



**PGDESIGN** | Programa de Pós-Graduação  
Mestrado | Doutorado



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**FACULDADE DE ARQUITETURA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

Paulo Victor de Farias Dantas

**AQUISIÇÃO GEOMÉTRICA E DE REFLETÂNCIA PARA RENDERIZAÇÃO  
BASEADA EM FÍSICA (PBR) APLICADA À VISUALIZAÇÃO 3D INTERATIVA**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2018

**PAULO VICTOR DE FARIAS DANTAS**

**Aquisição geométrica e de refletância para renderização baseada em física (PBR) aplicada à visualização 3D interativa**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientadores:

Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Underléa Miotto Bruscato

Porto Alegre

2018

### CIP - Catalogação na Publicação

Dantas, Paulo Victor de Farias

Aquisição geométrica e de refletância para renderização baseada em física (PBR) aplicada à visualização 3D interativa / Paulo Victor de Farias Dantas. -- 2018.

175 f.

Orientador: Fabio Pinto da Silva.

Coorientadora: Underléa Miotto Bruscato.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Digitalização 3D. 2. Aquisição de refletância. 3. Patrimônio cultural. 4. Aquisição de aparência. 5. Renderização baseada em física (PBR). I. Silva, Fabio Pinto da, orient. II. Bruscato, Underléa Miotto, coorient. III. Título.

**Paulo Victor de Farias Dantas**

**AQUISIÇÃO GEOMÉTRICA E DE REFLETÂNCIA PARA RENDERIZAÇÃO  
BASEADA EM FÍSICA (PBR) APLICADA A VISUALIZAÇÃO 3D INTERATIVA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Porto Alegre, 23 de março de 2018.

**Prof. Dr. Régio Pierre da Silva**

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva (Orientador)**

Programa de Pós-Graduação em Design – PGDesign / UFRGS

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Underléa Miotto Bruscato (Orientadora)**

Programa de Pós-Graduação em Design – PGDesign / UFRGS

**Prof. Dr. Mário Luiz Lopes Reiss**

Departamento de Geodésia – UFRGS – Examinador Externo

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mariana Pohlmann de Oliveira**

Departamento de Design e Expressão Gráfica – UFRGS – Examinadora Externa

**Prof. Dr. José Luís Farinatti Aymone**

Programa de Pós-Graduação em Design – PGDesign / UFRGS – Examinador Interno



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha mãe, pelo apoio e amor dado durante todos os anos de estudo, bem como por me ensinar a mais importante das lições, que eu posso. Te amo e sou grato!

À Talita, minha companheira e cúmplice nessa nada mole vida em Porto Alegre, pelo amor, pela parceria, e por me inspirar a alçar voos cada vez maiores.

Ao meu orientador, Prof. Fabio Pinto da Silva, por acreditar na minha proposta e por me ensinar o real significado da expressão “Isso é barbada!” (Vai dar bastante trabalho, mas é possível!).

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Underléa Miotto Bruscato, por me incentivar desde o primeiro contato, bem como pelas oportunidades criadas.

A todos os professores que direta ou indiretamente contribuíram para o meu amadurecimento acadêmico, dedicando seu tempo e dividindo seus conhecimentos, e em especial aos professores do Laboratório de Design e Seleção de Materiais, pelos conselhos e orientações recebidos no convívio diário.

Aos bolsistas de graduação, Flávia Pereira Strattmann e Vinícius Carana Bohrer, por auxiliarem, respectivamente, na concepção e fabricação dos componentes físicos, e na configuração eletrônica e programação do sistema.

À toda equipe do LdSM/UFRGS, em especial ao João Rogério Machado Pereira, por compartilhar seus conhecimentos de mecânica e pelo apoio na usinagem.

Ao LAFOTO/UFRGS, pelo apoio nas questões referentes ao processamento fotogramétrico, em especial ao Prof. Mário Luiz Lopes Reiss.

Aos técnicos e monitores do LIFELAB/UFRGS, da Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, e do Centro Multiusuário de Prototipagem Rápida (CMPR) do Parque Tecnológico da UFRGS (Zenit), pelo atendimento e apoio.

Aos amigos e familiares no Rio de Janeiro, que vem torcendo pelo meu sucesso, ao meu amigo Peter Spring, e aos meus sogros e cunhadas, pelo carinho e apoio.

Por fim, agradeço ao financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), sem o qual meu mestrado não seria possível.

## RESUMO

DANTAS, P. V. F. **Aquisição geométrica e de refletância para renderização baseada em física (PBR) aplicada à visualização 3D interativa**. 2018. 175 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

O presente trabalho aborda o problema da aquisição geométrica e de refletância de objetos físicos, em especial, aqueles pertencentes ao patrimônio cultural. Por, geralmente, demandar não só conhecimentos técnicos avançados, mas também recursos financeiros abundantes, o desenvolvimento dessas tecnologias tem se limitado a alguns poucos grupos de pesquisa. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver um sistema para a documentação da aparência de artefatos do patrimônio cultural, empregando estratégias acessíveis de aquisição geométrica e de refletância, e ferramentas de texturização para renderização baseada em física. O estudo culminou no desenvolvimento de um protótipo de sistema automatizado de aquisição, no qual se implementou a separação dos componentes de refletância difuso e especular, por meio da polarização da luz, e a reconstrução geométrica por Fotogrametria. O estudo verificou a influência da densidade de amostragem da captura de imagens sobre a reconstrução geométrica e de refletância. Os modelos tridimensionais gerados foram submetidos à análise dimensional, e, com base em medições de tempo total de processamento, foi possível recomendar diretrizes para escolha de parâmetros para documentação de acervos. Por fim, comparou-se o produto visual obtido com o método proposto a digitalizações realizadas sem levar em consideração o comportamento de refletância, as quais empregaram Fotogrametria de curta distância e um escâner comercial de luz branca. A análise comparativa evidenciou melhorias na qualidade e precisão da representação digital dos artefatos, proporcionadas pela aquisição de refletância e pela renderização baseada em física. O método proposto mostrou-se, portanto, uma alternativa eficiente e viável para documentação da aparência completa de artefatos do patrimônio cultural, também podendo ser aplicado em outras áreas que demandem modelos 3d realistas.

**Palavras-chave:** Digitalização 3D, Aquisição de Refletância, Patrimônio Cultural, Aquisição de Aparência, Renderização Baseada em Física (PBR).

## ABSTRACT

DANTAS, P. V. F. **Geometry and reflectance acquisition for physically-based rendering applied to interactive 3D visualization**. 2018. 175 f. Master Thesis (Master of Design) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

The present work deals with the geometry and reflectance acquisition of physical objects, especially those belonging to cultural heritage. The development of these technologies has been limited to a few research groups, since they demand not only advanced technical knowledge, but also abundant financial resources. In this context, the objective of the present work was to develop a system for the documentation of the complete appearance of cultural heritage artifacts, applying accessible geometry and reflectance acquisition strategies, and texturing tools for physically-based rendering. The study was successful in developing an automated prototype of said acquisition system. The separation of diffuse and specular reflectance components was implemented using cross polarization of light, and the geometry is obtained through photogrammetric reconstruction. The study verified the effects of variable sampling density on the geometric and reflectance reconstruction. The reconstructed 3D models were submitted to dimensional deviation tests, and, based on additional processing time measurements, it was possible to outline guidelines for the selection of efficient reconstruction parameters. The visual products obtained with the proposed method were, finally, compared to scans carried out without considering the reflectance behavior, for which short-range photogrammetry and an Artec Eva scanner were used. Comparative analysis showed improvements in the quality and accuracy of the digital representation of scanned artifacts, provided by the additional reflectance acquisition and physically-based rendering. The proposed method, therefore, proved to be an efficient and feasible alternative for documenting the complete appearance of cultural heritage, being also suited for other fields.

**Keywords:** 3D Scanning, Reflectance Acquisition, Cultural Heritage, Appearance Acquisition, Physically-based Rendering (PBR).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Categorias de câmeras fotográficas digitais .....	25
Figura 2 – Documentação multiespectral .....	26
Figura 3 – Interface para visualização de sequência de 360° .....	28
Figura 4 – Implementação de sequência de 360° interativa .....	28
Figura 5 – Aquisição de imagens de transformação de refletância (RTI) .....	30
Figura 6 – Análise baseada em RTI .....	30
Figura 7 – Sistemas comerciais de digitalização 3D .....	32
Figura 8 – Sistemas de aquisição fotogramétrica customizados .....	33
Figura 9 – Visualização de modelo 3D interativo online .....	35
Figura 10 – Smithsonian X 3D: visualização contextualizada .....	36
Figura 11 – Mapeamento no espaço UV .....	37
Figura 12 – Otimização da superfície digitalizada para visualização interativa .....	37
Figura 13 – Inferência de propriedades materiais através da percepção visual .....	40
Figura 14 – Inferência de causas e efeitos através da percepção visual .....	41
Figura 15 – Representação incompleta da aparência material .....	42
Figura 16 – Representação de uma onda eletromagnética .....	43
Figura 17 – Espectro visível ao olho humano (luz) .....	44
Figura 18 – Fenômenos da interação da luz com a geometria da superfície .....	45
Figura 19 – Polarização linear da luz .....	47
Figura 20 – Modelo geométrico da refletância luminosa .....	48
Figura 21 – Taxonomia de materiais para aquisição de aparência .....	49
Figura 22 – Comportamento difuso de refletância .....	50
Figura 23 – Comportamento misto (difuso e especular) de refletância .....	51
Figura 24 – Comportamento especular de refletância .....	52
Figura 25 – Comportamento de refletância com difusão subsuperficial .....	53
Figura 26 – Gonioreflectômetros .....	54
Figura 27 – Hierarquia de modelos de refletância .....	56
Figura 28 – Bancos de dados BRDF e BTF .....	59
Figura 29 – Características únicas da superfície de objetos semelhantes .....	60
Figura 30 – Princípios ópticos de aquisição geométrica .....	62
Figura 31 – Conservação de energia .....	65
Figura 32 – Conservação de energia na difusão .....	65
Figura 33 – Efeito Fresnel .....	66
Figura 34 – Abordagens de texturização PBR .....	67
Figura 35 – Efeitos do parâmetro metalicidade .....	68
Figura 36 – Efeitos do parâmetro rugosidade .....	69
Figura 37 – <i>Light Stages</i> do <i>Institute for Creative Technologies</i> .....	71
Figura 38 – Sistema de aquisição com arco luminoso .....	72
Figura 39 – Resultados obtidos em Tunwattanapong et al. (2013) .....	73
Figura 40 – Sistema OrcaM .....	74
Figura 41 – Dados obtidos com o sistema OrcaM .....	75

Figura 42 – Modelos reconstruídos com o sistema OrcaM.....	76
Figura 43 – Visão geral das etapas do estudo .....	77
Figura 44 – Disposição de filtros polarizadores para ensaio preliminar .....	79
Figura 45 – Ensaio preliminar de polarização linear .....	79
Figura 46 – Ensaio de controle e monitoramento remoto das câmeras.....	80
Figura 47 – Interface do <i>Smart Shooter Pro</i> .....	81
Figura 48 – Esboço inicial da disposição dos módulos.....	82
Figura 49 – Aplicativo <i>XRite ColorChecker Passport</i> .....	84
Figura 50 – Valores nominais do <i>XRite ColorChecker Passport</i> .....	85
Figura 51 – Objetos selecionados para os ensaios .....	86
Figura 52 – Variáveis para estratégia de aquisição convergente .....	87
Figura 53 – Sequenciamento de passos. ....	87
Figura 54 – Delimitação por meio de máscaras .....	89
Figura 55 – Alinhamento das imagens e processamento da nuvem.....	90
Figura 56 – Parâmetros para o processamento da malha poligonal.....	90
Figura 57 – Remoção de parte da geometria da plataforma giratória.....	91
Figura 58 – Isolamento do componente especular .....	93
Figura 59 – Sistema de aquisição desenvolvido.....	97
Figura 60 – Visão geral do módulo de posicionamento .....	98
Figura 61 – Detalhe da plataforma giratória .....	99
Figura 62 – Visão geral do módulo de iluminação.....	100
Figura 63 – Detalhe do arco luminoso.....	101
Figura 64 – Visão geral dos módulos de captura e polarização .....	102
Figura 65 – Detalhe do alternador de polarização.....	103
Figura 66 – Alternador de polarização em funcionamento .....	104
Figura 67 – Desenho esquemático da automação do sistema .....	105
Figura 68 – Interface de controle do sistema de aquisição .....	106
Figura 69 – Fluxograma de aquisição de imagens .....	107
Figura 70 – Protótipo construído .....	108
Figura 71 – Zona de maior eficiência de polarização perpendicular.....	110
Figura 72 – Resultados da variação na posição angular da câmera .....	111
Figura 73 – Posições angulares das câmeras nas aquisições realizadas .....	112
Figura 74 – Relação entre <i>megapixels</i> e nuvens de pontos .....	116
Figura 75 – Configurações de qualidade da reconstrução geométrica .....	116
Figura 76 – Análise comparativa do artefato CPedra .....	119
Figura 77 – Análise de desvio dimensional do artefato CPedra .....	120
Figura 78 – Análise comparativa do artefato Xixo .....	121
Figura 79 – Análise de desvio dimensional do artefato Xixo.....	122
Figura 80 – Desvio quadrático médio (CPedra).....	123
Figura 81 – Desvio quadrático médio (Xixo).....	123
Figura 82 – Tempo total de processamento (CPedra).....	126
Figura 83 – Tempo total de processamento (Xixo).....	127
Figura 84 – Relação RMS x Tempo de Processamento (CPedra).....	128
Figura 85 – Relação RMS x Tempo de Processamento (Xixo).....	129

Figura 86 – Projeção do componente difuso .....	131
Figura 87 – Projeção do componente especular .....	132
Figura 88 – Análise de desvio de intensidade da refletância especular.....	134
Figura 89 – Visualização 3D interativa dos modelos gerados .....	137
Figura 90 – Comparativo com métodos convencionais (CPedra) .....	138
Figura 91 – Comparativo com métodos convencionais (Xixo) .....	139

#### **SOBRE AS FIGURAS**

A fonte de referência está indicada abaixo das mesmas. Na ausência dessa informação, deve-se considerar que a autoria das imagens é do pesquisador.

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Comparativo entre métodos de documentação digital .....	38
Quadro 2 – Nomenclatura dos modelos de refletância .....	56
Quadro 3 – Nomenclatura de mapas de textura .....	70
Quadro 4 – Dados quantitativos da aquisição com o sistema OrcaM .....	75

### **SOBRE OS QUADROS**

A fonte de referência está indicada abaixo dos mesmos. Na ausência dessa informação, deve-se considerar que a autoria dos quadros é do pesquisador.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Tempo total e volume de dados da aquisição de imagens .....	113
Tabela 2 – Configuração das estações de trabalho utilizadas .....	124

### **SOBRE AS TABELAS**

A fonte de referência está indicada abaixo das mesmas. Na ausência dessa informação, deve-se considerar que a autoria dos quadros é do pesquisador.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
BRDF	Função Bidirecional de Distribuição de Refletância (do inglês, <i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i> )
BSSDF	Função Bidirecional de Distribuição de Difusão Subsuperficial (do inglês, <i>Bidirectional Subsurface Scattering Distribution Function</i> )
BSSRDF	Função Bidirecional de Distribuição de Refletância de Superfície Difusora (do inglês, <i>Bidirectional Scattering-Surface Reflectance Distribution Function</i> )
BTF	Função Bidirecional de Textura (do inglês, <i>Bidirectional Texture Function</i> )
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CFA	<i>Color Filter Array</i>
CH	<i>Cultural Heritage</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
CMPR	Centro Multiusuário de Prototipagem Rápida
CNC	Controle Numérico Computadorizado (do inglês, <i>Computer Numeric Control</i> )
CUDA	<i>Compute Unified Device Architecture</i>
CUReT	<i>Columbia-Utrecht Reflectance and Texture Database</i>
DOF	Profundidade de campo (do inglês, <i>Depth of Field</i> )
DSLR	<i>Digital Single-Lens Reflex</i>
GB	<i>Gigabytes</i>
GRF	Função Geral de Refletância (do inglês, <i>General Reflectance Function</i> )
HDRI	Imagem de alta faixa dinâmica (do inglês, <i>High Dynamic Range Imaging</i> )
ICT	<i>Institute for Creative Technologies</i>
IDE	Ambiente de desenvolvimento integrado (do inglês, <i>Integrated Development Environment</i> )
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
IR	Infravermelho (do inglês, <i>infrared</i> )
ISO	<i>International Organization of Standardization</i>
JPEG	Formato de imagem digital (do inglês, <i>Joint Photographic Experts Group</i> )



LAFOTO	Laboratório de Pesquisas em Fotogrametria
LCD	Display de cristal liquido (o inglês, <i>Liquid Cristal Display</i> )
LdSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
LED	Diodo emissor de luz (do inglês, <i>Light Emitting Diode</i> )
LIFELAB	Laboratório de Inovação e Fabricação Digital da Escola de Engenharia
MB	<i>Megabytes</i>
MERL	<i>Mitsubishi Electric Research Laboratories</i>
MP	<i>Megapixel</i> (1 milhão de <i>pixels</i> )
nm	nanômetros
PBR	Renderização baseada em Física (do inglês, <i>Physically-based Rendering</i> )
PTM	Mapeamento de Textura Polinomial (do inglês, <i>Polynomial Texture Mapping</i> )
RF	Campo de Refletância (do inglês, <i>Reflectance Field</i> )
rpm	rotações por minuto
RTI	Aquisição de Imagens de Transformação de Refletância (do inglês, <i>Reflectance Transformation Imaging</i> )
SLF	Campo de Luz da Superfície (do inglês, <i>Surface Light Field</i> )
SRF	Campo de Refletância da Superfície (do inglês, <i>Surface Reflectance Field</i> )
SSD	<i>Solid-State Drive</i>
SVBRDF	Função Bidirecional de Distribuição de Refletância Espacialmente Variável (do inglês, <i>Spatially-varying Bidirectional Reflectance Distribution Function</i> )
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTIA	<i>Institute of Information Theory and Automation</i> (Praga, Chéquia)
VR	Realidade Virtual (do inglês, <i>Virtual Reality</i> )
VRML	<i>Virtual Reality Modeling Language</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	Problema .....	18
1.2	Objetivos .....	19
1.3	Justificativa e Relevância .....	19
1.4	Estrutura do Trabalho .....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
2.1	Documentação e Representação Digital do Patrimônio Cultural .....	22
2.1.1	Fotografia Digital .....	24
2.1.2	Vídeo Digital .....	27
2.1.3	Sequências 360º Interativas .....	27
2.1.4	Aquisição de Imagens de Transformação de Refletância (RTI) .....	29
2.1.5	Digitalização 3D.....	31
2.1.6	Visualização 3D Interativa .....	34
2.1.6.1	Otimização para visualização 3D interativa .....	36
2.1.7	Comparativo das técnicas de documentação digital .....	38
2.2	Aparência Material (Textura Visual) .....	39
2.2.1	Luz visível.....	42
2.2.2	Comportamentos de Refletância.....	48
2.3	Aquisição de Aparência.....	53
2.3.1	Modelos de Refletância .....	54
2.3.2	Aquisição de amostras materiais vs. aquisição de artefatos .....	59
2.3.3	Sistema de Aquisição de Aparência .....	61
2.4	Texturização para Renderização baseada em Física (PBR) .....	63
2.4.1	Microfacetras .....	64
2.4.2	Conservação de Energia .....	64
2.4.3	Efeito Fresnel .....	66
2.4.4	Parâmetros do modelo de PBR .....	66
2.5	Estado da Arte .....	70
2.5.1	<i>Light Stages</i> - ICT.....	70
2.5.2	Tunwattanapong et al. (2013).....	71
2.5.3	Orbital Camera System - DFKI .....	73
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	77
3.1	Ensaio preliminares.....	78
3.2	Desenvolvimento do sistema de aquisição.....	81
3.3	Calibração de cor e pós-processamento.....	83
3.4	Aquisição de Imagens.....	85

3.5	Reconstrução Geométrica.....	88
3.6	Reconstrução da Refletância .....	92
3.7	Validação dos Resultados.....	94
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	96
4.1	Sistema de Aquisição.....	96
4.1.1	Módulo de Posicionamento.....	98
4.1.2	Módulo de Iluminação.....	99
4.1.3	Módulo de captura e módulo de polarização .....	102
4.1.4	Automação do sistema .....	104
4.1.5	Protótipo do sistema de aquisição .....	107
4.2	Aquisição de Imagens .....	109
4.2.1	Influência da posição angular sobre a aquisição de imagens .....	109
4.2.2	Dados da aquisição de imagens .....	113
4.3	Reconstrução Geométrica.....	114
4.3.1	Configurações de qualidade da reconstrução geométrica .....	115
4.3.2	Influência do tamanho do passo sobre a geometria.....	117
4.3.3	Dados da reconstrução geométrica .....	124
4.4	Reconstrução de Refletância .....	130
4.4.1	Modos de projeção de textura .....	130
4.4.2	Influência do tamanho do passo sobre a refletância .....	133
4.5	Validação dos Resultados.....	134
5	CONCLUSÃO.....	141
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	143
	REFERÊNCIAS .....	144
	APÊNDICE A .....	153
	APÊNDICE B .....	165
	APÊNDICE C .....	171

## 1 INTRODUÇÃO

As tecnologias de digitalização tridimensional (3D) vêm se difundindo e popularizando cada vez mais nas últimas duas décadas. O aumento no poder de processamento e armazenamento de microcomputadores, avanços no desenvolvimento de novas tecnologias, e a crescente oferta de sistemas de digitalização tridimensional de variadas faixas de preço, vem tornando a adoção desses recursos cada vez mais viável. Por conseguinte, a digitalização tridimensional vem sendo empregada, com grande êxito, em diversas áreas, complementando, ou até mesmo substituindo, diferentes processos de análise e documentação.

Uma das áreas a se beneficiar dessas tecnologias é a preservação do patrimônio cultural. De acordo com Meira (2001), a preservação é um conceito genérico que engloba as ações de identificação (inventários, levantamentos, documentação e registro nas mais diversas formas); as ações de conservação (manutenção, restauração, consolidação e outras); as ações de promoção (valorização, educação patrimonial, comunicação e difusão do patrimônio cultural nas suas diversas formas); e as ações de proteção (tombamento e outras formas de acautelamento definidas em lei). Um número crescente de museus e outras instituições voltadas à preservação do patrimônio cultural estão realizando a digitalização tridimensional de seus acervos (LOVEJOY, 2004; YOUNAN; TREADAWAY, 2015). Há boas razões para este desenvolvimento. A digitalização de acervos permite o acesso seguro e instantâneo a todos os itens da coleção, seja por pesquisadores, curadores ou o público geral. Além disso, essa tecnologia também pode servir a propósitos de documentação, capturando o estado do objeto antes de uma restauração ou do empréstimo a uma outra instituição, como também, para monitorar sua deterioração.

Objetos digitalizados com alta qualidade podem ser utilizados no lugar de seus originais em algumas aplicações. Isto, não apenas, reduz possíveis riscos a objetos frágeis e valiosos, como também permite formas de análise e apreciação que seriam impossíveis ao objeto físico (NEWELL, 2012; SCHWARTZ; KLEIN, 2012). O modelo virtual pode ser exibido simultaneamente em inúmeras localidades sem custos adicionais significativos. Esse também pode ser facilmente combinado com outros objetos virtuais e inserido em diferentes contextos, como, por exemplo, em seu uso histórico ou local de escavação onde foi encontrado. Por último, modelos virtuais, até

mesmo, podem ser utilizados para disseminação pública através da internet, podendo alcançar um enorme público (SCHWARTZ; KLEIN, 2012).

Aplicações voltadas à difusão digital do patrimônio cultural vêm sendo auxiliadas pelo desenvolvimento de tecnologias de exibição interativa de conteúdo tridimensional e de realidade virtual e aumentada. Em Muniz (2015), encontra-se um levantamento dessas tecnologias voltadas ao patrimônio cultural. Destaca-se a WebGL, que permite visualizar conteúdo tridimensional no navegador, sem a necessidade de instalações ou configurações adicionais, inclusive em dispositivos móveis. Há também, hoje, um grande número de repositórios online, como *Sketchfab*, *Cl3ver* e *Poly*, que permitem aos usuários e instituições, da mesma forma que o *Youtube* o faz para vídeos, carregar e compartilhar seus modelos tridimensionais. Também tem se tornado frequente a utilização de *engines* de jogos, como *Unreal*, *Unity* ou *Stingray*, para criação de aplicações informativas e educacionais (MUNIZ, 2015). Além disso, em outubro de 2016 a *Microsoft* anunciou a atualização *Windows 10 Creator's Update*, que trouxe ferramentas nativas de criação, visualização interativa e compartilhamento de conteúdo tridimensional para microcomputadores e aparelhos móveis, viabilizando uma maior integração desse conteúdo ao cotidiano dos usuários (MICROSOFT, 2016).

Ainda no que tange à visualização, especialmente no campo da preservação do patrimônio cultural, onde até os detalhes mais sutis podem mudar drasticamente a interpretação de um objeto, é importante capturar e reproduzir sua aparência completa. Dependendo da posição relativa ao observador ou da fonte de luz que ilumina o objeto, desgastes, ranhuras, sujeiras, entre outros detalhes, podem se tornar aparentes. Salienta-se, portanto, que a aparência não depende somente do objeto em si, mas também das condições de visualização e iluminação sob as quais esse é observado. A impressão que se tem de um artefato pode mudar de acordo com as condições sob as quais esse é contemplado (SCHWARTZ; KLEIN, 2012).

No entanto, grande parte dos casos de digitalização tridimensional de patrimônio cultural encontrados na literatura negligenciam aspectos mais complexos que dizem respeito à aparência do objeto (BRUNO et al., 2010; GUARNIERI; PIROTTI; VETTORE, 2010; GUIDI; RUSSO; ANGHELEDDU, 2014; PAVLIDIS et al., 2007; SANTOS JUNIOR et al., 2012; YOUNAN; TREADAWAY, 2015). Em geral, a digitalização é realizada enfatizando a aquisição detalhada da geometria. O modelo

tridimensional obtido dessa maneira é, então, complementado com mapas de textura obtidos fotograficamente durante o processo de digitalização, sob condições de luz desconhecidas ou pouco controladas. Como resultado, esses modelos reproduzem com sucesso a forma geométrica do objeto original, mas exibem uma aparência estática ou incorreta, ainda que em alta resolução (ANDRADE, 2009). Isto é, os mapas de texturas reproduzem a aparência do momento de aquisição, e não o comportamento da superfície sob quaisquer condições de luz. Como efeito, o modelo apresenta sombras e áreas de brilho intenso que permanecem em posições fixas de sua superfície. Ao manipular o modelo virtualmente, esses efeitos permanecem na mesma posição, independente das condições de iluminação e observação criadas no cenário virtual. Ou ainda, em alguns casos, os efeitos dinâmicos de iluminação são completamente omitidos na reprodução.

A digitalização e reprodução completa da aparência de objetos físicos é possível através da “aquisição de aparência”; que compreende o esforço conjunto de aquisição geométrica e aquisição de refletância (WEINMANN; KLEIN, 2015). A aquisição de refletância tem como objetivo medir a luz refletida, a fim de sintetizar o comportamento da interação da luz com a superfície do objeto; em outras palavras, o comportamento de refletância da superfície. Esse é um campo extensivamente investigado na literatura, muitas vezes focado em amostras de superfícies planas ou esféricas, e não objetos tridimensionais complexos (DANA et al., 1999; DEBEVEC et al., 2000, 2004; DUTTA, 2011; HOLROYD; LAWRENCE; ZICKLER, 2010; KÖHLER et al., 2013; SMITH; HANCOCK, 2010; TUNWATTANAPONG et al., 2013; TUNWATTANAPONG; EAKSARAYUT; SITTHI-AMORN, 2016; WEINMANN; KLEIN, 2015; ZHENG et al., 2010). A aquisição é realizada medindo a intensidade da refletância para diferentes combinações de direções de luz incidente e direções de observação. Quanto maior essa amostragem, e a quantidade de parâmetros considerados, mais precisa a aquisição e a reprodução da aparência. Artefatos tridimensionais, que ostentam grande variação geométrica e de refletância em sua superfície, representam um problema ainda maior, necessitando de estruturas mais complexas e um maior número de medições para uma aquisição precisa. Essas estruturas, chamadas por Weinmann e Klein (2015) de “ecossistemas de aquisição de aparência”, combinam diferentes técnicas de aquisição geométrica e de refletância,

como também algoritmos para reconhecimento e processamento dos dados obtidos, a fim de sistematizar e automatizar o processo.

Essas etapas adicionais, no entanto, tornam a aquisição de aparência um processo mais demorado e complexo que a digitalização 3D convencional, resultando ainda em um grande volume de dados. No sistema apresentado por Schwartz e Klein (2012), por exemplo, o tempo médio de aquisição por objeto é de 7 horas, durante as quais são adquiridas 186.000 imagens, que ocupam aproximadamente 1,1 *terabytes* em disco. O processamento automatizado desses dados, a fim de gerar uma Função de Textura Bidirecional, BTF (do inglês, *Bidirectional Texture Function*), de 2048x2048 pixels, leva em torno de 36 horas. O processamento é realizado em uma estação de trabalho com 24 núcleos lógicos e 144 *gigabytes* de memória RAM. Em consequência desse alto consumo de tempo e espaço de armazenamento, técnicas bidimensionais, como sequências 360° interativas e Imagens de Transformação de Refletância, RTI (do inglês, *Reflectance Transformation Imaging*) (NEWMAN, 2015; PORTER et al., 2016), por vezes, acabam sendo alternativas mais viáveis para a documentação digital da aparência.

Observa-se, no entanto, que, no que tange à criação eficiente de conteúdo tridimensional digital com aparência realista, a indústria de entretenimento – em especial jogos eletrônicos e cinema –, é referência. No mercado de jogos eletrônicos, por exemplo, que movimentou 96 bilhões de dólares no ano de 2016 (NEWZOO, 2016), a corrida pelo desenvolvimento e implementação de novas tecnologias é constante e acirrada. A criação de experiências visuais cada vez mais imersivas e realistas tem sido meta nas principais produções. Exemplos disso podem ser encontrados em jogos lançados recentemente, como “*Uncharted 4*” da *Naughty Dog* e “*The Witcher 3*” da *CD Projekt Red*, assim como em filmes e curtas-metragens. Para obter esses resultados, são utilizados, cada vez mais, métodos de texturização para renderização baseada em física, PBR (do inglês, *physically-based rendering*), que simula, com base em propriedades físicas, a interação da luz com superfícies encontradas no mundo real. A reprodução convincente dessa interação é fundamental no reconhecimento das propriedades materiais dos objetos que compõem o mundo virtual, contribuindo assim para imersão.

Evidentemente, há diferenças significativas entre a aquisição de aparência de objetos reais e a criação de conteúdo tridimensional para mundos virtuais de jogos

digitais e filmes. A aquisição de aparência, em geral, busca a automatização do processo, enquanto a criação de conteúdo depende fortemente da intervenção manual e criativa de profissionais especializados. Ambas, no entanto, baseiam-se nos mesmos princípios e modelos de representação de refletância, como Funções Bidirecionais de Distribuição de Refletância, BRDF (do inglês, *Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Ferramentas de texturização para PBR, permitem reconstruir de forma interativa a aparência de materiais por meio da criação e edição de mapas de textura que modulam espacialmente o modelo de BRDF utilizado (HAINDL; FILIP, 2013). Esse processo tem se mostrado bastante eficiente. Apesar dessas ferramentas, em geral, serem utilizadas sem o compromisso de reproduzir de forma precisa a aparência de um objeto específico, a possibilidade de utilizá-las com esse propósito não deve ser excluída.

Dispositivos dedicados à aquisição de aparência, por outro lado, ainda são comercialmente inexistentes. Seu desenvolvimento tem se limitado a alguns poucos grupos de pesquisa, por demandar não só conhecimentos técnicos avançados, mas também recursos financeiros abundantes. Uma alternativa para diminuir a complexidade técnica pode ser o uso de *softwares* comerciais de processamento gráfico, porém, o custo ainda pode tornar o sistema inacessível a instituições dedicadas ao patrimônio cultural.

Frente à complexidade e ao custo das abordagens de aquisição de aparência encontradas na literatura, assim como aos resultados pouco representativos obtidos por métodos de digitalização tridimensional convencionais, defende-se, no presente trabalho, a hipótese de que dados obtidos por meio de técnicas de aquisição geométrica e de refletância acessíveis possam ser empregados em conjunto com ferramentas de texturização para PBR, de modo a facilitar a aquisição de aparência de artefatos do patrimônio cultural.

## 1.1 Problema

Como, e até que extensão, pode-se documentar o comportamento de refletância de artefatos do patrimônio cultural, fazendo uso de técnicas acessíveis de aquisição geométrica e de refletância, bem como de ferramentas de texturização para PBR?



## 1.2 Objetivos

O objetivo geral é o desenvolvimento e avaliação de um sistema técnica e financeiramente acessível de aquisição de aparência, aliando técnicas de aquisição geométrica e de refletância, e ferramentas de texturização para PBR, visando à documentação de objetos do patrimônio cultural.

Os objetivos específicos estão listados a seguir:

- Compreender a formação da aparência (textura visual) de superfícies materiais no mundo físico e identificar os diferentes comportamentos de interação luz-superfície;
- Desenvolver um sistema automatizado (*hardware* e *software*) para iluminação e captura de imagens;
- Implementar estratégias para a aquisição geométrica por Fotogrametria;
- Implementar estratégias para a aquisição de refletância; contemplando a iluminação homogênea da superfície e a separação dos componentes de refletância;
- Implementar estratégias para a calibração da cor dos artefatos virtuais;
- Avaliar o método de captura de dados com o sistema proposto, bem como analisar o processamento dos dados obtidos;
- Gerar um produto visual fisicamente possível a partir dos dados de refletância capturados.

## 1.3 Justificativa e Relevância

A implementação de novas tecnologias no campo do Patrimônio Cultural e da Arqueologia tem sido, frequentemente, motivo de controvérsia. Isso deve-se à falta de confiança em se substituir abordagens consolidadas por métodos experimentais, baseados em *softwares* e dispositivos inovadores (DELLEPIANE et al., 2011). Também nesse contexto, a disponibilidade de verba e a proficiência tecnológica de entidades governamentais desempenham um papel muito maior para sua implementação do que a existência da tecnologia em si.

Diversas tecnologias já enfrentaram obstáculos para serem validadas nesse campo. A Fotografia, por exemplo, levou algum tempo até ser aceita e transformar os métodos vigentes de documentação e análise do patrimônio cultural. Tecnologias de digitalização e representação 3D encontram-se atualmente nessa posição. Apesar disso, essas tecnologias vêm sendo empregadas, cada vez mais, com grande êxito para documentação e análise do patrimônio cultural (ABEL et al., 2011; ARBACE et al., 2013; GRÜN; REMONDINO; ZHANG, 2004; KARASIK; SMILANSKY, 2008; LEVOY et al., 2000; OSORIO et al., 2011).

Muitos profissionais dedicados ao patrimônio cultural, no entanto, veem as tecnologias de representação 3D muito mais como um meio de alcançar o público, do que um instrumento básico para a pesquisa e preservação (DELLEPIANE et al., 2011). Hoje, a catalogação e documentação de acervos ainda é baseada em dados textuais enriquecidos por imagens fotográficas, nem sempre coloridas. Do mesmo modo, a abordagem consolidada para a análise e estudo de artefatos é a inspeção visual por manipulação direta; um privilégio restrito a poucos pesquisadores. Em muitos outros casos, a análise é baseada em imagens fotográficas, que proporcionam apenas uma representação parcial do objeto.

Modelos 3D virtuais obtidos sem levar em consideração a aquisição completa da aparência não revelam a informação visual necessária para que possam ser analisados da mesma forma que os artefatos físicos. Mesmo no que tange à utilização destes modelos para exibição ao público, as representações visuais obtidas por métodos convencionais são de verossimilidade questionável. Para Dellepiane et al. (2011), é preciso considerar a qualidade visual estabelecida pela indústria de entretenimento. A produção de filmes e jogos digitais vem aguçando a percepção do espectador quanto ao que é uma experiência ou representação virtual crível e de boa qualidade. Assim, imagens reproduzidas nestes meios podem ser tão convincentes que, por vezes, se sobrepõem ao que é disseminado pela comunidade científica, tornando-se a realidade histórica na cabeça do espectador (DELLEPIANE et al., 2011). Modelos virtuais precisos, obtidos por aquisição geométrica e de refletância, por sua vez, podem oferecer uma experiência visual mais próxima à manipulação pessoal do artefato original.

Para Dellepiane et al. (2011), é fácil imaginar um futuro em que catálogos e repositórios adotem tecnologias 3D como principal recurso de representação. A

concretização deste futuro depende, no entanto, muito mais da disponibilidade de fundos e conhecimento tecnológico de instituições governamentais voltadas à preservação do patrimônio cultural, do que do atual estado da arte da tecnologia em si. É neste contexto que a presente pesquisa se mostra relevante, contribuindo tanto para o aspecto financeiro, propondo alternativas viáveis e eficientes para a realização, como para o conhecimento técnico, ampliando a discussão sobre a documentação digital da forma e da aparência do patrimônio cultural, bem como sobre a sua valorização através da visualização 3D interativa.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Além deste primeiro capítulo introdutório, o presente trabalho divide-se em mais cinco capítulos. No capítulo dois, é apresentada a revisão de literatura, a qual versa sobre documentação e representação digital do patrimônio cultural, aparência material, aquisição de aparência, texturização para renderização baseada em física, e trabalhos relacionados. No capítulo três, são apresentados os materiais e métodos empregados neste estudo. O capítulo quatro traz os resultados e a discussão tida como pertinente, enquanto o capítulo cinco apresenta as conclusões a que se chegou. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas para a elaboração deste trabalho, e material complementar organizado nos apêndices.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Documentação e Representação Digital do Patrimônio Cultural

O patrimônio cultural encontra-se sob constante risco e ameaça de destruição e deterioração. Seja por conta de catástrofes naturais, conflitos armados, acidentes provocados pelo transporte, ou pela ação de turistas desatentos. O roubo de objetos de arte e artefatos também está entre as ameaças sob as quais o patrimônio cultural se encontra (DESVALLÉES; MAIRESSE, 2013; STANCO; TANASI, 2011). A ameaça está presente mesmo quando mantido sob cuidados de instituições dedicadas à sua preservação e conservação. A retirada da reserva técnica para estudo e análise pode, a longo prazo, resultar em danos e desgastes.

Desde a década de 1930 vem surgindo e se difundindo documentos e leis que buscam regulamentar a prática da preservação do patrimônio cultural no plano internacional. No Brasil, criou-se em 1937 o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, IPHAN, “uma autarquia vinculada ao Ministério da Cultura que responde pela preservação do Patrimônio Cultural Brasileiro” (IPHAN, 2014a). Segundo o Decreto-Lei nº 25, de 30 de novembro de 1937, o Patrimônio Cultural foi definido como:

[...] um conjunto de bens móveis e imóveis existentes no País e cuja conservação é de interesse público, quer por sua vinculação a fatos memoráveis da história do Brasil, quer por seu excepcional valor arqueológico ou etnográfico, bibliográfico ou artístico. São também sujeitos a tombamento os monumentos naturais, sítios e paisagens que importe conservar e proteger pela feição notável com que tenham sido dotados pela natureza ou criados pela indústria humana (IPHAN, 2014b).

Na Constituição Federal de 1988, Artigo 216, este conceito foi ampliado para bens “de natureza material e imaterial, tomados individualmente ou em conjunto, portadores de referência à identidade, à ação, à memória dos diferentes grupos formadores da sociedade brasileira” (IPHAN, 2004). De modo a incluir:

[...] as formas de expressão; os modos de criar, fazer e viver; as criações científicas, artísticas e tecnológicas; as obras, objetos, documentos, edificações e demais espaços destinados às manifestações artístico-culturais; os conjuntos urbanos e sítios de valor histórico, paisagístico, artístico, arqueológico, paleontológico, ecológico e científico (IPHAN, 2004).

Documentar, no contexto museal, e do patrimônio cultural em geral:

[...] envolve tarefas direcionadas à coleta, armazenamento, tratamento, organização, disseminação e recuperação da informação. Considerando os documentos como registro da atividade humana, a documentação serve como instrumento de comunicação e preservação da informação no âmbito da memória social e da pesquisa científica (YASSUDA, 2009).

A documentação visa acompanhar toda a trajetória do objeto, registrando desde o momento de sua descoberta ou entrada em uma instituição de preservação, até quaisquer medidas de preservação e restauração subsequentes, assim como a sua localização dentro e fora da instituição. Além disso, a documentação serve de base para demais medidas de preservação, tais como a pesquisa, a restauração e a valorização (educação patrimonial, comunicação e difusão).

Segundo Yassuda (2009), a descrição do objeto museológico ocorre sob duas perspectivas: o objeto enquanto estrutura física, e enquanto valor simbólico. O primeiro aspecto denota a forma e propriedades físicas do objeto, também denominado de aspectos intrínsecos, já o segundo diz respeito à razão de sua existência, sua função, significado e história, os aspectos extrínsecos (YASSUDA, 2009). Estes esforços de documentação e catalogação do patrimônio cultural ainda são, majoritariamente, baseados em descrições textuais enriquecidas por desenhos e fotografias.

O rápido avanço de tecnologias de computação e de comunicação facilitaram o processo de documentação e armazenamento digital destes dados, viabilizando, também, novas formas de registro e difusão do conhecimento. A digitalização tridimensional e a visualização 3D interativa são alguns desenvolvimentos mais recentes, que, aos poucos, vem ganhando espaço no campo da preservação do patrimônio cultural. Modelos virtuais podem não apenas descrever aspectos intrínsecos, mas também os aspectos extrínsecos, contextualizando o artefato em experiências multimidiáticas e imersivas

A digitalização e visualização 3D, no entanto, não se caracteriza atualmente como a alternativa mais acessível e fácil de ser implementada, se comparada a outras técnicas de documentação. A seguir são apresentadas algumas das técnicas empregadas para documentação de aspectos intrínsecos de objetos do patrimônio

cultural, explicitando o contexto em que as tecnologias 3D estão se inserindo. Uma análise comparativa é apresentada ao final.

### 2.1.1 Fotografia Digital

Com mais de 150 anos de existência, a fotografia tem sido uma das principais técnicas para a documentação do patrimônio cultural. Hoje conhecimentos gerais de fotografia digital são bastante difundidos. Além disso, avanços tecnológicos recentes tornaram a aquisição de imagens fotográficas digitais de alta qualidade um processo mais acessível, rápido e fácil. Mesmo imagens obtidas com equipamentos de baixo custo podem fornecer ricas informações bidimensionais e, até mesmo, tridimensionais, exploradas algumas das técnicas mostradas mais adiante (BECK, 2013; MUDGE; ASHLEY; SCHROER, 2007). Grün et al. (2004), por exemplo, demonstram a reconstrução digital de estruturas perdidas pela ação do homem, a partir de imagens amadoras, recuperadas da internet ou tomadas casualmente por turistas.

