em imagens. Para empregar o filtro, convolui-se uma matriz, chamada *kernel*, sobre uma matriz de entrada, de modo a computar a média ponderada desses valores para produzir a saída no *pixel* central do *kernel* que sobrepõe a matriz da imagem (GONZALEZ; WOODS, 2006). O peso de cada *pixel* é calculado de acordo com a função gaussiana, assim sendo, quanto mais próximo do centro, maior seu valor.

O comportamento de uma função Gaussiana é determinado pela equação 2.3

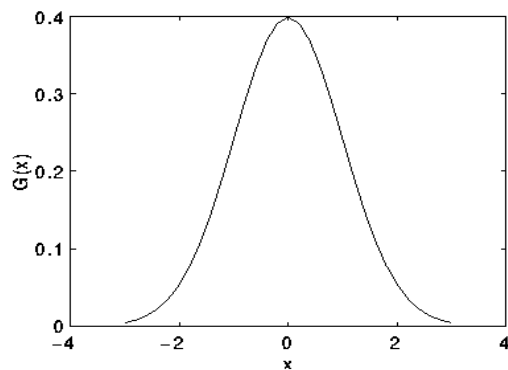
$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

e mostrado na Figura 5a. Observa-se uma parábola que começa em um valor mínimo e vai crescendo gradativamente até um valor máximo, o pico, e em seguida começa a descer de maneira simétrica à subida. A Figura 5b representa esse mesmo comportamento no espaço 3D. Um *kernel* é uma discretização do comportamento da uma Gaussiana num espaço 2D e sua representação é apresentada na Figura 4

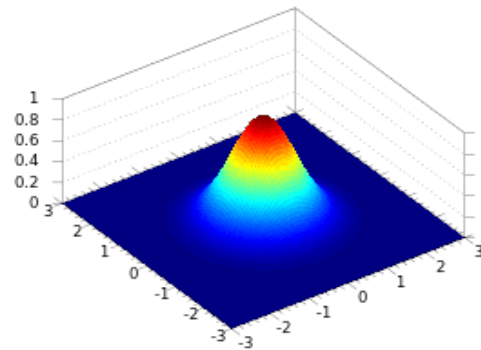
Neste trabalho o filtro da Gaussiana foi empregado no seu sentido mais comum: diminuir os ruídos na área de interesse da imagem.

#### 2.1.3.2 Filtro Bilateral

O filtro bilateral suaviza imagens reduzindo a quantidade de ruídos e, ao mesmo tempo, preserva as bordas a partir de uma combinação não linear dos *pixels* vizinhos

Figura 3 – *Kernels* do Filtro Gaussiano em 2D e 3D

(a) Representação da Gaussiana 2D



(b) Representação da Gaussiana 3D

Fonte: Adaptado de Baek e E.Jacobs (2011)

Figura 4 – Exemplo de uma *kernel* do filtro Gaussiano de tamanho de 3x3, onde 16 é a soma de todos os pesos

$$\frac{1}{16} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 2 & 4 & 2 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Fonte: Fisher et al. (2003)

presentes nela (TOMASI; MANDUCHI, 1998). O nome *bilateral* se dá pelo fato de que ele combina informações de valor e intensidade para fazer a filtragem.

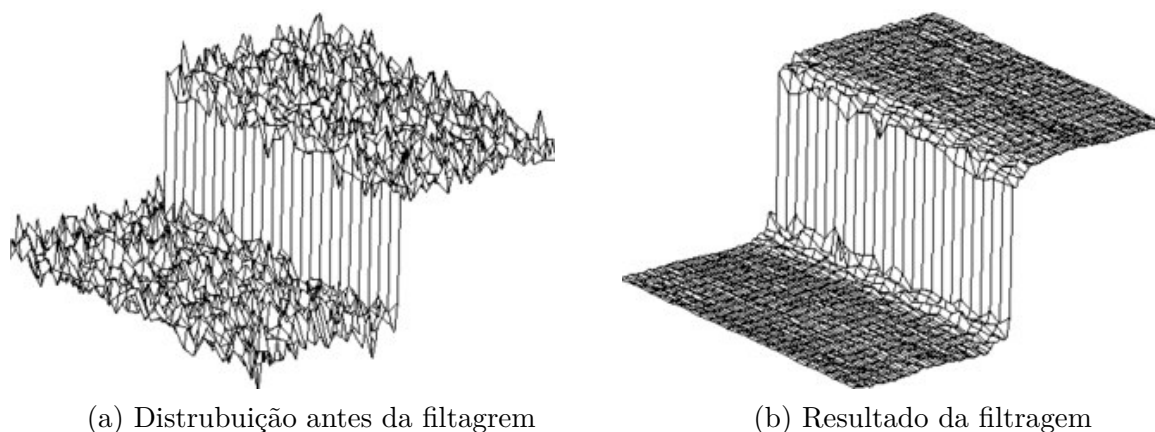
A equação 2.4 representa a filtragem bilateral.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} c(\xi - x) s(\mathbf{f}(\xi) - \mathbf{f}(x)) d\xi \quad (2.4)$$

A ideia desse filtro é computar um *kernel* que leva somente em consideração *pixels* vizinhos e de intensidade semelhante. *Pixels* vizinhos com uma diferença de intensidade maior que um parâmetro do filtro serão ignorados. A Figura 5 mostra um esquema do comportamento gráfico de uma filtragem bilateral.

A aplicação do filtro bilateral foi importante para melhorar um passo da metodologia, a detecção de bordas. O filtro enfatizou as bordas das imagens, facilitando a detecção e reduzindo o efeito de serrilhado.

Figura 5 – Aplicação do Filtro Bilateral



Fonte: Adaptado de [Manduchi \(1998\)](#)

### 2.1.4 Recuperação de contornos

Localizar pontos conectados é uma das técnicas fundamentais de processamento de imagem. [Suzuki et al. \(1985\)](#) desenvolveram um algoritmo capaz de buscar pontos conectados em uma imagem binária e retornar os vértices de fronteira, que demarcam o contorno do objeto no espaço cartesiano. Seu algoritmo também recupera informação topológica de cada um dos contornos, reconhecendo a sua hierarquia, e se ele contém ou está contido em outro, a partir da sua localização espacial.

Na metodologia desenvolvida, os contornos são utilizados para definir os objetos da cena e a sua informação topológica, para criar buracos nas malhas, de forma a torna a reconstrução o mais fiel à obra de arte possível.

## 2.2 Técnicas de Computação Gráfica

Computação Gráfica e Processamento de Imagens são duas subáreas da computação que apesar de quase sempre andarem juntas, possuem papéis invertidos. Enquanto o Processamento de Imagem transforma uma imagem do mundo real em informação, a Computação Gráfica transforma informações em modelos que podem ser visualizados e transportados para o mundo real. As técnicas de computação gráfica auxiliam esse processo usando principalmente conceitos da geometria.

### 2.2.1 Aproximação de Polígono

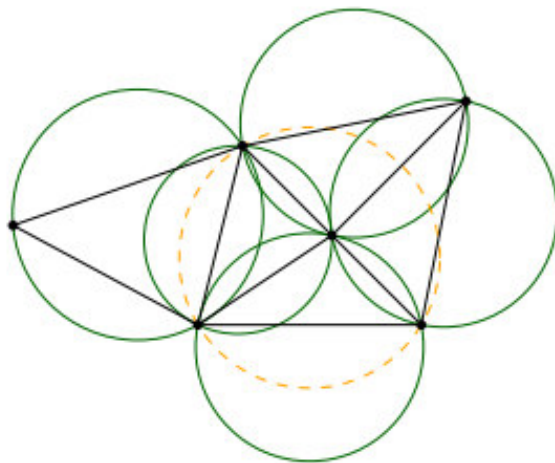
O algoritmo conhecido como algoritmo de Douglas-Peucker ([DOUGLAS; PEUCKER, 1973](#)) propõe uma maneira de aproximar um conjunto de pontos de um polígono à uma versão simplificada reduzindo a quantidade de pontos presentes, de forma a otimizar o custo de performance e memória de sua representação.

O algoritmo é recursivo e funciona da seguinte maneira: a entrada é uma curva e um parâmetro que indica a distância máxima entre a curva original e a desejada; com tais dados, é identificado automaticamente o ponto inicial e final da curva. É necessário então traçar uma linha entre esses dois pontos e descobrir o ponto da curva mais distante dessa linha, que será chamado *worst point*. Se a distância desse ponto para a curva for maior do que o parâmetro passado, significa que a sua remoção afetará de forma significativa a forma da curva, por isso será mantido. Caso contrário, tal ponto será marcado para remoção. O algoritmo invoca-se duas vezes recursivamente com os pontos finais sendo o primeiro e o *worst point* e o *worst point* e o último. Quando a recursividade terminar, o resultado será uma nova curva somente com os pontos mantidos.

### 2.2.2 Triangulação de Delaunay

Segundo [Welzl \(2013\)](#), Triangulação de Delaunay é uma triangulação onde nenhum dos pontos está contido na circunferência que contém os três pontos de cada triângulo, ou seja, todas as circunferências que definem os triângulos são vazias. A [Figura 13](#) mostra um exemplo dessa propriedade.

Figura 6 – Demonstração da propriedade das circunferências vazias



Fonte: [Welzl \(2013\)](#)

Um algoritmo que calcula essa triangulação é chamado *Lawson Flip Algorithm* ([LAWSON, 1972](#)). [Welzl \(2013\)](#) explica sua abordagem: dados  $n$  pontos, calcula-se uma triangulação qualquer; a seguir, enquanto existir uma subtriangulação de 4 pontos que não segue a propriedade das circunferências vazias, ela é substituída por uma triangulação Delaunay. Essa substituição é chamada de *flip*. O algoritmo demora no pior caso  $O(n^2)$ , onde  $n$  é o número de *flips*.

A razão por qual se torna desejável a utilização dessa triangulação é o fato de que ela sempre procura maximizar o menor dos ângulos de todos os triângulos. Isso faz com

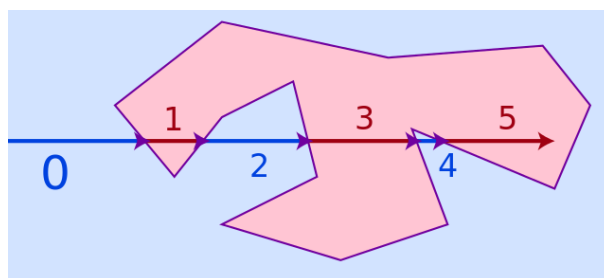
que todos os triângulos se aproximem ao máximo de triângulos equiláteros, reduzindo a existência de triângulos esticados na nossa malha.

### 2.2.3 Ray casting Algorithm

Na década de 60, já era comum a utilização de técnicas para descobrir se um ponto está definido nas fronteiras de um polígono (SUTHERLAND; SPROULL; SCHUMACKER, 1974). Uma das técnicas desenvolvidas mais baratas computacionalmente, é o algoritmo de *Ray Casting*. Ele tem como entrada um ponto específico e um conjunto de pontos que definem um ou vários polígonos e como saída, a resposta se o ponto informado localiza-se no interior ou exterior dos polígonos.

O funcionamento é simples: projetando o ponto como uma linha que tende ao infinito sobre um dos eixos, é possível contar quantas vezes acontece uma colisão entre a linha projetada com uma aresta dos polígonos dados. Assume-se então que se a contagem for par, o ponto em questão está externo ao polígono e se for ímpar, está interno.

Figura 7 – Contagem de colisões do algoritmo *Ray Casting*



Fonte: Melchoir (2007)

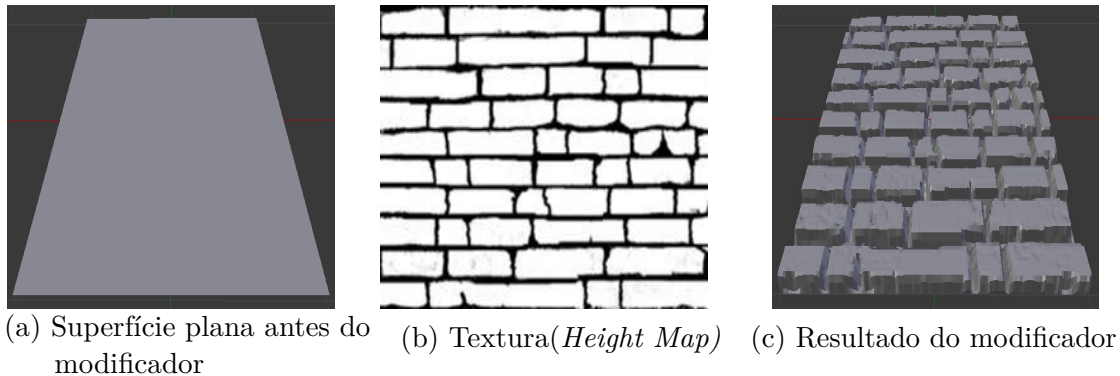
A técnica desempenhou um importante papel na etapa de triangulação dos segmentos na metodologia. Ela serviu para remoção dos triângulos indesejáveis resultantes da triangulação de Delaunay.

### 2.2.4 Displacement Mapping

É uma técnica de computação gráfica que visa adicionar detalhes à malhas tridimensionais a partir de uma textura, por isso o nome *Mapping*. A ideia é deslocar os vértices perpendicularmente à normal de acordo com um valor na textura, aqui chamada de *height map* (SZIRMAY-KALOS; UMENHOFFER, 2008). O cálculo de deslocamento é definido pela equação 2.5.

$$P_f = P_i + (N \cdot df \cdot uf) \quad (2.5)$$

onde  $P_i$  e  $P_f$  representam, respectivamente, a posição inicial e final do vértice,  $N$  o vetor da normal,  $df$  o fator de perturbação e  $uf$  a escala. A Figura 8 mostra a aplicação dessa técnica em uma superfície plana.

Figura 8 – Aplicação do *Displacement Mapping*

Fonte: Acervo do autor

Apesar de ser muito custoso, o emprego do *displacement mapping* é crucial para a presente metodologia, porque ele que garantirá a criação do baixo relevo nos modelos criados.

### 2.2.5 OpenGL

OpenGL é a abreviação para *Open Graphics Library*, uma biblioteca computacional que funciona como API (*Application Programming Interface*) e permite a criação de programas interativos com cor e movimentação de objetos em 2D ou 3D. OpenGL é totalmente independente de especificações de *hardware* e pode ser executada somente por *software*, se não houve nenhuma placa gráfica (GPU) presente. Adicionalmente, também é um produto *cross-plataform*, ou seja, é utilizável em vários sistemas operacionais sem restrição (SHREINER et al., 2013).

Na metodologia proposta, *OpenGL* foi usado na última etapa, para criar uma interface de visualização para o usuário final.

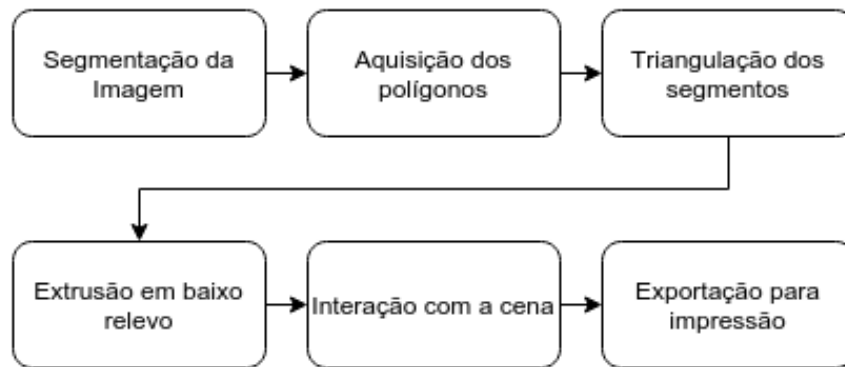


## 3 Metodologia

Este capítulo apresenta o passo a passo desenvolvida para transformar imagens de pinturas de obras de arte 2D em sua representação em baixo relevo.