Hoje encontra-se uma grande variedade de câmeras digitais, de modo que este se tornou um item de fácil aquisição, encontrado na maioria das instituições de preservação do patrimônio cultural. Câmeras com sensores CMOS (do inglês, *complementary metal-oxide-semiconductor*) de pequeno formato (menores que 35 mm) são as mais acessíveis e fáceis de se encontrar. Enquadram-se nesta categoria modelos compactos e câmeras DSLR (do inglês, *Digital Single Lens Reflex*), que atualmente apresentam resoluções em torno dos 20 *megapixels* (MP). Além destas, há também câmeras digitais com sensores de médio formato (maiores que 35 mm) que podem ostentar resoluções de até 100 MP (Figura 1). No entanto, mesmo os modelos mais simples possibilitam uma documentação rica em detalhes da superfície de objetos; dado que se providencie as condições de luz e estabilização necessárias.

Para além das de especificidades técnicas dos dispositivos utilizados, a documentação fotográfica pode ainda variar com respeito à informação visual capturada. Algumas técnicas utilizam-se de filtros ópticos ou modificações para capturar apenas determinadas faixas do espectro visível da radiação eletromagnética, como, por exemplo, a luz infravermelha (IR) ou ultravioleta; registrando desta maneira informações inacessíveis à visão humana (BERTANI; CONSOLANDI, 2006;

COSENTINO, 2016). A técnica é designada de acordo com a informação que é registrada, por exemplo, fotografia infravermelho.

**Figura 1 – Categorias de câmeras fotográficas digitais**



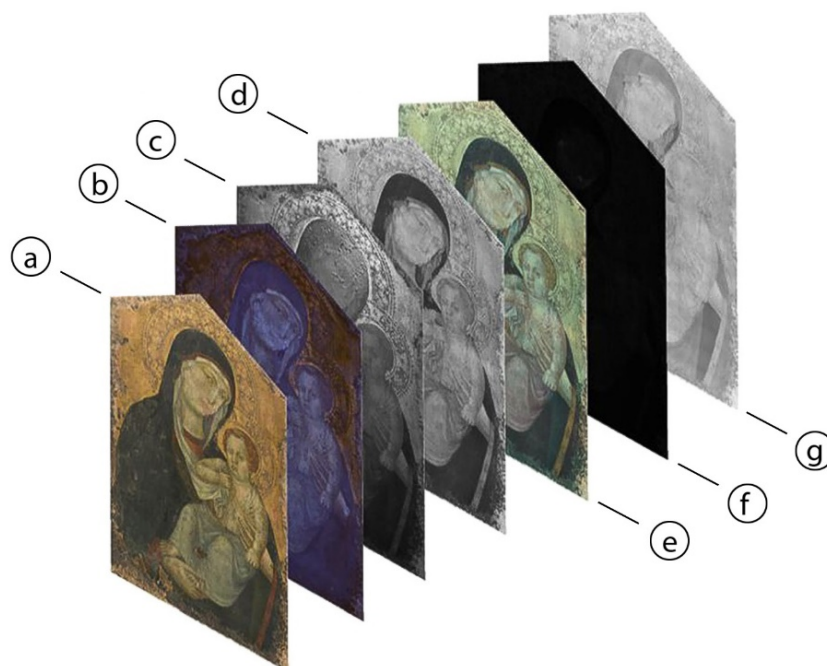
Diferentes faixas de preço: (a) câmera compacta de 20.1MP (aprox. US\$ 100.00); (b) câmera DSLR de 24.2MP (aprox. US\$ 800.00); (c) câmera de médio formato de 100MP (aprox. US\$ 40,000.00). Fonte: Adaptado de B&H Photo Video (2018).

A fotografia ou documentação multiespectral, por outro lado, consiste em registrar individualmente diversas faixas do espectro da luz (Figura 2). Além do registro de faixas imperceptíveis à visão humana, o método pode ainda ser empregado para registrar individualmente os comprimentos de onda que compõem os estímulos coloridos. Convencionalmente, sensores digitais fazem uso de arranjos de filtros de cor, CFA (do inglês *Color Filter Array*), de modo que cada ponto no sensor capta apenas uma das faixas de comprimentos de onda, correspondente ao vermelho, verde ou azul. A informação de cor completa de cada pixel, vista na imagem final, resulta de uma estimativa obtida através da interpolação de pixels vizinhos. A aquisição separada destes componentes, por meio da fotografia multiespectral, permite medir a intensidade de cor para cada pixel que forma a imagem, resultando em uma documentação e representação mais precisa da superfície fotografada.

Estas estratégias de documentação são muito utilizadas na conservação de pinturas e objetos policromos. Em Cosentino (2014), estratégias de fotografia multiespectral são empregadas para identificar diferentes pigmentos, utilizados para dar retoques à pintura original. E em Cosentino et al. (2015) a fotografia multiespectral

é usada para documentar e analisar o antes e depois de um procedimento de conservação.

**Figura 2 – Documentação multispectral**



(a) Luz visível; (b) fluorescência ultravioleta; (c) refletância ultravioleta; (d) infravermelho digital; (e) infravermelho falsa-cor; (f) fluorescência infravermelho; e (g) refletografia infravermelho. Fonte: Adaptado de Cosentino (2014).

Outras técnicas combinam múltiplas aquisições fotográficas para gerar uma representação visual de atributos realçados. A fotografia de alta faixa dinâmica, HDRi (do inglês, *High Dynamic Range Imaging*), por exemplo, combina imagens capturadas em diferentes exposições. A técnica permite gerar representações nas quais detalhes que, normalmente, se perderiam em áreas de sombra ou brilho intenso são preservados (REINHARD, 2010).

Já a fotografia de alta resolução (*High Resolution Imaging*), é um método que consiste em realizar múltiplas aquisições enquadrando apenas pequenos recortes do objeto. Após varrer toda a extensão do objeto, as imagens são processadas e fundidas, formando uma representação com resolução combinada de todas as aquisições. A imagem gerada pode chegar a resoluções na casa dos *gigapixels* (BERTANI; CONSOLANDI, 2006; KOPF et al., 2007). Como efeito, a representação resultante pode ser ampliada por diversas vezes, permitindo a análise minuciosa da superfície. No contexto do patrimônio cultural, esta técnica vem sendo empregada na



digitalização de quadros e artefatos para o acervo digital do Google Cultural Institute (KASTRENAKES, 2016).

### 2.1.2 Vídeo Digital

Da mesma forma que a fotografia digital, o vídeo digital também se tornou um recurso acessível e fácil de ser utilizado. Muitas das câmeras digitais utilizadas para aquisição de imagens fotográficas, hoje em dia, também permitem capturar vídeo. O vídeo, assim como a fotografia, pode ser explorado para documentar objetos do patrimônio cultural, com a possibilidade de registrar informações adicionais em áudio. Algumas das técnicas empregadas na fotografia, como a aquisição infravermelho/ultravioleta e a captura de alta faixa dinâmica também se aplicam ao vídeo. Além disso, a sequencialidade do vídeo permite, ainda, documentar fenômenos temporais, como a aparência de superfícies que variam temporalmente (HAINDL; FILIP, 2013). Combinando-se uma câmera de vídeo e uma plataforma giratória, pode-se, facilmente, capturar a aparência de um artefato de diferentes ângulos, e, até mesmo, em diferentes condições de iluminação.

### 2.1.3 Sequências 360° Interativas

Sequências 360° interativas são similares ao vídeo na possibilidade de documentar e visualizar diferentes vistas de um objeto tridimensional. No entanto, enquanto vídeos, geralmente, reproduzem sequências de imagens em ordem e tempo predeterminados, sequências 360° podem ser interativas, dando ao usuário a oportunidade de explorar o conteúdo com maior liberdade.

Este tipo de visualização se popularizou na década de 90 com a ferramenta *QuickTime VR*, desenvolvida pela *Apple Inc.* A tecnologia permite simular ambientes (panoramas 360°) e objetos virtuais, a partir de imagens bidimensionais (ZARA, 2004). Atualmente, existem diversas ferramentas para gerar este tipo de representação, mas também é possível implementá-la usando linguagens de programação como *Flash* ou *JavaScript*. Sequências 360° interativas, frequentemente, são aplicadas para a exposição de modelos de veículos em sites de montadoras, e comércio online em geral. Na Figura 3 pode ser visto um exemplo implementado em *JavaScript* que oferece diferentes recursos para manipular a visualização. Outro exemplo de implementação mais simples, encontrado no acervo online do *MARIST*

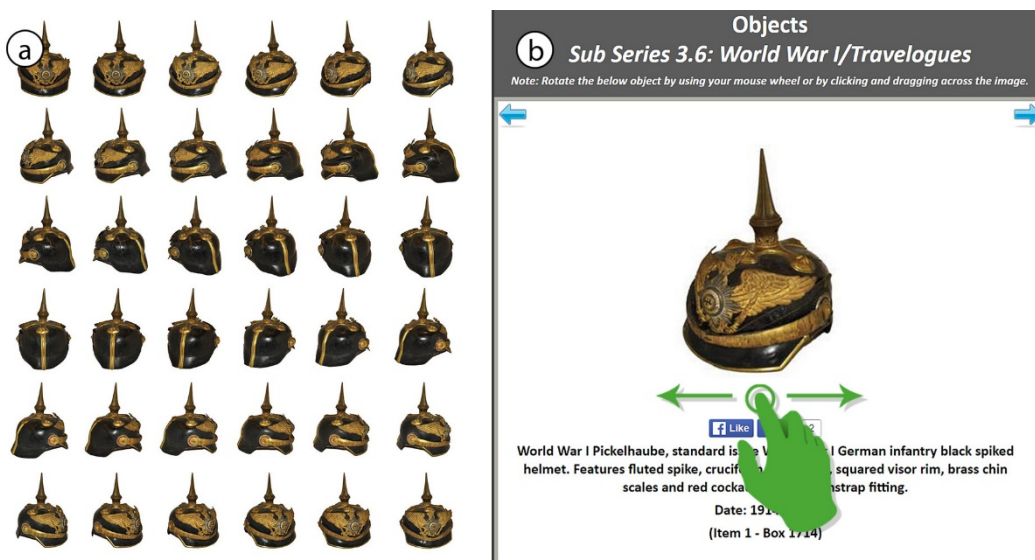
College (2010), mostra o uso de sequências 360° interativas para a difusão do patrimônio cultural (Figura 4).

**Figura 3 – Interface para visualização de sequência de 360°**



Os recursos da interface permitem alternar entre vistas (a)(b), e explorar o objeto minuciosamente na imagem ampliada (c). Fonte: Adaptado de Ajax Zoom (2017).

**Figura 4 – Implementação de sequência de 360° interativa**



(a) Sequência de imagens capturadas, e (b) visualizador online. Clicando e arrastando sobre a imagem é possível girar o artefato. Fonte: Adaptado de Marist College (2010).

A sequência interativa de 360° é criada a partir de imagens capturadas individualmente; cada uma representando uma vista do objeto. Com a câmera em posição fixa e o objeto posicionado sobre uma plataforma giratória, são capturadas imagens a cada incremento de rotação. Quanto menor o incremento de rotação, maior o número de imagens; e, conseqüentemente, mais fluido será o efeito de rotação do objeto. A impressão de se manipular um objeto tridimensional é gerada através da sincronização do movimento de arrastar do usuário com a exibição das vistas fotografadas. A representação do objeto, no entanto, é limitada ao número de vistas registradas no momento de aquisição; isto é, não é possível ao usuário explorar novos

pontos de vista. Da mesma forma, a aparência do objeto é restrita às condições de iluminação do registro fotográfico.

#### **2.1.4 Aquisição de Imagens de Transformação de Refletância (RTI)**

A Aquisição de Imagens de Transformação de Refletância, RTI (do inglês, *Reflectance Transformation Imaging*), também conhecida por Mapeamento de Textura Polinomial, PTM (do inglês, *Polynomial Texture Mapping*), é outra técnica que sintetiza múltiplas aquisições fotográficas em uma única representação digital. Neste caso, no entanto, ao invés de se capturar diferentes vistas, o objeto é fotografado sob diferentes condições de iluminação. O método permite adquirir tanto a forma, isto é, as normais da superfície, quanto a sua aparência. Usando *softwares* de visualização específicos é possível 'reiluminar' a representação da superfície de qualquer direção, realçando e transformando a visualização de atributos de cor e forma. Este aprimoramento da visibilidade de aspectos da superfície pode revelar informações que passariam despercebidas mesmo em uma manipulação direta do artefato, efetuada com atenção (MUDGE et al., 1981; SCHROER, 2012). Ademais, a RTI possibilita a documentação digital de artefatos e objetos de uma maneira muito mais completa que métodos fotográficos convencionais.

Originalmente, a RTI foi inventada por Tom Malzbender, nos laboratórios da *Hewlett Packard*. Em Malzbender et al. (2001), são descritas as primeiras ferramentas e métodos pertencentes às tecnologias de RTI. Desde então, esta vem sendo desenvolvida atendendo rigorosamente aos requisitos da documentação digital (SCHROER, 2012), e vem sendo adotada no contexto de museus e bibliotecas, principalmente, para a conservação e pesquisa (BUENO et al., 2015; EARL et al., 2011; EARL; MARTINEZ; MALZBENDER, 2010); encontrando, também, aplicação em outros campos de pesquisa (HAMMER et al., 2002; MUDGE et al., 1981; NEWMAN, 2015; PORTER et al., 2016). A tecnologia é fácil de ser aprendida, pode ser realizada com equipamento de baixo custo, facilmente encontrados, e os *softwares* necessários são livres. Além disso, é flexível, podendo ser adaptada tanto para aquisição de objetos pequenos, quanto para a documentação de objetos grandes, como mostrado em Dellepiane et al. (2006).

Representações por RTI são criadas a partir de informações derivadas de múltiplas imagens fotográficas do objeto ou superfície, obtidas a partir de uma câmera

mantida em posição fixa. Em cada imagem a luz é projetada de uma direção diferente, formando uma amostragem predefinida de direções conhecidas. A aquisição de imagens pode ser realizada posicionando a fonte de luz manualmente, ou então, com auxílio de estruturas de aquisição com múltiplas fontes de luz e/ou mecanismos de rotação (Figura 5).

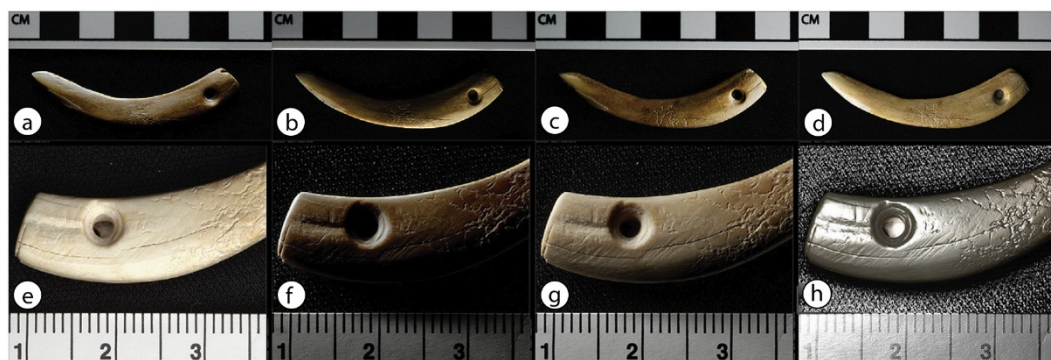
**Figura 5 – Aquisição de imagens de transformação de refletância (RTI)**



Posicionamento manual da fonte luminosa (a) e sistema de aquisição automatizado (b).  
Fonte: Adaptado de Cultural Heritage Imaging (2007).

Como resultado obtém-se uma série de imagens da mesma superfície com refletância e sombras variáveis. A informação extraída da iluminação destas imagens é, então, sintetizada, gerando assim um modelo matemático da superfície que pode ser dinamicamente reiluminado. *Softwares* de visualização baseada em RTI permitem, ainda, aplicar diversos filtros gráficos que realçam detalhes na imagem, como mostra a Figura 6.

**Figura 6 – Análise baseada em RTI**



Visualização em formato RTI com (a) iluminação de topo, (b) de baixo, (c) da direita e (d) da esquerda. Detalhes da extremidade perfurada revelam (e) um segundo furo feito do lado oposto, (f) marcas de uma ferramenta de corte e (g) leves ranhuras indicativas de um polimento, (h) ainda mais evidentes com o realçamento especular.

Fonte: (NEWMAN, 2015).

De forma semelhante à documentação fotográfica convencional, cada imagem obtida por RTI representa o objeto bidimensionalmente, exibindo-o de uma única perspectiva. A aparência do objeto representado, no entanto, pode ser transformada mudando as condições de iluminação. A aparência resultante é derivada de informações tridimensionais (normais) incorporadas em cada pixel da imagem.

### 2.1.5 Digitalização 3D

Digitalização ou escaneamento 3D, é o nome dado a um conjunto de técnicas com as quais é possível adquirir dados geométricos da superfície de um objeto físico, de forma a reproduzi-la virtualmente em *software*. Em geral, os dados obtidos nestas aquisições são nuvens de pontos; milhares, ou mesmo milhões, de coordenadas cartesianas correspondentes a pontos contidos na superfície do objeto.

A partir destas nuvens de pontos, devidamente alinhadas e processadas, é possível realizar uma operação de triangulação; processo no qual os pontos são ligados entre si, reconstruindo assim a superfície do objeto em forma de malha poligonal. O modelo virtual gerado desta maneira, idealmente, terá a mesma forma tridimensional que o objeto original. O modelo virtual pode, então, ser usado para a realização de medições, análises de superfície, inspeção visual, ou mesmo como referência para diversos processos de fabricação (SILVA, 2011).

As inovações no desenvolvimento de escâneres 3D, e o aumento da capacidade de processamento de computadores atuais, vem popularizando a digitalização 3D, levando à sua aplicação nos mais diversos campos. A sua aplicação no campo da documentação do patrimônio cultural é uma área de crescente interesse e investigação. Pavlidis et al. (2007) apresentam um revisão das técnicas mais apropriadas para esta finalidade. Destacam-se tecnologias que dispensam o contato com o objeto físico, baseadas no princípio de triangulação ativa (laser ou luz estruturada), tempo de voo e defasagem de sinal. Atualmente encontra-se uma grande variedade de dispositivos e sistemas de digitalização 3D comerciais, cujo preço pode chegar a algumas dezenas de milhares de dólares (Figura 7).

Pavlidis et al. (2007) destacam ainda métodos de reconstrução 3D baseados em imagem, como Fotogrametria, estéreo fotométrico (*photometric stereo*) e modelagem a partir de silhuetas (*shape-from-silhouette*). Estes trazem como vantagem a possibilidade de se utilizar dispositivos fotográficos convencionais, em

muitos casos já disponíveis em instituições de pesquisa e preservação. Sistemas de digitalização 3D customizados podem usar o mesmo equipamento em diferentes configurações, expandindo ou adaptando-se de acordo com as dimensões e propriedades dos objetos a serem digitalizados (Figura 8). Como efeito, isso pode representar um custo reduzido de implementação.

**Figura 7 – Sistemas comerciais de digitalização 3D**



Sistemas comerciais de digitalização 3D: a) *DAVID 3D SLS- 3 Stereo Camera* (aprox. US\$ 7,500.00); b) *Artec EVA* (aprox. US\$ 20,000.00); c) *Faro Focus 3D X 130* (aprox. US\$ 45,000.00); d) *Faro Freestyle 3D* (aprox. US\$ 12,000.00); e) *Konica Minolta Vivid 9i* (aprox. US\$ 55,000.00). Fonte: Adaptado de (a) Hewlett-Packard (2016), (b) Artec3D (2018), (c)(d) FARO Brasil (2018), e (e) CVASt (2018).

Segundo Gomes et al. (2014), as principais motivações para a aplicação da digitalização 3D são: assegurar que informações de forma e aparência não sejam perdidas em caso de dano; ampliar o acesso a acervos digitais por meio de museus virtuais; produzir réplicas físicas; identificar falsificações; e viabilizar análises e medições difíceis de serem realizadas no objeto real.

Em Levoy et al. (2000), – um dos trabalhos pioneiros –, por exemplo, é apresentada a digitalização de dez grandes esculturas de mármore de Michelangelo. Os autores utilizaram escâneres baseados em triangulação ativa e câmeras fotográficas, para adquirir a geometria das esculturas, com resolução de até 0,25mm, e a textura visual do mármore. Já em Arbace et al. (2013), os autores documentam



tridimensionalmente os fragmentos de uma estátua de terracota quebrada. Os modelos virtuais são usados para ensaiar estratégias de restauração, avaliando o melhor encaixe sem apresentar perigo adicional aos originais. Karasik e Smilansky (2008) empregam a digitalização 3D como ferramenta para análise arqueológica de fragmentos de potes de cerâmica. Em Grün et al. (2004), técnicas de reconstrução baseadas em imagens são empregadas para gerar modelos tridimensionais de monumentos destruídos pela ação do homem.

**Figura 8 – Sistemas de aquisição fotogramétrica customizados**



(a) Sistema com uma única câmera, (b) sistema multicâmera para aquisição de face, e (c) sistema multicâmera para aquisição de corpo inteiro. Fonte: Adaptado de (a) Sketchfab (2017a), (b) Pixel Light Effects (2015), e (c) Infinite-Realities (2018).

É importante observar que a digitalização 3D, a priori, resulta em grandes volumes de dados brutos, muitas vezes difíceis de manejar ou, até mesmo, visualizar. As superfícies digitalizadas são representadas por conjuntos densos de nuvens de pontos ou malhas poligonais. Quanto maior a resolução desejada, maior será o montante de dados a ser processado, e, conseqüentemente, a demanda por equipamento compatível com grandes processamentos. O armazenamento destes dados brutos mostra-se interessante para análises métricas da superfície e para

fabricação de réplicas físicas. No entanto, para que estes dados possam ser facilmente acessados, e visualizados dinamicamente, faz-se necessária a otimização do modelo 3D virtual.

### 2.1.6 Visualização 3D Interativa

Acompanhando os avanços na computação gráfica e a capacidade de processamento de dispositivos móveis e computadores, a presença online de conteúdo 3D está cada vez maior. Diferente de ferramentas populares surgidas na década de 90, como *Quicktime VR* e o *VRML (Virtual Reality Modeling Language)*, uma das primeiras abordagens para conteúdo 3D online (ZARA, 2004), as tecnologias atuais permitem visualizar conteúdo 3D interativo sem a necessidade de instalações adicionais. Outra tendência é uso de *engines* de jogos<sup>1</sup> para criação de aplicações de visualização interativa com fins informativos ou educativos.

Entre as principais tecnologias para visualização em navegador estão o *WebGL* e o *X3D*. Ambas são de código aberto e podem ser livremente modificadas e adaptadas para as mais diversas aplicações. O *3DHOP (3D Heritage Online Presenter)*, por exemplo, é um visualizador baseado em *WebGL* especialmente voltado para a exibição de patrimônio cultural. Outro exemplo pode ser encontrado no repositório 3D do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da UFRGS, cuja implementação é descrita em Muniz (2015). Outro visualizador, rico em recursos, pode ser encontrado no repositório 3D do *Smithsonian Institute*, chamado *Smithsonian X 3D*. Esta é uma implementação da tecnologia *X3D*, que possui ferramentas de análise e visualização que remetem à visualização de imagens RTI (Figura 9).

Há, ainda, um crescente número de plataformas de hospedagem de conteúdo 3D, como *P3D.in*, *Cl3ver* e *Sketchfab*, que apesar da ausência de certos recursos específicos, facilitam a disponibilização e difusão do patrimônio cultural online. Somente o *Sketchfab*, uma das plataformas mais conhecidas, conta atualmente com mais de 500 instituições dedicadas à preservação do patrimônio cultural em sua comunidade online (SKETCHFAB, 2017b).

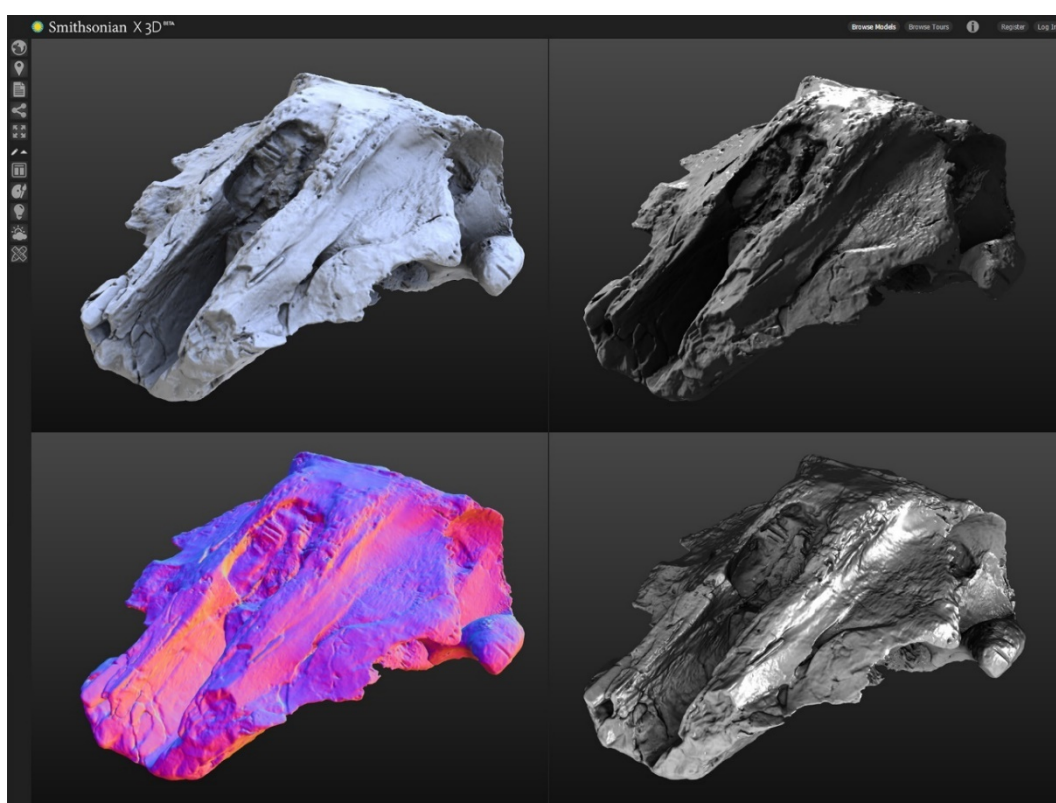
---

<sup>1</sup> *Engines* de jogos, do inglês *game engine*, são programas de computador ou conjuntos de bibliotecas de programação utilizadas para o desenvolvimento de jogos eletrônicos outras aplicações com gráficos em tempo real.



A visualização 3D interativa permite ao usuário explorar o modelo virtual sob combinações arbitrárias de pontos de vista e condições de iluminação; dando-lhe maior liberdade para interagir com o patrimônio cultural. O mesmo não seria possível com o objeto original sem comprometer seu estado de conservação. Observa-se ainda, que a documentação 3D não dispensa ou exclui outras formas de registros documentais. A visualização 3D interativa pode ser facilmente incorporada em páginas ou aplicativos já existentes. Poder-se-ia, por exemplo, incorporar modelos virtuais em fichas de catalogação preexistentes, mantendo os demais dados documentais.

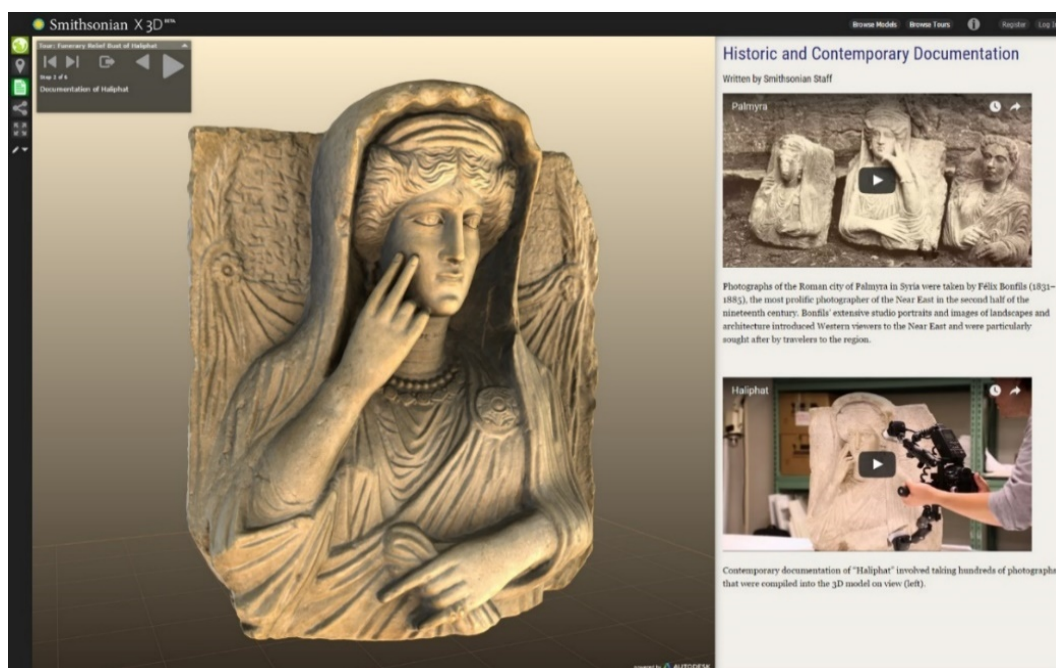
**Figura 9 – Visualização de modelo 3D interativo online**



A plataforma *Smithsonian X 3D* dispõe de recursos para manipular dinamicamente a visualização do objeto que remetem às ferramentas de visualização de imagens RTI. Fonte: Adaptado de Smithsonian Institute (2017).

Outra abordagem possível, bastante interessante para fins educativos, é incorporar dados complementares na visualização interativa. Deste modo é possível contextualizar o objeto, construindo narrativas e guiando o olhar do usuário para determinados aspectos da peça. A Figura 10 mostra uma experiência de visualização 3D guiada, encontrada no repositório *Smithsonian X 3D*. Além do modelo 3D, o usuário tem acesso à vídeos, imagens e textos, que ajudam a compreender o significado e a história do objeto documentado.

**Figura 10 – Smithsonian X 3D: visualização contextualizada**



*Smithsonian X 3D*: Além da documentação tridimensional do artefato, a plataforma permite ainda incorporar dados complementares, como descrição textual, fotografias e vídeos.  
 Fonte: (SMITHSONIAN INSTITUTE, 2017).

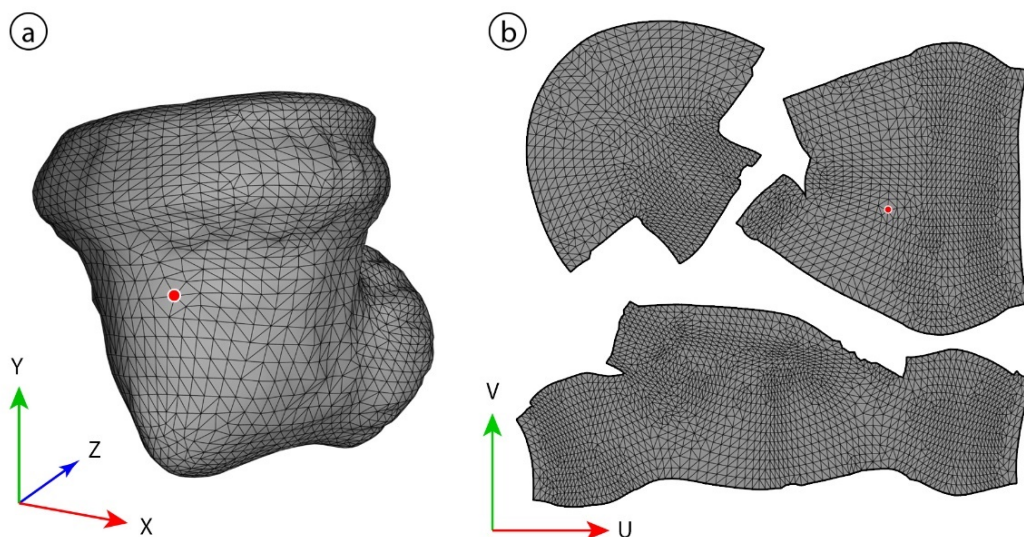
### 2.1.6.1 Otimização para visualização 3D interativa

Para possibilitar a visualização 3D interativa de modelos digitalizados faz-se necessário uma otimização, através da qual o modelo geométrico obtido é simplificado. Cria-se um segundo modelo, no qual detalhes pequenos de superfície são descartados, mantendo-se apenas a geometria da forma geral. Em seguida, é realizado o mapeamento UV do modelo otimizado, processo através do qual sua malha tridimensional é planificada no espaço UV para a aplicação ou criação de mapas de textura. Assim, cada ponto em sua superfície, além das coordenadas XYZ no espaço tridimensional, passa a possuir coordenadas UV, que descrevem sua posição em um plano bidimensional (Figura 11).

Para restituir a aparência do modelo, os detalhes do modelo bruto, em alta resolução, podem ser projetados sobre a superfície do modelo otimizado, gerando diferentes tipos de mapas com informações da geometria original. O método é semelhante ao empregado na texturização para a indústria de jogos digitais 3D. Cada modelo otimizado, portanto, possui uma malha geométrica simplificada descrevendo sua forma geral, e um conjunto de mapas de textura bidimensionais que complementam a representação de sua aparência. O exemplo da Figura 12 mostra

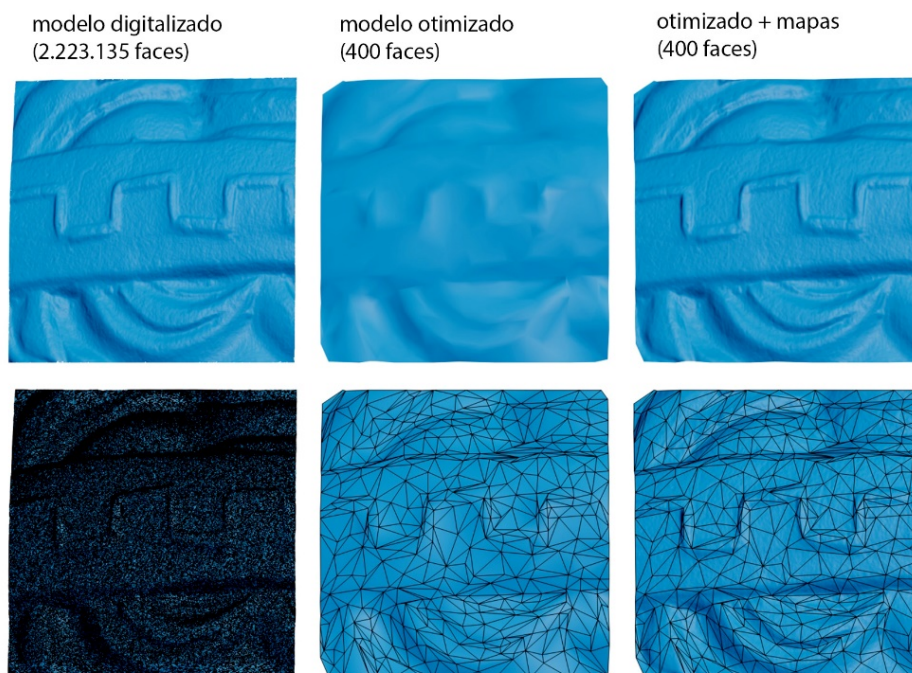
uma superfície digitalizada em alta resolução, com mais de 2 milhões de faces, que em sua forma otimizada é representada com apenas 400 faces. A informação geométrica descartada na otimização foi visualmente restituída por mapas de textura derivados da geometria do modelo digitalizado.

**Figura 11 – Mapeamento no espaço UV**



(a) Ponto da superfície no espaço XYZ, e (b) mesmo ponto no espaço UV.

**Figura 12 – Otimização da superfície digitalizada para visualização interativa**



A informação geométrica 3D descartada é restituída visualmente por mapas de textura 2D, reconstruindo assim a aparência inicial da superfície.

Modelos otimizados para visualização interativa chegam a ocupar em disco uma fração mínima do tamanho dos modelos que os originaram. Em alguns casos a redução pode chegar a mais de 99%, reduzindo modelos de quase 1 GB a pouco mais de 5 MB (MUNIZ, 2015), tamanho aproximado de um arquivo de música. Modelos processados desta maneira podem ser facilmente difundidos pela internet.

### 2.1.7 Comparativo das técnicas de documentação digital

Além da evidente vantagem de adquirir dados que descrevem a forma tridimensional do objeto, a documentação e representação digital em 3D combina diversas características dos outros métodos; mostrando-se, assim, como uma das alternativas mais completas. O Quadro 1 traz uma comparação das características dos métodos de documentação digital abordados aqui. Foram considerados os seguintes critérios: a natureza da documentação, 2D ou 3D; a capacidade de representar múltiplas perspectivas; a capacidade de representar diferentes condições de iluminação; a presença de recursos interativos; a existência de ferramentas para realçamento dinâmico da visualização; e se a representação corresponde à aparência completa do objeto.

**Quadro 1 – Comparativo entre métodos de documentação digital**

Método	2D/3D	Persp. variável?	Ilumin. variável?	Interativo?	Realçamento dinâmico?	Aparência completa?
Fotografia Digital	2D	Não	Não	Não	Não	Sim
Video Digital	2D	Sim*	Sim*	Não	Não	Sim
Sequências 360°	2D	Sim*	Não	Sim	Não	Sim
RTI	2D	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
<b>Digitalização 3D</b>	<b>3D</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim**</b>	<b>Não</b>
<b>Aquisição de Aparência</b>	<b>3D</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim**</b>	<b>Sim</b>

\*variável, mas não arbitrária. \*\* possível de ser implementado.

Observa-se que a representação por digitalização 3D não atende ao quesito de aparência completa. Na documentação fotográfica, por exemplo, a imagem resultante dá conta de representar todos os efeitos visuais correspondentes às condições de



perspectiva e luz do instante de aquisição. Cada fotografia documenta a aparência completa para as condições em que foi tirada. O mesmo pode ser dito sobre o vídeo e os demais métodos baseados em fotografia. Já a digitalização 3D, *a priori*, tem como função principal a aquisição geométrica. Embora alguns sistemas possibilitem também capturar a textura visual, esta é uma função secundária, realizada, em geral, com menor rigor. A representação gerada com as imagens capturadas, não dá conta de representar a aparência completa das infinitas condições de perspectiva e iluminação em que o modelo pode ser visualizado.

Por estas razões, faz-se neste trabalho a distinção entre digitalização 3D e a aquisição de aparência, que compreende o esforço conjunto de aquisição geométrica e aquisição de refletância (DORSEY; RUSHMEIER; SILLION, 2007; HAINDL; FILIP, 2013; SCHWARTZ et al., 2011; WEINMANN; KLEIN, 2015). A aquisição de refletância tem como objetivo determinar o comportamento da luz ao interagir com a superfície digitalizada. Esta informação permite representar de forma mais precisa a aparência do objeto sob perspectivas e condições de luz arbitrárias.

## **2.2 Aparência Material (Textura Visual)**

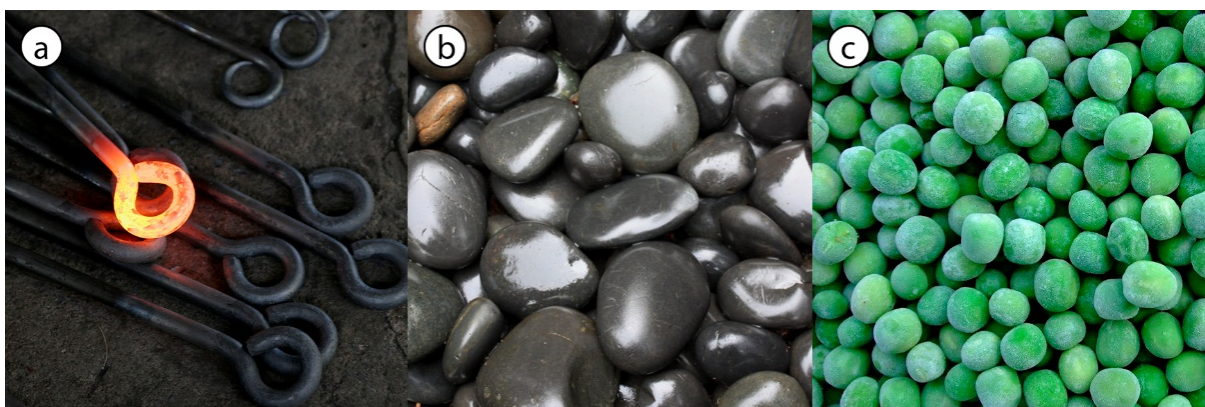
Os diversos sentidos do sistema perceptivo humano – visão, audição, paladar, olfato, toque e equilíbrio, entre outros – nos abastecem de ricas informações a respeito do ambiente em que vivemos. A informação recebida através destes sentidos, aliada à experiência adquirida, permite inferir alguns aspectos da vida cotidiana, como, por exemplo, de que forma devemos interagir com o mundo físico que nos cerca. A visão é, para nós, o sentido dominante, e, provavelmente, o mais importante para estas interações (WADE; SWANSTON, 2001; WEINMANN; KLEIN, 2015). Ela nos permite perceber o mundo de forma remota, isto é, sem que haja necessidade de estabelecer contato físico ou aproximação. Em comparação, os demais sentidos possuem um alcance reduzido, resultando, portanto, em uma percepção limitada à distância (WEINMANN; KLEIN, 2015).

Uma das funções-chaves do sistema visual é extrair informações da aparência de objetos e seres que permeiam o mundo físico, de forma que se possa construir um significado daquilo que se enxerga, e tomar atitudes apropriadas. Humanos, entre outros animais, aprendem desde cedo a identificar objetos vitais para seu sustento,

os quais prontamente buscamos alcançar; e, também, a detectar ameaças, para as quais o afastamento, às vezes, pode ser a única forma de garantir a sobrevivência.

Para objetos inertes, esta informação é extraída, quase exclusivamente, da aparência material, ou textura visual, de sua superfície. A textura visual é de suma importância para o reconhecimento de objetos e a determinação de suas propriedades (HAINDL; FILIP, 2013). Superfícies são a interface primária com estes objetos, e, portanto, são essenciais para compreender as possibilidades de interação e manipulação que comportam (WARE, 2013). Por meio da percepção visual, apenas, é possível deduzir aspectos que dizem respeito às propriedades físicas e funcionais, como deformabilidade, fragilidade, densidade, peso, valor, condutividade térmica ou elétrica, entre outras. Além disso, a percepção visual não só pode proporcionar impressões visuais da aparência característica do objeto, como também pode evocar sensações materiais do domínio dos demais sentidos (WEINMANN; KLEIN, 2015). Para isso, são resgatadas experiências sensoriais obtidas ao interagir com materiais de aparência semelhante. Na Figura 13, por exemplo, pode-se fazer algumas deduções, convencionalmente, percebidas através do contato direto com a pele.

**Figura 13 – Inferência de propriedades materiais através da percepção visual**



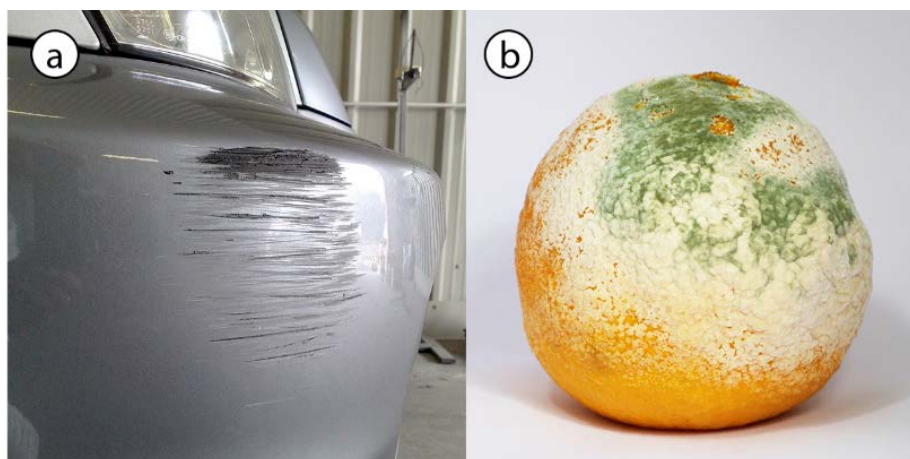
Propriedades física: (a) a aparência incandescente pode sugerir calor; (b) a aparência brilhosa pode sugerir umidade; (c) a aparência congelada pode sugerir frio e dureza.

Fonte: Adaptado de (a) Wikipedia (2017), (b) Mejia (2013), e (c) Addy (2012).

O sistema visual humano é capaz de reconhecer objetos e materiais em diferentes estados, e sob condições de luz e observação variáveis. É possível identificar mudanças na aparência de objetos ou materiais familiares, e deduzir as causas que os levaram ao estado atual (HAINDL; FILIP, 2013). Também é possível, a partir da inspeção visual, estimar os efeitos da interação com determinado objeto. No primeiro item (a) da Figura 14, por exemplo, a mudança na aparência do para-choque

do carro pode dar indícios de sua causa; possivelmente, uma abrasão em direção horizontal. No segundo item (b), apesar de sua superfície estar recoberta de bolor, continua sendo possível reconhecer que se trata de uma laranja. Neste caso, a identificação da mudança na aparência pode dar indícios das consequências de seu consumo.

**Figura 14 – Inferência de causas e efeitos através da percepção visual**



Pela observação é possível deduzir a causa de determinada aparência e possíveis consequências da interação. Fonte: Adaptado de (a) Expert Car Body Repairs (2013), e (b) Wikipedia (2018).

Retornando ao caso específico da documentação de objetos do patrimônio cultural; variações na aparência da superfície destes objetos podem fornecer indícios de sua história, função e materialidade. A inspeção por manipulação direta do objeto original permite acessar toda esta informação visual contida em sua superfície. Para que uma representação digital possa proporcionar experiências semelhantes, é preciso que a superfície representada forneça os mesmos estímulos visuais que o objeto real em circunstâncias iguais. Em modelos 3D interativos, é preciso que sua superfície simule o comportamento que a luz teria ao incidir sobre a superfície real.

A Figura 15 exibe duas cadeiras Pergolesi (a), e a representação virtual de cadeiras semelhantes (b), obtidas por digitalização 3D. O modelo virtual reproduz a forma geral das cadeiras, mas observa-se que a textura visual dos modelos falha em representar a aparência material da madeira, não transmitindo, portanto, as mesmas impressões que a imagem fotográfica. O resultado visual parece artificial, deixando transparecer a natureza virtual do artefato exibido.

**Figura 15 – Representação incompleta da aparência material**



Fonte: (a) Adaptado de Sotheby's (2008); (b) captura de tela de Smithsonian Institute (2017).

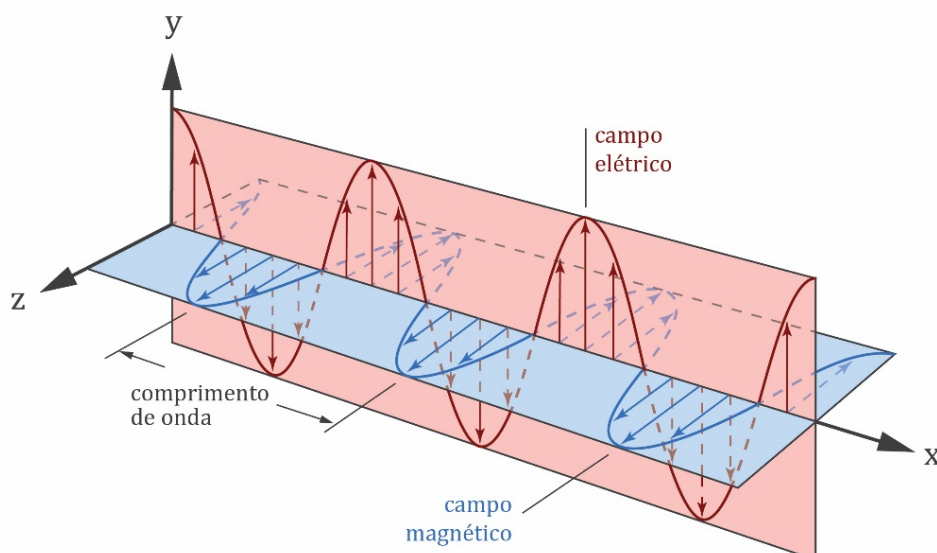
### 2.2.1 Luz visível

A luz visível pode ser descrita como radiação eletromagnética; uma onda composta por campos elétricos e magnéticos, com direções de vibração (y e z) perpendiculares entre si e em relação à direção de sua propagação (x) (Figura 16). Há, ainda, outras formas de radiação eletromagnética, como infravermelho, ondas de rádio, micro-ondas, raios-X, entre outros. Cada uma destas caracteriza-se, principalmente, pelo seu intervalo de comprimento de onda característico (CALLISTER; RETHWISCH, 2010). Essa radiação é ubíqua no mundo físico; as superfícies que o compõem podem emití-la, refleti-la, transmiti-la ou absorvê-la. Devido às características de sua propagação, a luz, frequentemente, também é representada por raios; linhas imaginárias que representam a direção pela qual ela se propaga.

Uma pequena parte desta radiação pode ser percebida por organismos vivos. Outra, menor ainda, é possível de ser detectada pela visão humana. O que é chamado de luz visível distingue-se das demais formas de radiação eletromagnética com base no sistema visual humano. O intervalo perceptível ao olho humano se estende de aproximadamente 380 nm a 720 nm. A luz pode ser monocromática, quando contém radiação de apenas um comprimento de ondas (laser), ou policromática, quando abrange diversos comprimentos de onda. No caso policromático, pode ser caracterizada em função da distribuição de força espectral, que descreve a força de radiação para cada comprimento de onda  $\lambda$  (WEINMANN; KLEIN, 2015).



**Figura 16 – Representação de uma onda eletromagnética**

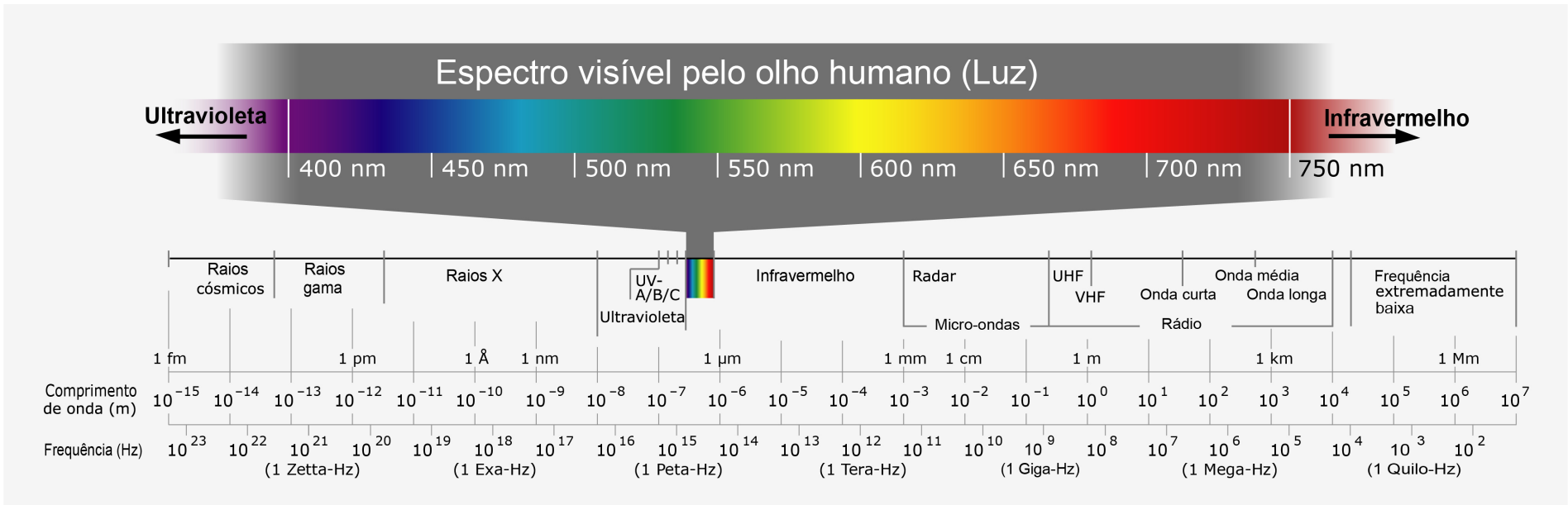


Fonte: Adaptado de (BAUER; WESTFALL, 2011)

O olho humano possui três tipos de células (cones) sensíveis à cor, cada um deles é sensibilizado por um intervalo específico de comprimento de onda, que corresponde respectivamente à cor azul, verde ou vermelho. Para indivíduos de visão regular, os diversos comprimentos de onda que compõem o espectro visível (Figura 17) estimulam um ou mais tipos cones, resultando na percepção de uma ampla gama de cores (WADE; SWANSTON, 2001). A soma de todos os estímulos é percebida como luz branca.

Superfícies que não são fontes de luz refletem ou transmitem apenas uma parte da luz que incide sobre elas. A estrutura molecular do material determina quais comprimentos de onda da luz incidente são absorvidos, e quais são refletidos ou transmitidos. De modo geral, as superfícies dos materiais conhecidos não refletem nem absorvem a luz por completo. Em função desta absorção a superfície aparenta possuir determinada cor. Se a superfície, por exemplo, absorver toda a luz com comprimento de onda abaixo de 650 nm, o resultado será uma aparência avermelhada. Caso todos os comprimentos de onda forem refletidos igualmente, a aparência tenderá ao branco. Ou ainda, se a superfície absorver todos os comprimentos de onda igualmente, sua aparência tenderá ao preto. A cor aparente ainda pode ser influenciada por fatores como a cor de superfícies adjacentes, e a cor da luz incidente (GIBSON, 1978; WADE; SWANSTON, 2001; WEINMANN; KLEIN, 2015).

Figura 17 – Espectro visível ao olho humano (luz)

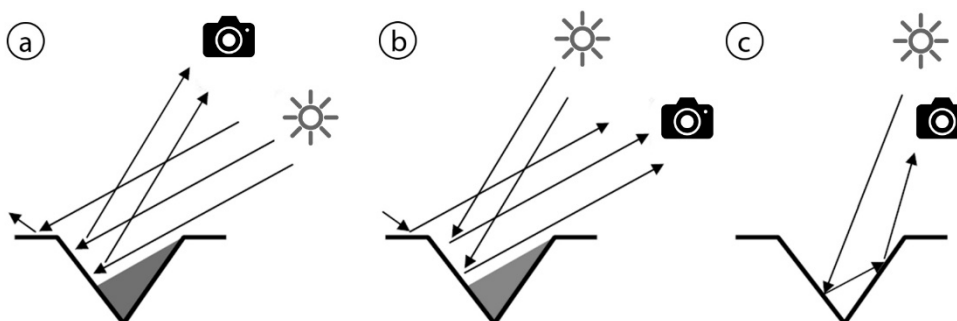


Fonte: (WIKIPEDIA, 2016)

Também é importante observar que a interação da luz com a superfície pode ocorrer em diferentes escalas, cada qual com seus efeitos sobre a aparência. No extremo menor, a escala microscópica, a luz interage com estruturas atômicas e moléculas. Estas interações são responsáveis por aspectos gerais da aparência material, como cor e as propriedades de refletância e transmitância.

Na escala mesoscópica, a luz interage com estruturas grandes o suficiente para serem vistas a olho nu, mas que não determinam a forma geral do objeto, sua silhueta. Estruturas mesoscópicas incluem pequenos veios e ranhuras, porosidades, padrões de tecelagem encontrados em materiais têxteis, e outros tipos de detalhes. A presença destas estruturas pode produzir efeitos como interreflexões, auto oclusões ou auto projeções de sombra (Figura 18), que resultam em grandes mudanças de aparência sob determinadas condições de visualização. A visibilidade destes efeitos, no entanto, depende da distância em que o observador se encontra. Conforme o observador se distancia da superfície observada, detalhes mais acentuados, como veios e porosidades, podem se tornar indistinguíveis. Assim, superfícies com texturas visuais bastante heterogêneas de perto, podem parecer homogêneas de uma posição mais afastada. No extremo maior, a escala macroscópica, a luz interage com estruturas maiores que influenciam diretamente a silhueta e geometria do objeto (AKENINE-MÖLLER; HAINES; HOFFMAN, 2008; SCHWARTZ; KLEIN, 2012; WEINMANN; KLEIN, 2015).

**Figura 18 – Fenômenos da interação da luz com a geometria da superfície.**



Estruturas meso- e microscópicas da superfície podem provocar diferentes fenômenos, como: (a) autossombreamento, (b) oclusão e (c) interreflexão.

Ainda no que diz respeito a suas propriedades, a luz pode apresentar uma direção de vibração preferida, fenômeno conhecido como polarização. A luz que geralmente enxergamos é composta por ondas eletromagnéticas que vibram

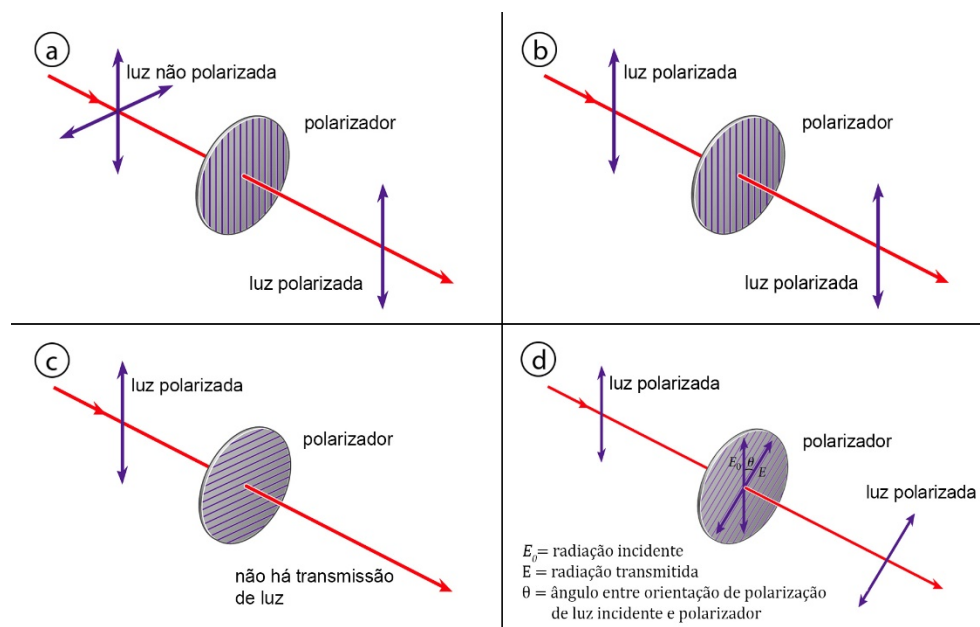
igualmente em todas as direções perpendiculares à direção de sua propagação. Essa luz é chamada de luz natural, ou não polarizada. No entanto, ao refletir de, ou atravessar, determinados materiais, a luz pode ser condicionada a vibrar em apenas uma direção, ao que é chamada de luz polarizada (DORSEY; RUSHMEIER; SILLION, 2007; MÜLLER, 1995).

É possível transformar a luz não polarizada artificialmente em polarizada, passando-a por um filtro polarizador. A polarização pode ser explorada para obter alguns efeitos. Para a luz não polarizada, ao incidir sobre o filtro polarizador, toda a radiação luminosa com direção de vibração perpendicular à orientação do filtro é retida, reduzindo a intensidade da radiação pela metade (Figura 19a). No caso de um feixe de luz polarizada, com mesma orientação do filtro polarizador (polarização paralela), toda a radiação incidente é transmitida (Figura 19b). Se, no entanto, um feixe de luz polarizada, com orientação perpendicular ao filtro (polarização perpendicular ou cruzada), incidir sobre ele, a radiação é retida quase inteiramente, não havendo transmissão de luz (Figura 19c). Para feixes polarizados com direção de vibração oblíqua em relação à orientação do filtro polarizador, a intensidade transmitida dá-se em função da Lei de Malus, que leva em consideração o ângulo formado entre os dois (Figura 19d) (BAUER; WESTFALL, 2011; DORSEY; RUSHMEIER; SILLION, 2007; MÜLLER, 1995).

Quanto à sua intensidade, a luz pode ser quantificada em termos de fluxo radiante, ou intensidade de radiação, que é obtido pelo fluxo de energia radiante por unidade de tempo (TAYLOR, 2000; WEINMANN; KLEIN, 2015). Quanto maior o fluxo radiante que atravessa uma região de dimensão constante, mais luminosa/brilhante será sua aparência. Para superfícies difusas, o fluxo radiante é emitido uniformemente de uma área da superfície para todas as direções. A luminosidade da superfície também pode variar para diferentes ângulos de observação se o material apresentar um comportamento de preferência por determinada direção de reflexão, como é o caso de alguns materiais lustrosos.

A quantidade de luz que incide sobre uma superfície por unidade de área é definida como irradiância, e é medida em função da energia radiante por unidade de área por unidade de tempo. A radiância é definida da mesma forma, mas representa a quantidade de energia radiante que deixa a superfície por unidade de área por unidade de tempo. (NUNES, 2014; WEINMANN; KLEIN, 2015).

Figura 19 – Polarização linear da luz

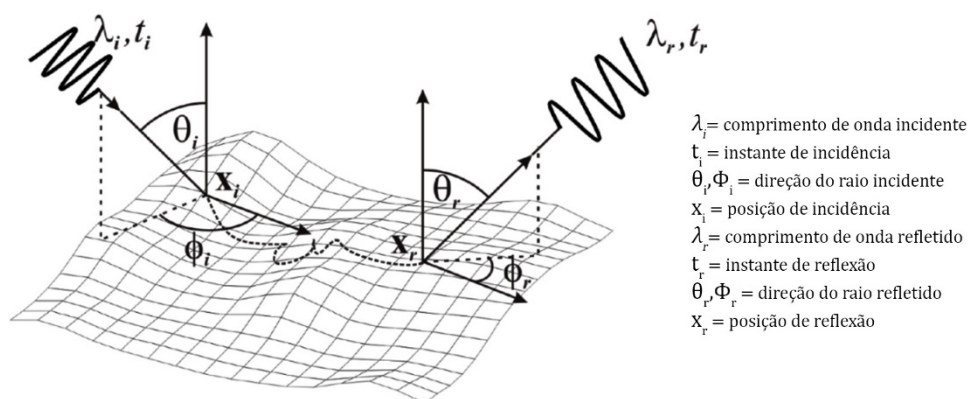


Polarização da luz natural (a); polarização paralela (b); polarização perpendicular (c); e polarização oblíqua (d). Fonte: Adaptado de (BAUER; WESTFALL, 2011).

Toda superfície material reflete uma porção da luz que incide sobre ela. O restante da luz pode ser transportado através do objeto, como no caso de materiais transparentes/translúcidos, ou ser absorvido, sendo convertido em outra forma de energia. Neste sentido, fala-se em **refletância** para denotar a proporção entre o fluxo de luz incidente e o fluxo (radiância) que é refletido. De forma semelhante, transmitância é a proporção da luz que é transportada através do material; e absorbância é a proporção da luz que é absorvida.

Considerando-se um caso genérico de refletância em que um raio incide sobre a superfície no ponto  $x_i$  no instante  $t_i$  e com o comprimento de onda  $\lambda_i$ , este pode penetrar o material, se deslocar através do mesmo, e emergir na posição  $x_r$ , no instante  $t_r$ , com o comprimento de onda possivelmente modificado  $\lambda_r$ . A direção do raio incidente ( $\theta_i, \Phi_i$ ) e a direção do raio refletido ( $\theta_r, \Phi_r$ ) geralmente são representadas usando-se coordenadas locais, dependentes das posições  $x_i$  e  $x_r$ , que são parametrizadas bidimensionalmente sobre a superfície (Figura 20) (MÜLLER et al., 2005; WEINMANN; KLEIN, 2015). A refletância, de acordo com esta generalização, também chamada de Função Geral de Refletância, GRF (do inglês, *General Reflectance Function*), é uma função de 12 parâmetros. Dependendo do material em questão, é possível assumir certas suposições que podem reduzir o número de parâmetros, conforme abordado mais profundamente no item 2.3.1 deste trabalho.

**Figura 20 – Modelo geométrico da refletância luminosa**



Fonte: (MÜLLER et al., 2005)

### 2.2.2 Comportamentos de Refletância

Como já foi reiterado ao longo deste trabalho, a aparência material resulta da interação da luz com a superfície; e esta, por sua vez, é ditada por propriedades intrínsecas de cada material. No mundo físico existe uma grande variedade de materiais, muitos dos quais empregados na confecção de objetos que hoje são do patrimônio cultural. Cada um deles possui seu próprio comportamento de refletância.

Segundo Weinmann e Klein (2015), não há, no atual estado da arte, nenhuma tecnologia de aquisição geométrica capaz de lidar com toda a gama de materiais existentes. A escolha da tecnologia e dos componentes apropriados para a digitalização tridimensional é ditada pela complexidade da aparência do objeto, isto é, a complexidade das interações em sua superfície. Consequentemente, faz-se necessário agrupar e classificar objetos de acordo com este comportamento.

Em Ihrke et al. (2010) encontra-se uma taxonomia de classes de objetos que busca suprir esta demanda. Nela estão listadas diferentes propriedades de materiais, e os comportamentos de refletância correspondentes (Figura 21), tanto para superfícies quanto para volumes (nuvens, vapores, etc.). As classes são numeradas do 1 ao 9, em ordem de complexidade do comportamento da luz; com as cores, do verde ao vermelho, indicando o quanto a aquisição geométrica de cada classe tem sido estudada na literatura. Assim, verde corresponde a “pouco complexo / extensivamente estudado”, e vermelho a ‘muito complexo / pouco estudado’.

**Figura 21 – Taxonomia de materiais para aquisição de aparência**

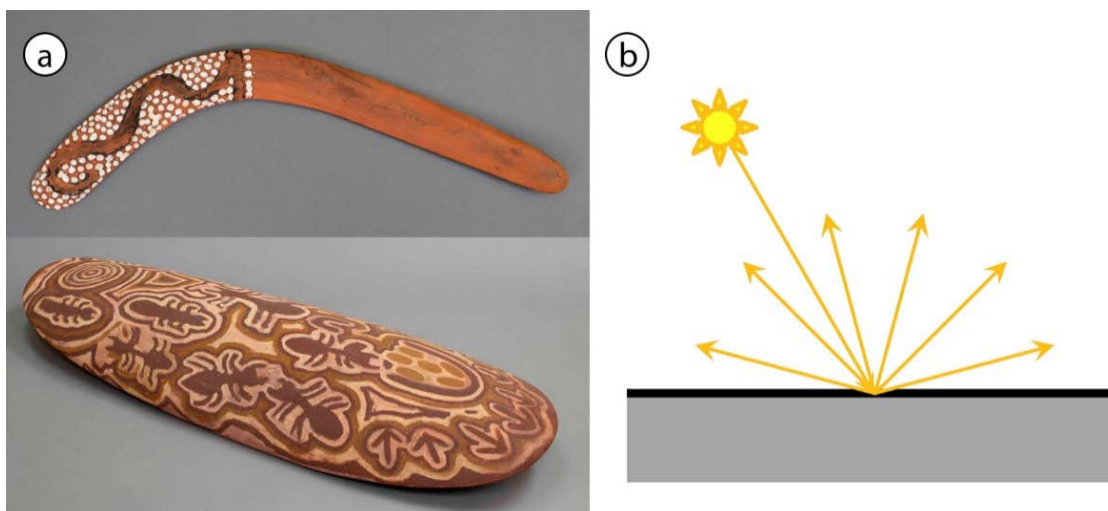
tipo de material	tipo de superfície/ volume	classe	comportamento
opaco	fosca	①	refletância difusa, ou quase difusa ideal
	brilhosa	②	refletância mista, difusa e especular
translúcido	espelhada, metálica	③	refletância especular ideal ou quase ideal
	translúcido	④	dispersão subsuperficial múltipla
transparente	transparente	⑤	refração ideal ou quase ideal
	volume, emissão/absorção	⑥	integrada com a direção de observação
heterogêneo	volume, dispersão simples	⑦	integrada com a direção de observação
	volume, dispersão múltipla	⑧	propagação global completa da luz, sem oclusão
	heterogêneo, contendo alguns, ou todos supracitados	⑨	propagação global completa da luz

Taxonomia de classes de materiais para aquisição de aparência. Fonte: Adaptação de (IHRKE et al., 2010)

A pesquisa que aqui se propõe investiga a aquisição de aparência de objetos das classes 1 e 2: opacos (que não permitem a passagem da luz) de superfície fosca e opacos de superfície brilhosa. Reconhecendo-se a possibilidade de objetos, cujas superfícies se enquadram majoritariamente nas classes 1 e 2, apresentarem uma grande variação de comportamentos, também serão observados aspectos referentes às classes 3 e 4: opacos de superfície polida e translúcidos com difusão de subsuperficial. No entanto, não está no escopo desta pesquisa a aquisição geométrica e de refletância de superfícies cujo comportamento é predominantemente das classes 3 e 4.

Materiais opacos de superfície com aparência fosca (classe 1) apresentam comportamento difuso de refletância, ou reflexão difusa. Ao incidir sobre o material, o raio de luz é refletido igualmente por todo o hemisfério da normal da superfície (Figura 22). Este efeito deve-se ao fato de o raio luminoso sofrer uma refração ao atingir a superfície, dispersando-se na estrutura molecular do material, e sendo refletido arbitrariamente para fora do mesmo em seguida. O deslocamento do raio sob a superfície, no entanto, é ínfimo, podendo ser desconsiderado. A interação com a estrutura molecular resulta na absorção de alguns comprimentos de onda da luz incidente, atribuindo à superfície uma coloração correspondente. Outra característica da reflexão difusa é que, mesmo que a radiação incidente apresente polarização, a luz refletida será não polarizada (DORSEY; RUSHMEIER; SILLION, 2007; HAINDL; FILIP, 2013; WEINMANN; KLEIN, 2015).

**Figura 22 – Comportamento difuso de refletância**



(a) Exemplo de artefato com comportamento difuso de refletância e (b) modelo geométrico correspondente. Fonte: Adaptado de (a) South Australian Museum (2018), e (b) Weinmann & Klein (2015).

A aparência de materiais com comportamento de refletância difusa independe da direção do observador. A superfície pode ser observada com a mesma intensidade de todas as direções, dependendo somente da direção e intensidade da luz incidente. Este comportamento também é conhecido como ‘comportamento lambertiano de refletância’ (IHRKE et al., 2010; MCDERMOTT, 2015a; TAYLOR, 2000; WEINMANN; KLEIN, 2015).

Materiais opacos de aparência brilhosa (classe 2) apresentam comportamento misto de refletância, que além da reflexão difusa é composto por um segundo tipo de reflexão, chamado de reflexão especular (Figura 23). Fala-se, portanto, de componente difuso e componente especular da refletância.

A reflexão especular ocorre diretamente na superfície, isto é, sem que o raio penetre e se disperse na estrutura molecular do material. A luz, ao ser refletida, preserva os comprimentos de ondas da radiação incidente, não apresentando, portanto, coloração diferente. Além disso, se a luz incidente for não polarizada, o componente de reflexão especular é refletido com polarização parcial. Caso a luz incidente seja polarizada, a polarização é preservada no componente de reflexão especular (BAUER; WESTFALL, 2011; HAINDL; FILIP, 2013).



**Figura 23 – Comportamento misto (difuso e especular) de refletância**



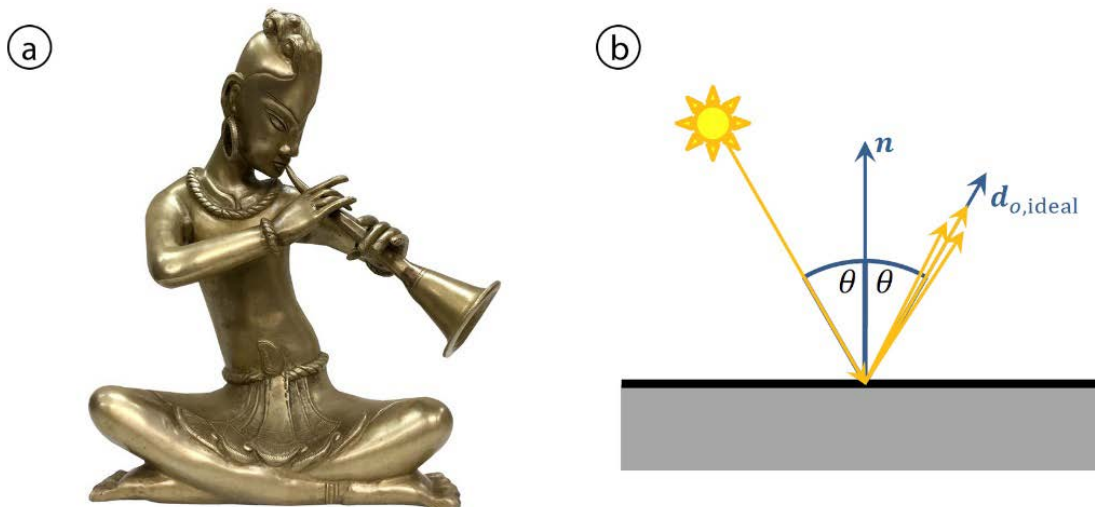
(a) Exemplo de artefato com comportamento misto de refletância e (b) modelo geométrico correspondente. Fonte: Adaptado de (a) The Metropolitan Museum of Art (2018a), e (b) Weinmann & Klein (2015).

O componente de refletância especular concentra-se em torno da direção de reflexão ideal do raio incidente, gerando picos de brilho sobre a coloração ou textura visual difusa da superfície. A concentração e intensidade do brilho especular se dá em função de microfacetetas presentes na superfície. Estas são pequenas irregularidades na superfície, que desviam a luz incidente da direção de reflexão ideal. A posição do brilho especular depende da direção da luz incidente e da direção do observador (IHRKE et al., 2010; TAYLOR, 2000; WEINMANN; KLEIN, 2015). Na prática, isto significa que a aparência do material muda drasticamente com a menor variação nestas direções. Como efeito, o brilho especular realça detalhes de relevo da superfície.

Materiais metálicos, opacos e de aparência espelhada (classe 3), apresentam comportamento de refletância especular ideal. Neste caso não há o componente de refletância difuso, apenas o especular (Figura 24). Como é característico da reflexão especular, a luz incidente é refletida na superfície, sem interagir com a estrutura interna do material. Conseqüentemente, artefatos de materiais com este comportamento de refletância não apresentam aparência própria. O que se percebe como textura visual desses artefatos é, na verdade, o ambiente refletido em sua superfície. Assim, a aparência depende inteiramente da direção do observador e do ambiente em que esse se encontra. Alguns metais, como o ouro, podem, no entanto, absorver parte dos comprimentos de onda da luz incidente, dando assim uma

coloração à reflexão especular (IHRKE et al., 2010; MCDERMOTT, 2015a; TAYLOR, 2000; WEINMANN; KLEIN, 2015).

**Figura 24 – Comportamento especular de refletância**

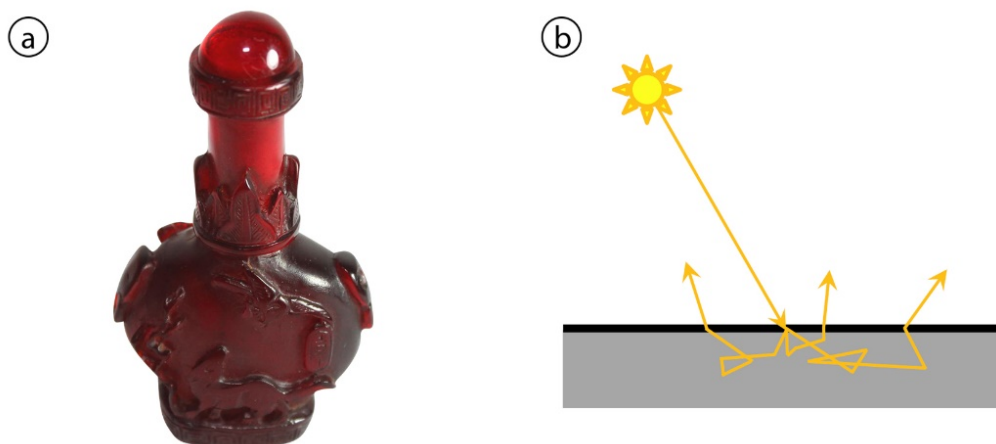


(a) Exemplo de artefato com comportamento especular de refletância e (b) modelo geométrico correspondente (b). Fonte: Adaptado de (a) Snapdeal (2017), e (b) Weinmann & Klein (2015).

Um objeto de material que apresenta comportamento de refletância especular e superfície polida, como uma esfera cromada, por exemplo, teria como aparência o reflexo nítido do ambiente em que se encontra. No entanto, com a presença de micro facetas ou outras irregularidades em sua superfície, os raios incidentes refletiriam de forma arbitrária, impossibilitando a formação de um reflexo nítido em sua superfície. Quanto mais numerosas as irregularidades, mais dispersa a reflexão.

Materiais com algum nível de translucidez (classe 4), da mesma forma que materiais de refletância mista podem apresentar dois componentes de reflexão, o difuso e o especular. A reflexão difusa, no entanto, é mais complexa. Ao incidir sobre a superfície, parte da luz penetra o material e se dispersa internamente, mudando de direção diversas vezes até emergir novamente (Figura 25). Conseqüentemente, uma parcela da luz sai do material em um ponto da superfície diferente do ponto de incidência. Este comportamento é conhecido como difusão subsuperficial (*subsurface scattering*). Neste caso, o deslocamento da luz sob a superfície não pode ser desconsiderado, tendo efeitos significativos sobre a aparência e estratégias de aquisição (IHRKE et al., 2010; MCDERMOTT, 2015a; WEINMANN; KLEIN, 2015).

**Figura 25 – Comportamento de refletância com difusão subsuperficial**



(a) Exemplo de superfície com comportamento de refletância com difusão subsuperficial e (b) modelo geométrico correspondente. Fonte: Adaptado de (a) Ruby Lane, Inc. (2018), e (b) Weinmann & Klein (2015).

### 2.3 Aquisição de Aparência

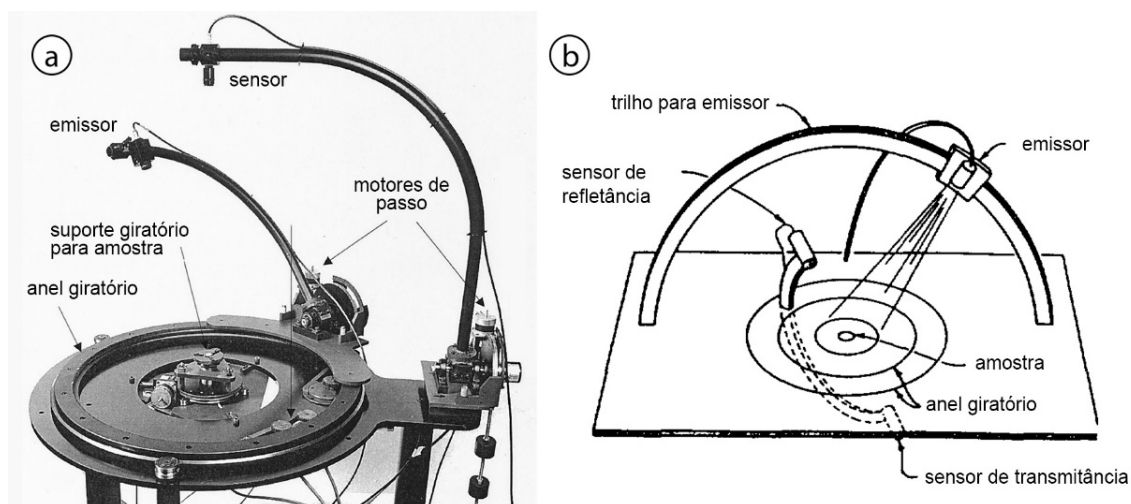
A aquisição e modelagem matemática da aparência de superfícies reais é um assunto amplamente investigado no campo da Computação Gráfica e Visão Computacional. Sua investigação antecede os avanços na computação gráfica das décadas de 1970 e 1980, que viabilizaram a sua representação de forma realística. Ao decorrer das últimas décadas foram desenvolvidas diversas ferramentas para medir a aparência característica, isto é, a refletância, de diferentes tipos de superfícies, assim como modelos matemáticos para sua representação.

Tradicionalmente, a medição de refletância, em forma de Funções Bidirecionais de Distribuição de Refletância, BRDF, é realizada com amostras materiais de forma geométrica conhecida: planas, esféricas ou cilíndricas. A medição consiste em realizar uma amostragem da intensidade e da cor de refletância da superfície, variando as direções da fonte luminosa e do observador. Quanto maior a amostragem, mais precisa será a modelagem da aparência do material. Os instrumentos utilizados para este propósito são conhecidos como gonioreflectômetros (Figura 26) (DORSEY; RUSHMEIER; SILLION, 2007; HAINDL; FILIP, 2013; WEINMANN; KLEIN, 2015).

De forma genérica, um gonioreflectômetro é constituído por um suporte para posicionamento da amostra, uma fonte luminosa, e um sensor para registrar a luz refletida pela superfície. A fonte luminosa e o sensor são mantidos por hastes a uma distância fixa da amostra, enquanto mecanismos de rotação e trilhos permitem girá-

los em torno da amostra. Em geral, ao menos dois destes componentes são móveis. O grau de liberdade e o número de elementos móveis pode variar, de dispositivo para dispositivo, com base nos parâmetros a serem considerados. A movimentação mecânica de partes, no entanto, aumenta o tempo de aquisição significativamente para amostragens densas. Algumas configurações contornam este problema empregando sensor de posição fixa, com suporte para amostra inclinável e fonte de luz móvel. Outras variações empregam ainda arranjos de múltiplos sensores, múltiplas fontes luminosas em posição fixa, ou espelhos, para reduzir assim a movimentação mecânica necessária. Sistemas mais recentes para aquisição de aparência são abordados com maior profundidade no item 2.5 (Estado da Arte).

**Figura 26 – Goniorelectômetros**



Fonte: Adaptado de (a) White et al. (1998), e (b) Ward (1992).

### 2.3.1 Modelos de Refletância

Como visto na seção 2.2.1, a refletância pode ser definida em termos de uma função com base em 12 parâmetros (ou dimensões): a direção do raio incidente ( $\theta_i$ ,  $\Phi_i$ ), a posição ( $x_i$ ,  $y_i$ ) e instante ( $t_i$ ) em que este incide com o comprimento de onda ( $\lambda_i$ ) sobre a superfície, a posição ( $x_r$ ,  $y_r$ ) e instante ( $t_r$ ) em que a luz emerge da superfície com o comprimento de onda ( $\lambda_r$ ), e a direção do raio refletido ( $\theta_r$ ,  $\Phi_r$ ) (MÜLLER et al., 2005; WEINMANN; KLEIN, 2015). Esta é chamada de Função Geral de Refletância (GRF); a representação mais descritiva e fisicamente correta existente. No entanto, devido à sua complexidade, não há casos na literatura que tratem da sua medição, considerando todos os parâmetros envolvidos. Tampouco existem modelos para sua visualização. Porém, existem diversas funções simplificadas, derivadas

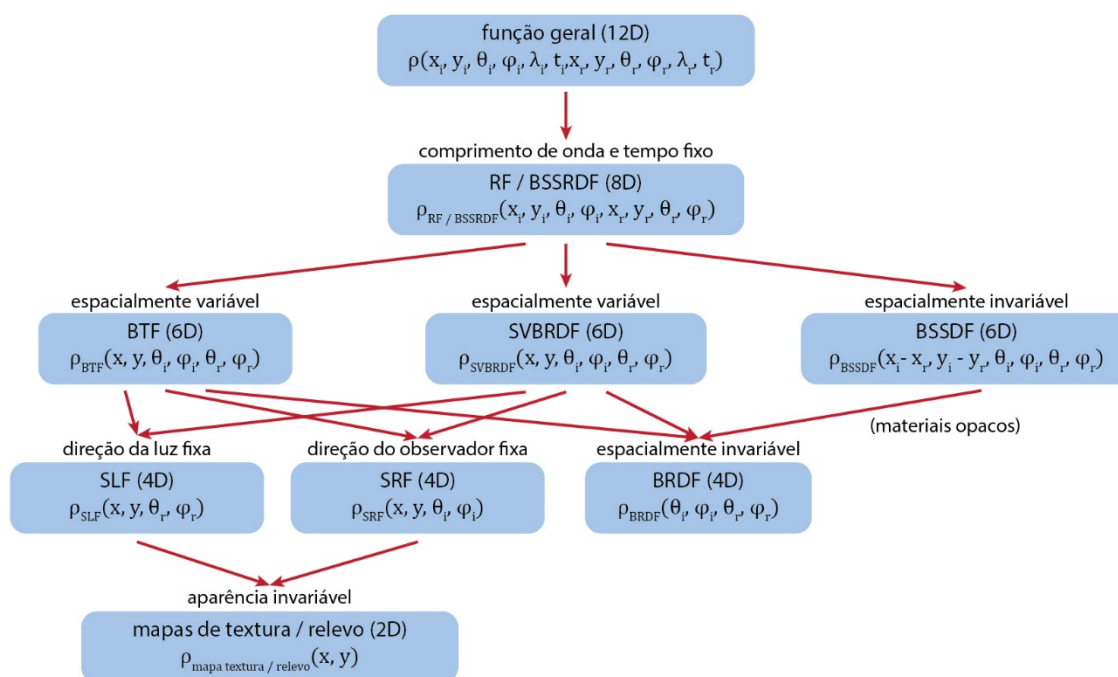
desta Função Geral de Refletância. Cada uma delas enfatiza um determinado comportamento de refletância ou grupo de materiais, buscando medir e representar sua aparência da forma mais simples e crível possível. Para este propósito são assumidas algumas suposições sobre a interação da luz com a superfície, reduzindo assim o número de parâmetros a serem considerados. Algumas destas suposições ditam que:

- o deslocamento da luz não leva tempo ( $t_i = t_r$ ), e que não há variação temporal do comportamento de refletância;
- o comprimento da onda não é alterado ( $\lambda_i = \lambda_r$ );
- não há transmissão da luz através do material;
- a luz é refletida da mesma posição em que incidiu ( $x_i = x_r, y_i = y_r$ );
- não há difusão subsuperficial;
- a direção da luz permanece fixa;
- a direção do observador permanece fixa;
- a refletância é espacialmente invariável.