O núcleo da proposta se baseia no uso de processamento de imagem e computação gráfica. O objetivo final é a criação de uma ferramenta assistiva que permita que museus, professores de arte ou aficionados por arte possam obter um modelo 3D de pinturas que possam ser representadas nessa forma, seguindo a sua interpretação pessoal. A Figura 9 descreve o roteiro geral da metodologia. As etapas são descritas na seções seguintes.

Figura 9 – Visão geral da metodologia desenvolvida.



Fonte: Acervo do autor.

### 3.1 Segmentação da imagem

Quando trabalha-se com pinturas, o primeiro passo tomado é identificar e separar cada um dos objetos na cena. Objetos podem ser figuras humanas ou animais, vestimentas, vegetação, ou qualquer coisa que adicione um significado único à pintura. A quantidade de objetos e os limites de suas extensões variam de acordo com a interpretação pessoal. Pensando nisso, foi implementado uma técnica semiautomática de segmentação. O algoritmo escolhido para esta etapa foi o *GrabCut*. Como descrito na Seção 2.1.2.2, ele funciona de maneira interativa, sempre aguardando uma informação do usuário a cada passo.

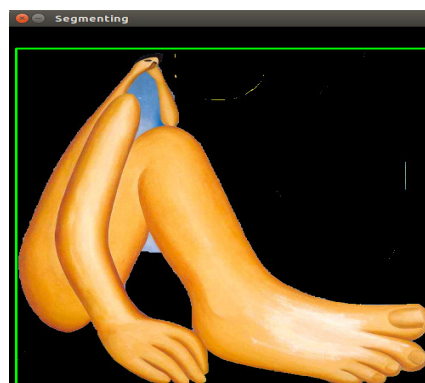
Inicialmente, o usuário delimita a área que contém o objeto que ele deseja segmentar, como mostrado na Figura 10a. Uma vez realizada a seleção, ele avança para o próximo passo, onde o algoritmo tentará separar a imagem em *background* e *foreground*, representado na Figura 10b. Com o auxílio do *mouse*, é realizado a marcação da áreas que pertencem ou não pertencem ao objeto (Figura 10c) e o usuário poderá prosseguir com as interações,

até que o resultado desejado seja alcançado. Ao final, uma imagem similar à Figura 10d será obtida.

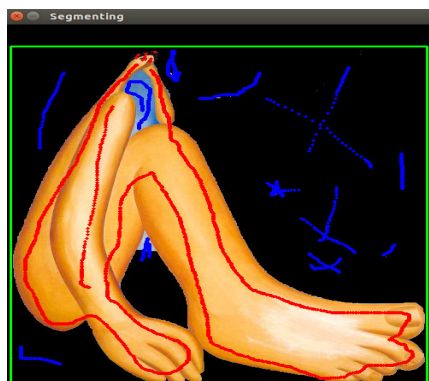
Figura 10 – Exemplo - As etapas do processo de segmentação utilizando o algoritmo do *Grabcut*



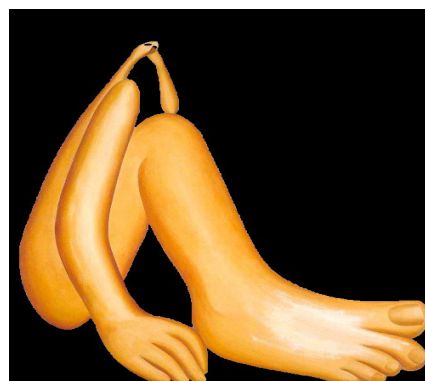
(a) Área selecionada em verde



(b) Resultado da primeira interação do *GrabCut*



(c) Marcação das regiões de interesse



(d) Resultado da segmentação

Fonte: Acervo do autor.

Todo esse processo é repetido para cada objeto presente na cena.

## 3.2 Aquisição dos polígonos

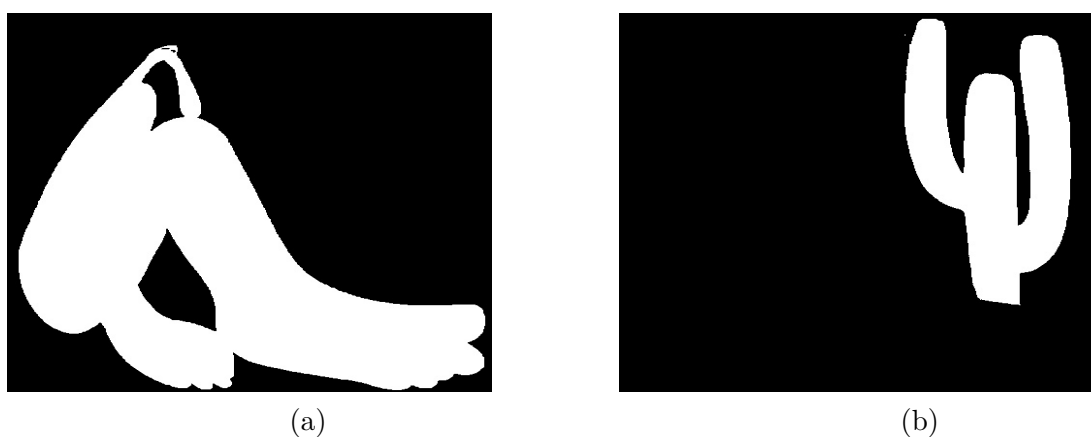
Com as imagens segmentadas, é necessário extrair informação espacial dos objetos para reconstruí-los no espaço 3D. Nesta fase, todas as técnicas de processamento de imagens descritas na seção 2.1 serão usadas.

Como o objetivo é manter a obra o mais fidedigna à realidade, capturar as informações da mesma maneira que a visão humana percebe a luz é fundamental. Logo, o primeiro passo é transformar a imagem do segmento para o espaço de cor  $L^*a^*b$  e utilizar somente o seu componente  $L$ .

O componente L da imagem é então suavizado a partir da convolução do filtro da Gaussiana com um *kernel* de tamanho  $3 \times 3$ . Essa filtragem tornou-se necessária por apresentar uma redução de serrilhado das bordas da imagem. A seguir, será necessário destacar as fronteiras que delimitam os objetos da imagem. Para tanto, aplica-se uma filtragem bilateral, com os parâmetros 15 e 30; o primeiro determina o diâmetro da vizinhança de cada *pixel* usado durante o processo e o segundo o limiar de similaridade entre o *pixel* central e seu vizinho, para que este seja considerado. Em outras palavras, se a diferença de intensidade do *pixel* em questão e seu vizinho for maior que 30, ele será ignorado do processo. Tais parâmetros, definidos a partir de métodos experimentais, foram os que mostraram resultados na suavização. Uma cópia desse componente melhorado será guardada para posterior utilização, na etapa de reconstrução do objeto.

Uma vez que a imagem for melhorada, pode-se fazer uso de outra técnica de segmentação: a binarização. Tendo em vista que uma segmentação já foi realizada em etapas prévias, a segmentação corrente funciona mais como um préprocessamento, inibindo falhas na detecção de bordas, uma etapa posterior. A limiarização binária é empregada: dado um limiar, todos os *pixels* com intensidade acima desse valor recebem o valor máximo de intensidade e todos abaixo recebem zero. O valor do limiar utilizado pode ser considerado "simbólico", pois deve um número bem baixo, para garantir que tudo na imagem seja utilizado, e maior que 0. Quando esta etapa for finalizada, os resultados apresentados na Figura 11 são obtidos.

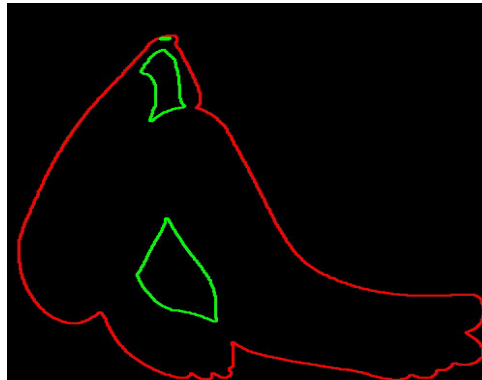
Figura 11 – Resultado do préprocessamento de 2 objetos presentes na cena.



Fonte: Acervo do autor

Com a imagem binarizada, um detector de bordas robusto, como Canny ou Sobel, para recuperar as bordas não é necessário. É possível recupera-las simplesmente utilizando o algoritmo de Suzuki et al. (1985), que retornará a informação espacial de todos os vértices dos polígonos formados pelas bordas, assim como as suas hierarquias. A Figura 12 retrata o resultado desse algoritmo aplicado na Figura 11a, destacando a informação topológica da imagem.

Figura 12 – Contornos e informação hierárquica da imagem. Em vermelho, o contorno mais externo(pai) e em verde, os contornos internos(filhos).



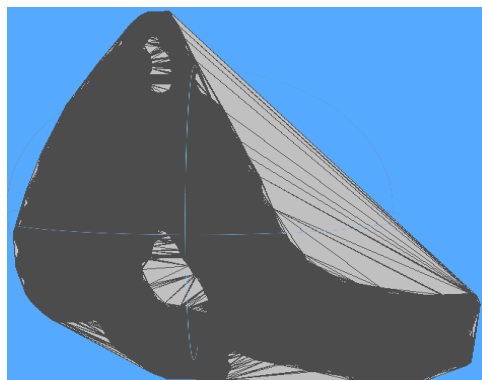
Fonte: Acervo do autor.

### 3.3 Triangulação dos segmentos

Com as informações espaciais dos objetos obtidas na etapa anterior, já é possível iniciar reconstrução no espaço 3D. Uma malha é construída a partir da definição de todas as faces que juntas formarão a superfície. A forma geométrica mais simples e mais utilizada em CG para representar uma face é o triângulo.

Primeiramente, todos os *pixels* da imagem binária serão utilizados como o conjunto de pontos. O algoritmo de *Lawson Flip* 2.2.2 recebe como entrada tal conjunto e gera finitos triângulos seguindo as regras da Triangulação de Delaunay. A triangulação obtida é apresentada na Figura 13. É observável que apesar da imagem de entrada, Figura 11a, apresentar aberturas internas(buracos), o algoritmo não as discriminou e continuou gerando triângulos dentro delas.

Figura 13 – Triangulação de Delaunay. A parte em cinza escuro é mais densa e possui uma grande quantidade de triângulos. Observa-se também triângulos indesejáveis na parte de fora do contorno do objeto e no interior dos buracos da imagem.



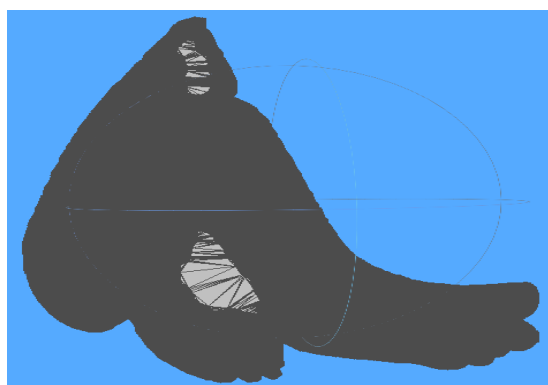
Fonte: Acervo do autor.

Este problema é contornado com a informação espacial dos polígonos obtida na

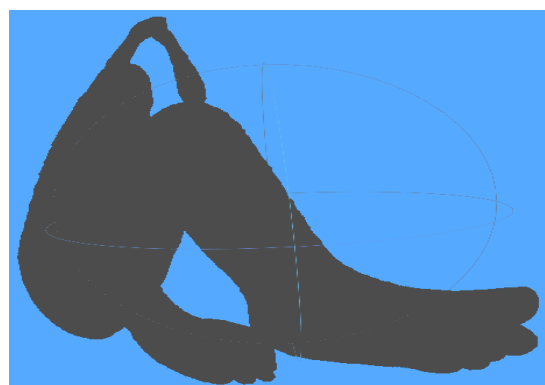
fase anterior e técnicas de computação gráfica, mais especificamente, o algoritmo de *Ray Casting*. Para cada um dos triângulos presentes na malha, calcula-se o seu centroide, a média dos seus três vértices no eixo das abscisas e coordenadas. Para remover um triângulo externo ao contorno do objeto, o *Ray Casting* tem como entrada o centroide e o contorno mais externo do objeto. Se o resultado indicar que o centroide não está na região interior do contorno, o triângulo será eliminado. Aplicando essa idéia para todos os triângulos da superfície, ela resultará em uma malha como apresentado na Figura 14a.

Para remoção dos triângulos dentro dos buracos, é verificado se o centroide de cada triângulo está dentro de algum dos polígonos dos buracos. Se esta assertiva for verdadeira, ele será removido. A aplicação desse algoritmo obterá o resultado na apresentado na Figura 14b.

Figura 14 – Remoção dos triângulos indesejados



(a) Remoção dos triângulos externos



(b) Remoção dos triângulos internos aos buracos

Fonte: Acervo do autor

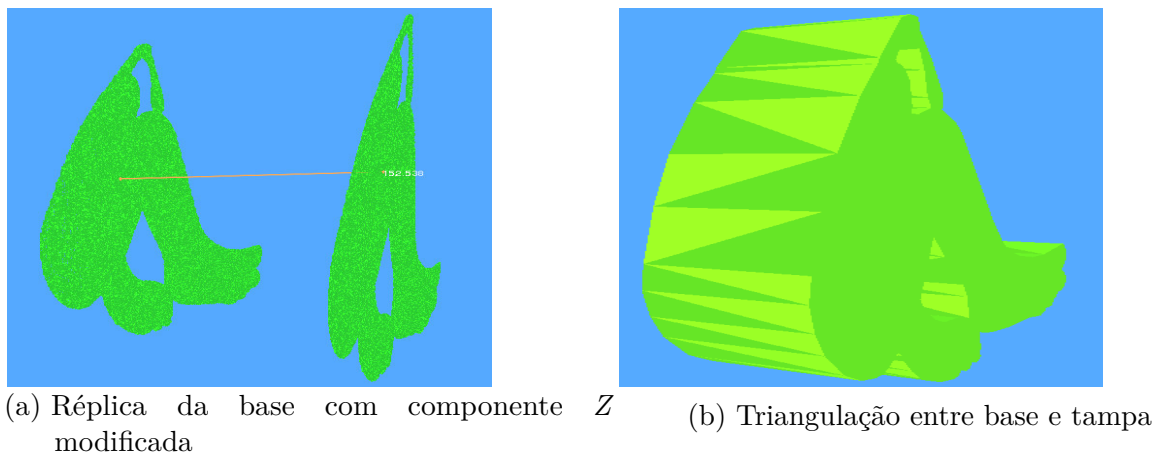
### 3.4 Extrusão em baixo relevo

Na seção anterior, a malha 2D, a qual chamaremos de base, já está inserida em um espaço tridimensional. Porém, uma superfície 2D plana não é suficiente para que seja possível identificar os elementos da obra a partir do tato. O objetivo da etapa atual é gerar um **sólido** em baixo relevo.