A Figura 27 apresenta, de forma hierárquica, as funções mais recorrentes na literatura, enquanto o Quadro 2 apresenta a nomenclatura utilizada com suas respectivas traduções.

Segundo Weinmann e Klein (2011), para a aquisição eficiente da aparência é preciso conhecer, não apenas o tipo de comportamento de refletância da superfície, mas também o modelo matemático a ser utilizado para sua representação. Modelar a aparência de uma superfície opaca de comportamento difuso, por exemplo, requer considerar muito menos parâmetros na hora da aquisição do que modelar a aparência de uma superfície translúcida. Escolhendo-se o modelo adequado, é possível reduzir a medição de refletância ao mínimo de parâmetros necessários; podendo diminuir desta maneira o tempo de aquisição e processamento. A aquisição de aparência também depende, portanto, do modelo matemático utilizado para sua representação (WEINMANN; KLEIN, 2015). A seguir é apresentada uma visão geral dos modelos mais recorrentes na literatura.

Figura 27 – Hierarquia de modelos de refletância



Fonte: Adaptado de Weinmann e Klein (2015).

Quadro 2 – Nomenclatura dos modelos de refletância

Modelo	Nome (em inglês)	Tradução livre (português)
GRF	<i>General Reflectance Function</i>	Função Geral de Refletância
RF	<i>Reflectance Field</i>	Campo de Refletância
BSSRDF	<i>Bidirectional Scattering-Surface Reflectance Distribution Function</i>	Função Bidirecional de Distribuição de Refletância de Superfície Difusora
BTF	Bidirectional Texture Function	Função Bidirecional de Textura
SVBRDF	<i>Spatially-varying Bidirectional Reflectance Distribution Function</i>	Função Bidirecional de Distribuição de Refletância Espacialmente Variável
BSSDF	<i>Bidirectional Subsurface Scattering Distribution Function</i>	Função Bidirecional de Distribuição de Difusão Subsuperficial
SLF	<i>Surface Light Field</i>	Campo de Luz da Superfície
SRF	<i>Surface Reflectance Field</i>	Campo de Refletância da Superfície
BRDF	<i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i>	Função Bidirecional de Distribuição de Refletância

O modelo baseado na BSSRDF, proposto por Nicodemus et al. (1977), é o que mais se aproxima da Função Geral de Refletância, e a melhor representação disponível atualmente. A BSSRDF supõe que a interação com a superfície ocorre em um tempo nulo, que o comprimento de onda não se altera, e que não há transmitância. Uma vez que considera os parâmetros referentes à posição em que a luz incide ( $x_i, y_i$ ) e a posição em que emerge ( $x_r, y_r$ ), o modelo é capaz de representar variações ao longo da superfície e comportamentos complexos, como o transporte subsuperficial da luz (DORSEY; RUSHMEIER; SILLION, 2007; HAINDL; FILIP, 2013; WEINMANN; KLEIN, 2015). A sua complexidade, condicionada pelos 8 parâmetros envolvidos, no entanto, tornam a sua medição muito difícil e pouco prática. Conseqüentemente, até o presente, não foram coletados dados satisfatórios baseados neste modelo, tampouco foram desenvolvidos métodos para visualização completa de modelos BSSRDF (HAINDL; FILIP, 2013). Supondo que a refletância do material é espacialmente invariável, a BSSRDF pode ser simplificada para a BSSDF de 6 parâmetros.

A SVBRDF é uma função um pouco mais simples que, adicionalmente, supõe que a luz é refletida da mesma posição em que incidiu, sem deslocamento no interior do material. A refletância para cada posição ( $x, y$ ) na superfície é modelada em função das direções de luz incidente e de observação. Conseqüentemente, a SVBRDF não é capaz de representar materiais que apresentam deslocamento interno da luz, como no caso da difusão subsuperficial (HAINDL; FILIP, 2013; WEINMANN; KLEIN, 2015). A simplificação supõe ainda que não há autossombreamento, oclusão, nem interreflexões na superfície. De modo geral, a SVBRDF se adequa mais à representação de superfícies quase planas.

Supondo-se que o comportamento de refletância não apresenta variação espacial, a SVBRDF pode ser simplificada para uma função de apenas 4 parâmetros que descrevem as direções da luz incidente e de observação, denominada BRDF. A BRDF, apresentada por Nicodemus et al. (1977), é, provavelmente, a primeira descrição formal da dependência existente entre a aparência material e as direções de luz incidente e de observação. Modelos baseados na BRDF são amplamente empregados para medição de materiais opacos e homogêneos reais, como também para representação, em geral, de superfícies virtuais em aplicações gráficas. A sua medição, tradicionalmente, é realizada com gonioreflectômetros; outros métodos, no

entanto, reduzem o tempo e a complexidade do sistema de aquisição empregando câmeras digitais. Utilizando amostra material de forma conhecida, esférica ou cilíndrica, é possível registrar em uma única imagem a refletância para diferentes combinações de direções de luz incidente e de observação.

Modelos baseados na BTF são o atual estado da arte da aquisição de aparência, podendo ser medidos e visualizados de forma conveniente. Dana et al. (1999) desenvolveram o conceito de mapas de texturas bidimensionais nos quais estão incluídos todos os efeitos de distribuição de refletância e de interação da luz com mesoestruturas, como autossombreamento, oclusão e interreflexões. A função parte das mesmas suposições da BSSRDF, considerando ainda que a luz é refletida da mesma posição em que incidiu. Diferente da medição de BSSRDF, SVBRDF e BRDF, a aquisição de BTF captura a aparência da superfície fotograficamente em função da direção da luz incidente e da direção do observador. Em outras palavras, a refletância da superfície, para cada par de direções de luz incidente e de observação, é armazenada em forma de pixels de um mapa de textura bidimensional. Ao manipular o modelo ou a luz virtualmente, a BTF alterna dinamicamente entre os mapas de textura armazenados, representando assim o valor de refletância correspondente à cada ponto da superfície naquelas condições.

O campo de luz radiante (*radiant light field*) é a reposta de objetos de uma cena ao campo de luz irradiante (*incoming light field*) do ambiente. Em ambos os casos, o campo é definido sobre uma superfície convexa, geralmente uma esfera, que engloba todos os objetos da cena. O mapeamento entre os dois campos pode ser visto como o transporte de luz entre pares arbitrários de direções de luz incidente e de luz refletida, e pontos na superfície. A função de 8 parâmetros resultante é chamada de campo de refletância, RF. Se fixada a direção da luz incidente, pode-se obter a função simplificada de 4 parâmetros SLF, que modela a refletância considerando o ponto na superfície e a direção de observação. Fixando-se a direção de observação obtém-se a função SRF, que quantifica a refletância para uma determinada direção de observação em função da posição na superfície e da direção da luz incidente.

Mapas de textura são a forma mais simples de representação da aparência/refletância de uma superfície material. Eles descrevem a distribuição bidimensional de um determinado tipo de informação (no caso, refletância) sobre uma superfície. Este modelo fixa tanto a direção da luz incidente, quanto a direção de

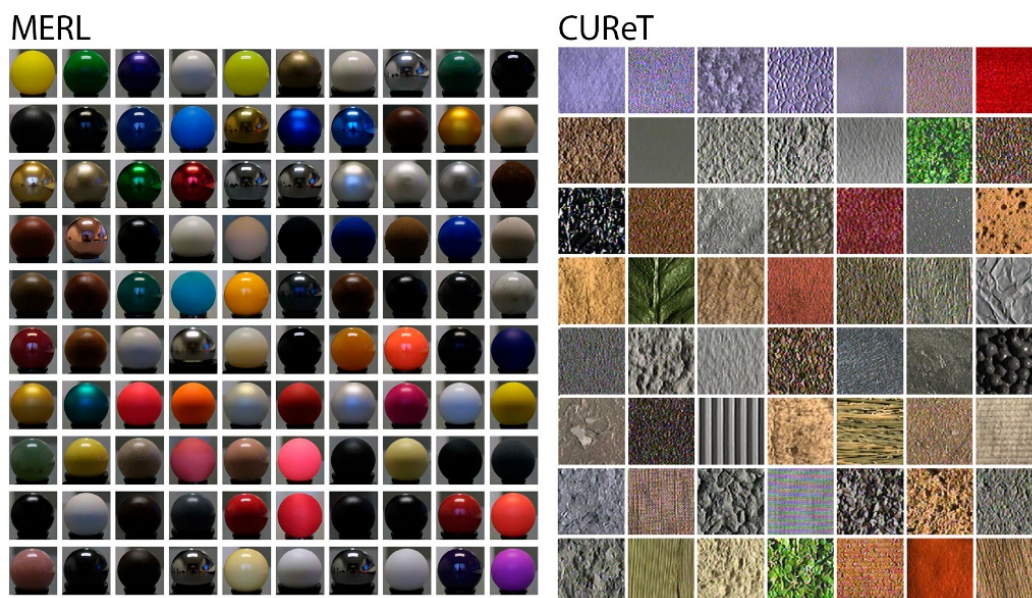


observação, supondo que a refletância não apresenta dependência dos mesmos. Assim, a representação só é aceitável para materiais de comportamento de refletância difusa, visualizados sob as mesmas condições. Mapas de textura, conforme descrito no item 2.4, podem ainda representar outros tipos de informações ou propriedades da superfície, como variações de normais na geometria da superfície.

### 2.3.2 Aquisição de amostras materiais vs. aquisição de artefatos

Tradicionalmente, os esforços de aquisição de aparência são direcionados a medir amostras representativas de uma determinada superfície material, de forma a gerar uma representação crível, porém genérica, de sua aparência. Os dados obtidos através da medição, frequentemente, são organizados em forma de bancos de dados disponibilizados publicamente, ou comercializados, contendo uma amostragem de diferentes de materiais (Figura 28).

Figura 28 – Bancos de dados BRDF e BTF



Fonte: Adaptado de Dana et al. (1999), e Matusik et al. (2003).

O banco de dados da Mitsubishi Electric Research Laboratories, MERL, por exemplo, disponibiliza 100 amostras de BRDF obtidas a partir da medição de materiais reais, sobretudo metais e acabamentos de pintura (MATUSIK et al., 2003). A Columbia-Utrecht Reflectance and Texture Database, CURET, fruto de um trabalho pioneiro de aquisição de BTFs e BRDFs, reúne medições de 61 amostras de materiais como casca de laranja, cortiça, veludo, entre outros (DANA et al., 1999). Um grande

número de amostras de BTF e de BRDF também pode ser encontrado na BTF Database Bonn e UTIA BTF Database (HAINDL; FILIP; VÁVRA, 2012). Haindl e Filip (2013) apresentam um levantamento mais extenso dos bancos existentes, incluindo detalhes a respeito dos sistemas de aquisição empregados.

A aquisição de aparência de objetos com forma tridimensional arbitrária e textura visual singular, como no caso de artefatos do patrimônio cultural, é um avanço relativamente novo dentro deste campo. O par de copos de origem quíchua<sup>2</sup> exibidos na Figura 29, por exemplo, foram produzidos do mesmo material (madeira) e apresentam geometria bastante semelhante. Os detalhes ao centro da figura, no entanto, revelam o quão singular a superfície de cada um dos copos é. A aquisição da refletância de uma amostra de mesmo material não seria o bastante para reconstruir a aparência de ambos. Uma representação desta maneira, embora crível, não corresponderia a aparência característica de cada um dos artefatos e não atenderia aos objetivos da documentação. Em outras palavras, para cada artefato faz-se necessária a aquisição da geometria e da refletância de toda extensão de sua superfície.

**Figura 29 – Características únicas da superfície de objetos semelhantes**



Dois artefatos quíchua, (a) e (b), de geometria e material semelhante, mas com características únicas em sua superfície. Fonte: Adaptado de The Metropolitan Museum of Art (2018b).

---

<sup>2</sup> É a designação aplicada aos povos indígenas da América do Sul que falam o quíchua. Distribuem-se pela região andina, especialmente no Peru, na Bolívia, Argentina e Chile.

### 2.3.3 Sistema de Aquisição de Aparência

Um sistema para aquisição de aparência, ou “ecossistema de aquisição de aparência” segundo Weinmann e Klein (2015), é composto por: componentes de *hardware* para aquisição; técnicas para calibração destes componentes; técnicas de aquisição geométrica; técnicas de aquisição fotométrica (de refletância), e sistemas auxiliares diversos que podem aumentar a eficiência da aquisição (WEINMANN; KLEIN, 2015). Além disso, fazem-se necessários também métodos e recursos para visualização dos dados adquiridos.

No que diz respeito aos componentes de *hardware*, podem ser incluídos uma grande variedade de tipos de sensores (câmeras e detectores), assim como emissores, para iluminar ativamente ou projetar padrões sobre a superfície de interesse. Também são necessárias estruturas e componentes físicos para o posicionamento e movimentação dos respectivos sensores, emissores e objetos. Entre estas incluem-se plataformas giratórias, tripés, e armações em geral.

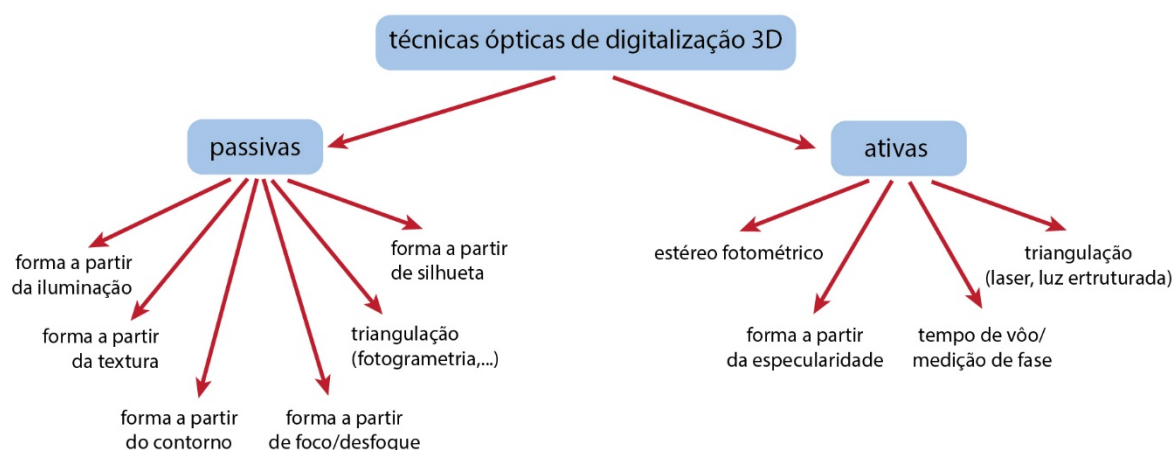
Para determinar as características do sistema criado e assegurar a consistência dos dados medidos, faz-se necessária a calibração do sistema, tanto geométrica, quanto fotométrica. A calibração geométrica busca determinar a disposição de cada componente dentro do sistema, assim como as características intrínsecas de cada um. As características e o posicionamento de lentes e sensor de uma câmera fotográfica, por exemplo, podem resultar em distorções, que devem ser levadas em conta na aquisição. A calibração fotométrica busca determinar as características dos emissores de luz empregados, e a sensibilidade à luz de cada sensor. O objetivo é assegurar a aquisição e a reprodução fidedigna das cores e luminosidade observadas na cena.

Além da aquisição de refletância em si, o sistema de aquisição de aparência deve ainda prever técnicas para aquisição da geometria da superfície; um dos fatores determinantes para formação da aparência material. Como já ressaltado, não há uma única técnica capaz de abranger toda a gama de superfícies materiais existentes. Ao invés disso, cada uma tende a focar na aquisição de um determinado comportamento de refletância ou classe de objetos. A configuração de sistemas equipados com componentes compatíveis com mais de uma técnica de aquisição geométrica é, portanto, uma alternativa bastante oportuna. A utilização de câmeras digitais para a

aquisição de refletância, por si só, já favorece a implementação de diversas técnicas de aquisição geométrica baseadas em imagens; como Fotogrametria, modelagem a partir da iluminação, modelagem a partir de silhuetas, estéreo fotométrico, entre outras.

A Figura 30 exibe uma visão geral de técnicas de aquisição geométrica sem contato, baseadas em princípios ópticos. Estas se mostram bastante interessantes, por não comprometerem a estrutura de objetos do patrimônio cultural, muitas vezes frágeis ao toque e sob cuidados de preservação. Um levantamento mais amplo das principais tecnologias aplicadas ao patrimônio cultural pode ser encontrado em Gomes et al. (2014) e Weinmann & Klein (2015).

**Figura 30 – Princípios ópticos de aquisição geométrica**



Uma taxonomia de princípios ópticos de aquisição geométrica. Fonte: Adaptado de Weinmann e Klein (2015).

Ainda no que diz respeito à aquisição geométrica, Schwartz e Klein (2012) recomendam até 1 mm de resolução para objetos com dimensões até 24 cm. Detalhes menores que essa resolução podem ser registrados de forma mais eficiente na aquisição de refletância. Observa-se, portanto, que esta resolução pode ser insuficiente para aplicações especificamente voltadas à análise métrica de superfícies, como na análise e reprodução de texturas táteis vista em Silva (2006).

Sistemas auxiliares, citados por Weinmann e Klein (2015), referem-se a ferramentas e componentes que buscam automatizar o processo de aquisição e processamento, aumentando, portanto, sua eficiência. Por fim, a geometria e comportamento de refletância adquiridos precisam ser visualizados outra vez,

necessitando-se, portanto, de meios adequados de visualização e reprodução da aparência.

## 2.4 Texturização para Renderização baseada em Física (PBR)

Nos subcapítulos anteriores abordou-se o comportamento da luz ao interagir com superfícies materiais, e como isso resulta na aparência que percebemos visualmente. Os diferentes modelos de refletância mostrados permitem medir e reproduzir a aparência de diversos materiais encontrados no mundo físico. No mundo virtual de jogos digitais e animações, no entanto, na maioria das vezes, esta aparência é construída por artistas e designers, que fazem uso de ferramentas de texturização.

Na computação gráfica, texturização é o processo através do qual a aparência de uma superfície virtual é transformada, por meio de imagens, funções ou outro tipo de dados. Tomando-se, por exemplo, o caso da representação de uma parede de tijolos, ao invés de reproduzir precisamente sua geometria, é possível aplicar uma imagem colorida de uma parede de tijolos sobre um simples plano. Esta imagem, chamada de mapa de textura, informará a cor apropriada para cada ponto da superfície (AKENINE-MÖLLER; HAINES; HOFFMAN, 2008). A falta de detalhe geométrico da parede criada poderá passar despercebida se o observador não se aproximar ou mudar a perspectiva.

Em adição à informação de cor, a superfície pode ainda possuir diversos outros mapas que informam propriedades relevantes para construção de sua aparência. Mapas de brilho (*glossiness*) e de especularidade (*specular*), por exemplo, são uma forma bastante comum de controlar a variação do brilho de uma superfície; em termos de intensidade e difusão do componente especular de refletância. Mapas de relevo (*bump*) e de normal, modificam a interação da luz com a superfície, de modo a simular variações em sua geometria. O simulacro, no entanto, é facilmente desfeito se observada de um ângulo mais adjacente a ela. Diferentemente, mapas de deslocamento (*displacement*) armazenam o quanto a geometria da superfície deve ser deslocada para assumir uma determinada aparência. Muitas outras informações, além destas, podem ser mapeadas sobre a superfície, gerando os mais diversos efeitos (AKENINE-MÖLLER; HAINES; HOFFMAN, 2008; BURLEY, 2012).

A renderização, um dos componentes fundamentais da computação gráfica, é o processo através do qual a descrição de uma cena tridimensional é convertida em

uma imagem bidimensional. Todos os algoritmos envolvidos, desde os de modelagem geométrica e animação até os de texturização e iluminação da cena, precisam passar seus resultados por um processo de renderização, de modo a tornar a informação visível.

Renderização baseada em física, PBR, é o nome dado a diversos modelos de renderização que buscam modelar de forma mais precisa o deslocamento e a interação da luz no mundo real. PBR baseia-se, para isso, nas propriedades físicas da luz e de superfícies materiais, abordados no capítulo 2.2 deste trabalho. Modelos de renderização mais antigos utilizam-se de aproximações pouco plausíveis, controladas por um grande número de parâmetros pouco intuitivos. Muitos destes modelos, por exemplo, separam as superfícies em reflexivas e não-reflexivas, enquanto modelos PBR reconhecem que, no mundo físico, todas as superfícies são reflexivas. A seguir são apresentados os princípios que regem a representação por PBR, e os principais parâmetros (mapas de textura) utilizados para modelagem da aparência material.

#### **2.4.1 Microfacetras**

A representação por PBR emprega modelos BRDF baseados em microfacetras. A teoria por trás destes modelos supõe que superfícies são formadas por planos microscópicos de orientação variável (chamados de microfacetras). Ao que a luz incide sobre a superfície, cada microfaceta a reflete em uma única direção com respeito à sua normal. A intensidade e irregularidade das microfacetras influencia na difusão da luz refletida, e é controlada por um dos parâmetros do modelo PBR chamado de rugosidade (*roughness*) ou brilho (*glossiness*) (BURLEY, 2012; MCDERMOTT, 2015a; RUSSEL, 2015). Uma vez que o componente difuso de refletância já sofre difusão ao que a luz penetra no material, os efeitos provocados pelas microfacetras são mais perceptíveis no componente especular. Quanto mais rugosa a superfície, mais distribuída e menos nítida será a reflexão especular percebida.

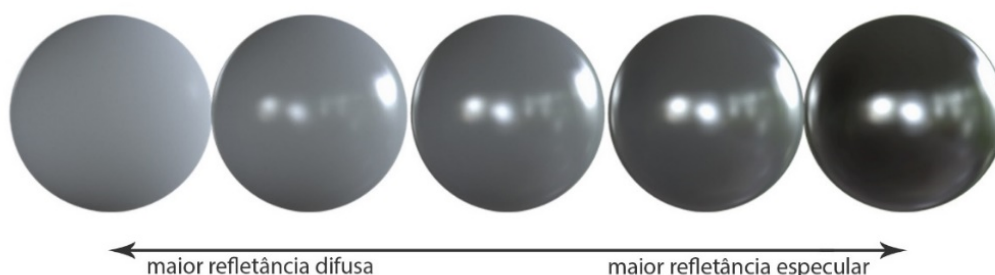
#### **2.4.2 Conservação de Energia**

Um dos princípios chaves que regem a renderização PBR é conhecido como “conservação de energia”, e dita que uma superfície material não pode refletir/transmitir mais luz do que incide sobre ela. Em outras palavras, a soma dos



componentes de refletância difusa e especular, e transmitância, será sempre menor que o montante de luz que incidiu sobre a superfície (AKENINE-MÖLLER; HAINES; HOFFMAN, 2008; MCDERMOTT, 2015a; RUSSEL, 2015). Se a superfície apresenta um componente especular bastante luminoso, conseqüentemente, apresentará pouca ou nenhuma refletância difusa. O inverso também se mostra verdadeiro; uma superfície de componente difuso intenso, apresentará baixa refletância especular. A Figura 31 demonstra o efeito do princípio de conservação de energia em superfícies de albedo constante, e componentes difuso e especular variáveis.

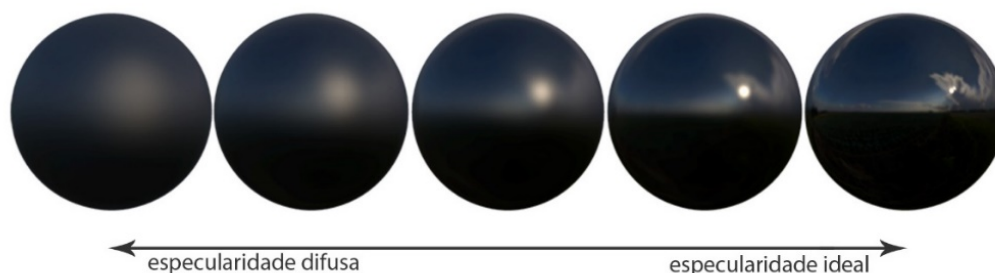
**Figura 31 – Conservação de energia**



Fonte: Adaptado de Russel (2015).

Como visto anteriormente, a presença de microfacetas na superfície pode provocar a difusão da reflexão especular. Assim, uma superfície de baixa rugosidade apresentará um componente especular concentrado, quase espelhado, enquanto superfícies rugosas terão uma reflexão especular mais difusa. No modelo PBR este fenômeno também obedece ao princípio de conservação de energia, de modo que o montante de luz refletida permanece o mesmo, independente da concentração ou difusão do componente especular. Assim, a refletância especular parecerá mais luminosa quando concentrada, e menos luminosa quando distribuída (Figura 32).

**Figura 32 – Conservação de energia na difusão**



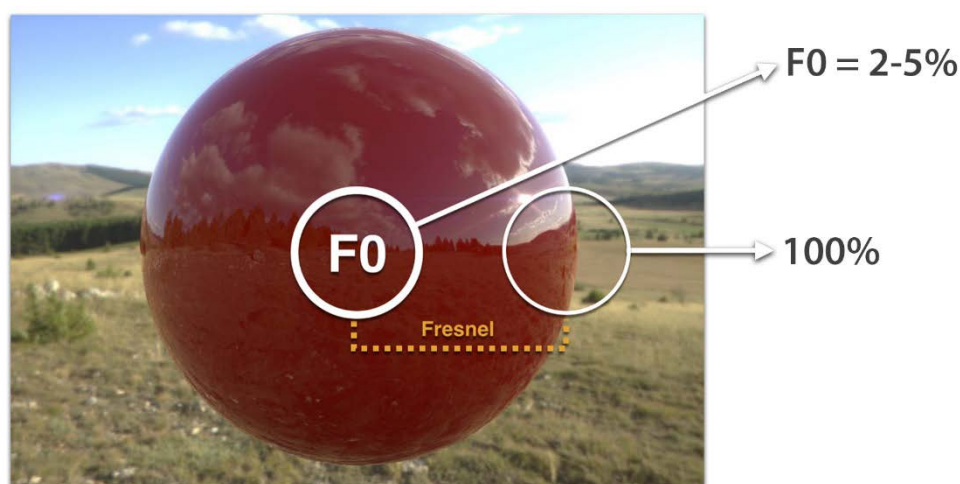
Fonte: Adaptado de Russel (2015).

### 2.4.3 Efeito Fresnel

O efeito Fresnel é outro fator que influencia e determina a aparência da BRDF no modelo de representação por PBR. Segundo as observações de Augustin-Jean Fresnel, a percepção da quantidade de luz sendo refletida por uma superfície depende do ângulo de observação. De modo geral as superfícies aparentam ser mais reflexivas quando observadas de um ângulo rasante, do que quando vistas de uma direção perpendicular.

Assim, para superfícies dielétricas (não-metálicas) lisas a refletância especular em ângulo reto ( $F_0$ ) será de 2 a 5%, podendo chegar a quase 100% observada de ângulos rasantes. Para superfícies rugosas a refletância se tornara mais intensa da mesma maneira, no entanto, sem alcançar os 100% de refletância especular nos ângulos rasantes.

Figura 33 – Efeito Fresnel



Fonte: Adaptado de McDermott (2015a).

### 2.4.4 Parâmetros do modelo de PBR

Sistemas para PBR utilizam modelos BRDF de microfacetas controlados por parâmetros. Como visto anteriormente, BRDFs são espacialmente invariáveis. No entanto, a variação destes parâmetros pode ser mapeada sobre a superfície, resultando em uma BRDF espacialmente modulada. Desta maneira, é possível representar superfícies materiais bastante heterogêneas. O modelo busca proporcionar aos designer e artistas um fluxo de trabalho intuitivo, de poucos parâmetros. A maioria destes parâmetros, com exceção dos que informam cor,



possuem um intervalo fisicamente coerente de 0 a 1, calibrado a partir de medições obtidas de superfícies materiais reais.

Existem duas abordagens na texturização para PBR, comumente identificadas como “especularidade – brilho” (*specular – glossiness*) e “metallicidade – rugosidade” (*metal – roughness*), esta última sendo a mais amplamente difundida e fisicamente possível (Figura 34). Cada abordagem possui seus próprios parâmetros, que dão origem à denominação, e modos como estes são sintetizados em mapas de textura. Os demais parâmetros são comuns a ambas abordagens e intercambiáveis. Na abordagem “especularidade – brilho”, o parâmetro especularidade controla a intensidade do componente de refletância especular, enquanto o brilho controla a distribuição deste componente. Já a abordagem “metallicidade – rugosidade” divide as superfícies em dielétricas (não-metálicas) e metálicas, partindo dos seguintes princípios: que a refletância de materiais dielétricos apresenta componente especular pequeno (entre 2% e 5% da refletância), e que metais não possuem componente difuso, tendo sua aparência definida inteiramente pelo componente especular.

**Figura 34 – Abordagens de texturização PBR**

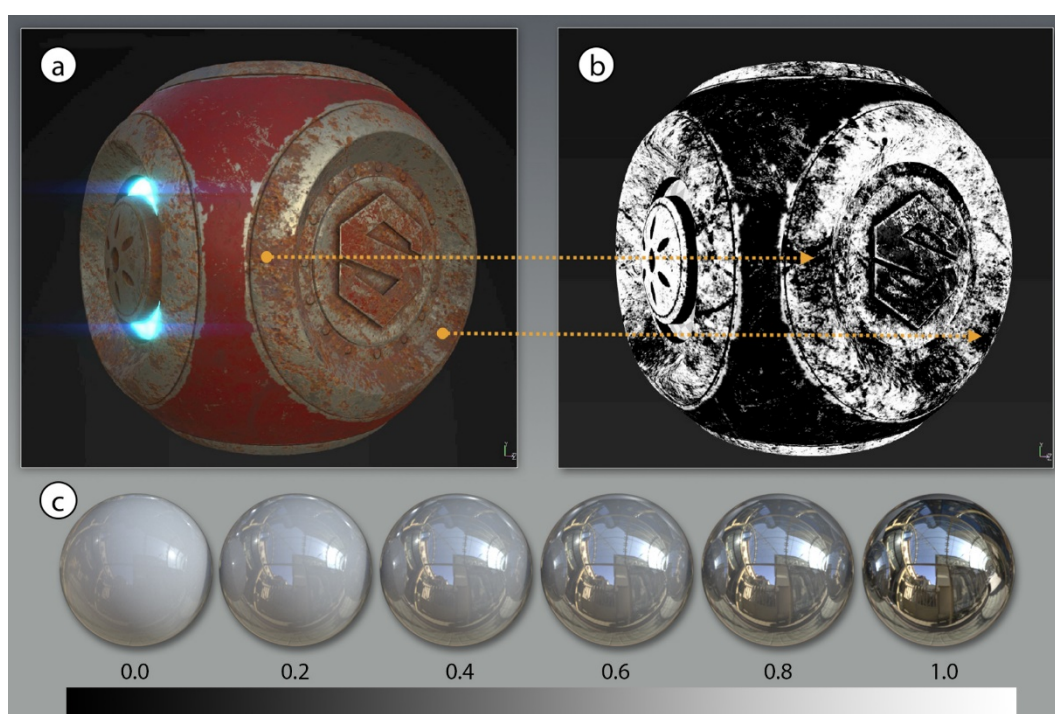


Fonte: Adaptado de McDermott (2015b).

Partindo da abordagem “metallicidade – rugosidade”, os parâmetros principais são albedo, metalicidade e rugosidade. O parâmetro albedo, também chamado de cor base (*base color*), descreve os comprimentos de onda refletidos pela superfície sob iluminação branca. Albedo pode ser representado por um mapa de textura colorido.

O parâmetro metalicidade (*metallic*) determina se a superfície é dielétrica ou metálica, alternando assim entre os diferentes comportamentos de refletância. Mapas de metalicidade são representados em escala de cinza, onde o preto (0.0) corresponde a dielétrico, e o branco (1.0) corresponde a metálico. Para materiais metálicos a informação de cor contida no mapa albedo passa a informar a coloração do componente especular, e não mais a cor difusa. Valores intermediários podem ser utilizados para representar superfícies metálicas corroídas ou parcialmente cobertas por camadas dielétricas, como no caso de ferrugem, pintura ou poeira (Figura 35).

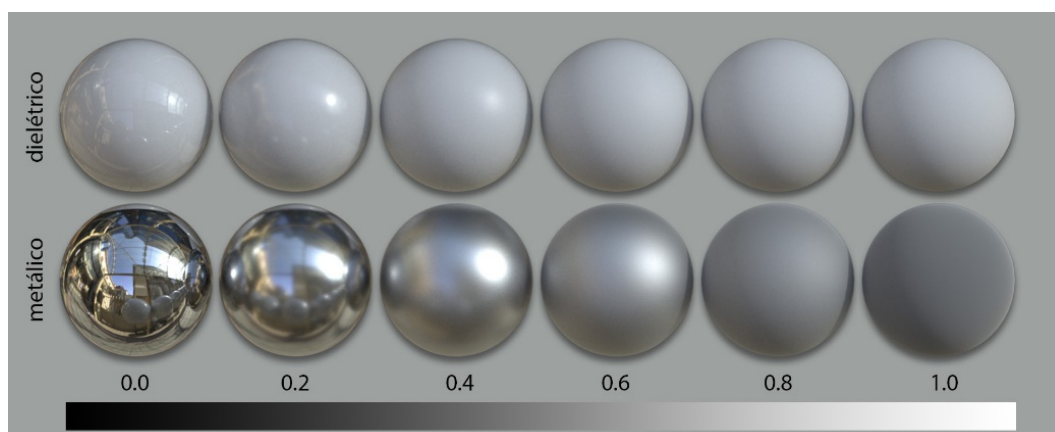
**Figura 35 – Efeitos do parâmetro metalicidade**



(a) Áreas pintadas e enferrujadas de uma superfície metálica, (b) mapa de metalicidade correspondente, e (c) variação da metalicidade em superfícies de rugosidade constante (c).  
Fonte: Adaptado de McDermott (2015b).

O parâmetro rugosidade, assim como o brilho na abordagem “especularidade – brilho”, controla o efeito de difusão provocado pelas microfacetas presentes na superfície. Este também pode ser representado por um mapa de textura em escala de cinza, onde preto (0.0) resulta em uma superfície de reflexão especular ideal, e branco (1.0) proporciona uma reflexão especular de difusão máxima (Figura 36).

**Figura 36 – Efeitos do parâmetro rugosidade**



Aumento gradativo do efeito de difusão, provocado por microfacetas, em superfícies dielétricas e metálicas.

Modelos de representação para PBR mais elaborados, como o desenvolvido pela Walt Disney Animation Studios, apresentado em Burley (2012), podem apresentar ainda outros parâmetros, capazes de representar comportamentos de refletância mais complexos. O estúdio vem empregando métodos baseados em física desde o filme Enrolados, lançado em 2010, entre outras coisas, por conta da facilidade em uniformizar modelos e ambientes criados por diferentes artistas. No modelo de representação desenvolvido por eles há também parâmetros para modelar comportamentos como difusão subsuperficial (*subsurface*) e reflexão anisotrópica (*anisotropic*).

Na texturização para PBR, além dos parâmetros citados anteriormente, também são empregados diversos tipos de mapas de textura já consagrados em outros modelos de representação. Entre os mais importantes, podem ser citados aqueles que modificam a representação da geometria, seja por meio da simulação ou pela deformação da malha. Também há aqueles que auxiliam na representação de efeitos de luz ambiente, como os mapas de oclusão de ambiente (*ambient occlusion*) e mapas de cavidade (*cavity*). Estes dois últimos, tal qual os mapas de geometria, podem ser obtidos a partir de modelos de alta resolução, e tem como função mapear áreas da superfície que são menos acessíveis à luz ambiente, como fendas e orifícios. O Quadro 3 reúne uma lista, com nomenclatura adotada em português, dos principais mapas de textura abordados neste trabalho.

**Quadro 3 – Nomenclatura de mapas de textura**

Tipo	Nome (em inglês)	Tradução (em português)
cor	<i>albedo (base color)</i>	albedo (cor base)
refletância	<i>metallic</i>	metallicidade
	<i>roughness</i>	rugosidade
	<i>specular</i>	especularidade
	<i>glossiness</i>	brilho
ambiente	<i>ambient occlusion</i>	oclusão de ambiente
	<i>cavity</i>	cavidade
geometria	<i>normal</i>	normal
	<i>bump</i>	relevo
	<i>displacement</i>	deslocamento

## 2.5 Estado da Arte

Os trabalhos apresentados a seguir estabelecem o atual estado da arte no que tange a dispositivos de aquisição de aparência em geral, e, em especial, dispositivos voltados à aquisição de artefatos.

### 2.5.1 *Light Stages* - ICT

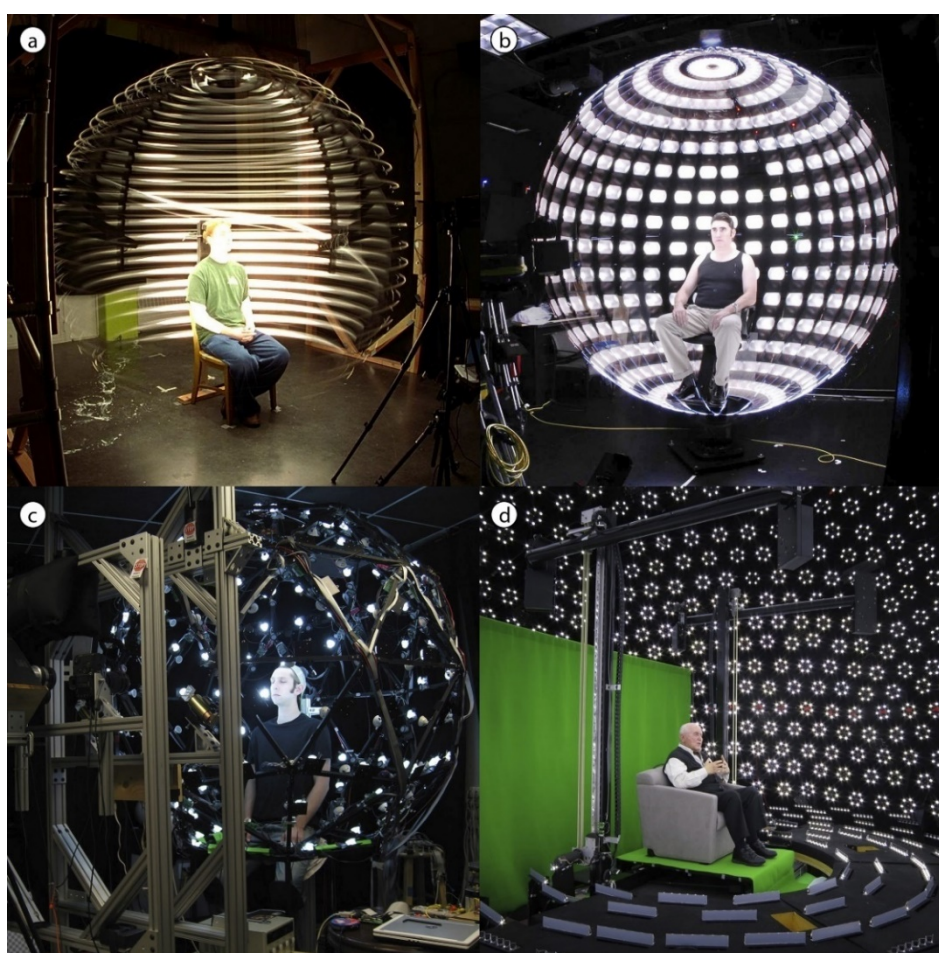
O *Institute for Creative Technologies*, ICT, da Universidade do Sul da Califórnia, é referência na aplicação prática de métodos de aquisição e reprodução de aparência, tendo desenvolvido diversas gerações de sistemas de aquisição, chamados de *Light Stages* (Figura 37), voltados à captura de campos de luz e de refletância (SLF e SRF) de faces. O processo consiste, basicamente, em filmar a pessoa sob a iluminação controlada da *Light Stage*. Os algoritmos desenvolvidos permitem estimar a geometria e diversas propriedades de refletância da face, de modo que é possível reiluminar arbitrariamente a cena gravada, ajustando sua aparência a cenas criadas virtualmente

A tecnologia desenvolvida vem sendo aplicada, com muito êxito, na indústria cinematográfica, tendo sido usado com esta finalidade, pela primeira vez, na produção de *Homem-Aranha 2*. Cabe destacar que, embora não tenham sido divulgados valores, o investimento da indústria cinematográfica em grandes produções costuma ser bastante alto. Isso, por um lado, favorece o desenvolvimento tecnológico, mas, por outro lado, distancia esses sistemas de aquisição de aparência da realidade financeira de outros segmentos, como o da preservação do patrimônio cultural. A



ocasião permitiu o desenvolvimento do sistema de segunda geração, *Light Stage 2*, baseado na pesquisa original publicada em Debevec et al. (2000). As gerações seguintes (*Light Stage 3, 4 e 5*), usadas em produções como “Super-Homem” e “O Curioso Caso de Benjamin Button”, ampliaram as funcionalidades dos sistemas, possibilitando, entre outras coisas, não só a aquisição de campos de luz e de refletância, mas também a reprodução de iluminação ambiente a partir de imagens (DEBEVEC et al., 2002). A sexta geração do sistema foi fisicamente ampliado, e consiste em um domo geodésico de 8 metros de largura, permitindo, assim, a captura de performances de corpo inteiro (EINARSSON et al., 2006).