O primeiro passo tomado para alcançar tal objetivo é replicar base com uma alteração no valor do seu componente  $Z$ , resultando em dois planos, que serão chamados de **base** e **tampa**, como ilustrado na Figura 15a. Para unir a base com a tampa, foi desenvolvido um algoritmo de triangulação descrito a seguir: para todos os segmentos de reta do contorno externo da malha, o primeiro vértice do primeiro segmento da base irá formar um triângulo com a sua cópia na tampa e o segundo vértice do segmento da base e segundo vértice do segmento da tampa irá formar outro triângulo com a sua cópia na

base e o primeiro vértice do segmento da tampa. Ao final, o sólido ficará fechado, como na Figura 15b. A distância entre as bases poderá ser modificada por uma interface gráfica, para permitir ao usuário uma interpretação da alocação espacial dos objetos da cena.

Figura 15 – Replicação da base do objeto para gerar um sólido fechado



Fonte: Acervo do autor

O sólido agora já possui volume e está alocado no espaço 3D, logo, pronto para impressão. Porém, a cena montada não apresenta nenhuma informação de textura ou características dos objetos da imagem original. Para criar a impressão desses atributos no sólido, será utilizado a técnica de *displacement mapping*.

A partir da imagem de iluminação obtida na seção 3.2, a textura será mapeada para perturbar a tampa dos objetos. O esquema é simples: cada vértice da tampa irá se deslocar perpendicular à normal e a partir do cálculo:

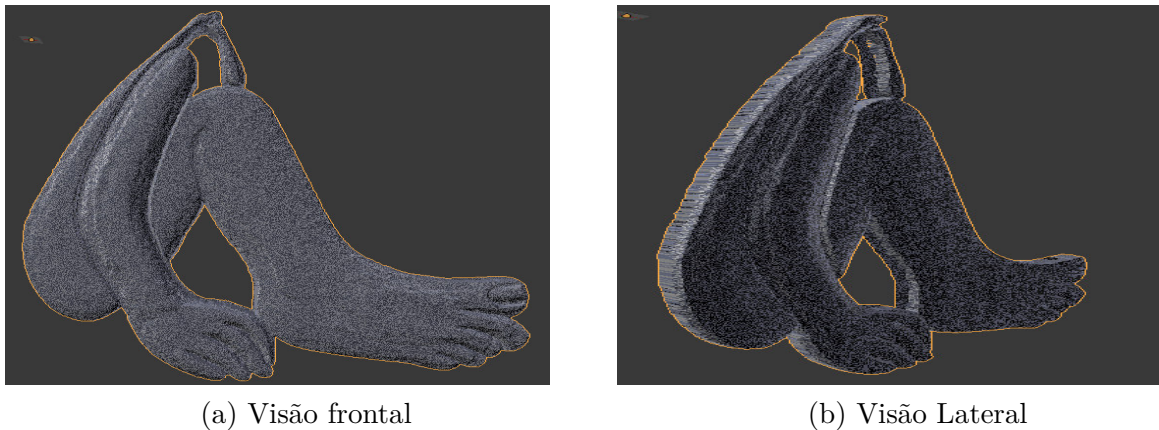
$$Z_{x,y} = \frac{C * I(x,y)}{max} \quad (3.1)$$

Onde  $Z$  é a componente  $Z$  do vértice;  $C$  é o coeficiente de perturbação;  $I(x,y)$  o valor de intensidade do *pixel* na imagem de iluminação e  $max$  é o valor da maior intensidade da imagem. Seguindo a formulação deste cálculo, nota-se que quanto mais intenso for o *pixel*, maior o deslocamento do seu vértice correspondente.

As Figuras 23a e 23b mostram o resultado ao perturbar os vértices da imagem usando a técnica de *displacement mapping*.

### 3.5 Interação com Cena

Para esta etapa foi desenvolvido um sistema que, a partir da imagem de entrada, emprega toda a metodologia apresentada nas seções anteriores. Ao final, o usuário poderá visualizar num espaço tridimensional um modelo de como ficará a cena de entrada. O

Figura 16 – Resultado do *Displacement Mapping* em dois ângulos

(a) Visão frontal

(b) Visão Lateral

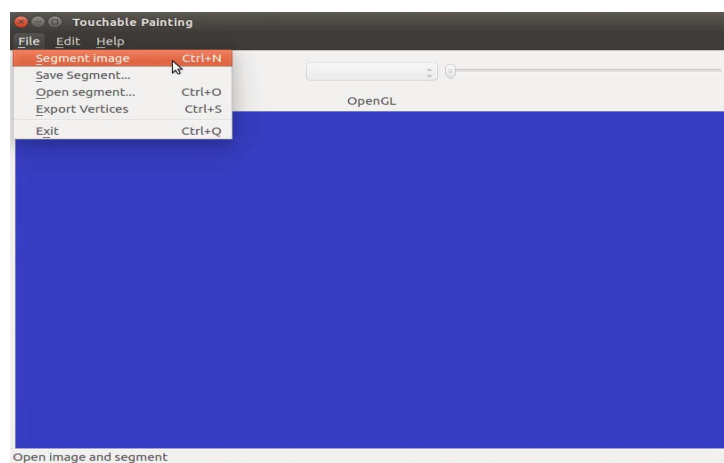
Fonte: Acervo do autor

sistema foi desenvolvido usando a plataforma *Qt Creator* (PROJECT, 2009) e seu suporte para OpenGL.

### 3.5.1 Segmentar Imagem

Usando o menu principal, mostrado na Figura 17, e clicando na opção de **Segment Image**, o sistema solicitará que o usuário informe uma imagem e abrirá uma janela auxiliar contendo a imagem selecionada. Essa janela serve como interface para todo o algoritmo do *GrabCut* e nela que o usuário realizará a marcação da região de interesse e regiões que não fazem parte do objeto que ele quer segmentar, como descrito na seção 3.1. Uma vez terminado esse processo, ele poderá salvar seu trabalho clicando na opção **Save Segment**.

Figura 17 – Menu principal do sistema

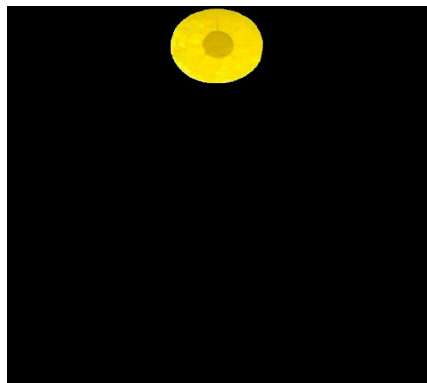


Fonte: Acervo do autor.

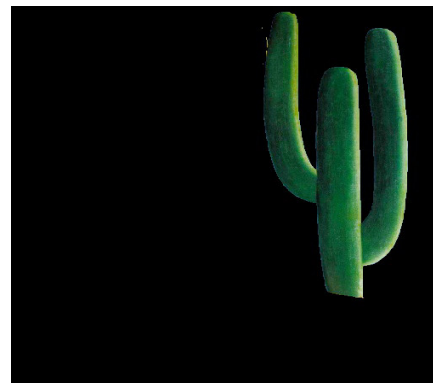
### 3.5.2 Carregar Segmentos

Assim que o usuário estiver satisfeito com a segmentação, poderá carregar cada um dos segmentos na cena, ao clicar na opção **Open Segment**. Esse comando irá aplicar toda a metodologia descrita nas seções anteriores e carregar os modelos 3D para a cena virtual. A Figura 18 apresenta os segmentos carregados no estudo de caso deste trabalho e a Figura 19 mostra tais objetos na janela OpenGL.