**Figura 37 – *Light Stages* do *Institute for Creative Technologies***



(a) *Light Stage 1*, o sistema original, (b) *Light Stage 2*, utilizado para o filme *Homem-Aranha 2*, (c) *Light Stage 5*, e (d) *Light Stage 6*. Fonte: (INSTITUTE FOR CREATIVE TECHNOLOGIES, 2017)

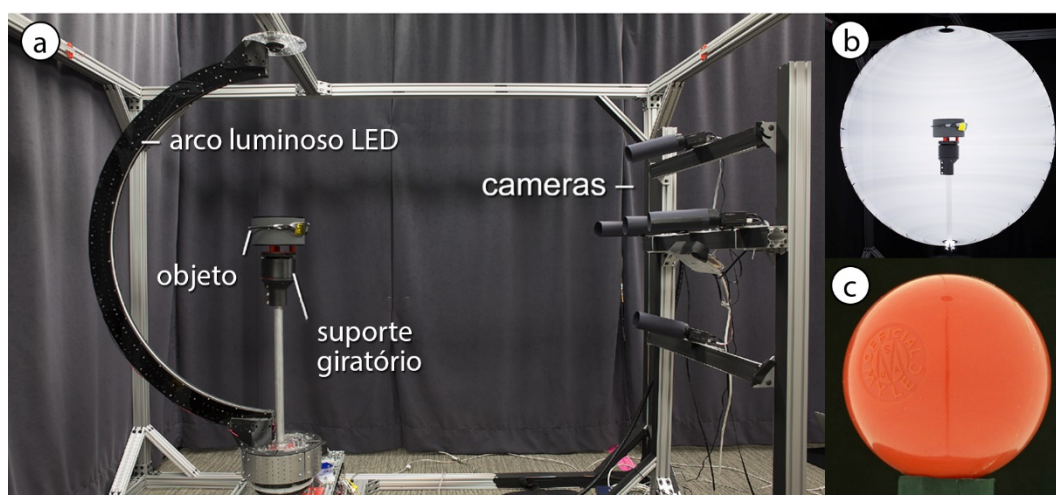
### 2.5.2 Tunwattanapong et al. (2013)

Outro estudo de aquisição de aparência, mais próximo do contexto da documentação de artefatos, é apresentado por Tunwattanapong et al. (2013). Esta

pesquisa, também desenvolvida no *Institute for Creative Technologies*, apresenta um método para aquisição da aparência de objetos especulares, usando padrões de iluminação baseados em harmônicos esféricos.

O sistema de aquisição consiste em uma plataforma giratória para posicionamento do objeto, um arco luminoso equipado de uma fita LED com módulos individualmente endereçáveis, e um arranjo de cinco câmeras fixas (Figura 38). O arco luminoso, girando em velocidade elevada, ilumina o objeto, quase simultaneamente, de todas as direções. Acendendo e apagando determinadas módulos LED durante a revolução do arco, é possível reproduzir padrões harmônicos esféricos que são usados na separação dos componentes de refletância. As câmeras fotográficas capturam imagens consecutivas, registrando um total de 44 padrões harmônicos esféricos, para cada posição da plataforma giratória. A aquisição completa, girando o objeto com passo de 45 graus, leva em torno de 10 minutos.

**Figura 38 – Sistema de aquisição com arco luminoso**



Configuração do sistema de aquisição (a); arco luminoso em rotação (b); e bola de plástico fotografada sob esta iluminação (c).

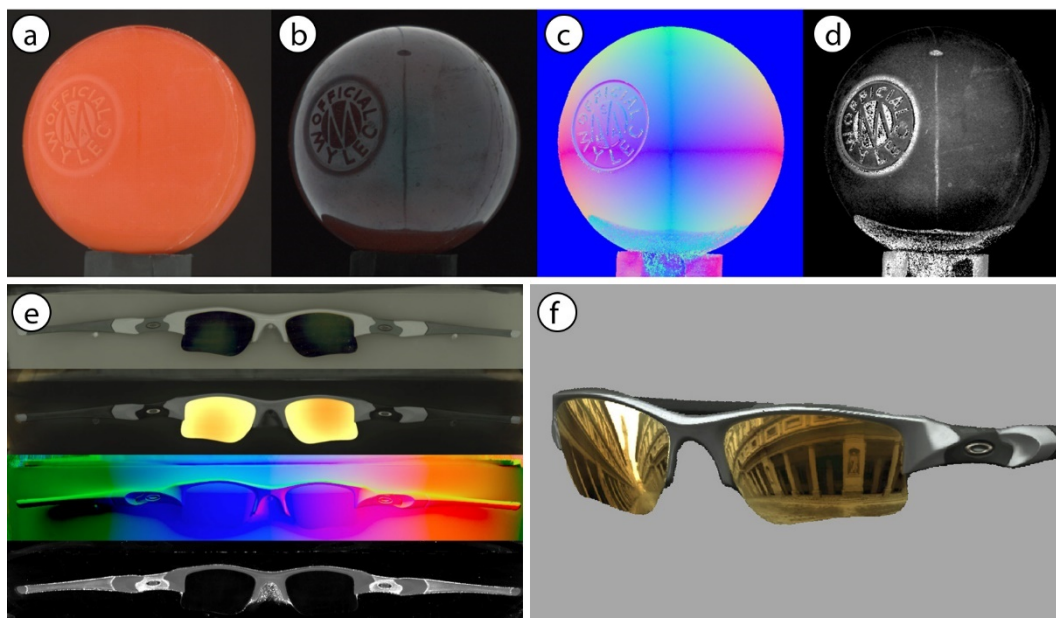
Fonte: Adaptado de (TUNWATTANAPONG *et al.*, 2013)

A partir dos padrões harmônicos esféricos também é possível estimar direções de incidência da luz, usadas na recuperação das normais da superfície por meio de estéreo fotométrico. A geometria tridimensional do objeto é reconstruída por meio de um algoritmo de triangulação passiva, que combina as imagens de ambos os componentes de refletância e as normais recuperadas.

A Figura 39(a-d) exibe os diferentes tipos de dados recuperados para cada posição de câmera, são estes: componente difuso (albedo), componente especular

(albedo especular), normal e rugosidade. Ao final, os dados contidos em cada imagem são projetados sobre a superfície da superfície do modelo tridimensional, gerando mapas de textura (Figura 39e) usados na representação virtual (Figura 39f).

Figura 39 – Resultados obtidos em Tunwattanapong et al. (2013)



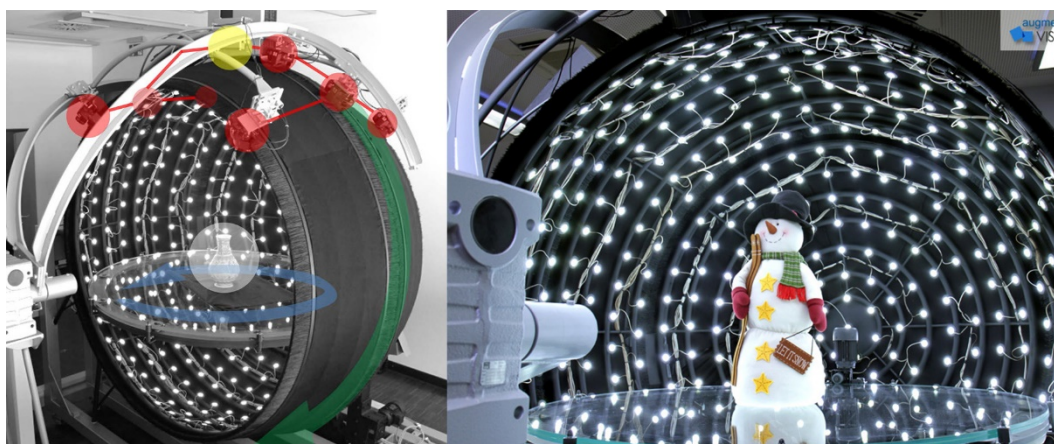
Em cima: imagens de (a) albedo, (b) albedo especular, (c) normal e (d) rugosidade de uma bola de plástico. Em baixo: (e) mapas de textura finais e (f) representação virtual de uns óculos. Fonte: Adaptado de (TUNWATTANAPONG et al., 2013)

### 2.5.3 Orbital Camera System - DFKI

Em Köhler et al. (2013) e Nöll et al. (2013), os autores, do Centro Alemão de Pesquisa para Inteligência Artificial, DFKI (do alemão, *Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz*), apresentam o desenvolvimento de um sistema esférico de aquisição geométrica e de refletância simultânea, denominado OrcaM (abreviação de *Orbital Camera*) (Figura 40). O sistema consiste em uma estrutura esférica fechada com raio de 1m. Em seu interior estão distribuídas 633 fontes luminosas LED, individualmente controláveis, a uma distância angular de  $7,5^\circ$ . As câmeras DSLR utilizadas para a aquisição, Canon 500D de 15.1 MP, são montadas em um braço móvel capaz de girar  $210^\circ$  em torno da estrutura central. Além delas, o sistema conta ainda com um projetor de alta definição (1920x1080 *pixels*), utilizado para aquisição geométrica por luz estruturada. As câmeras e o projetor acessam o interior da estrutura esférica através de fendas, vedadas contra a luz exterior por escovas. Para permitir a aquisição completa do objeto, sem nenhuma oclusão, o sistema emprega uma plataforma giratória feita de vidro antirreflexivo.



**Figura 40 – Sistema OrcaM**



Sete câmeras (vermelho) e um projetor (amarelo) encontram-se montados em um braço móvel capaz de girar  $210^\circ$  (verde). O objeto (branco) é posicionado sobre uma plataforma de vidro que pode ser rotacionada em  $360^\circ$  (azul).

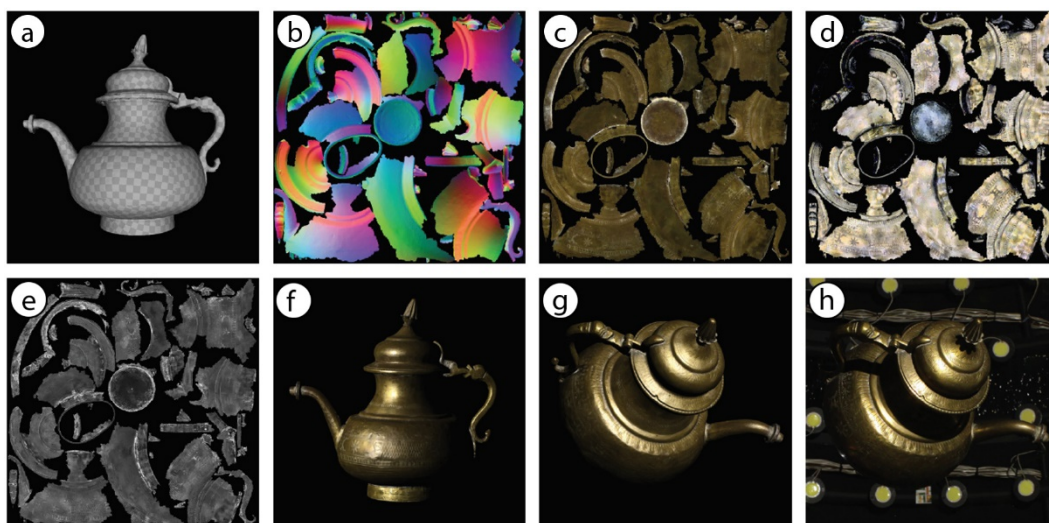
Fonte: Adaptado de (KÖHLER et al., 2013; NÖLL et al., 2013)

A aquisição geométrica é realizada por meio da projeção de franjas (luz estruturada) sobre o objeto, as quais são fotograficamente registradas pelas câmeras DSLR. Através da triangulação de cada par projetor-câmera obtido durante a aquisição, é possível gerar uma nuvem de pontos da forma geométrica do objeto. As nuvens de pontos reconstruídas com o OrcaM, possuem, em geral, de 200 a 300 milhões de pontos, e ocupam aproximadamente 15-20 gigabytes em disco. Estes dados brutos são otimizados para visualização interativa, gerando uma malha triangular de baixa resolução, e uma mapa de normal no qual os detalhes geométricos são armazenados. Desta maneira, a informação geométrica do objeto é representada com alguns poucos *megabytes* em disco (10 a 20 MB).

A aquisição de refletância, consiste na amostragem BRDF por meio de imagens. Para cada posição do braço móvel o objeto é iluminado por 15 a 20 LEDs e imagens são adquiridas por cada uma das câmeras. A partir delas é realizada a amostragem BRDF de cada ponto na superfície do objeto. Além disso, são recuperadas informações de cor difusa (albedo), cor especular (albedo especular), rugosidade e normal, representadas em forma de mapa. A normal é obtida por meio de processamento estéreo fotométrico. Os mapas são utilizados em conjunto com um modelo BRDF de microfacetadas, para gerar a representação virtual (Figura 41) do artefato.



Figura 41 – Dados obtidos com o sistema OrcaM



(a) Modelo otimizado; (b) mapa de normal; (c) mapa de albedo; (d) mapa de albedo especular; (e) mapa de rugosidade; (f)(g) representação virtual; e (h) referência fotográfica.  
 Fonte: Adaptado de (KÖHLER et al., 2013)

O sistema de aquisição e processamento é inteiramente automatizado, não requerendo nenhuma forma de pós-produção manual. No entanto, os autores observam que o processo de reconstrução leva várias horas por objeto, o que torna a documentação de uma coleção ou acervo completo quase impraticável. O Quadro 4 apresenta alguns dados quantitativos referentes à aquisição dos objetos exibidos na Figura 42.

Quadro 4 – Dados quantitativos da aquisição com o sistema OrcaM

	Nome	Posições de Câmera	Captura (hh:mm)	Processamento (hh:mm)	Dados brutos (GB)	Dados finais (MB)
a)	'Allegorie Luxembourg'	126	01:09	12:31	25,2	16,1
b)	'Weiblicher Torso'	126	00:57	10:28	15,6	12,7
c)	'Das kleine Mädchen'	112	00:39	10:55	15,9	15,3
d)	Máscara africana de madeira	133	01:07	11:42	24,4	10,9
e)	Vaso chinês de porcelana	112	00:57	10:36	20,0	9,5
f)	Chaleira de latão	98	00:43	11:05	16,7	12,3
g)	Estatueta africana de madeira	126	01:03	11:28	22,3	12,6

Fonte: Adaptado de (NÖLL et al., 2013)

Figura 42 – Modelos reconstruídos com o sistema OrcaM

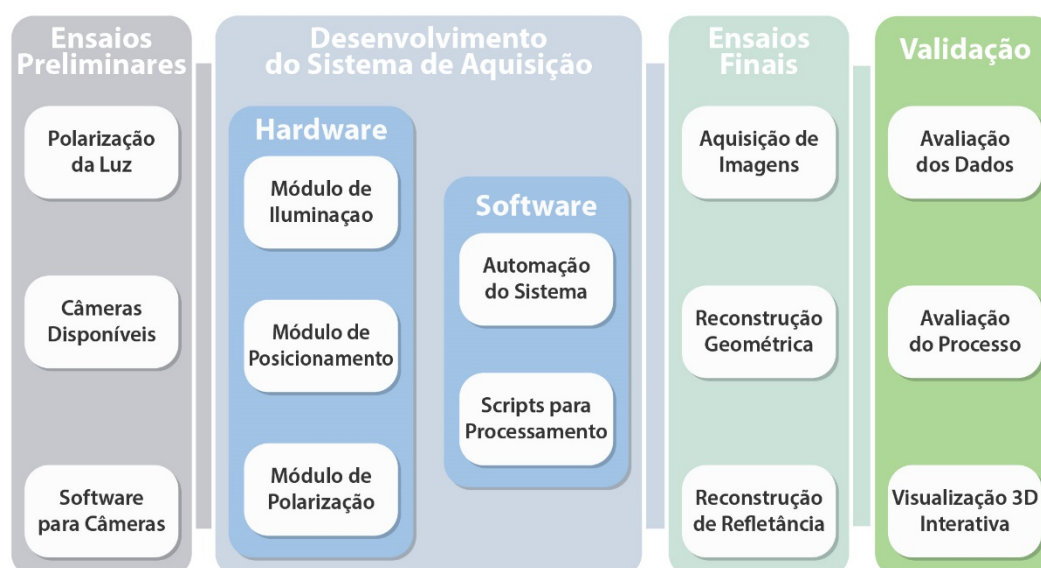


Modelos reconstruídos: (a) 'Allegorie Luxembourg'; (b) 'Weiblicher Torso'; (c) 'Das kleine Mädchen'; (d) máscara africana de madeira; (e) vaso chinês de porcelana; (f) chaleira de latão; e (g) estatueta africana de madeira. Fonte: Adaptado de (NÖLL et al., 2013)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão bibliográfica apresentada versou sobre os princípios que determinam a aparência visual de superfícies materiais, assim como os fundamentos e o estado da arte da aquisição de aparência e texturização de modelos virtuais. Com base nos fenômenos da luz e nos comportamentos de refletância verificados na revisão, optou-se por delimitar o estudo à aquisição de aparência de superfícies materiais com comportamento de refletância difuso ou misto. Buscando alcançar os objetivos estabelecidos, estruturou-se o presente estudo, que foi dividido em quatro etapas gerais (Figura 43).

Figura 43 – Visão geral das etapas do estudo



A primeira dessas etapas, a dos ensaios preliminares, buscou verificar os fenômenos de polarização da luz, e o funcionamento das câmeras e dos *softwares* previstos. Na etapa de desenvolvimento, buscou-se aplicar os princípios verificados no desenvolvimento de um sistema de aquisição. Esse desenvolvimento abrangeu tanto a estrutura física do sistema, composta por módulos de iluminação, posicionamento e polarização, quanto a parte lógica, a automação do sistema e *scripts* para o processamento dos dados. Na etapa de ensaios finais, realizou-se um estudo aprofundado do sistema desenvolvido, verificando os efeitos das principais variáveis na aquisição de imagens, na reconstrução geométrica, e na reconstrução da refletância. Ao final, realizou-se a validação dos resultados obtidos, avaliando os

dados obtidos, o processo proposto, bem como o produto visual 3D interativo obtido por meio da renderização baseada em física.

### 3.1 Ensaios preliminares

O estudo proposto tem como um de seus conceitos fundamentais a separação dos componentes de refletância difuso e especular da superfície. Esta separação, conforme verificado na revisão bibliográfica, pode ser realizada por meio da polarização da luz, utilizando filtros polarizadores lineares. A fim de verificar este fenômeno, e assegurar a viabilidade do estudo proposto, foram realizados ensaios preliminares.

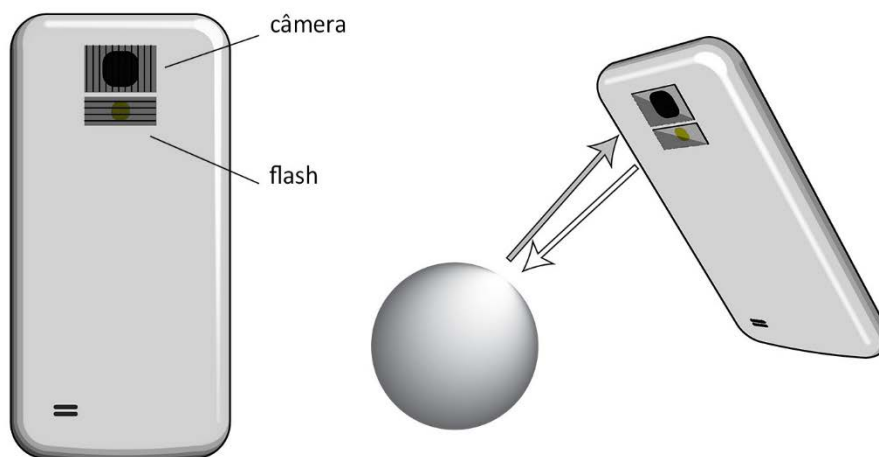
Para este propósito buscou-se, primeiramente, por fabricantes e revendedores nacionais de filtros polarizadores para fins técnicos ou científicos. Constatou-se, no entanto, que não há muitas especificações ou fornecedores especializados para este material. Por conseguinte, foram adquiridas películas polarizadoras lineares comumente utilizadas na fabricação e reparo de telas de cristal líquido, LCD (do inglês, *Liquid Cristal Display*), encontradas *online* no Mercado Livre.

Para verificar o fenômeno, assim como o desempenho do material adquirido, foram colados pequenos pedaços de filtro polarizador em orientação vertical e horizontal, respectivamente, sobre o flash e a câmera traseira de um *smartphone* (Figura 44). O resultado esperado nesta configuração perpendicular de polarização, também chamada de polarização cruzada (*cross-polarization*), é de que a luz emitida pelo flash, ao ser refletida especularmente pela superfície, seja bloqueada pelo filtro polarizador posicionado diante da câmera. Assim, com a filtragem do componente especular, somente o componente difuso alcança o sensor para ser registrado na imagem.

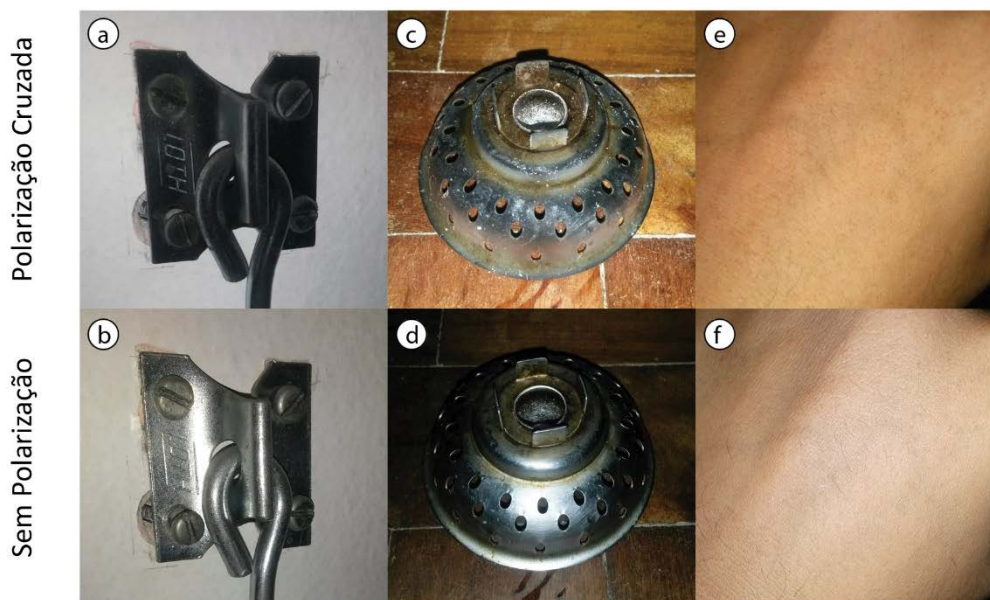
Em um ambiente escuro, isolado de outras fontes luminosas, foram capturadas imagens de diversas superfícies de objetos cotidianos. Além da captura em configuração perpendicular de polarização, ainda foram registradas imagens convencionais, utilizando também a iluminação de flash do *smartphone*. Os resultados confirmaram o fenômeno e a eficácia dos filtros adquiridos. Nas imagens com polarização perpendicular (Figura 45), pode-se observar a ausência do componente difuso de superfícies metálicas (a), caracterizada pela aparência preta, e a maior distinção de detalhes de superfícies ofuscadas pelo componente especular nas

imagens convencionais (c)(e). Sem a polarização, a aparência das mesmas superfícies é marcada por áreas de luminosidade intensa e concentrada, proporcionadas pela reflexão especular da luz do flash.

**Figura 44 – Disposição de filtros polarizadores para ensaio preliminar**



**Figura 45 – Ensaio preliminar de polarização linear**



Superfícies fotografadas durante o ensaio: (a)(b) gancho de parede metálico, (c)(d) ralo de pia oxidado, e (e)(f) pele humana.

Também foram conduzidos ensaios para verificar o funcionamento do equipamento fotográfico disponível para a realização do presente trabalho. O equipamento disponível consiste em quatro câmeras DSLR modelo D90 da Nikon pertencentes ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da UFRGS. Cada câmera é equipada com uma lente *Nikon Af-S Nikkor 18-105mm*, e é capaz de capturar imagens de até 12 MP. Verificou-se as possibilidades de controle simultâneo



e remoto das mesmas. Para este propósito, testou-se o *software Smart Shooter Pro*. Este é um *software* comercial que, sob licença de uso profissional (US\$ 195,00), permite controlar e monitorar até 8 câmeras. A licença utilizada neste estudo foi cedida pelos desenvolvedores, *Kuvacode*.

Para o ensaio as quatro câmeras disponíveis foram dispostas de forma concêntrica, enquadrando um mesmo objeto (Figura 46a). Todas elas foram conectadas a um *Hub USB* que, por sua vez, as conectava ao computador (Figura 46b). Estabelecendo a conexão com o *software*, obtêm-se uma visão geral dos parâmetros de cada câmera, sendo possível nomeá-las para facilitar sua identificação e organização das imagens capturadas por cada uma. Além da sincronização dos parâmetros fotográficos, o *software* dispõe ainda de um modo chamado de *Live View*, no qual é possível visualizar as imagens obtidas pelo sensor em tempo real (Figura 46). Usando este recurso, é possível verificar e ajustar o foco e a exposição remotamente e em tempo real.

**Figura 46 – Ensaio de controle e monitoramento remoto das câmeras**

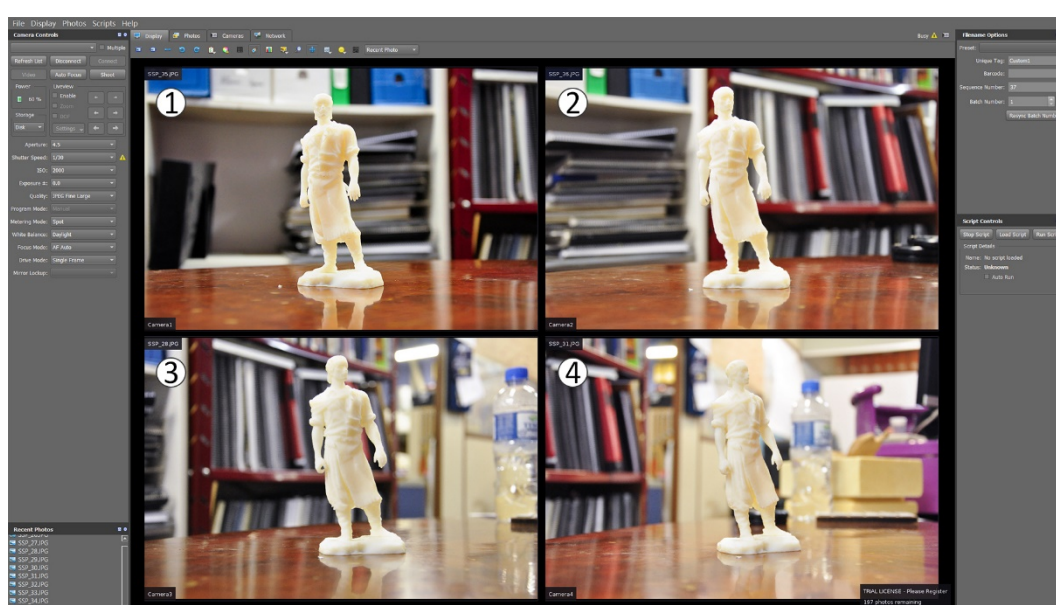


Disposição das câmeras e miniatura do monumento “O Laçador” (a); e hub USB com quatro câmeras conectadas (b).

Durante o ensaio, foram verificadas algumas funcionalidades, como o disparo simultâneo e a transferência direta de imagens capturadas para o disco rígido do computador. Constatou-se que, o modo de acionamento simultâneo do *software* provoca um atraso de 300 ms entre o acionamento de cada câmera. No entanto, é possível realizar o acionamento simultâneo utilizando recursos externos, como, por exemplo, um controle remoto infravermelho, sem abrir mão das demais vantagens oferecidas pelo *software*. Além disso, observou-se que, a transferência de imagens de

múltiplas câmeras por uma mesma porta USB, pode provocar congestionamento na transferência dos dados, atrasando as capturas seguintes. Este congestionamento é influenciado pela quantidade de câmeras, e pelo tamanho em disco dos arquivos. Quanto maiores, mais intenso será o atraso provocado. Observa-se, no entanto, que o equipamento disponível para realização do estudo possui somente portas USB 2.0, cuja taxa de transferência é de até 60 megabytes por segundo. Acredita-se que o uso de portas USB 3.0, com transferência de até 640 megabytes por segundo, possa atenuar o problema observado.

**Figura 47 – Interface do *Smart Shooter Pro***



Visualização em tempo real das imagens captadas pelas quatro câmeras dispostas na Figura 46b.

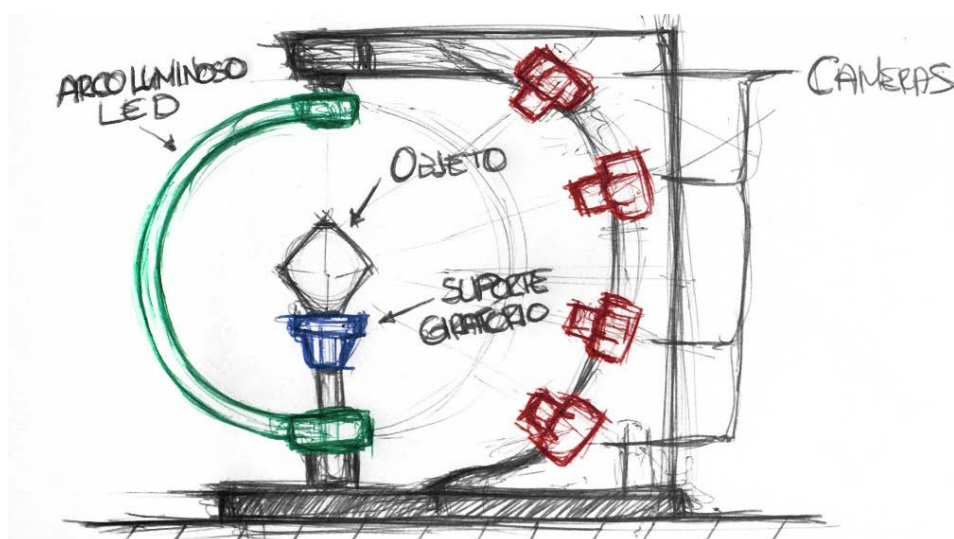
Verificou-se, também, que apesar da sincronização dos parâmetros fotográficos, as câmeras podem registrar imagens ligeiramente distintas em função das especificidades de cada sensor, variando não só na representação das cores, como também nos níveis de exposição. Esta constatação enfatizou a importância de estratégias de calibração de cor e pós-processamento para uniformização dos dados capturados.

### **3.2 Desenvolvimento do sistema de aquisição**

A partir da revisão bibliográfica e dos ensaios preliminares, baseado no método de projeto de produto exposto por Baxter (2011), foram verificados requisitos para o desenvolvimento de um sistema de aquisição. A partir de um projeto conceitual,

identificou-se a necessidade de desenvolvimento de módulos: uma plataforma de suporte e posicionamento do artefato; uma fonte de iluminação homogênea e polarizada; e um arranjo concêntrico de câmeras, incluindo mecanismos para alternar a orientação de filtros polarizadores. A Figura 48 apresenta um esboço do conceito produzido nos estágios iniciais de desenvolvimento, que demonstra uma possível disposição desses módulos.

**Figura 48 – Esboço inicial da disposição dos módulos**



Vista lateral da disposição dos componentes: câmeras DSLR (vermelho); arco luminoso LED (verde); e plataforma giratória (azul).

Observa-se que o desenvolvimento do sistema de aquisição não contou com nenhum fomento direto para aquisição de materiais e equipamentos, ou contratação de serviços externos. Em consequência disso, as decisões de projeto foram tomadas visando o aproveitamento máximo de materiais e equipamentos disponibilizados pelos laboratórios e oficinas da UFRGS. As infraestruturas envolvidas foram o Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM), o Laboratório de Inovação e Fabricação Digital da Escola de Engenharia (LIFELAB), a Oficina de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, o Centro Multiusuário de Prototipagem Rápida (CMPR) do Parque Tecnológico da UFRGS (Zenit), bem como o Laboratório de Pesquisa em Fotogrametria (LAFOTO). Ainda assim, fez-se necessária a aplicação de recursos financeiros próprios do presente autor. O Apêndice C traz uma relação completa dos materiais utilizados e sua origem.

Para o desenvolvimento do sistema, foram empregados diversos processos de prototipagem e fabricação digital, sem os quais a construção de um protótipo funcional



no prazo disponível não teria sido possível. As técnicas empregadas foram: corte e gravação a laser, usinagem, e impressão 3D. Os modelos e desenhos em CAD de todo sistema foram realizados no *software Autodesk Inventor Pro*, para o qual foi obtida uma licença acadêmica.

Para a automação de seu funcionamento, utilizou-se a plataforma de prototipagem eletrônica *Arduino*. A meta estipulada para esta etapa de desenvolvimento foi a automação completa do processo de aquisição de imagens, incluindo o controle da iluminação, do posicionamento do artefato, do acionamento das câmeras e da orientação dos filtros polarizadores.

O desenvolvimento teve início efetivo no começo de abril de 2017, após a banca de qualificação. Os primeiros ensaios de aquisição foram realizados em novembro do mesmo ano, totalizando um período de desenvolvimento de aproximadamente 8 meses.

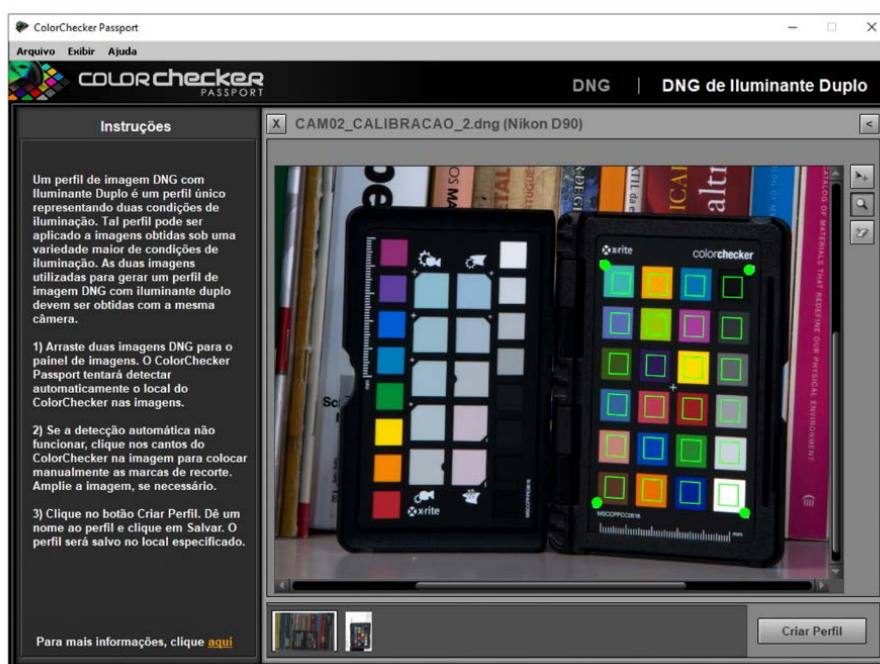
### **3.3 Calibração de cor e pós-processamento**

Conforme os ensaios preliminares demonstraram, a utilização de múltiplas câmeras pode resultar em um conjunto de dados com variações no nível de exposição na representação das cores. Para obter resultados consistentes entre as diferentes câmeras, é preciso uma estratégia de calibração de cor e o pós-processamento das imagens capturadas.

Para a calibração de cor, utilizou-se o *XRite ColorChecker Passport* (WEINMANN; KLEIN, 2015), que é composto por três alvos de referência: alvo de melhoria criativa, alvo de referência cromática padrão, e alvo de balanceamento do branco. O alvo de referência cromática padrão possui 24 quadrados de valores cromáticos conhecidos, fabricados com elevado controle. A calibração é realizada capturando uma imagem deste alvo e processando-a no aplicativo associado (Figura 49). O aplicativo compara os valores cromáticos registrados pelo sensor da câmera com os valores nominais, gerando assim um perfil de correção de cor específico para aquele sensor. Para obter maior precisão, também é possível gerar um perfil de iluminante duplo, isto é, com base em duas imagens capturadas sob condições de iluminação distintas.

O processo de calibração de cor com o *XRite ColorChecker Passport* requer a captura de imagens no formato RAW (do termo em inglês para cru). Neste formato a imagem é capturada e armazenada sem nenhum ajuste ou processamento permanente. Não há perda de informação. Deste modo, a imagem armazena uma maior faixa dinâmica, o que também a torna mais adequada para o pós-processamento. Em função disto, optou-se por capturar todas as imagens no formato RAW.

Figura 49 – Aplicativo *XRite ColorChecker Passport*




Janela do aplicativo ColorChecker Passport: o realce em verde indica que o alvo de referência cromática padrão foi detectado.

Foram criados perfis de calibração de cor de iluminante duplo para cada uma das câmeras utilizadas, com o alvo sob a iluminação ambiente, predominantemente fluorescente, do LdSM, e com o mesmo sob a iluminação LED do sistema de aquisição. Todas as imagens capturadas foram processadas no *software Adobe Lightroom*, no qual se realizou a aplicação dos perfis de cor correspondentes, e a uniformização das imagens obtidas com as diferentes câmeras. Ao final do pós-processamento foram exportadas imagens no formato JPEG, usadas nas etapas subsequentes de reconstrução geométrica e de refletância.

Além disso, criou-se, com base nos valores nominais fornecidos pelo fabricante (Figura 50), uma versão virtual do alvo de referência cromática padrão, usado na

configuração da visualização 3D interativa para ajuste da iluminação e calibração das texturas. A estratégia de calibração de cor empregada, portanto, se estende da aquisição de imagens até a construção do cenário virtual para visualização 3D interativa.

Figura 50 – Valores nominais do *XRite ColorChecker Passport*



Nº	Nome	sRGB			CIE L*a*b*			Sistema Munsell	
		R	G	B	L*	a*	b*	Hue Value/ Chroma	
1	dark skin	115	82	68	39,986	13,555	14,059	3 YR	3,7 / 3,2
2	light skin	194	150	130	65,711	18,13	17,81	2,2 YR	6,47 / 4,1
3	blue sky	98	122	157	49,927	-4,88	-21,925	4,3 PB	4,95 / 5,5
4	foliage	87	108	67	43,139	-13,095	21,905	6,7 GY	4,2 / 4,1
5	blue flower	133	128	177	55,112	8,844	-25,399	9,7 PB	5,47 / 6,7
6	bluish green	103	189	170	70,719	-33,397	-0,199	2,5 BG	7 / 6
7	orange	214	126	44	62,661	36,067	57,096	5 YR	6 / 11
8	purplish blue	80	91	166	40,020	10,41	-45,964	7,5 PB	4 / 10,7
9	moderate red	193	90	99	51,124	48,239	16,248	2,5 R	5 / 10
10	purple	94	60	108	30,325	22,976	-21,587	5 P	3 / 7
11	yellow green	157	188	64	72,532	-23,709	57,255	5 GY	7,1 / 9,1
12	orange yellow	244	163	46	71,941	19,363	67,857	10 YR	7 / 10,5
13	blue	56	61	150	28,778	14,179	-50,297	7,5 PB	2,9 / 12,7
14	green	70	148	73	55,261	-38,342	31,37	0,25 G	5,4 / 8,65
15	red	175	54	60	42,101	53,378	28,19	5 R	4 / 12
16	yellow	231	199	31	81,733	4,039	79,819	5 Y	8 / 11,1
17	magenta	187	86	149	51,935	49,986	-14,574	2,5 RP	5 / 12
18	cyan	8	133	161	51,038	-28,631	-28,638	5 B	5 / 8
19	white (.05*)	243	243	242	96,539	-0,425	1,186	N	9,5 /
20	neutral 8 (.23*)	200	200	200	81,257	-0,638	-0,335	N	8 /
21	neutral 6.5 (.44*)	160	160	160	66,766	-0,734	-0,504	N	6,5 /
22	neutral 5 (.70*)	122	122	121	50,867	-0,153	-0,27	N	5 /
23	neutral 3.5 (1.05*)	85	85	85	35,656	-0,421	-1,231	N	3,5 /
24	black (1.50*)	52	52	52	20,461	-0,079	-0,973	N	2 /

O alvo de referência cromática virtual foi criado a partir dos valores RGB informados nesta tabela.

### 3.4 Aquisição de Imagens

O método de aquisição de aparência apresentado no presente trabalho é não-invasivo e não-destrutivo. No entanto, dada sua natureza experimental, optou-se por realizar ensaios com objetos desprovidos de elevado valor histórico ou financeiro. Para testar o funcionamento do sistema de aquisição e do processo proposto, foram selecionados dois artefatos de superfícies materiais distintas. Ambos adquiridos no Brique da Redenção, tradicional feira de antiguidades e artesanato de Porto Alegre.

Os artefatos selecionados foram identificados como “CPedra” e “Xixo”. O artefato CPedra, de autoria desconhecida, é uma estatueta em forma de coruja, de 155 mm de altura, esculpida em pedra-sabão. Sua superfície é predominantemente polida, contendo entalhes e imperfeições nos quais a pedra se apresenta mais rugosa. O segundo artefato, Xixo, é uma representação de coruja entalhada em madeira, com 120 mm de altura. Esta peça é de autoria do artesão gramadense de mesmo nome,

Xixo. Sua superfície é facetada, marcada pelo entalhe, e exibe uma rica variação de tons, proporcionada pelos veios da madeira. A Figura 51 apresenta um registro dos dois artefatos ao lado do alvo de referência cromática padrão.

**Figura 51 – Objetos selecionados para os ensaios**

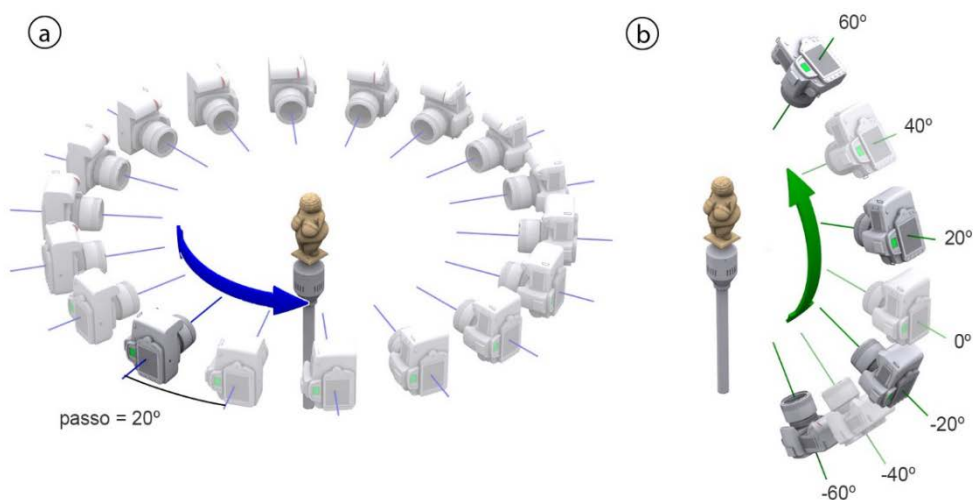


(a) Estatueta de pedra-sabão, CPedra, (b) coruja em madeira, Xixo, e (c) alvo de referência cromática.

Para a aquisição das imagens de diferentes pontos de vista, empregou-se uma estratégia de aquisição concêntrica, auxiliada por uma plataforma giratória. Duas variáveis devem ser consideradas neste tipo de estratégia: a distância angular entre os pontos de vista no eixo de rotação Z, também chamada de passo (Figura 52a), e a posição angular das câmeras no eixo de rotação Y (Figura 52b). Ambas as variáveis foram ensaiadas neste estudo.

Primeiramente, realizou-se um ensaio variando a posição angular da câmera de 5 em 5 graus no eixo de rotação Y, conforme as posições existentes no sistema de aquisição desenvolvido. O ensaio teve como objetivo verificar a influência desta variável sobre os efeitos da polarização linear. Tomando-se como referência o estudo apresentado por Ghosh et al. (2011), utilizou-se neste ensaio uma laranja como amostra de superfície. Laranjas, em geral, possuem formato quase esférico e comportamento de refletância misto, o que as tornam convenientes para este tipo de ensaio. Com os resultados obtidos determinou-se o intervalo angular aceitável, e a melhor distribuição das câmeras no eixo de rotação Y, para a aquisição de imagens.