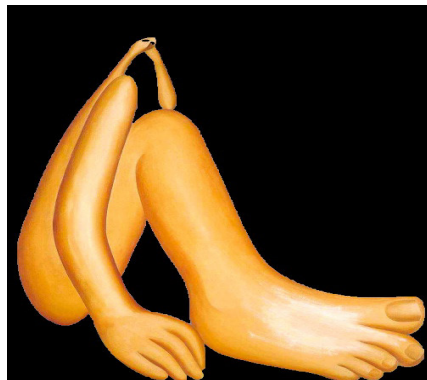
Figura 18 – Exemplo - Segmentos presentes na pintura Abaporu



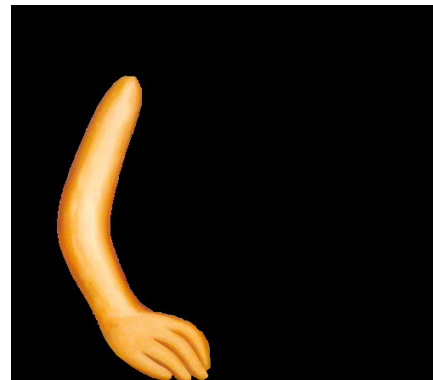
(a) Sol



(b) Cacto



(c) Homem



(d) Braço do homem

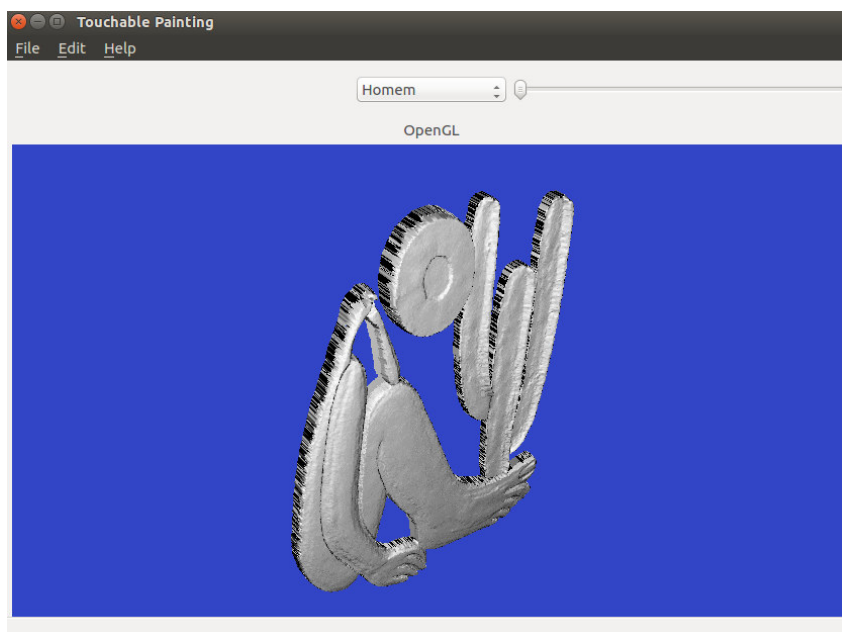
Fonte: Acervo do autor.

### 3.5.3 Manipulação dos objetos

Com o auxílio de caixa *dropdown* e um *slider* presentes na interface, é possível selecionar separadamente os objetos da cena e ajustar a distância entre a sua base e sua tampa, garantindo maior controle do usuário sobre os modelos. Uma possível interpretação do quadro "Abaporu" de Tarsila do Amaral é exibido na Figura 20.

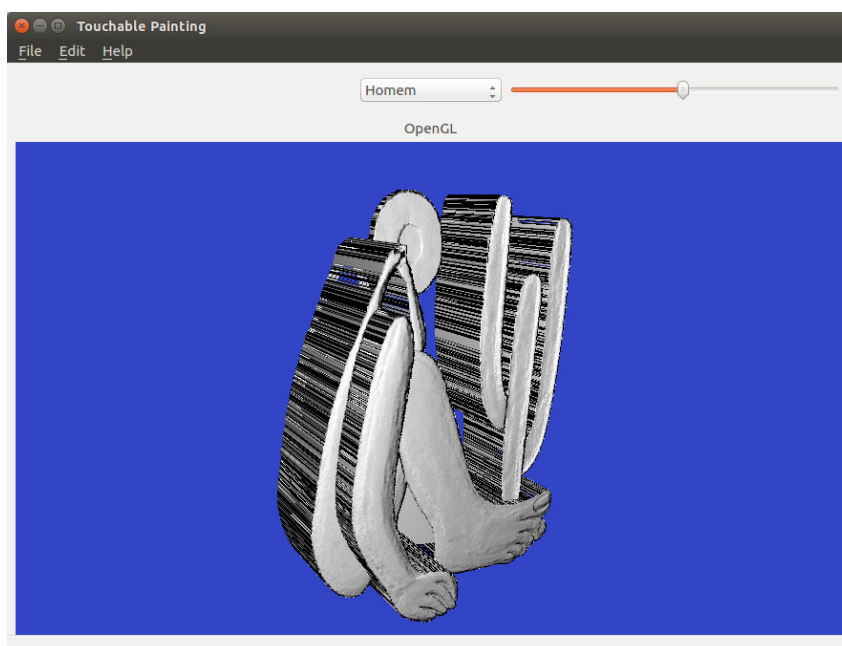


Figura 19 – Visualização do resultado da metodologia



Fonte: Acervo do autor.

Figura 20 – Interpretação 3D do quadro Abaporu



Fonte: Acervo do autor.

### 3.5.4 Exportação para impressão

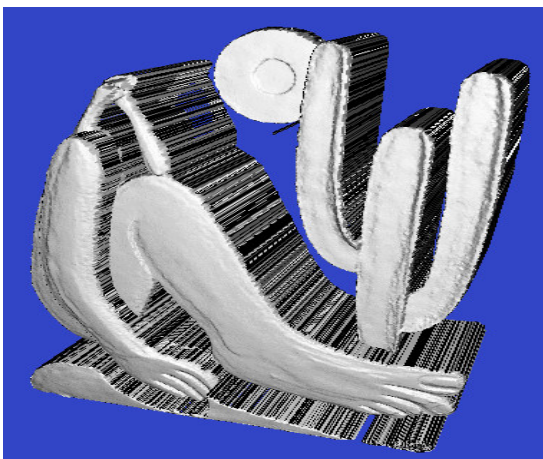
Quando tiver terminado a manipulação da cena, o usuário poderá selecionar a opção **Export Vertices** para salvar seu modelo em um formato de arquivo aceito por impressoras 3D para impressão posterior. O formato de exportação é o *Wavefront Obj*, um arquivo de definições geométricas criado por Wavefront Technologies.

## 4 Estudo de casos

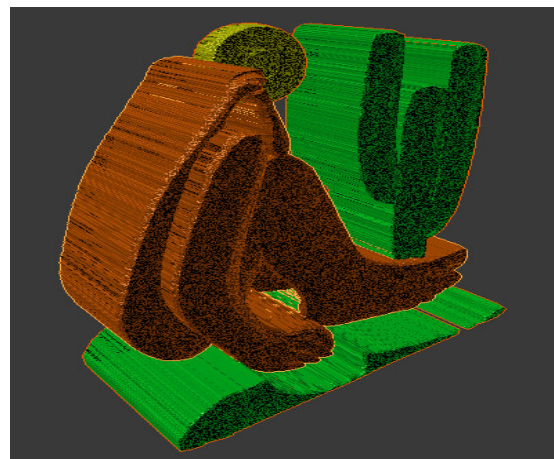
Neste capítulo são apresentados os resultados da utilização do sistema desenvolvido que usa a metodologia apresentada. Os testes foram realizados com três grandes obras de Tarsila do Amaral: "Abaporu", "A Cuca" e "A Lua".