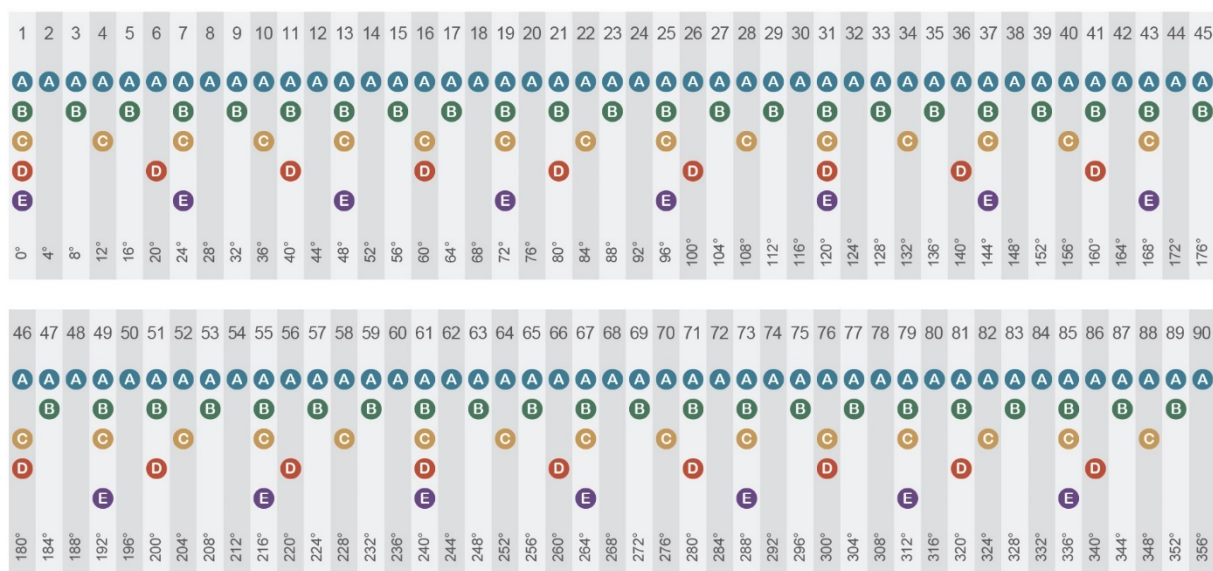
**Figura 52 – Variáveis para estratégia de aquisição convergente**



(a) Incremento do passo em torno do eixo de rotação Z, e (b) posições angulares no eixo de rotação Y.

A variação da distância angular no eixo de rotação Z, foi ensaiada buscando verificar a influência deste parâmetro sobre a reconstrução da geometria e da refletância dos artefatos. Para este propósito, realizou-se a aquisição de imagens com passo mínimo de 4 graus, resultando num total de 90 posições em torno do objeto, por câmera. Posteriormente, foram simuladas aquisições com passos maiores, de 8, 12, 20 e 24 graus, formando subconjuntos de imagens nos quais algumas posições da aquisição original foram omitidas, conforme apresentado na Figura 53.

**Figura 53 – Sequenciamento de passos.**



Passos de: (A) 4°, (B) 8°, (C) 12°, (D) 20° e (E) 24°.



Os parâmetros de exposição das câmeras foram ajustados com respeito ao alvo de referência cromática padrão, que foi posicionado no lugar do artefato no início da aquisição. Usou-se uma combinação de baixa sensibilidade ISO (100-200) e pequena abertura de diafragma ( $f/11$ -  $f/16$ ), de modo a reduzir a presença de ruído nas imagens e obter uma maior profundidade de campo. O tempo de exposição foi sincronizado com a velocidade de rotação do arco luminoso, de modo que cada imagem registrasse uma revolução completa do mesmo. A distância focal e o foco, foram ajustados manualmente, de acordo com cada artefato.

### 3.5 Reconstrução Geométrica

A partir das imagens capturadas, cromaticamente calibradas e processadas, realizou-se a reconstrução geométrica da superfície dos artefatos. A reconstrução se deu através do processamento fotogramétrico, utilizando o *software Agisoft Photoscan Pro*. Este é um *software* comercial cuja licença na modalidade profissional (*Pro*) é comercializada a US\$ 3499,00. Sua utilização neste estudo foi viabilizada pelo empréstimo de uma licença pertencente ao Laboratório de Pesquisas em Fotogrametria (LAFOTO) da UFRGS. Observa-se que a calibração geométrica do sistema desenvolvido não esteve no escopo do presente estudo.

Para otimizar o processo de reconstrução geométrica, fez-se uso de máscaras. A utilização de máscaras faz com que o *software* desconsidere parte da imagem durante o processamento, restringindo a detecção e triangulação de pontos à área delimitada. Como efeito, obtém-se uma redução no tempo de processamento, e evita-se a detecção de pontos irrelevantes ou equivocados localizados no plano de fundo da imagem. Este recurso faz-se especialmente necessário no presente estudo, devido ao fato de as câmeras se manterem estacionárias enquanto o artefato é girado pela plataforma. Nesta configuração, o plano de fundo permanece idêntico em todas as imagens, o que provocaria erros na etapa de alinhamento.

As máscaras foram criadas usando ferramentas de seleção e processamento de imagens do *software Adobe Photoshop*. Após determinar manualmente o melhor método para esta tarefa, criou-se um *script* para a automação deste processo, encontrado no Apêndice B deste trabalho. As máscaras resultantes, imagens em preto e branco representando a silhueta do artefato (Figura 54c), foram salvas em JPEG, para, posteriormente, serem importadas no *Agisoft Photoscan*.

Figura 54 – Delimitação por meio de máscaras



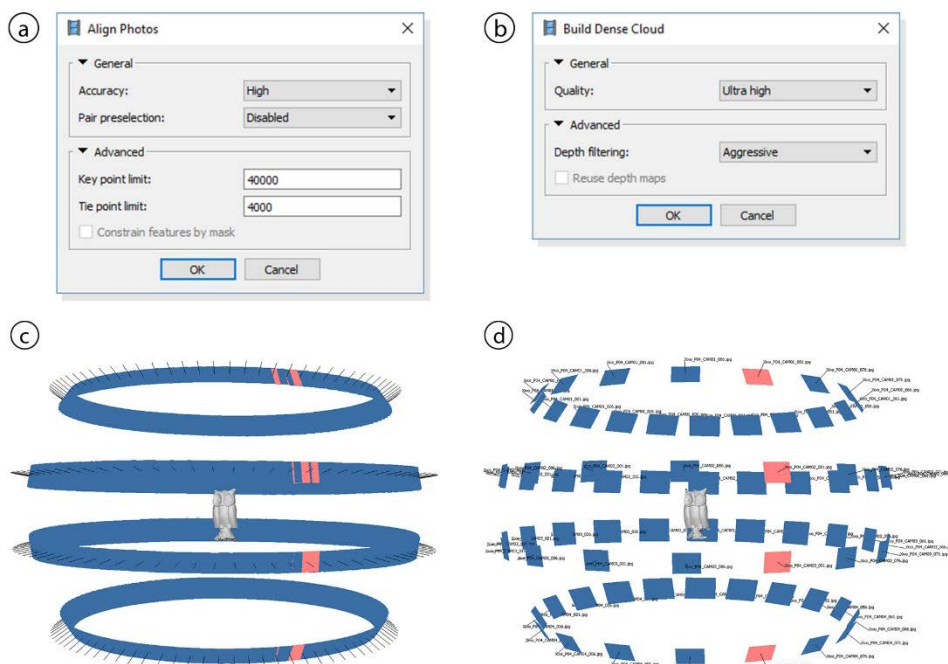
(a) A imagem do componente difuso, (b) de ambos os componentes, (c) máscara gerada, e (d) máscara aplicada sobre imagem do componente difuso.

Na etapa de reconstrução geométrica, utilizou-se as imagens obtidas em configuração perpendicular de polarização, nas quais apenas o componente difuso é representado (Figura 54a). Em todos os casos, realizou-se a fototriangulação, chamada de alinhamento das imagens (*Align Photos*) no software, na configuração de mais alta precisão (*Highest*), com os parâmetros de detecção de pontos nos valores padrão (Figura 55a). Como resultado dessa etapa obteve-se a orientação relativa das câmeras no espaço tridimensional, conforme a posição na qual cada imagem foi capturada (Figuras 55c e 55d).

Após o alinhamento das imagens, verificou-se, primeiramente, o resultado das diferentes configurações de qualidade de geração da nuvem de pontos densa. As configurações de qualidade estão relacionadas à proporção do redimensionamento aplicado às imagens antes do processamento da nuvem de pontos. As configurações *Lowest*, *Low*, *Medium*, *High* e *Ultra High*, correspondem, respectivamente, às razões de 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 e 1/1. Os demais parâmetros, referentes à geração da nuvem de pontos densa, foram mantidos em sua configuração padrão durante os ensaios de reconstrução geométrica (Figura 55b).

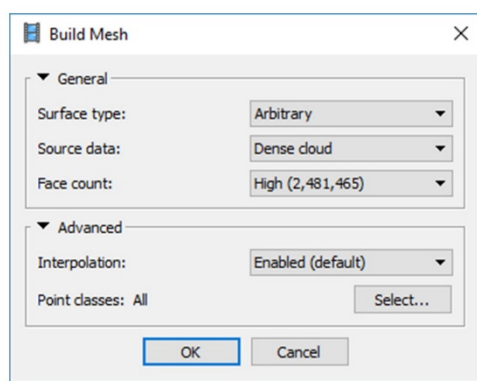
Em seguida, as nuvens de pontos geradas foram processadas para a construção de malhas poligonais (triangulares). Em todos os casos, o processamento foi realizado na pré-configuração de alta contagem de faces, com os demais parâmetros na opção padrão (Figura 56). Os modelos tridimensionais obtidos desta maneira foram comparados qualitativamente, de modo a determinar a qualidade mínima necessária para representação da forma geral dos artefatos.

**Figura 55 – Alinhamento das imagens e processamento da nuvem**



(a) Parâmetros para alinhamento das imagens, (b) parâmetros para processamento da nuvem de pontos densa, e resultado da fototriangulação das imagens para passo de (c) 4 graus e (d) 20 graus.

**Figura 56 – Parâmetros para o processamento da malha poligonal**



O número exato de faces na configuração High varia conforme o tamanho da nuvem de pontos densa.

Após esta primeira análise comparativa, foram realizados ensaios para determinar a influência da variação do tamanho do passo sobre a reconstrução geométrica. Conforme já explicitado na Figura 53, foram simuladas reconstruções geométricas para passos de 8, 12, 20 e 24 graus, a partir dos subconjuntos de imagens. O processo de reconstrução geométrica descrito foi repetido para cada subconjunto de imagens. Os modelos gerados desta maneira foram submetidos a uma análise de desvio dimensional, que os comparou a um modelo de referência.

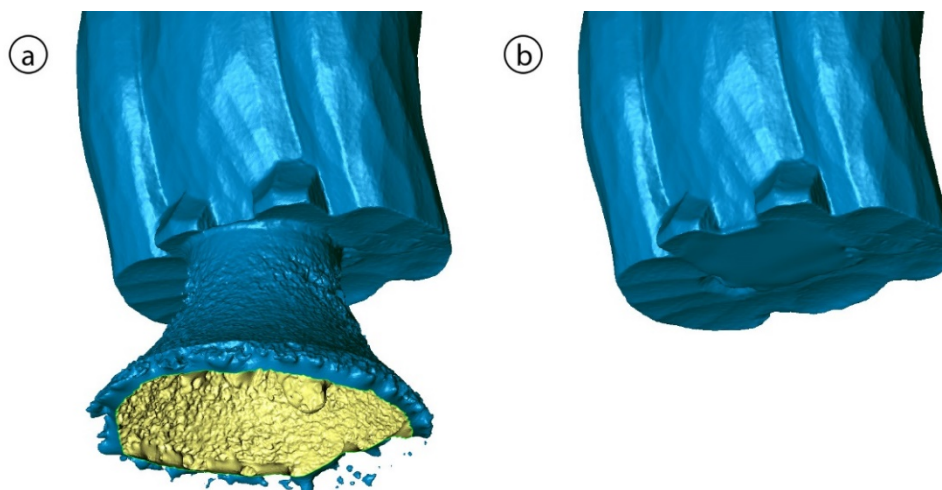


O modelo de referência também foi obtido por meio de digitalização tridimensional. No entanto, utilizou-se um equipamento CNC híbrido, *Digimill 3D*, equipado com um cabeçote de digitalização de alta precisão, *Optimet ConoProbe 1000*. Para cada artefato, registrou-se uma nuvem de pontos de uma vista representativa, que posteriormente foi convertida em malha poligonal. As varreduras foram realizadas na resolução de 0,1 mm X e Y com a lente 150 mm, obtendo precisão em Z de 0,035 mm.

Como os modelos obtidos no *Agisoft Photoscan* foram gerados sem indicação de escala, fez-se necessário redimensionar e alinhá-los ao modelo de referência. Para isto utilizou-se o *software CloudCompare*, no qual se realizou um registro global com ajuste de escala. A matriz de transformação gerada durante este processo foi salva, para facilitar, posteriormente, a transferência de modelos entre o *Agisoft Photoscan* e os demais *softwares*. Em seguida, importou-se todos os modelos, em escala, no *Geomagic Qualify*, onde se efetuou a análise de desvio dimensional.

Após os ensaios de desvio dimensional, selecionou-se, para cada artefato, o modelo com menor desvio, e efetuou-se a otimização da malha poligonal. Esta otimização foi composta por duas etapas. Primeiramente, fez-se necessário remover partes da geometria da plataforma giratória, digitalizada junto com o artefato. Também se cuidou do fechamento de aberturas e tratamento de outras irregularidades encontradas na malha (Figura 57).

**Figura 57 – Remoção de parte da geometria da plataforma giratória**



A geometria da plataforma giratória (a), digitalizada junto com o artefato, é excluída e a abertura na malha é fechada (b).

Na etapa seguinte efetuou-se a retopologia da malha poligonal corrigida, realizada de forma automática no *software Autodesk Mudbox*. Para criação dessa malha, estabeleceu-se 32.000 como meta de contagem de faces. Observa-se que este valor serve apenas de referência, de modo que o número de faces resultantes da retopologia tende a ser um número próximo, podendo variar para mais ou para menos. Após a retopologia, o modelo otimizado foi submetido à matriz de transformação invertida e importado no *Agisoft Photoscan*, onde se deu sequência com a reconstrução da refletância.

### **3.6 Reconstrução da Refletância**

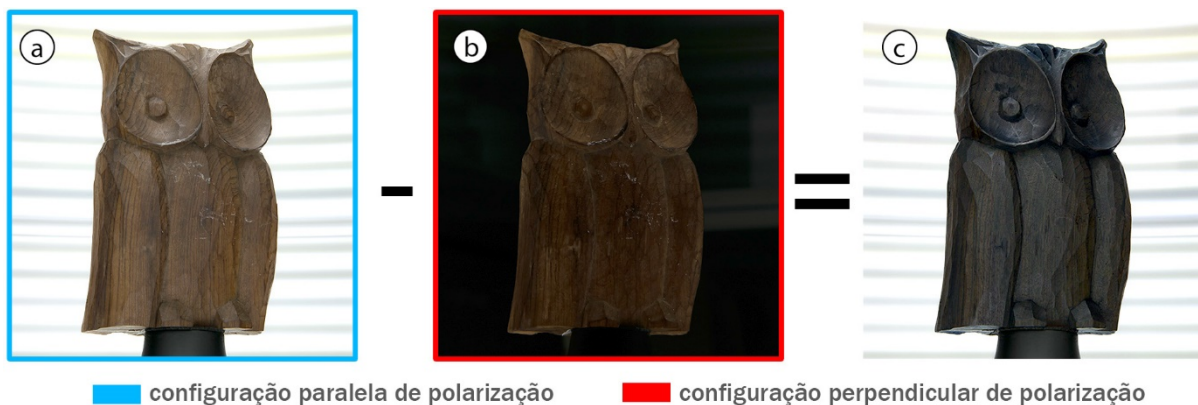
Neste estudo, a aquisição de refletância se dá por meio da aquisição de imagens de luz polarizada, que permitem separar os componentes de refletância difuso e especular da superfície do artefato fotografado. Neste contexto, a reconstrução da refletância é compreendida como o processo através do qual os dados de refletância, registrados nas imagens, são projetados sobre a superfície da geometria reconstruída, isto é, mapeados. Como resultado, obtém-se um conjunto de mapas de textura que serão utilizados na renderização do artefato virtual.

Por conveniência, optou-se por usar o mapeamento UV automático, realizado no próprio *Agisoft Photoscan*, durante a etapa de projeção de textura. Para isso realizou-se uma primeira projeção na pré-configuração de mapeamento UV genérico. Nas projeções de textura subsequentes, utilizou-se a opção *Keep UV*, que preserva o mapeamento UV existente.

Para o mapeamento do componente de refletância difuso, foram utilizadas as imagens obtidas em configuração perpendicular de polarização (Figura 58b), que também deram origem aos modelos tridimensionais. Para poder mapear o componente especular, fez-se necessário um processamento prévio das imagens adquiridas em configuração paralela de polarização. Uma vez que estas contêm ambos os componentes (Figura 58a), foi preciso isolar o componente especular. Isto foi realizado subtraindo o primeiro conjunto de imagens, de polarização perpendicular, do segundo conjunto, de polarização paralela, conforme demonstrado na Figura 58. A imagem resultante (Figura 58c) é, então, convertida em escala de cinza, armazenando em forma de gradiente a distribuição de intensidade do componente especular da superfície. O procedimento de subtração de todo o conjunto de imagens foi

automatizado através da criação de um *script* para *Photoshop*, encontrado no Apêndice B deste trabalho.

**Figura 58 – Isolamento do componente especular**



(a) Imagem de polarização paralela, (b) imagem de polarização perpendicular, e (c) imagem do componente especular isolado.

Foram realizados dois ensaios referentes à etapa de reconstrução da refletância. O primeiro tratou de investigar os diferentes modos de projeção e combinação de textura (*blending modes*) oferecidos pelo *Agisoft Photoscan*. Para isso, realizou-se o mapeamento de ambos os componentes de refletância a partir do conjunto completo de imagens, obtidas com passo de 4 graus, usando cada um dos cinco modos disponíveis: *mosaic*, *average*, *max intensity*, *min intensity*, e *disabled*. Os resultados obtidos foram analisados qualitativamente, a fim de determinar o modo de projeção mais adequado para cada componente de refletância.

O segundo ensaio realizado verificou a influência do tamanho do passo de aquisição sobre o mapa de textura projetado. Para isso, projetou-se ambos os componentes para cada subconjunto de imagens, simulando as diferentes configurações de tamanho de passo explicitadas na Figura 53. O modo de projeção utilizado para cada componente foi aquele considerado mais adequado no ensaio anterior.

Ao final destes ensaios, importou-se o modelo poligonal e os mapas de textura de cada artefato no *software* de texturização *Substance Painter*. Junto a estes dados importou-se também o alvo de referência cromática virtual, utilizado para calibração de cor e ajuste de nível das texturas. A partir dos dados de refletância difusa, gerou-se, ajustando a exposição, o mapa de cor base (*albedo*). O mapa contendo o componente de refletância especular foi usado como ponto de partida para a criação

de um mapa de rugosidade (*roughness*). Foram ensaiadas diversas configurações dos parâmetros, até obter uma reconstrução fisicamente aceitável da aparência de cada artefato. Ao final, exportou-se o conjunto de texturas para renderização baseada em física, incluindo mapa de albedo, mapa de normal, mapa de rugosidade e mapa de oclusão de ambiente.

### 3.7 Validação dos Resultados

Os resultados do presente estudo foram avaliados em três aspectos. Primeiramente, avaliou-se os dados obtidos com o sistema de aquisição e o método proposto, isso é, as imagens capturadas empregando princípios de polarização da luz, os modelos geométricos reconstruídos, e os mapas de textura obtidos a partir da projeção das imagens sobre a geometria.

O segundo aspecto avaliado diz respeito ao processo. Nessa avaliação, levou-se em conta as etapas de aquisição de imagens, de reconstrução geométrica, de reconstrução da refletância e de texturização para renderização baseada em física. Considerou-se o tempo despendido em cada etapa, o volume de dados gerado ao longo do processo, bem como a complexidade de execução de cada tarefa. A partir dessa avaliação foi possível realizar análises de tempo x resultado, fornecendo bases para a definição de parâmetros de aquisição e processamento.

O último aspecto considerado diz respeito ao produto visual gerado com o método proposto. Isso é, a aparência reconstruída do artefato virtual, visualizado de forma interativa empregando a renderização baseada em física. Para esse propósito, realizou-se uma análise comparativa, contrapondo os resultados deste estudo com o de dois métodos de digitalização convencional. Realizou-se a digitalização dos artefatos CPedra e Xixo por Fotogrametria convencional, a qual foi realizada utilizando a plataforma giratória e as câmeras do sistema desenvolvido, porém, sob iluminação natural, sem a separação dos componentes de refletância. Os mesmos artefatos também foram digitalizados com o uso do escâner 3D *Artec EVA* (Figura 7b). Uma vez que o cerne deste estudo é a aquisição da textura visual, optou-se por desconsiderar os modelos geométricos obtidos por esses métodos. Nesse sentido, projetou-se, em ambos os casos, a textura capturada sobre o modelo tridimensional obtido com o método proposto, resultando em três versões de cada artefato. Em um ambiente

virtual de PBR, submeteu-se esses modelos a diferentes condições de luz incidente, verificando e comparando as mudanças na representação da aparência.

Ao final dessa análise comparativa, enviaram-se os artefatos virtuais, gerados com o método proposto, para a plataforma de visualização tridimensional interativa, *Sketchfab*. Cabe destacar que essa plataforma tem suporte para PBR, atendendo aos interesses deste estudo. Novamente, empregou-se o alvo de referência cromática virtual para calibrar os parâmetros de iluminação e de exibição. No *Sketchfab*, os modelos foram submetidos a diferentes condições de iluminação, reproduzidas a partir de imagens HDRI capturadas de ambientes reais. Esse tipo de iluminação proporciona um cenário mais complexo, com luz incidente de diferentes direções, e, conseqüentemente, mais próximo da realidade. Essa visualização permitiu verificar e avaliar a melhoria visual proporcionada pela aquisição de refletância aliada à renderização baseada em física.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente estudo traz como resultado o desenvolvimento de um sistema acessível de aquisição de aparência, baseado na separação dos componentes de refletância por meio da polarização da luz, e no uso de técnicas de texturização para PBR. A seguir, apresenta-se detalhadamente o sistema desenvolvido, bem como os ensaios realizados, que permitiram verificar a influência das variáveis de aquisição de imagens sobre as etapas de reconstrução geométrica e de refletância. Também é realizada uma discussão sobre o método proposto, fornecendo, quando possível, diretrizes para a escolha de parâmetros e aprimoramento dos resultados.

O estudo realizado possibilitou uma maior compreensão dos fenômenos explorados, assim como do processo de aquisição geométrica e de refletância como um todo. Os resultados demonstram a viabilidade de implementação de estratégias de aquisição de aparência a um baixo custo, e fornecem instruções para sua realização. A análise comparativa com técnicas de digitalização convencionais, realizada ao final, evidencia as vantagens oferecidas pela aquisição de aparência com o método proposto.

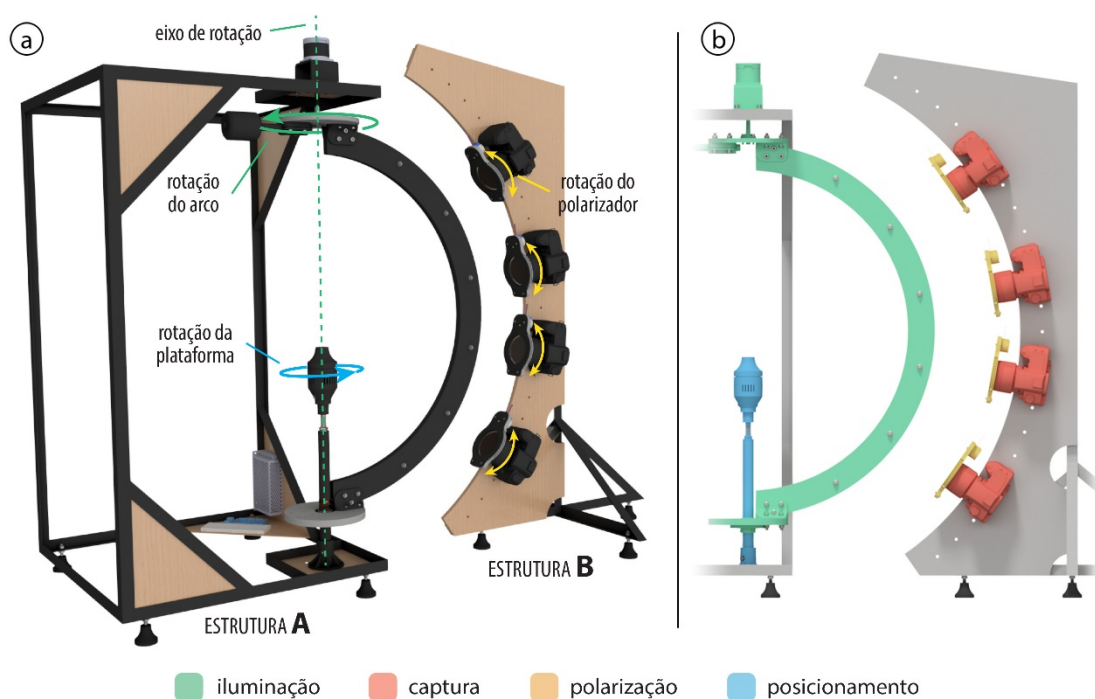
### 4.1 Sistema de Aquisição

O sistema de aquisição desenvolvido se divide em duas estruturas (Figura 59a). A primeira, Estrutura A, concentra as funções de posicionamento e iluminação do artefato a ser digitalizado, enquanto a segunda, Estrutura B, tem como função o posicionamento e a fixação das câmeras fotográficas. Os primeiros desenhos de configuração do sistema, conforme mostra a Figura 48, previam a integração de todas as funções em uma estrutura única. Após uma análise mais profunda das funções, optou-se pela separação em duas estruturas. Essa decisão teve como objetivo facilitar o transporte do sistema, e isolar as câmeras fotográficas da vibração provocada pelos atuadores contidos nos componentes de posicionamento e iluminação.

A Estrutura A possui uma base de 60 x 60 cm, e 110 cm de altura. A Estrutura B possui a mesma altura, com base de 45 x 45 cm. Ambas as estruturas foram confeccionadas em cantoneiras de aço de 1 polegada, que lhes proporcionam rigidez e estabilidade. Para sua confecção, contrataram-se os serviços de uma serralheria local, especializada em grades e portões. As estruturas entregues apresentaram desvios dimensionais acima do esperado, mas compreendeu-se que sua fabricação

constituía uma tarefa fora do trabalho habitual dos profissionais contratados. Apesar de ter sido possível compensar os desvios durante a montagem, é oportuno estudar alternativas de maior precisão para a confecção das estruturas. Ainda neste sentido, ambas as estruturas foram equipadas com pés amortecedores de vibração e impacto, Vibra-Stop Micro I, que ajudaram no nivelamento e lhes proporcionou maior estabilidade.

**Figura 59 – Sistema de aquisição desenvolvido**



(a) Renderização do sistema de aquisição, e (b) vista lateral com destaque dos componentes chave.

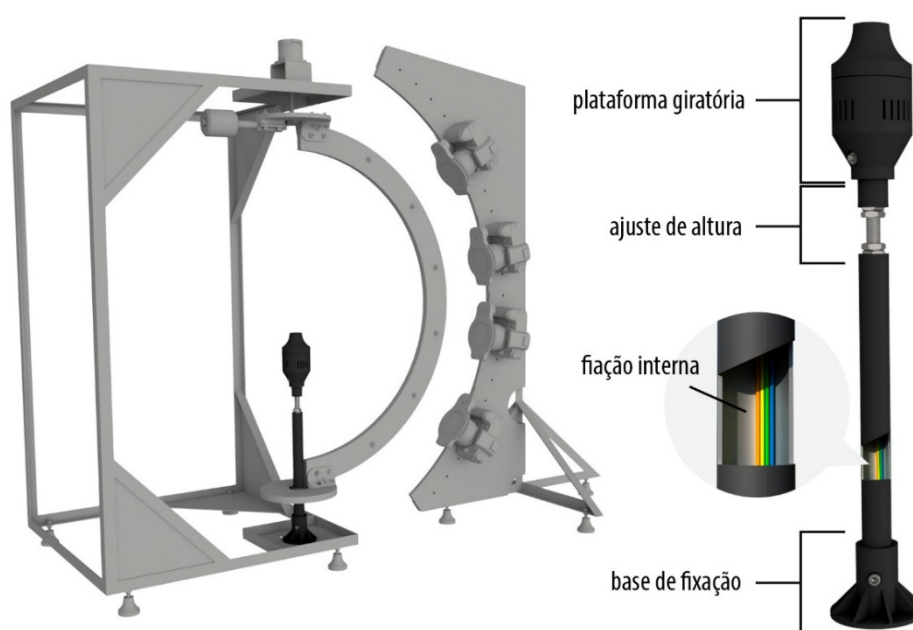
O sistema de aquisição é organizado em quatro módulos chave, destacados com cores na Figura 59b: o módulo de posicionamento, composto pela plataforma giratória e o sistema de ajuste de altura (azul), o módulo de iluminação, composto pelo arco luminoso giratório (verde), o módulo de captura, composto pelas câmeras fotográficas (vermelho), e o módulo de polarização, composto por alternadores de polarização acoplados à cada uma delas (amarelo). Todos os módulos, com exceção do das câmeras fotográficas, são fruto de pesquisa e desenvolvimento iniciados com o presente estudo. A seguir, é apresentada uma descrição mais aprofundada do funcionamento de cada um desses módulos.



#### 4.1.1 Módulo de Posicionamento

O módulo de posicionamento do artefato localiza-se em um dos cantos da base da Estrutura A (Figura 60). Ele é composto por uma base de fixação, que o prende à estrutura, um sistema de ajuste manual de altura e uma plataforma giratória. O tubo de aço de 1 polegada, localizado entre a base de fixação e o ajuste de altura, permite a passagem da fiação da plataforma giratória, e, ao mesmo tempo, serve de eixo de rotação para o arco luminoso.

Figura 60 – Visão geral do módulo de posicionamento

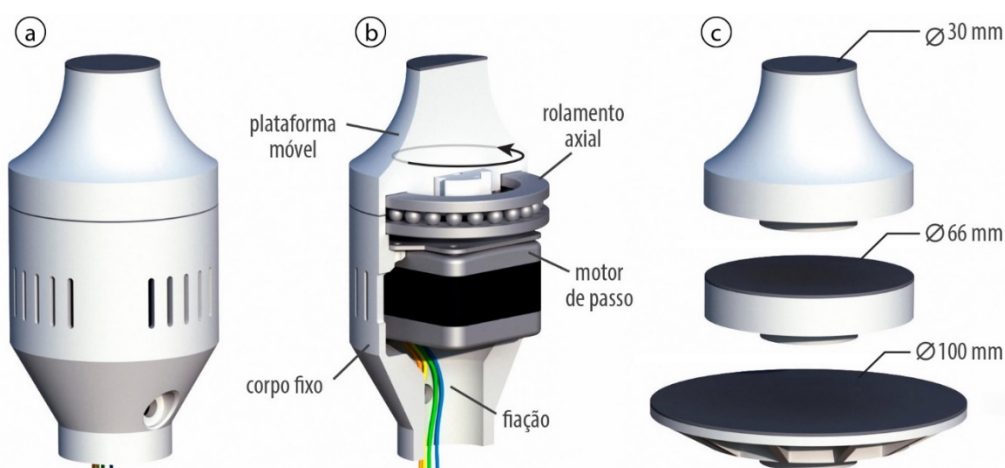


O sistema de ajuste de altura manual utiliza um segmento de *niple* de 20 cm e quatro porcas. O *niple*, peça comumente utilizada na montagem de luminárias, consiste em um tubo roscado, que, assim como o tubo de aço, permite a passagem da fiação da plataforma giratória. O ajuste de altura é realizado afrouxando uma das porcas e girando a parte superior do sistema até atingir a altura desejada. Ao final, para manter a plataforma na posição, é preciso apertar a mesma porca.

O ajuste de altura garante o posicionamento ao centro da esfera de luz formada pelo arco luminoso, e deve ser realizado toda vez que o artefato seguinte apresentar uma grande diferença de altura (acima de 1 cm). Em virtude disso, recomenda-se a análise prévia, e o agrupamento de artefatos de dimensões próximas.

A plataforma giratória, no extremo superior do módulo de posicionamento, é composta por um corpo e um elemento móvel intercambiável (Figura 61). Ela possui formato cilíndrico, e foi desenvolvida para ser uma peça de dimensões discretas, reduzindo ao máximo a oclusão e a projeção de sombras sobre o artefato. O corpo fixo possui diâmetro de 66 mm, e abriga um motor de passo NEMA 17 com torque de 3 kgf em seu interior. Esse motor opera, por padrão, a 200 passos por revolução, o que lhe confere uma resolução nativa de 1,8 graus. Usando-o, no entanto, na configuração de micropassos é possível alcançar resoluções ainda menores, de até 0,056 graus.

**Figura 61 – Detalhe da plataforma giratória**



(a) Plataforma fechada, (b) perspectiva com componentes internos, e (c) elemento intercambiáveis com plataformas com diâmetro de 30 mm, 66 mm e 100 mm.

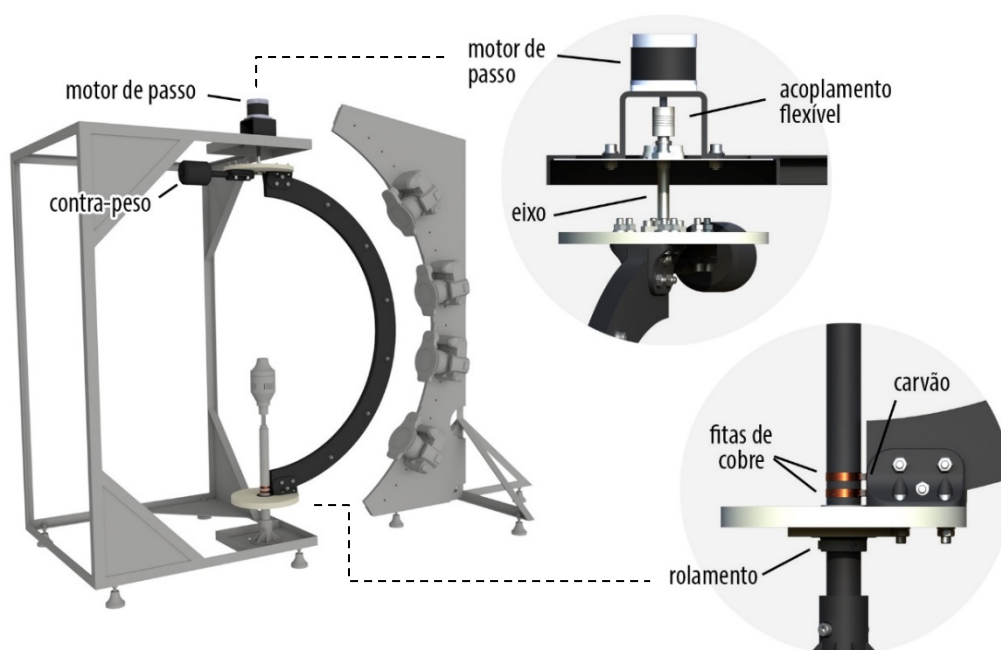
Acoplado ao eixo do motor, sobre um rolamento axial, localiza-se o elemento móvel sobre qual o artefato é posicionado, isso é, a plataforma propriamente dita. Visando possibilitar o posicionamento seguro do artefato sobre a menor área possível, desenvolveu-se um sistema intercambiável, com plataformas de 30 mm, 66 mm e 100 mm de diâmetro. Observa-se que, o uso de plataformas muito maiores que a base do artefato pode resultar na oclusão do artefato, dificultando, desta maneira, a captura de imagens, e reduzindo a eficiência do sistema de iluminação.

#### **4.1.2 Módulo de Iluminação**

O módulo de iluminação desenvolvido foi baseado no sistema de iluminação da *Light Stage 2* (HAWKINS et al., 2004), e no equipamento apresentado por

Tunwattanapong et al. (2013). O módulo, de forma semelhante às referências, consiste numa estrutura giratória em formato de arco (Figura 62), equipada com fontes luminosas. Quando em revolução, o arco luminoso proporciona a incidência da luz de todas as direções. Realizando-se uma captura fotográfica de longa exposição do sistema, obtém-se, como efeito, uma grande esfera luminosa. Apesar dessas semelhanças, o módulo de iluminação desenvolvido se distingue das referências por empregar o princípio do arco luminoso giratório em conjunto com filtros polarizadores lineares, aplicados diretamente sobre o mesmo.

**Figura 62 – Visão geral do módulo de iluminação**

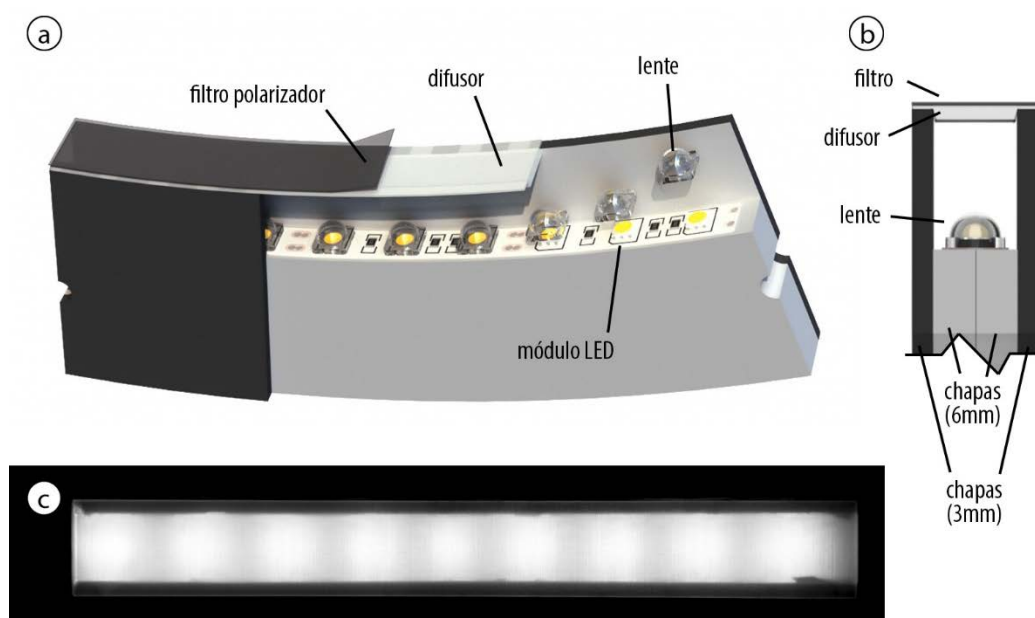


O arco luminoso tem seu eixo de rotação alinhado com o módulo de posicionamento. Na parte superior da Estrutura A, localiza-se um motor de passo NEMA 23, de 10 kgf, responsável pela rotação do arco. Um acoplamento flexível, que une o eixo do motor com o eixo superior do arco, foi utilizado para amenizar desvios de alinhamento durante a operação.

A estrutura em arco é afixada, em ambas as extremidades, a discos de 200 mm de diâmetro. No disco superior afixou-se ainda um contrapeso, na posição oposta ao arco, que ajuda na redução de vibração do sistema. O disco inferior encontra-se apoiado sobre um rolamento, fixado por parafusos ao tubo de aço do módulo de posicionamento, o que permite a propagação do movimento de rotação em torno do eixo.

A estrutura em arco possui raio externo de 420 mm, e é composta por quatro chapas de fibra de média densidade (MDF, do inglês *Medium Density Fiberboard*), de 3 mm e 6 mm de espessura, cortadas a laser. A estrutura foi projetada de tal maneira, que as duas chapas internas (6mm) formam uma canaleta, na qual se instalou uma fita LED que percorre toda a extensão do arco (Figura 63). Essa fita possui um total de 69 unidades LED (SMD 5050), cada qual equipada com uma lente que concentra a emissão em um cone de 30 graus. Um difusor acrílico, fabricado sob medida por meio de técnicas de gravação a laser de múltiplas camadas (SOARES, 2017), recobre a canaleta e auxilia na difusão dos focos individuais de luz (Figura 63c). Por último, sobre o difusor acrílico, aplicou-se uma película polarizadora linear em orientação horizontal.

**Figura 63 – Detalhe do arco luminoso**



(a) Perspectiva com corte, (b) vista lateral em corte, e (c) arco aceso visto de topo.

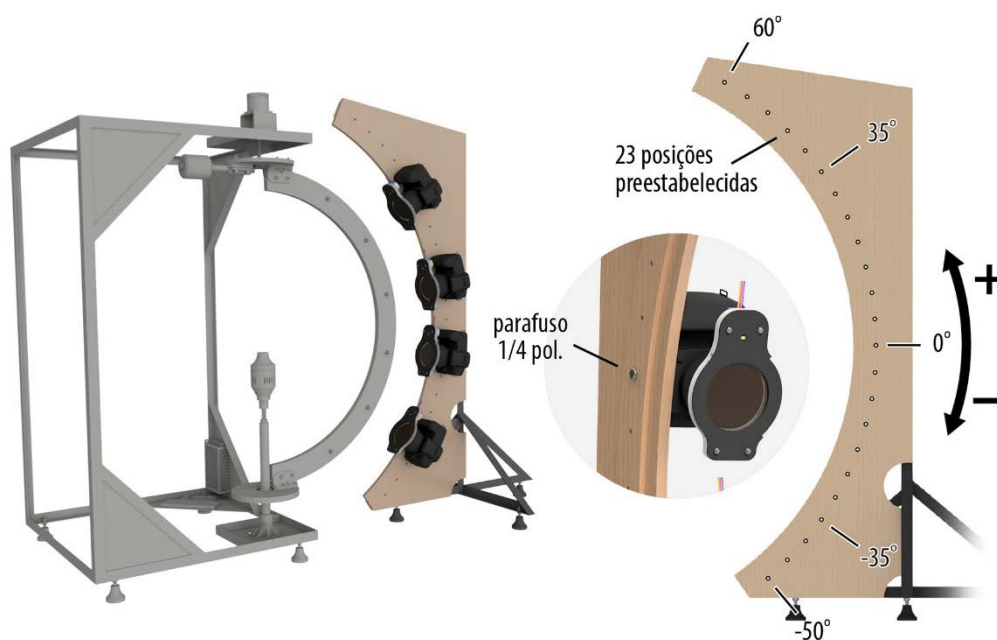
Durante o desenvolvimento considerou-se a fabricação do arco em alumínio, que além de maior rigidez e durabilidade, auxiliaria na dissipação térmica dos componentes eletrônicos embutidos. Esta alternativa, no entanto, foi descartada por não haver acesso ao equipamento e material necessário. Projetos iniciais também previam um arco com raio de 500 mm. As dimensões, no entanto, tiveram que ser adaptadas à máquina de corte a laser disponível durante o período de desenvolvimento, com área útil de 900x600 mm.