A Figura 21 retrata a interpretação do quadro "Abaporu", usado extensivamente na descrição da metodologia deste trabalho. O quadro, que foi um presente da Tarsila para seu marido Oswaldo de Andrade, apresenta quatro objetos principais: o sol, que aparenta estar distante de todos os outros objetos e longe também do observador; um cacto, que tem um grande destaque na pintura, plantado ao lado de um homem solitário sentado em uma pequena planície verde, que apresenta traços de gigantismo nos membros, dando uma ilusão de que estão mais próximos do plano do observador.

Figura 21 – Modelo da obra 'Abaporu' em dois ângulos diferentes



(a) Modelo no sistema



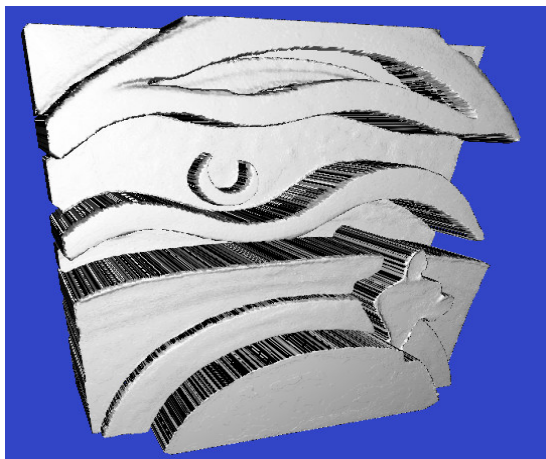
(b) Modelo em um editor gráfico

Fonte: Acervo do autor

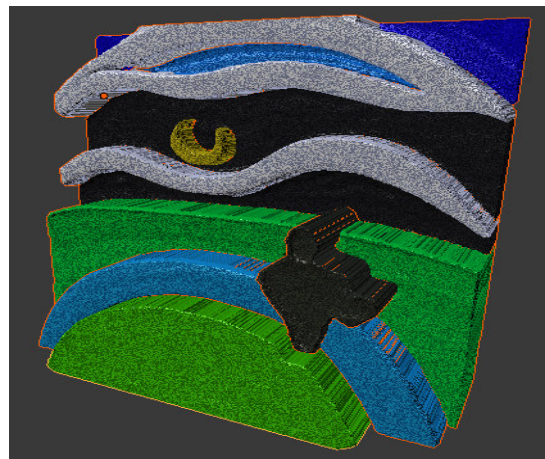
O modelo tridimensional da obra "A Lua", criado em 1928 por Tarsila, é apresentado na Figura 22. O quadro apresenta poucos elementos visuais. Está presente uma figura humana habitando um pequeno planeta ermo, cortado por um oceano que o divide em dois. O humano observa a lua, muito distante dali, entre os fechos de um céu nublado, expressando sinais de saudosismo, ao aparentar estar gesticulando um sinal de "adeus".

A representação tátil do quadro "A Cuca", está retratada na Figura 23. A obra apresenta uma diversidade de elementos naturais e vegetais, tanto que foi descrito pela própria autora como "um bicho esquisito, no meio do mato, com um sapo, um tatu e outro bicho inventado" (BRASIL, 2012).

Figura 22 – Modelo da obra 'A Lua' em dois ângulos diferentes



(a) Modelo no sistema



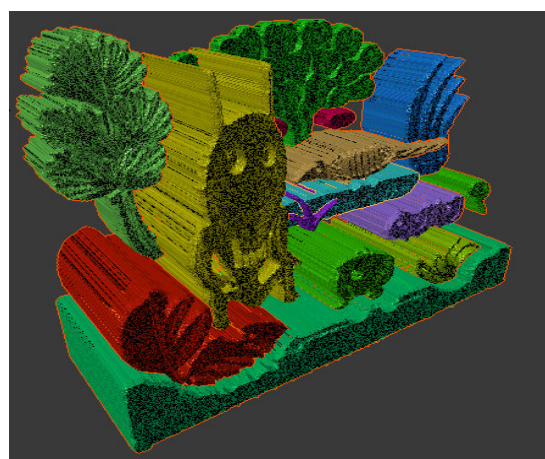
(b) Modelo em um editor gráfico

Fonte: Acervo do autor

Figura 23 – Modelo da obra 'A Cuca' em dois ângulos diferentes



(a) Modelo no sistema



(b) Modelo em um editor gráfico

Fonte: Acervo do autor

## 5 Conclusão

Este trabalho apresentou uma proposta de metodologia para construção de modelos táteis de pinturas de obras de arte. O método proposto teve a intenção de reconstruir qualquer cena usando *Displacement Mapping*, uma técnica que garantiu que a representação em baixo relevo fosse gerada sem nenhum auxílio do usuário. Tal representação incorpora as características de textura visuais, tornando o tateamento da superfície mais fidedigno à realidade.

O sistema desenvolvido que implementa a metodologia proposta mostrou-se adequado e eficiente possibilitando o usuário a desenvolver uma representação em profundidade da pintura e gerar um modelo tridimensional reproduzível em impressoras 3D. Espera-se assim estar contribuindo para facilitar e simplificar o processo de transformação de uma obra 2D para 3D, disponibilizando mais obras de arte a um baixo custo para a inclusão de pessoas com deficiência visual.

Como trabalhos futuros, planeja-se melhorar o processo de deslocamento das bases, oferecendo mais eficiência com o desenvolvimento de um algoritmo que sugere automaticamente a profundidade de cada objeto a partir de um método diferente, como por exemplo, a utilização dos pontos de fuga. Também planeja-se realizar um estudo de levantamento dos critérios a serem utilizados na determinação de quais pinturas podem ser representadas em um modelo de baixo relevo. Concomitantemente, uma maneira de informar o usuário final por áudio com informações a respeito da obra, como o período e a escola em que foi produzida, garantiriam um enriquecimento para a metodologia.

# Referências

- ADOBE. *The Lab Color Mode in Photoshop*. 2007. <<http://www.adobe.com/cfusion/knowledgebase/index.cfm?id=310838>>. Acesso em 23 de Dezembro de 2016. Citado na página 15.
- AGUIAR, L. M. M. de. 2013. <<http://brasilecola.uol.com.br/historiag/a-arte-prehistoria-nos-periodos-paleolitico-neolitico.htm>>. [Online; Acesso em 22 de Dezembro de 2016.]. Citado na página 11.
- ALBUQUERQUE, M. P. de Albuquerque; Marcelo Portes de. *Processamento de Imagens: Métodos e Análises*. 2000. <<http://www.cbpf.br/cat/pdsi/pdf/ProcessamentoImagens.PDF>>. Acesso em 23 de Março de 2016. Citado na página 15.
- BAEK, J.; E.JACOBS, D. *Accelerating Spatially Varying Gaussian Filters*. 2011. <<http://pt.slideshare.net/chiaminhsu/study-accelerating-spatially-varying-gaussian-filters>>. Acesso em 23 de Dezembro de 2016. Citado na página 19.
- BAILES, S. M.; LAMBERT, R. M. Cognitive aspects of haptic form recognition by blind and sighted subjects. *British Journal of Psychology*, Wiley Online Library, v. 77, n. 4, p. 451–458, 1986. Citado na página 12.
- BEHRMANN, M.; EWELL, C. Expertise in tactile pattern recognition. *Psychological science*, SAGE Publications, v. 14, n. 5, p. 480–492, 2003. Citado na página 12.
- BOYKOV, Y. Y.; JOLLY, M.-P. Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in nd images. In: IEEE. *Computer Vision, 2001. ICCV 2001. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on*. [S.l.], 2001. v. 1, p. 105–112. Citado na página 17.
- BRASIL, U. *Conheça A Cuca, de Tarsila do Amaral*. 2012. <<http://noticias.universia.com.br/tempo-livre/noticia/2012/11/12/981258/conheca-cuca-tarsila-do-amaral.html>>. Acesso em 10 de Janeiro de 2017. Citado na página 33.
- CARFAGNI, M.; FURFERI, R.; GOVERNI, L.; VOLPE, Y.; TENNIRELLI, G. Tactile representation of paintings: an early assessment of possible computer based strategies. In: SPRINGER. *Euro-Mediterranean Conference*. [S.l.], 2012. p. 261–270. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- DOUGLAS, D. H.; PEUCKER, T. K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, University of Toronto Press, v. 10, n. 2, p. 112–122, 1973. Citado na página 20.
- FISHER, R.; PERKINS, S.; WALKER, A.; WOLFART., E. *Gaussian Smoothing*. 2003. <<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/gsmooth.htm>>. Acesso em 23 de Dezembro de 2016. Citado na página 19.
- FURFERI, R.; GOVERNI, L.; VANNI, N.; VOLPE, Y. Tactile 3d bas-relief from single-point perspective paintings: a computer based method. *J. Inform. Comput. Sci*, v. 11, n. 16, p. 1–14, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing (3rd Edition)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2006. ISBN 013168728X. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.

HELLER, M. A. Picture and pattern perception in the sighted and the blind: the advantage of the late blind. *Perception*, SAGE Publications, v. 18, n. 3, p. 379–389, 1989. Citado na página 12.

HOIEM, D.; EFROS, A. A.; HEBERT, M. Automatic photo pop-up. *ACM transactions on graphics (TOG)*, ACM, v. 24, n. 3, p. 577–584, 2005. Citado na página 12.

HORRY, Y.; ANJYO, K.-I.; ARAI, K. Tour into the picture: using a spidery mesh interface to make animation from a single image. In: ACM PRESS/ADDISON-WESLEY PUBLISHING CO. *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. [S.l.], 1997. p. 225–232. Citado na página 12.

KENNEDY, J. M.; BAI, J. Haptic pictures: Fit judgments predict identification, recognition memory, and confidence. *Perception*, SAGE Publications, v. 31, n. 8, p. 1013–1026, 2002. Citado na página 12.

KLATZKY, R. L.; LEDERMAN, S.; REED, C. There's more to touch than meets the eye : the salience of object attributes for haptics with and without vision. *Journal of Experimental Psychology General*, v. 116, n. 4, p. 356–369, 1987. Citado na página 11.

KLATZKY, R. L.; LOOMIS, J. M.; LEDERMAN, S. J.; WAKE, H.; FUJITA, N. Haptic identification of objects and their depictions. *Perception & Psychophysics*, Springer, v. 54, n. 2, p. 170–178, 1993. Citado na página 12.

LAWSON, C. L. Transforming triangulations. *Discrete Mathematics*, v. 3, n. 4, p. 365 – 372, 1972. ISSN 0012-365X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0012365X72900933>>. Citado na página 21.

MANDUCHI, R. *ral Filtering for Gray and Color Images*. 1998. <[http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL\\_COPIES/MANDUCHI1/Bilateral\\_Filtering.html](http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/MANDUCHI1/Bilateral_Filtering.html)>. Acesso em 23 de Dezembro de 2016. Citado na página 20.

MELCHOIR. *RecursiveEvenPolygon*. 2007. <<https://en.wikipedia.org/wiki/File:RecursiveEvenPolygon.svg>>. Acesso em 23 de Dezembro de 2016. Citado na página 22.

ORTÍ, J. G.; MIRA, J. S.; PITARCH, M. J. M. Obtención de gráficos tangibles mediante técnicas de prototipado rápido: el volumen como elemento compositivo de diseño. ONCE, 2015. Citado na página 12.

PICARD, D.; LEBAZ, S.; JOUFFRAIS, C.; MONNIER, C. Haptic recognition of two-dimensional raised-line patterns by early-blind, late-blind, and blindfolded sighted adults. *Perception*, SAGE Publications, v. 39, n. 2, p. 224–235, 2010. Citado na página 12.

PROJECT, Q. *Qt Creator*. 2009. <<https://www.qt.io/ide/>>. Acesso em 10 de Janeiro de 2017. Citado na página 30.

RODRIGUES, J. B.; SANTOS, A. G. S.; CUTRIM, H. de M.; MAIA, I. M. O.; PAIVA, A. C. de. Desenvolvimento de material didático inclusivo para o estudo e apreciação da história da arte. In: *Anais da Jornada de Informática do Maranhão*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 13.

ROTHER, C.; KOLMOGOROV, V.; BLAKE, A. Grabcut: Interactive foreground extraction using iterated graph cuts. In: ACM. *ACM transactions on graphics (TOG)*. [S.l.], 2004. v. 23, n. 3, p. 309–314. Citado na página 17.

SALVADOR, A. *GUnderstanding Grabcut, an Interactive Foreground Extraction using Iterated Graph Cuts*. 2014. <<http://bitsearch.blogspot.com.br/2014/03/understanding-grabcut-interactive.html>>. Acesso em 26 de Dezembro de 2016. Citado na página 17.

SANTOS, A. G. S.; CUTRIM, H. de M.; MAIA, I. M. O.; RODRIGUES, J. B.; PAIVA, A. C. de. Modelagem tridimensional de obras de arte: uma ação inclusiva. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Pesquisa e desenvolvimento em Tecnologia Assistiva*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 13.

SANTOS, L. G.; BANDEIRA, A. L. M.; PANSANATO, L. T. E.; PAIVA, D. M. B. Recursos de acessibilidade para auxiliar a navegação de estudantes cegos em um editor de diagramas. In: *Anais do 23º Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE 2012)*. [S.l.: s.n.], 2012. ISSN 2316-6533. Citado na página 11.

SHREINER, D.; SELLERS, G.; KESSENICH, J. M.; LICEA-KANE, B. M. *OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL, Version 4.3*. 8th. ed. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 2013. ISBN 0321773039, 9780321773036. Citado na página 23.

SUTHERLAND, I. E.; SPROULL, R. F.; SCHUMACKER, R. A. A characterization of ten hidden-surface algorithms. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, ACM, v. 6, n. 1, p. 1–55, 1974. Citado na página 22.

SUZUKI, S. et al. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Elsevier, v. 30, n. 1, p. 32–46, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 26.

SZIRMAY-KALOS, L.; UMENHOFFER, T. Displacement mapping on the gpu—state of the art. In: WILEY ONLINE LIBRARY. *Computer Graphics Forum*. [S.l.], 2008. v. 27, n. 6, p. 1567–1592. Citado na página 22.

TOJAL, A. P. d. F. Museu de arte e público especial. *São Paulo*, 1999. Citado na página 11.

TOMASI, C.; MANDUCHI, R. Bilateral filtering for gray and color images. In: *Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271)*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 839–846. Citado na página 19.

WANG, J. *RobustMatting : The robust tool for natural image segmentation and mattings*. 2006. <<http://www.juew.org/projects/RobustMatting/index.html>>. Acesso em 23 de Dezembro de 2016. Citado na página 18.

WATAYA, R. S.; D'ABREU, J. V. V.; KIRNER, C.; BERNARDI, N. Realidade aumentada com em um mapa tátil sonoro para deficientes visuais: um sistema de interação. In: *II Congresso Brasileiro de Informática na Educação (CBIE 2013) Workshops (WCBIE 2013)*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado na página 11.

WELZL, E. *Computational Geometry Chapter 6*. 2013. <<http://www.ti.inf.ethz.ch/ew/Lehre/CG13/lecture/Chapter%206.pdf>>. Acesso em 23 de Dezembro de 2016. Citado na página 21.

WHO, W. H. O. 2014. <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/en/>>. [Online; Visitado em 30 de Dezembro de 2016]. Citado na página 11.

WU, J.; MARTIN, R. R.; ROSIN, P. L.; SUN, X.-F.; LANGBEIN, F. C.; LAI, Y.-K.; MARSHALL, A. D.; LIU, Y.-H. Making bas-reliefs from photographs of human faces. *Computer-Aided Design*, Elsevier, v. 45, n. 3, p. 671–682, 2013. Citado na página 12.