Um dos desafios enfrentados no desenvolvimento deste módulo foi a alimentação elétrica da fita de LED com o arco em revolução. Qualquer utilização de fiação comum resultaria no enrolamento dos fios em torno do eixo. Anéis coletores encontrados no mercado, por outro lado, não se adequariam à configuração do sistema. A solução encontrada foi aplicar um revestimento isolante no tubo de aço, e criar duas pistas condutivas com fita adesiva de cobre (Figura 62). A fiação usada para alimentação das pistas condutivas, tal qual a fiação da plataforma giratória, foi passada por dentro do tubo de aço. Na extremidade inferior do arco instalou-se duas escovas de furadeira (carvão) que, por meio de molas, pressionam seu elemento condutivo contra as pistas de cobre durante a rotação.

#### 4.1.3 Módulo de captura e módulo de polarização

O módulo de captura do sistema desenvolvido consiste em quatro câmeras fotográficas DSLR, modelo D90 da Nikon, operadas remotamente. As câmeras são afixadas a posições preestabelecidas da Estrutura B por meio de parafusos de  $\frac{1}{4}$  de polegada, padrão utilizados em tripés. A Estrutura B possui 23 posições de fixação distribuídas em arco, com espaçamento angular de 5 graus, cobrindo um intervalo de 60 a -50 graus (Figura 64). Através de ensaios apresentados no Item 4.2.1 foi possível determinar as posições de fixação mais adequadas para a aquisição de imagens.

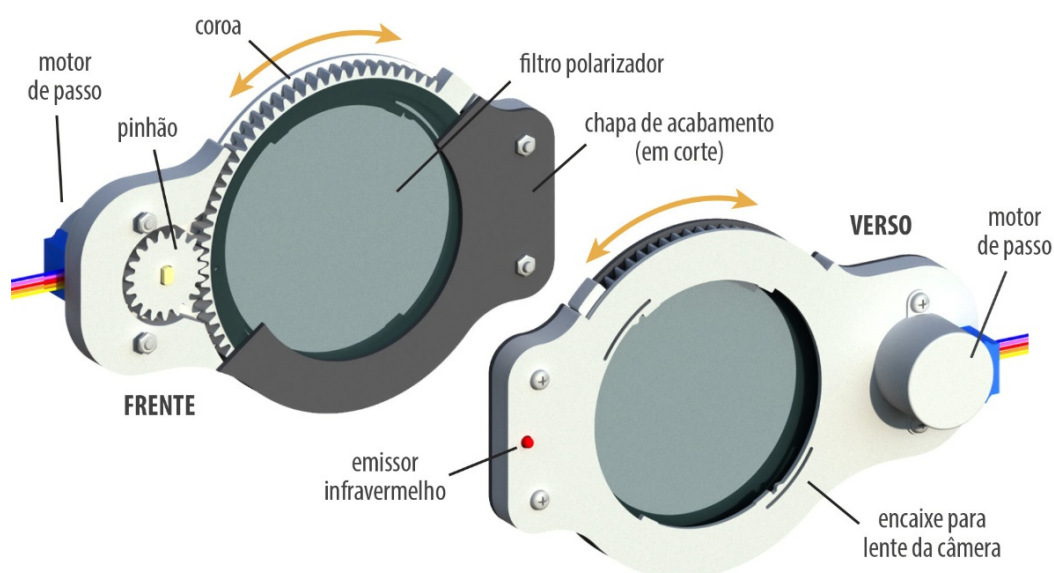
Figura 64 – Visão geral dos módulos de captura e polarização



Para obter os melhores resultados na aquisição de imagens, é preciso que as Estruturas A e B estejam posicionadas de modo que o arco formado pelas posições de fixação esteja concêntrico com o arco luminoso. Após esse ajuste inicial, também se faz necessário acertar a orientação das câmeras, apontando cada uma delas para o centro da esfera formada pelo arco luminoso. A orientação é realizada de forma manual, e mostrou-se um tanto trabalhosa durante os ensaios. Em consequência disso, recomenda-se para estudos futuros o desenvolvimento de um sistema de fixação com limitação de orientação, dispensando o ajuste posterior.

O módulo de polarização consiste num dispositivo alternador de polarização acoplado à lente de cada câmera, que, em conjunto com o filtro polarizador do arco luminoso, possibilita a aquisição de imagens em diferentes configurações de polarização. O acoplamento à lente se dá por meio do sistema de encaixe preexistente, usado, normalmente, para acoplar para-sóis e outros acessórios. Para a reprodução do sistema de encaixe, digitalizou-se o para-sol da lente em um escâner 2D de mesa. O desenho extraído foi inserido no projeto do dispositivo, que em sua face frontal e traseira possui chapas de acrílico de 2 mm cortadas a laser (Figura 65). Cada alternador de polarização possui ainda um emissor infravermelho em seu verso, posicionado na altura do receptor infravermelho das câmeras. Esse emissor é usado para o acionamento remoto.

**Figura 65 – Detalhe do alternador de polarização**





Cada alternador de polarização possui um motor de passo afixado em seu verso, que move um conjunto de pinhão e coroa, fabricado por impressão 3D, contido no interior do dispositivo (Figura 65). O pinhão e a coroa foram projetados em uma razão de 4 para 1, de modo que uma rotação completa do pinhão resulta em uma rotação de 90 graus da coroa. Essa é concêntrica à lente, e foi modificada em dois aspectos: vazou-se a parte central para permitir a passagem da luz, e adicionou-se um elemento limitador, que impede sua rotação para além da posição desejada (Figura 66). A coroa possui ainda marcações que auxiliam na aplicação do filtro polarizador linear, que é colado sobre a mesma. Invertendo-se o sentido de rotação do motor de passo é possível alternar entre a orientação horizontal e vertical do filtro polarizador.

**Figura 66 – Alternador de polarização em funcionamento**



As linhas vermelhas contidas na figura são meramente ilustrativas.

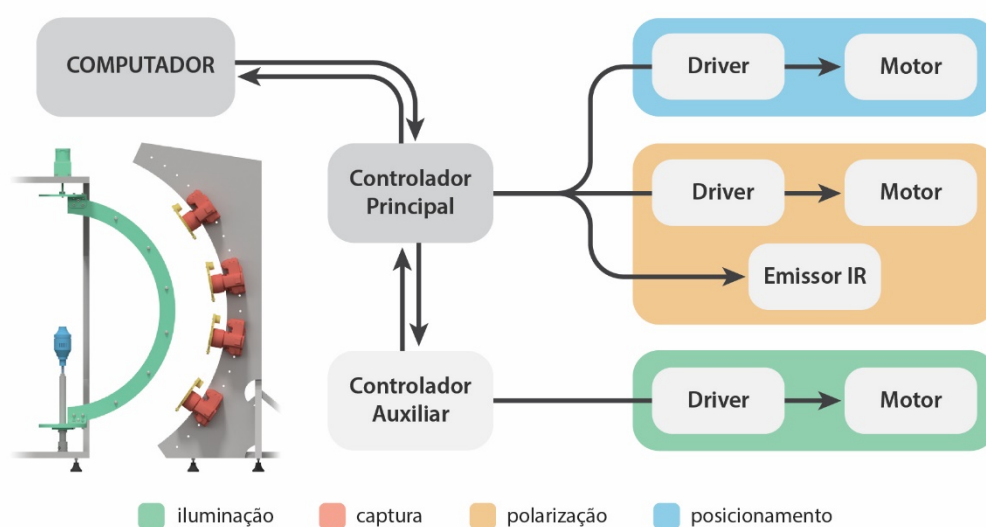
#### 4.1.4 Automação do sistema

O sistema de aquisição desenvolvido possui dois microcontroladores *Arduino*, responsáveis pela operação dos módulos durante a aquisição de imagens. O microcontrolador principal, um *Arduino Mega*, controla o funcionamento dos componentes do módulo de posicionamento e do módulo de polarização. Além disso, ele se comunica com o microcontrolador auxiliar, um *Arduino Nano*, enviando instruções para operação do módulo de iluminação (Figura 67).



Ambos os controladores estão localizados na base da Estrutura A, assim como a fonte que alimenta todo o sistema. As Estruturas A e B são interligadas por um cabo de energia e um cabo de rede de 8 vias, usado para a transmissão dos sinais lógicos necessários para operação dos motores de passo e dos emissores LED do módulo de polarização. Na base da Estrutura B instalou-se uma placa de circuito, a partir da qual a energia e os sinais lógicos são distribuídas aos alternadores de polarização. Uma representação mais detalhada do circuito eletrônico pode ser encontrada no Apêndice A do presente trabalho.

**Figura 67 – Desenho esquemático da automação do sistema**

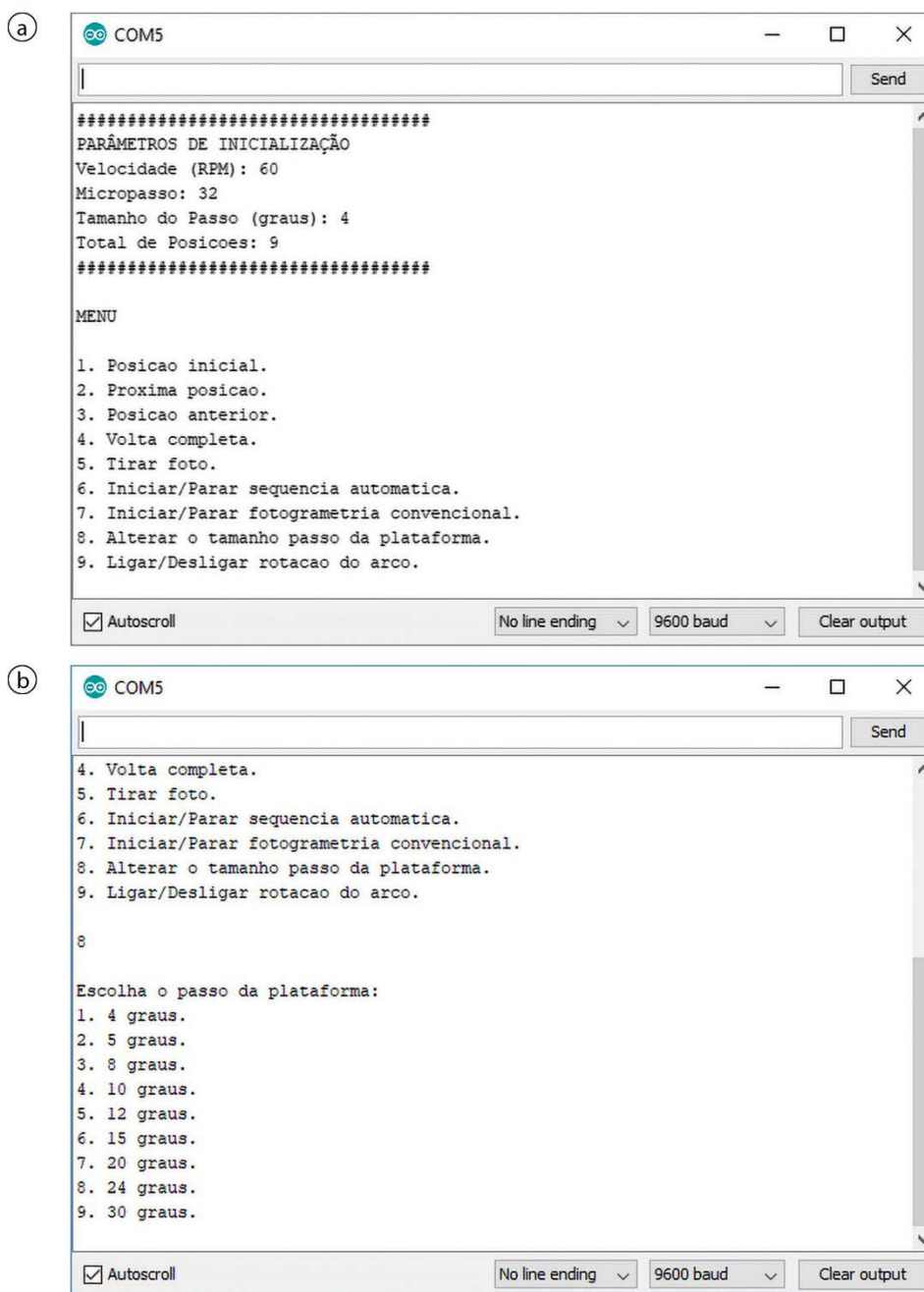


O microcontrolador principal, assim como as câmeras, conecta-se por USB a um computador, usado para o ajuste dos parâmetros, monitoramento da aquisição, e transferência dos dados. O ajuste dos parâmetros do sistema de aquisição é realizado através da interface de linha de comando do ambiente integrado de desenvolvimento (IDE) do *Arduino* (Figura 68a). A navegação é realizada inserindo, com auxílio do teclado, o número correspondente à opção desejada. De acordo com o item escolhido, são exibidas opções adicionais ou é iniciado o funcionamento dos componentes (Figura 68b).

A programação desenvolvida para sua operação permite ajustar o tamanho do passo da plataforma giratória ( $4^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $24^\circ$ ) e a velocidade de rotação do arco luminoso (60 rpm, 30 rpm e 20 rpm). Além disso foram implementados diferentes modos de operação: o modo manual, no qual cada etapa da sequência de aquisição é iniciada manualmente; o modo automático, no qual o sistema funciona de forma

autônoma até a conclusão da aquisição; e o modo de aquisição para Fotogrametria convencional, que não faz uso dos alternadores de polarização. Este último foi implementado para a realização do ensaio comparativo apresentado no item 4.5 do presente trabalho.

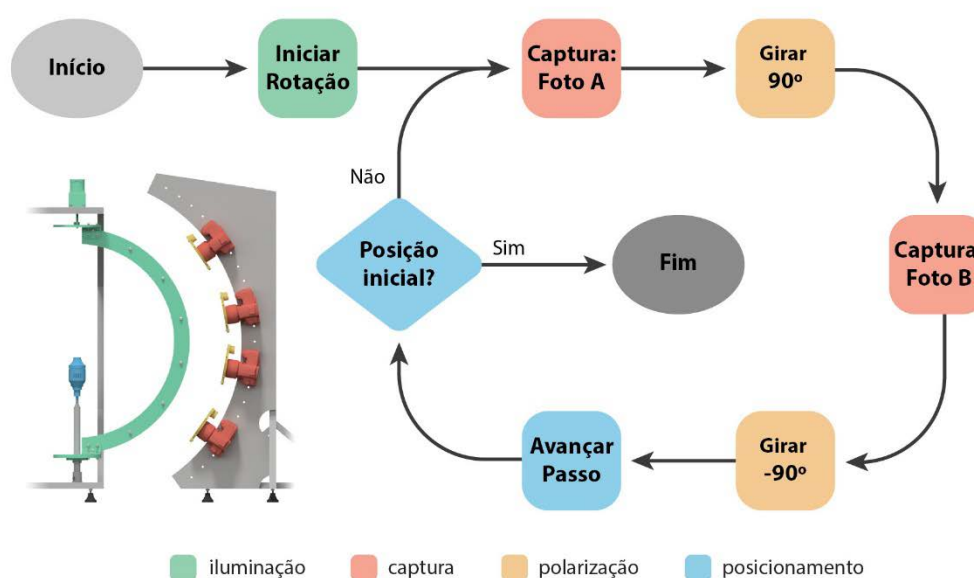
**Figura 68 - Interface de controle do sistema de aquisição**



(a) Interface de controle com menu após inicialização do sistema, e (b) menu de tamanho de passo exibido após escolher a opção 8 no menu anterior.

No modo de funcionamento automático o operador apenas precisa dar o comando de início, e a sequência de aquisição de imagens obedecerá às etapas apresentadas no fluxograma da Figura 69. Para cada posição da plataforma giratória serão adquiridas duas imagens, uma em configuração paralela de polarização e outra em configuração perpendicular. A sequência será concluída quando o artefato retornar à posição inicial da plataforma giratória. O número de vezes que esta sequência será repetida é determinado pelo tamanho do passo selecionado.

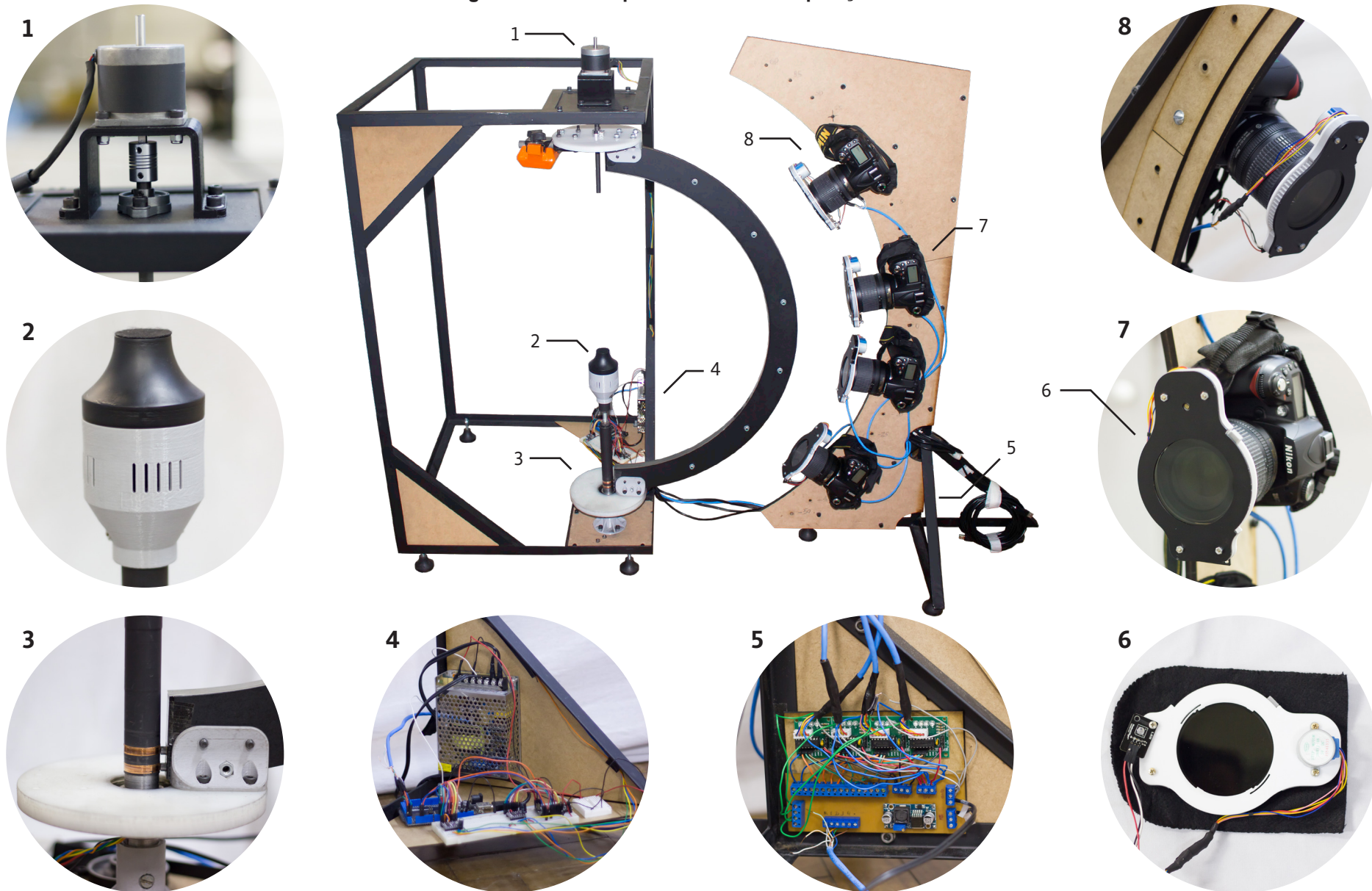
Figura 69 – Fluxograma de aquisição de imagens



#### 4.1.5 Protótipo do sistema de aquisição

A Figura 70 exhibe o protótipo do sistema de aquisição, utilizado na realização dos ensaios apresentados neste trabalho. Observa-se que, dada a importância da realização dos ensaios de aquisição de aparência para validação do sistema proposto, o desenvolvimento do protótipo foi interrompido no estágio exibido. Entre as melhorias previstas, que não foram realizadas por uma questão de prioridade, estão a aplicação de um acabamento preto fosco em todo o sistema, e a fabricação das placas de circuito projetadas. A ausência dessas melhorias, no entanto, não prejudicou a realização dos ensaios previstos. Cabe destacar que este trabalho se concentrou no estudo da aquisição de refletância e, portanto, não teve como objetivo o desenvolvimento de um produto comercial.

Figura 70 – Protótipo do sistema de aquisição



(1) Motor e acoplamento flexível, (2) plataforma giratória, (3) faixa de cobre e carvão, (4) fonte e microcontroladores, (5) placa de circuito da Estrutura B, (6 e 7) alternador de polarização, e (8) fixação das câmeras com parafuso de 1/4 de polegada.

O custo de desenvolvimento e construção do protótipo, desconsiderando os recursos humanos, bem como a infraestrutura e os materiais disponibilizados pelo LdSM/UFRGS e os demais laboratórios, foi de aproximadamente R\$ 2.500,00. Neste valor estão inclusas a aquisição do alvo de calibração de cor, *XRite Color Checker Pro* (R\$ 560,00), e a contratação do serviço de serralheiro para confecção das estruturas em cantoneiras de aço (R\$ 600,00), que correspondem à quase metade do investimento realizado. Observa-se, no entanto, que o sistema desenvolvido partiu da disponibilidade de quatro câmeras fotográficas DSLR do LdSM, o que reduziu significativamente os custos e viabilizou sua realização. O Apêndice C apresenta um levantamento detalhado dos materiais e equipamentos utilizados, indicando os custos e explicitando quais recursos foram disponibilizados pela UFRGS.

## **4.2 Aquisição de Imagens**

Os ensaios de aquisição de imagens permitiram verificar o funcionamento do sistema de aquisição e os resultados proporcionados pela polarização linear da luz. Embora cada módulo tenha sido testado durante o seu desenvolvimento, somente durante estes ensaios que foi possível visualizar e compreender o comportamento do sistema como um todo. Foram observados diversos aspectos passíveis de melhorias e aprimoramentos futuros, dos quais os mais críticos foram implementados ainda durante a realização dos ensaios.

### **4.2.1 Influência da posição angular sobre a aquisição de imagens**

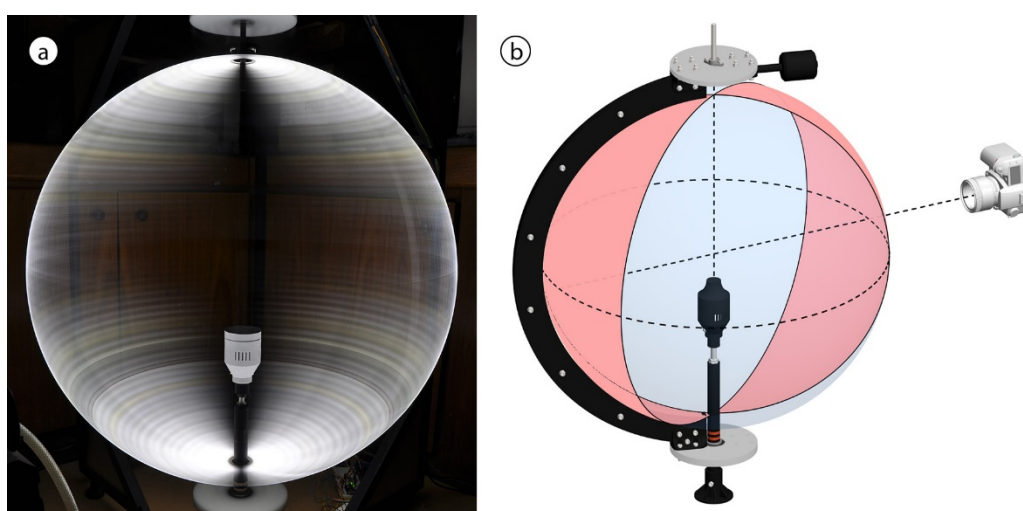
Ainda durante a montagem do protótipo fotografou-se o arco em movimento por diversas vezes, e foi possível observar efeitos inesperados. Um desses efeitos diz respeito à polarização da esfera de luz formada pelo arco luminoso. Sobre esse, conforme explicitado no item 4.1.2, aplicou-se uma película de filtro polarizador linear em orientações horizontal. Esperava-se, portanto, que a luz dessa esfera fosse inteiramente bloqueada com o sistema em configuração perpendicular de polarização. A Figura 71a mostra que não é isso que ocorre.

Observa-se que a luz emitida pela esfera luminosa é apenas parcialmente bloqueada pelos filtros polarizadores, formando uma região central, em formato de losango, na qual a polarização perpendicular se dá com maior eficiência. Analisando o fenômeno, constatou-se que o arco luminoso, quando em revolução, entre e sai da



configuração de polarização pretendida. Quando esse se encontra de frente para a câmera, projetando uma linha sobre o plano da imagem, a luz é quase inteiramente bloqueada, visto que a configuração de polarização é perpendicular. Esta é a posição ideal. Conforme o arco vai girando, a configuração de polarização vai se tornando oblíqua, aumentando gradativamente a transmissão da luz. Com o arco visto de lado, a 90 graus da posição ideal, a configuração de polarização é praticamente paralela, ocorrendo a transmissão da luz. Isso pode ser observado com maior intensidade nos polos da esfera (Figura 71a).

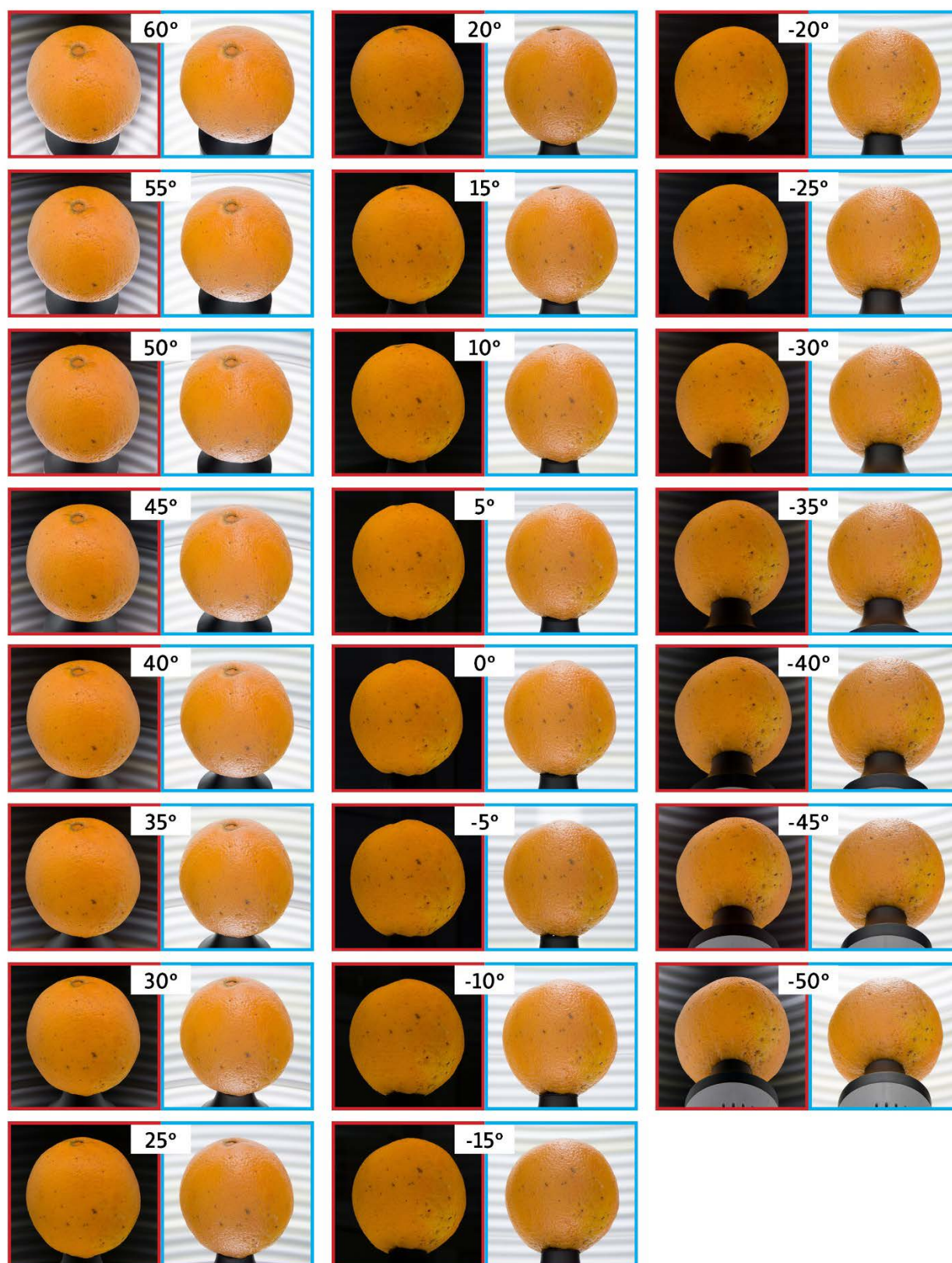
**Figura 71 – Zona de maior eficiência de polarização perpendicular**



(a) Arco em revolução fotografado em configuração perpendicular, e (b) desenho esquemático de todo mostrando os fusos formados.

Observa-se que a região de maior eficiência, vista de frente na Figura 71a, corresponde a um fuso esférico, formado dos dois lados da esfera (Figura 71b). O fuso mais próximo da câmera, marca a zona de onde a luz especularmente refletida pela superfície do artefato será inteiramente bloqueada, resultando na separação do componente de refletância difuso. A luz emitida de fora deste fuso terá o componente especular visível. Isso fica mais evidente quando a câmera se encontra em uma posição angular mais inclinada. Realizou-se um ensaio preliminar para evidenciar esse fenômeno, e verificar a relação existente entre a posição angular da câmera e a separação dos componentes de refletância. Para isso realizou-se a aquisição de imagens de uma laranja, a partir de cada uma das posições de fixação existentes na Estrutura B. A Figura 72 exhibe as imagens obtidas nesse ensaio, em configuração perpendicular (contorno vermelho) e paralela (contorno azul) de polarização.

Figura 72 – Resultados da variação na posição angular da câmera



■ configuração perpendicular de polarização

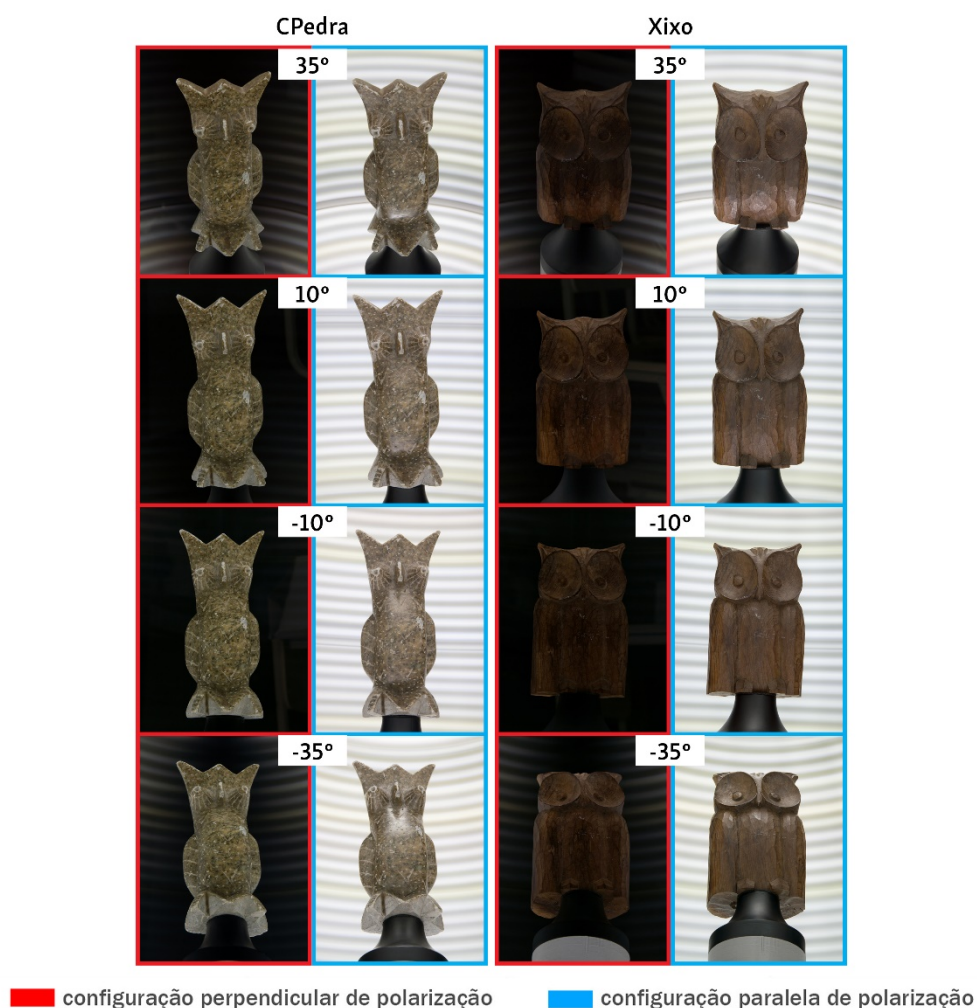
■ configuração paralela de polarização



Nas imagens é possível observar que na posição angular de 0 graus, paralela ao piso e à plataforma giratória, a câmera enquadra a região central do fuso, onde este apresenta a maior largura. Como efeito obtém-se uma imagem de fundo quase preto, com eliminação máxima do componente especular. Já nas imagens obtidas em posições de fixação mais inclinadas é possível observar os limites do fuso esférico, marcados pela visibilidade da luz do arco. Em consequência dessa luz incorretamente polarizada, a separação dos componentes de refletância se faz menos eficiente, podendo-se observar regiões de intensa especularidade na superfície da laranja.

Visando obter uma eficiência mínima de separação dos componentes de refletância, limitou-se as posições de fixação a um intervalo de trabalho, de resultados considerados satisfatórios. Assim, para a realização dos ensaios as câmeras foram distribuídas nesse intervalo, afixadas nas posições de 35°, 10°, -10° e -35°. A Figura 73 exibe imagens dos artefatos CPedra e Xixo obtidas nessa configuração.

**Figura 73 – Posições angulares das câmeras nas aquisições realizadas**



Observa-se que, apesar de posições angulares mais inclinadas favorecerem a reconstrução da geometria do topo e da base dos artefatos, a pouca eficiência na separação dos componentes de refletância pode comprometer a aquisição de aparência. Em consequência disso, com bases nos resultados obtidos nesse ensaio, optou-se por priorizar a captura dos dados de refletância.

#### 4.2.2 Dados da aquisição de imagens

Após este primeiro ensaio, realizou-se a aquisição das imagens dos artefatos CPedra e Xixo, usadas para os ensaios de reconstrução geométrica e de refletância. As aquisições foram cronometradas, e a partir das medições obtidas, foram calculadas estimativas de tempo total de aquisição para diferentes configurações de parâmetros do sistema. Nas estimativas considerou-se também o volume de dados gerados para cada configuração, tomando como base o tamanho médio das imagens capturadas nas aquisições, que foi de 8,6 *megabytes* por imagem de 12 *megapixels* em formato RAW. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tempo total e volume de dados da aquisição de imagens

Passo da Plataforma	Nº de Posições	Total de Imagens	Dados em disco	Tempo de exposição	Tempo de aquisição (mm:ss)	Artefatos por hora
4°	90	720	6,05 GB	1 s	19:33	3
				2 s	22:33	3
				3 s	25:33	2
8°	45	360	3,02 GB	1 s	10:01	6
				2 s	11:32	5
				3 s	13:01	5
12°	30	240	2,02 GB	1 s	06:51	9
				2 s	07:51	8
				3 s	08:51	7
20°	18	144	1,21 GB	1 s	04:19	14
				2 s	04:55	12
				3 s	05:31	11
24°	15	120	1,01 GB	1 s	03:41	16
				2 s	04:11	14
				3 s	04:41	13

Os dados demonstram que o tempo total de aquisição é influenciado por dois parâmetros de configuração do sistema: o tamanho do passo da plataforma giratória e a velocidade de rotação do arco luminoso. Desses dois, o tamanho do passo é o que tem maior peso, uma vez que determina quantas vezes a sequência de aquisição

deve ser repetida. A influência da velocidade de rotação arco luminoso se deve ao fato de que foi estabelecida uma paridade entre o tempo necessário para completar uma revolução, e o tempo de exposição das câmeras. Assim, as velocidades de 60 rpm, 30 rpm e 20 rpm correspondem, respectivamente, a tempos de exposição de 1, 2 e 3 segundos exibidos na Tabela 1.

Os dados indicam que com as configurações previstas na estimativa, o sistema permite realizar de 2 a 16 aquisições por hora. Assim, tendo em vista uma jornada de seis horas, pode-se considerar a documentação de 12 a 72 artefatos por dia. Esta alta produtividade beneficia-se do fato de que o processamento dos dados não precisa ser realizado de forma subsequente à aquisição. Pode-se, portanto, priorizar a etapa de aquisição, reduzindo, assim, o tempo de permanência do sistema de aquisição na instituição. O processamento pode ser deixado para um momento mais oportuno, ou, até mesmo, apenas para quando o artefato virtual for requisitado. Neste sentido, também podem ser consideradas estratégias de processamento em plano de fundo.

Observa-se que nas estimativas apresentadas não foi considerado o tempo necessário para ajuste de posicionamento e foco entre cada aquisição, o que pode levar até 5 minutos no atual estágio de desenvolvimento do sistema. De todo modo, a aquisição de imagens mostrou-se como um processo rápido e pouco trabalhoso. No modo automático o sistema funciona de forma completamente autônoma, restando ao operador a tarefa de monitorar o progresso e a transferência dos dados para o computador.

### **4.3 Reconstrução Geométrica**

Foram realizados ensaios para verificar os efeitos das configurações de qualidade do *software* e do tamanho do passo de aquisição sobre a reconstrução geométrica. Os modelos tridimensionais gerados foram submetidos a análises qualitativas e quantitativas, nas quais se verificou a qualidade geométrica e o desvio dimensional. Além disso, também foram verificadas as implicações dos parâmetros de reconstrução sobre o tempo de processamento, o que permitiu estabelecer diretrizes para orientar a escolha de parâmetros.

### 4.3.1 Configurações de qualidade da reconstrução geométrica

O *software* utilizado, conforme esclarecido na metodologia, oferece diferentes configurações de qualidade para o processamento da nuvem de pontos. Verificou-se que essas configurações são relacionadas ao redimensionamento aplicado às imagens antes do processamento. Constatou-se, também, que esse tipo de redimensionamento não é exclusivo ao *software Agisoft Photoscan*. Configurações de qualidade similares, mesmo que não explicitadas, podem ser encontradas em outros *softwares*, como *RealityCapture*, *Pix4D*, ou *Recap Photo*.

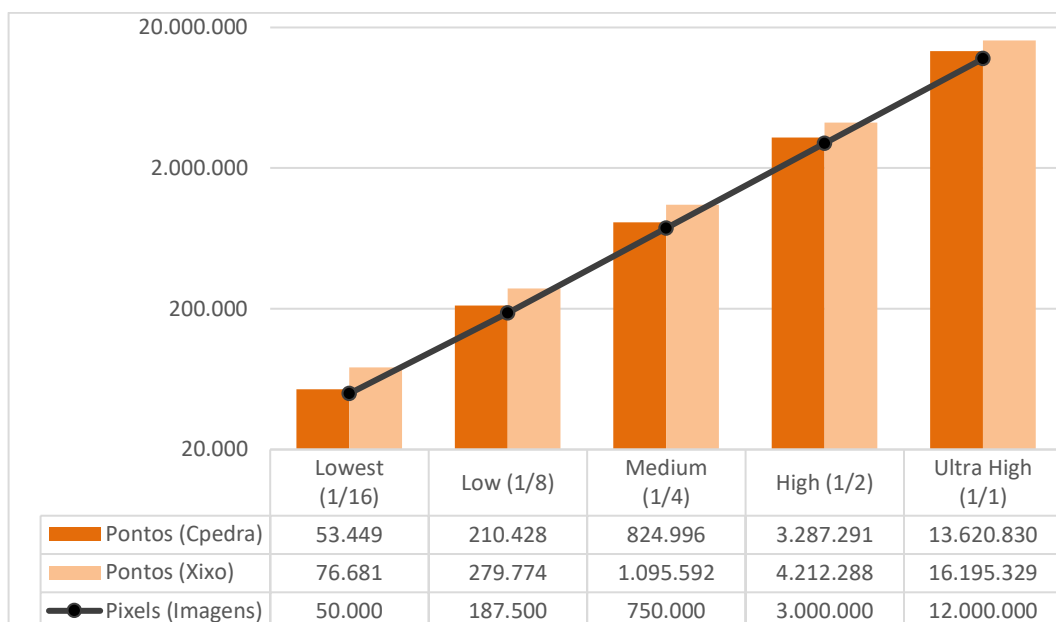
Observa-se que a razão de redimensionamento correspondente a cada nível de qualidade se refere às dimensões laterais, e não à área ou quantidade de *pixels* contidos na imagem. A razão de redimensionamento é quadrática. Uma imagem com metade da largura e metade da altura tem um quarto dos *pixels* da imagem original. Assim, uma imagem de 12 *megapixels* redimensionada na razão de  $\frac{1}{2}$  terá, portanto, 3 *megapixels*, e não 6 *megapixels*. É importante ressaltar que estas configurações de qualidade são relativas, dependendo da resolução da imagem original. De modo que, o resultado de uma reconstrução em *High* ( $\frac{1}{2}$ ) a partir de imagens de 12 *megapixels*, tende a ser o mesmo de uma reconstrução em *Ultra High* ( $\frac{1}{1}$ ), sem redimensionamento, usando imagens de 3 *megapixels*.

Durante as análises observou-se que há proporção direta entre o redimensionamento das imagens e o número de pontos restituídos durante a etapa de processamento da nuvem de pontos (Figura 74). As imagens de 12 *megapixels* do artefato CPedra, por exemplo, geraram uma nuvem de 13.62 milhões de pontos. Ao processar estas mesmas imagens em *High*, reduzindo-as a 3 *megapixels*, obteve-se uma nuvem de pontos de 3,3 milhões de pontos. A nuvem de pontos gerada é proporcional ao total de *pixels* contidos na imagem usada para o processamento.

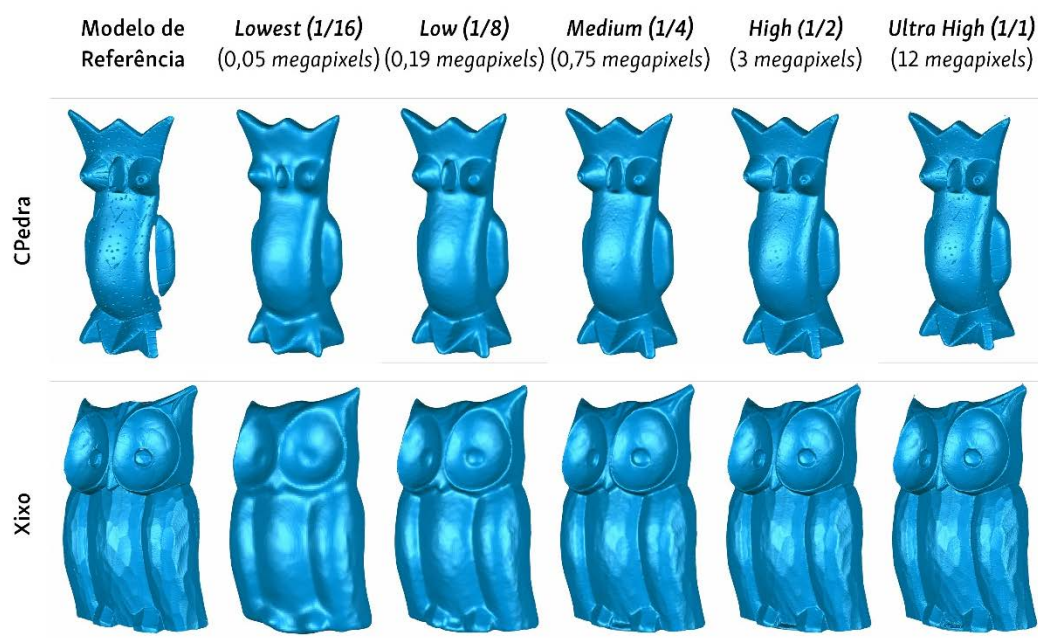
Os modelos tridimensionais reconstruídos exibiram uma variação significativa na qualidade geométrica (Figura 75), quando comparados ao modelo de referência obtido com o escâner *Digimill 3D*. Nas duas configurações de qualidade mais baixas as imagens sofrem intensa redução, chegando a 0,05 e 0,15 *megapixels*, o que resulta em uma reconstrução geométrica grosseira, incapaz de representar corretamente a forma geral dos artefatos, exibida pelo modelo de referência. Na configuração *Medium*, com 0,75 *megapixels*, obtém-se um modelo de contorno bem definido, mas

sem detalhes de superfície (mesoestruturas). Na configuração seguinte, *High*, é possível observar diversos detalhes de superfície, que apenas ganham maior nitidez na configuração *Ultra High*. A maior definição, no entanto, não é exclusiva aos detalhes do artefato, o ruído de superfície também se torna mais aparente nesta configuração.

**Figura 74 – Relação entre *megapixels* e nuvens de pontos**



**Figura 75 – Configurações de qualidade da reconstrução geométrica**



Comparando as reconstruções geradas ao modelo de referência, se poderia afirmar que uma reconstrução satisfatória só pode ser obtida a partir da configuração *Medium*. Esta recomendação, no entanto, ignoraria o fato de que as configurações de qualidade são relativas. Uma observação mais útil seria dizer que, para se obter uma boa definição da forma geral do artefato, as imagens não deverão ter menos que 0,75 *megapixels* após o redimensionamento realizado pelo *software*.

Evidentemente, também se deve levar em consideração o enquadramento do artefato. Isto é, o quanto o artefato fotografado preenche a área útil da imagem. Quanto mais espaço o artefato estiver ocupando na imagem, maior será o aproveitamento dos *pixels* disponíveis, e, conseqüentemente, maior a definição da reconstrução geométrica.

Alternativamente, há também a possibilidade de se realizar o redimensionamento manual, obtendo-se assim resultados intermediários. Imagens de 12 *megapixels*, por exemplo, podem ser redimensionadas em um *software* de processamento gráfico para 6 *megapixels* e processadas em *Ultra High*, obtendo assim um resultado intermediário ao *High* e *Ultra High* da Figura 75. A desvantagem dessa abordagem é que a projeção de textura também ficará limitada à imagem de 6 *megapixels*, o que não ocorre com o redimensionamento realizado pelo *software*.

#### **4.3.2 Influência do tamanho do passo sobre a geometria**

Nos ensaios de aquisição de imagens observou-se o efeito do tamanho do passo da plataforma giratória sobre o tempo de aquisição e o volume de dados armazenados. Ficou claro que, quanto maior o tamanho do passo, menor o tempo total de aquisição. Assim, reduzindo-se esse tempo, é possível aumentar a produtividade, realizando a captura de imagens de um maior número de artefatos em um determinado período. Observa-se, no entanto, que para se poder tomar uma decisão embasada, é preciso compreender que influência o tamanho do passo exerce sobre as etapas de reconstrução geométrica e de refletância.

Com este intuito realizou-se um ensaio para verificar a influência do tamanho do passo sobre a geometria reconstruída. Os resultados obtidos nesse ensaio complementam a análise comparativa dos níveis de qualidade de reconstrução geométrica, agregando dados quantitativos que auxiliam na tomada de decisão. As imagens capturadas dos artefatos CPedra e Xixo foram processadas simulando

aquisições com passos  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $24^\circ$ , conforme explicitado na metodologia. Foram realizadas reconstruções geométricas em cada um dos níveis de qualidades, gerando um total de 25 modelos tridimensionais para cada artefato.

Os modelos foram submetidos a uma análise de desvio dimensional, comparando-os à geometria dos modelos de referência, exibidos na Figura 75. A Figura 76 e a Figura 77 apresentam, respectivamente, os modelos tridimensionais reconstruídos e a representação gráfica dos resultados da análise de desvio dimensional para o artefato CPedra, enquanto a Figura 78 e a Figura 79 apresentam os mesmos dados referentes ao artefato Xixo. A representação gráfica da análise de desvio dimensional exibe um espectro de cores que indica a distribuição do desvio dimensional sobre a superfície, distinguindo entre valores positivos, do amarelo ao vermelho, e valores negativo, do ciano ao azul. A coloração verde corresponde a regiões nas quais o desvio medido está abaixo da tolerância, que para este ensaio foi estabelecida como 0,1 mm. O valor abaixo de cada modelo corresponde ao desvio quadrático médio (RMS), calculado a partir da análise de desvio dimensional.

Os resultados validam as observações qualitativas realizadas anteriormente. No espectro de cores dos modelos em qualidade *Lowest* e *Low* é possível observar a indicação de elevados valores de desvio em regiões determinantes para a forma geral, como ressaltos e sulcos característicos. Exemplos disso podem ser observados nas patas do artefato CPedra e entre o tronco e as asas do artefato Xixo, assim como no entorno dos olhos de ambos os artefatos. Os resultados obtidos a partir da configuração de qualidade *Medium* apresentam espectros que se mostram majoritariamente verdes, indicando que há precisão dentro da tolerância na representação da forma geral. Nesses modelos, as indicações de desvios se concentram em detalhes de superfície, e vão se tornando mais escassas conforme se passa para as configurações *High* e *Ultra High*.

Com respeito à variação de passo, é possível observar um sutil aumento no desvio dimensional provocado pelo aumento do passo. As regiões com faces voltadas para cima ou para baixo são as mais afetadas, como, por exemplo, o topo do bico do artefato CPedra e abaixo dos olhos do artefato Xixo. Observa-se que estas são regiões nas quais as câmeras de posição angular  $10^\circ$  e  $-10^\circ$  tem pouca ou nenhuma visibilidade, de modo que a reconstrução pode ser limitada a uma única posição angular, tornando-as mais sensíveis a variação do tamanho do passo.



Figura 76 – Análise comparativa do artefato CPedra

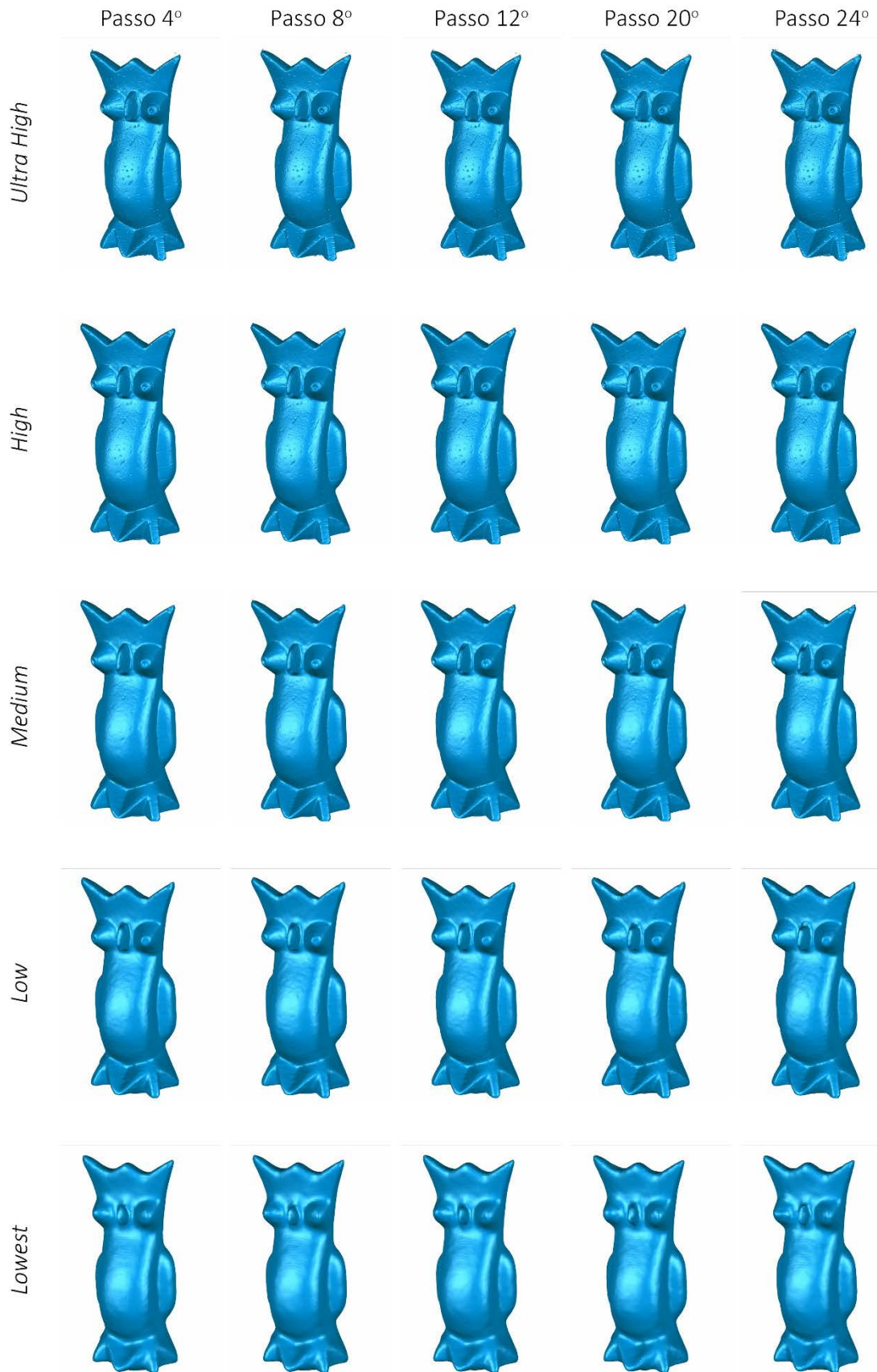


Figura 77 – Análise de desvio dimensional do artefato CPedra

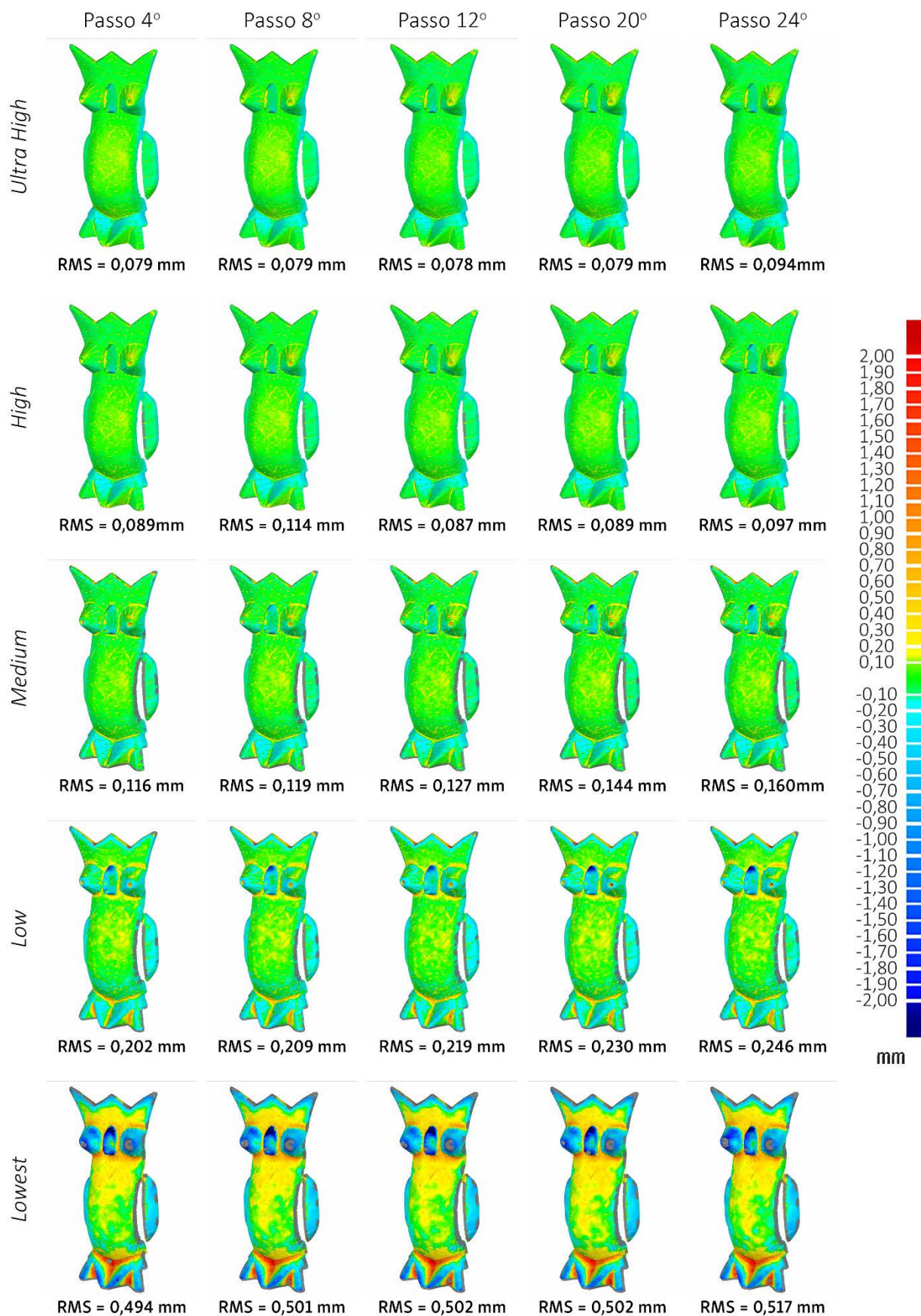
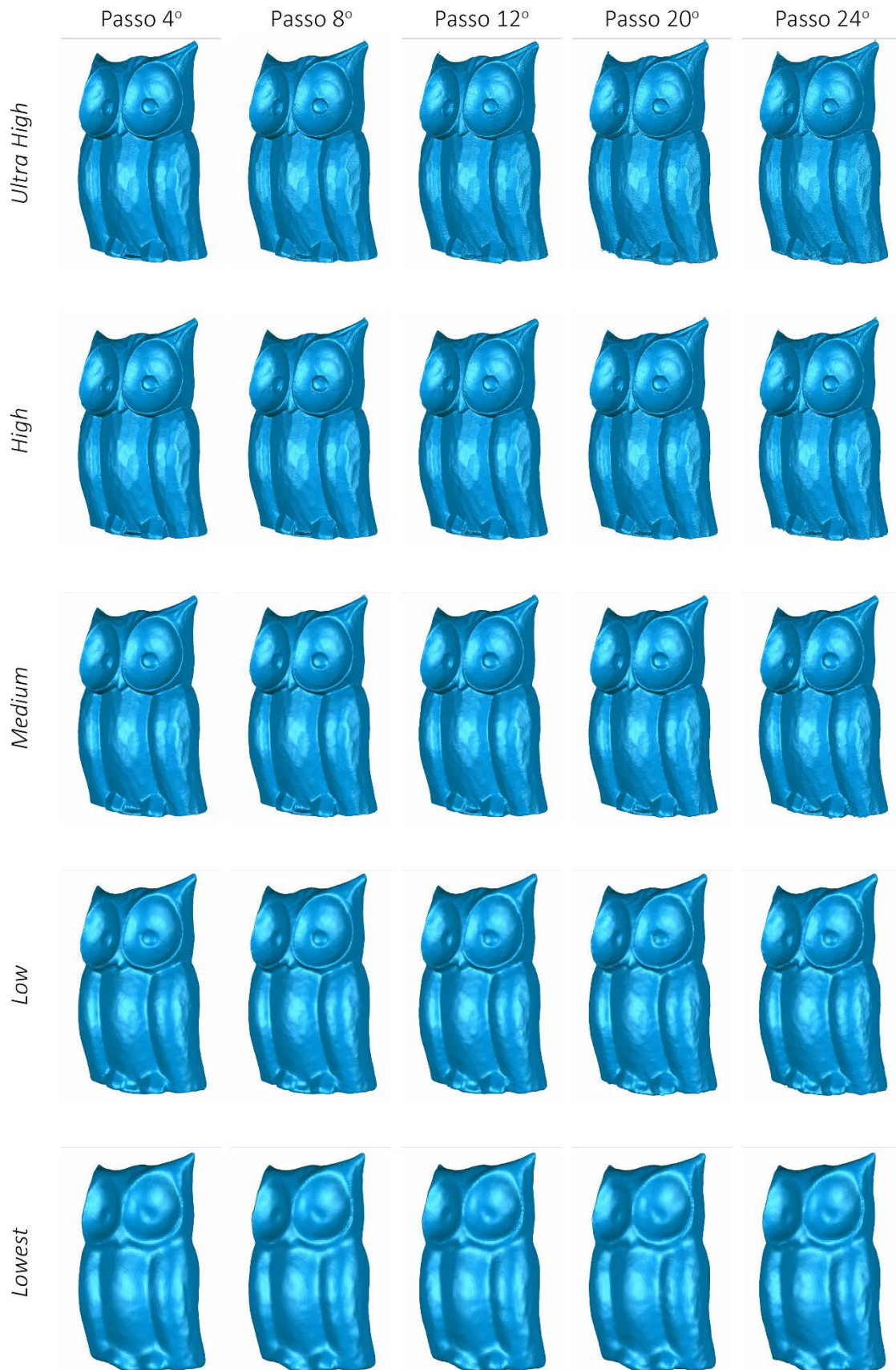
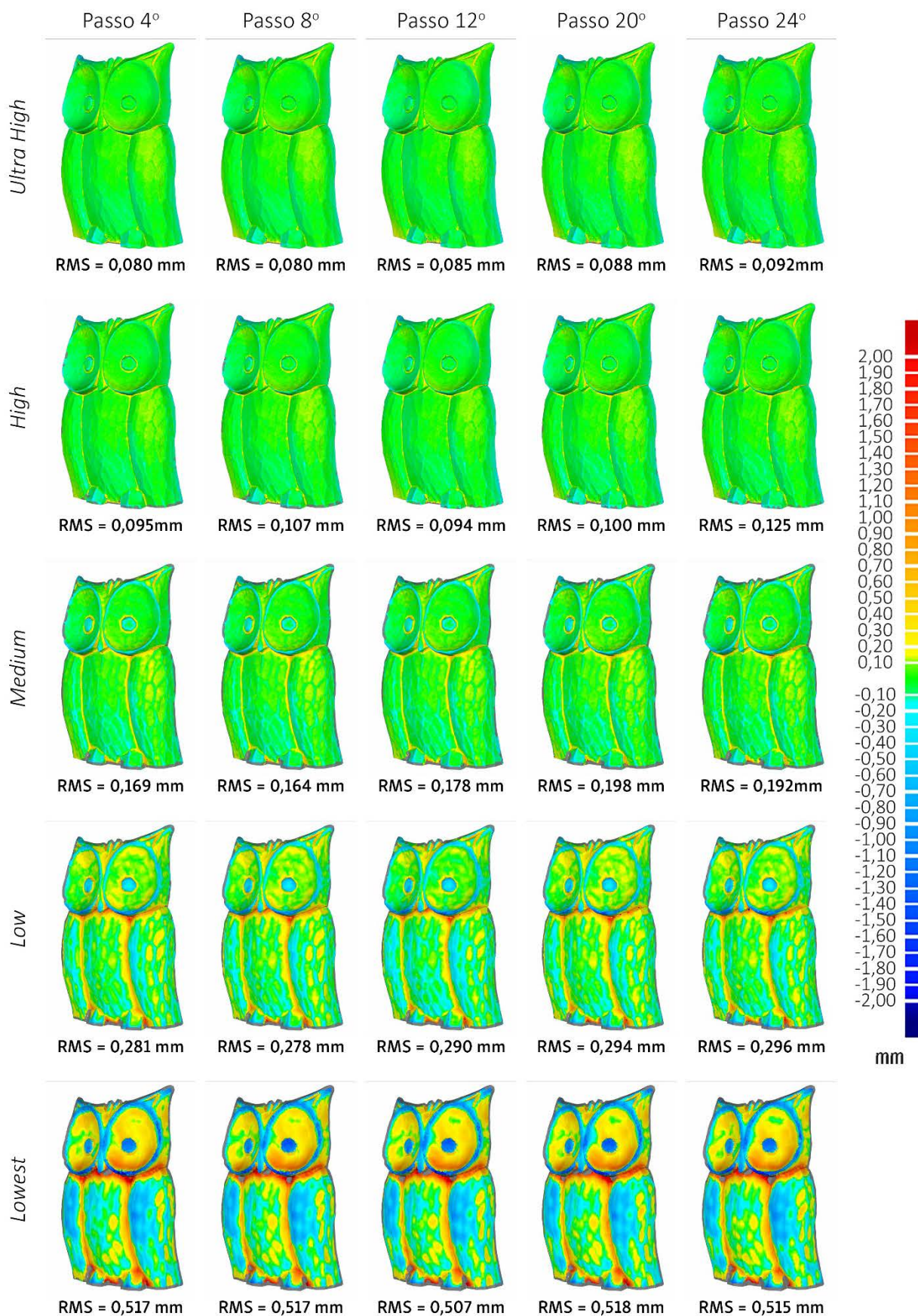




Figura 78 – Análise comparativa do artefato Xixo



**Figura 79 – Análise de desvio dimensional do artefato Xixo**

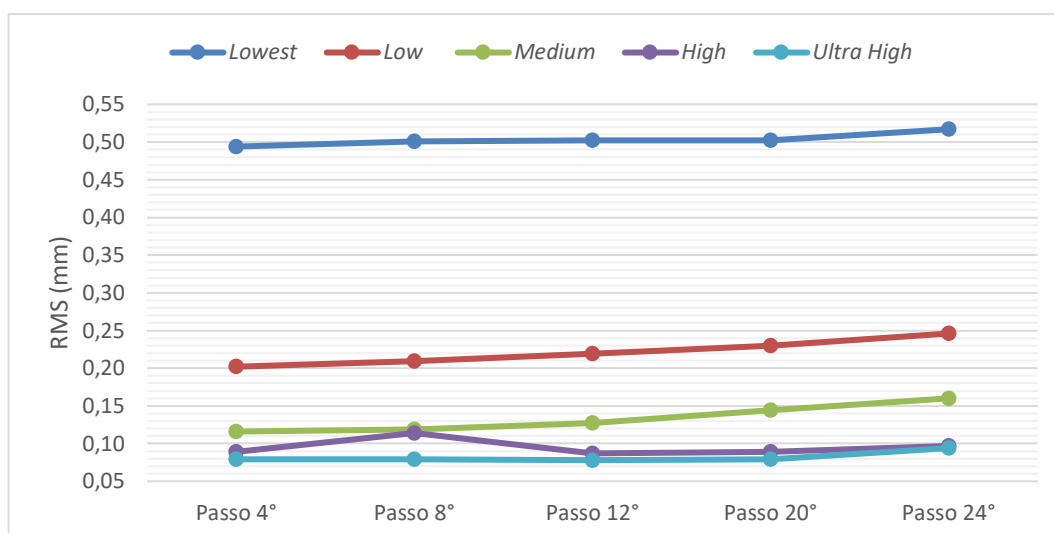




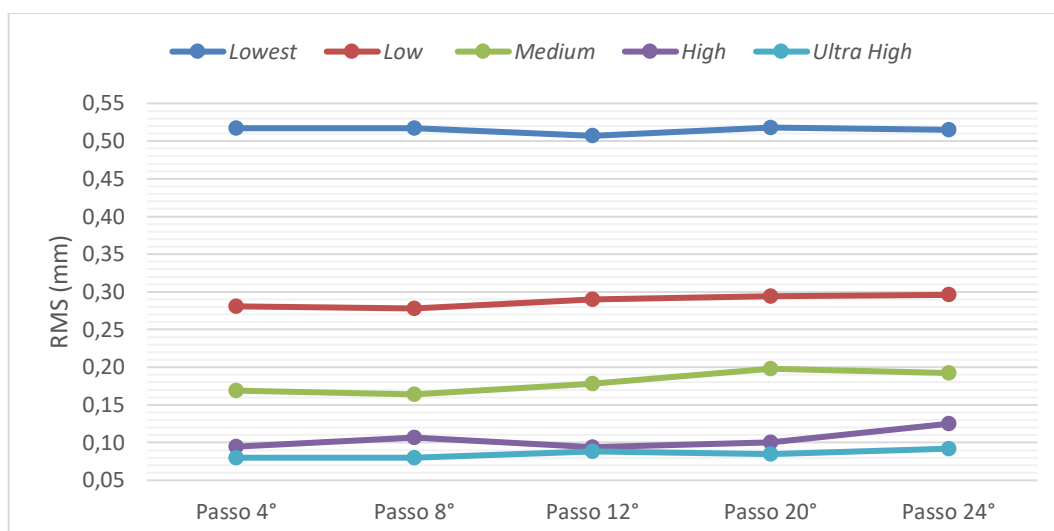
A relação entre o tamanho do passo e o desvio dimensional fica mais evidente se observada a variação no desvio quadrático médio, compilada nas figuras Figura 80 e Figura 81. Os gráficos revelam uma tendência ascendente presente em todas as configurações de qualidade. Também é possível observar que, a redução no desvio quadrático médio é mais intensa entre as primeiras configurações de qualidade, com os valores chegando próximo a um empate técnico entre as qualidades *High* e *Ultra High*.

Por meio da análise quantitativa fica evidente que os melhores resultados geométricos são obtidos com passo de 4° em configuração *High* e *Ultra High*. O aumento da configuração de qualidade e a redução do tamanho do passo, no entanto, tem grande efeito sobre o tempo e custo de processamento, analisados a seguir.

**Figura 80 – Desvio quadrático médio (CPedra)**



**Figura 81 – Desvio quadrático médio (Xixo)**



### 4.3.3 Dados da reconstrução geométrica

Durante os estágios iniciais dos ensaios, o processamento fotogramétrico foi realizado em duas estações de trabalho. A Tabela 2 apresenta a configuração de ambas as estações de trabalho. Após observar melhor desempenho em uma delas, e visando a coleta de estatísticas de processamento, os processamentos foram restringidos a uma única estação de trabalho. Observando-se a Tabela 2, é possível que se espere um melhor da estação de trabalho 2, devido ao elevado número de núcleos lógicos e a maior disponibilidade de memória RAM. Os dados coletados durante os ensaios, no entanto, demonstraram o oposto.

**Tabela 2 – Configuração das estações de trabalho utilizadas**

	<b>Estação de Trabalho 1</b>	<b>Estação de Trabalho 2</b>
<b>Processador</b>	Intel i7 4770K	2x Intel Xeon X5650
Núcleos lógicos	8 (3,9 GHz)	24 (2,66 GHz)
<b>Memória RAM</b>	16 GB	32 GB
<b>Disco Rígido</b>	SSD de 240GB	SSD de 240GB
<b>Placa de Vídeo</b>	2x Nvidia GTX 760	Nvidia Quadro K4000
Memória de vídeo	2x 2 GB	3 GB
Núcleos CUDA	2x 1152	768
<b>Sistema</b>	Windows 10	Windows 7

A fim de investigar os possíveis motivos desse comportamento inesperado, visitou-se os fóruns de discussão do desenvolvedor do *software*, onde foi possível fazer duas constatações. Primeiramente, constatou-se que os algoritmos de processamento utilizados se favorecem muito mais de processadores com elevada frequência de operação, independentemente do número de núcleos. Em consequência disso, os 8 núcleos lógicos da Estação de Trabalho 1, operando a 3,9 GHz, tem maior desempenho que os 24 núcleos lógicos da Estação de Trabalho 2 operando a 2,66 GHz.

Além disso, constatou-se que durante a etapa de geração de mapas de profundidade (*depth maps*), que ocorre na etapa de geração da nuvem de pontos, o *software* é capaz de fazer uso de núcleos de processamento gráfico (CUDA), presentes em placas de vídeo. O desempenho de cada placa de vídeo nesta etapa pode ser de cinco a dez vezes maior que o desempenho do processador, acelerando significativamente os cálculos. Assim, a presença de três vezes mais núcleos CUDA



na Estação de Trabalho 1 contribuiu significativamente para o seu melhor desempenho.

Destaca-se que placas de vídeo convencionais, voltadas para jogos, apresentam elevados números de núcleos CUDA a um custo inferior ao de placas específicas para estações de trabalho. Uma placa de vídeo Nvidia Quadro P4000, por exemplo, custa hoje US\$ 899,00, e possui 1792 núcleos CUDA e 8GB de memória. Pelo mesmo valor é possível adquirir duas placas de vídeo Nvidia GTX 1070ti, totalizando 4864 núcleos CUDA e 16 GB de memória de vídeo.

A frequência de operação do processador, isso é, o desempenho de núcleo único, assim como o número de núcleos CUDA da placa de vídeos, devem ser levados em consideração na configuração de uma estação de trabalho para processamento fotogramétrico. Adequando os componentes à demanda dos algoritmos é possível obter um aumento significativo no desempenho.

Durante os ensaios registrou-se o tempo de processamento das etapas de alinhamento das imagens, de geração da nuvem de pontos, e de geração da malha poligonal. A Figura 82 e a Figura 83 apresentam os tempos totais, com discriminação das diferentes etapas. Cada um dos modelos exibidos previamente na Figura 77 e Figura 79 é identificado pela combinação das iniciais da configuração de qualidade (LT, L, M, H e UH) com um código referente ao tamanho do passo (P04, P08, P12, P20 e P24). Deste modo, os dados identificados como UH\_P12 correspondem ao modelo processado em *Ultra High* com passo de 12°.

Os resultados revelam que a etapa de geração de nuvens de pontos é responsável pela maior variação de tempo, sendo influenciada tanto pelo tamanho do passo quanto pela configuração de qualidade. O tempo de alinhamento, por sua vez, independe da configuração de qualidade, sendo apenas determinado pelo tamanho do passo. Isso é, pelo número de imagens. Observa-se que em todos os casos o alinhamento foi realizado na maior configuração de qualidade, *Highest*. Já a geração da malha poligonal, realizada por último, tem pouco peso sobre o tempo total de processamento. A Figura 82 e a Figura 83 permitem visualizar a disparidade entre os tempos totais de processamento de diferentes configurações de parâmetros, que para o menor passo e no maior nível de qualidade chegou a 114 horas, quase cinco dias.

Figura 82 – Tempo total de processamento (CPedra)

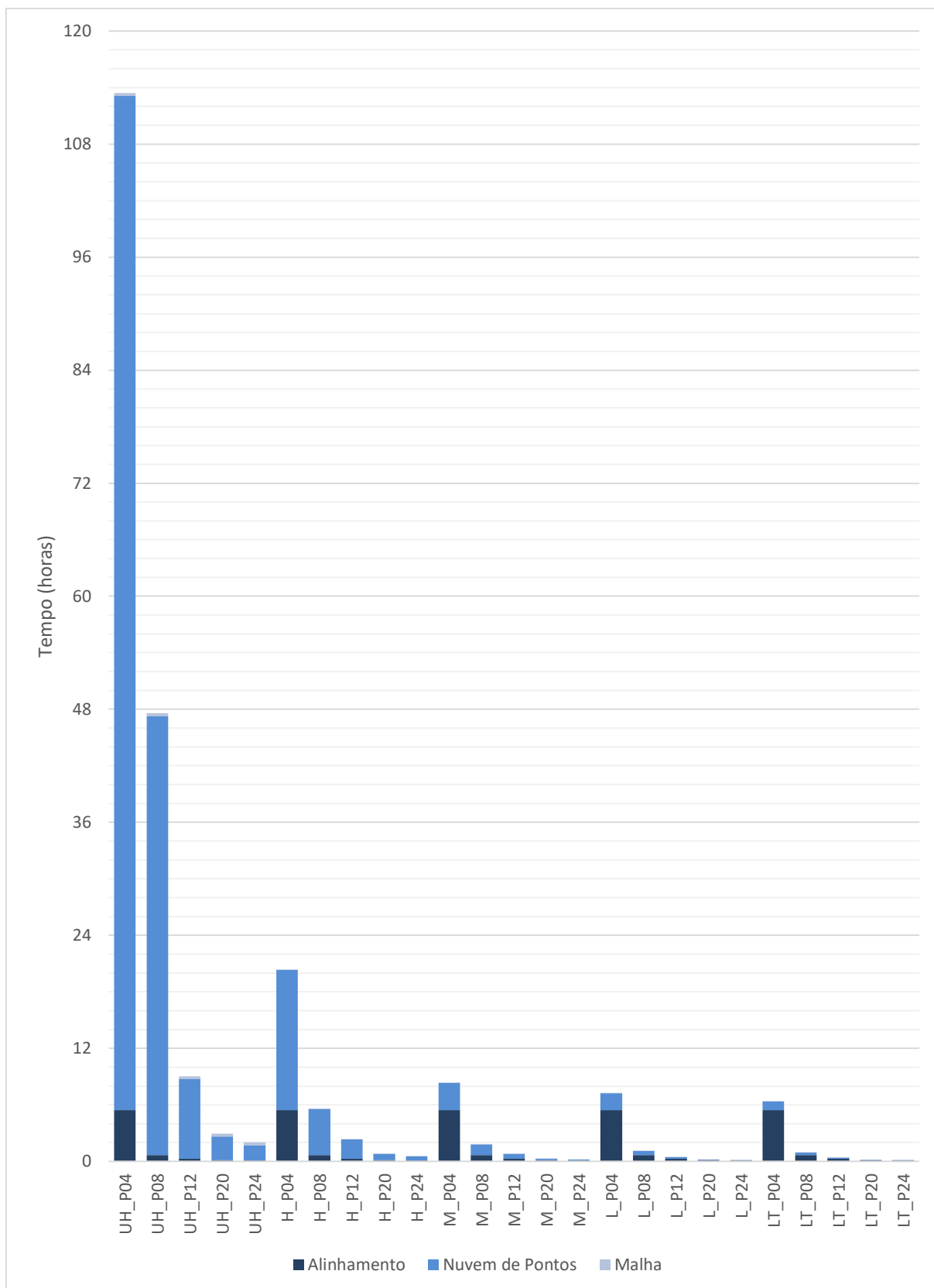
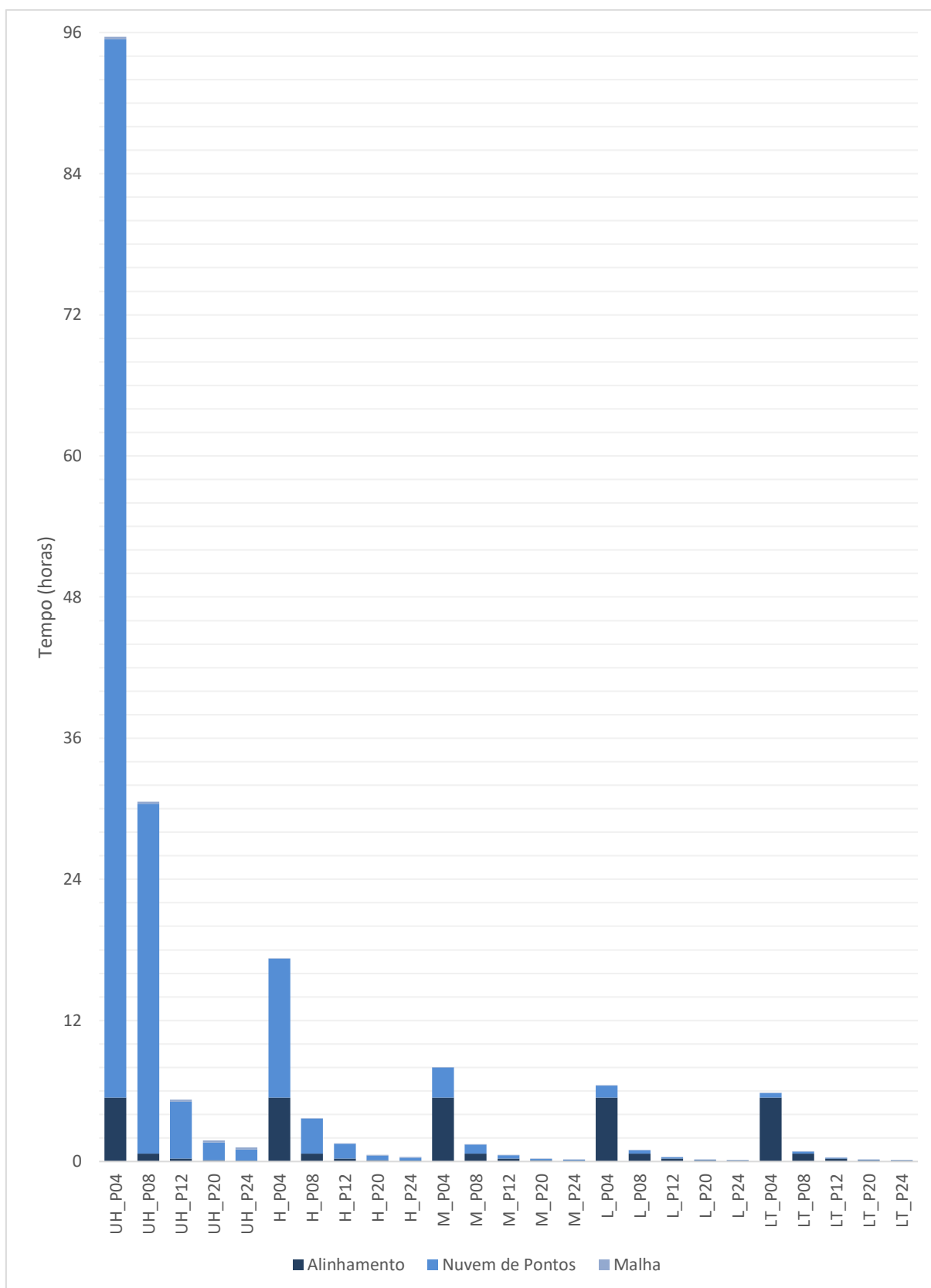
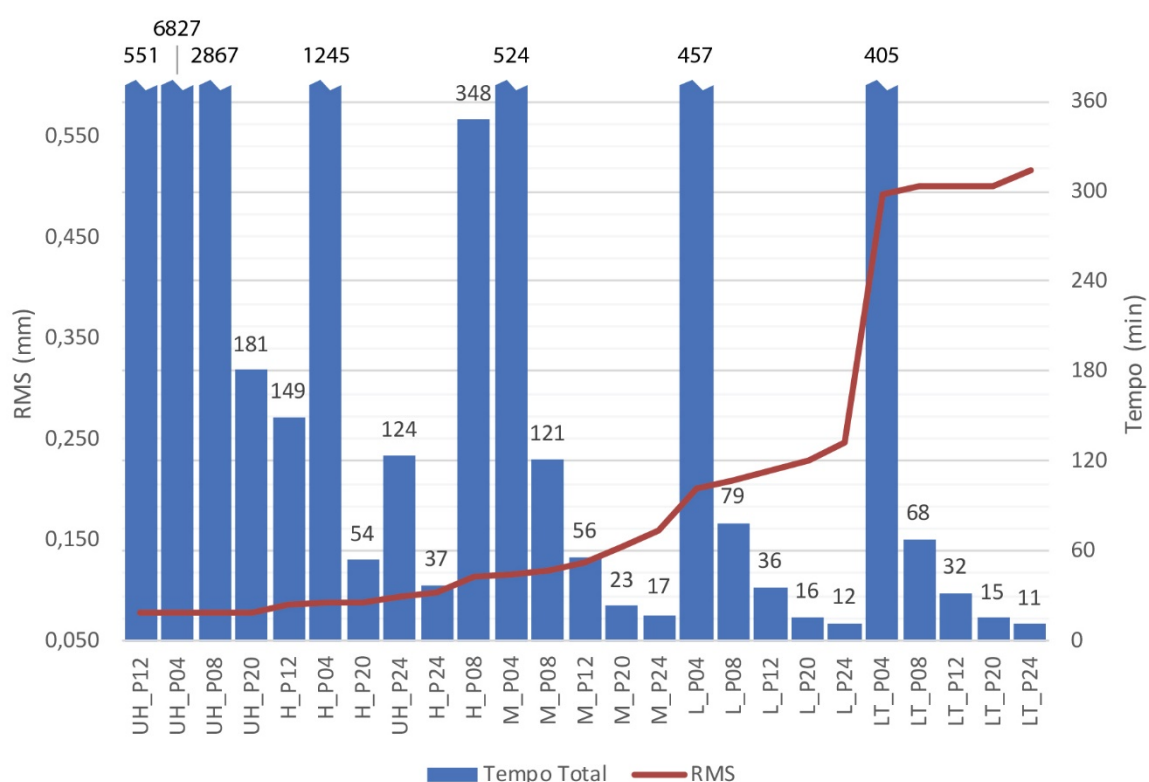


Figura 83 – Tempo total de processamento (Xixo)



A análise do tempo total de processamento ganha mais sentido se considerada a qualidade das reconstruções geométricas correspondentes. A Figura 84 e a Figura 85 apresentam os tempos totais registrados associados ao desvio quadrático médio, calculado na análise de desvio dimensional. Realizou-se um recorte, limitado a um tempo máximo de 360 minutos. Para fins de referência indicou-se, sobre as colunas, também o tempo total das configurações que extrapolaram a delimitação indicada. As reconstruções estão listadas, da esquerda para direita, em ordem crescente do desvio quadrático médio, indicado pela linha vermelha. Os gráficos permitem esboçar relações de tempo x qualidade de reconstrução.

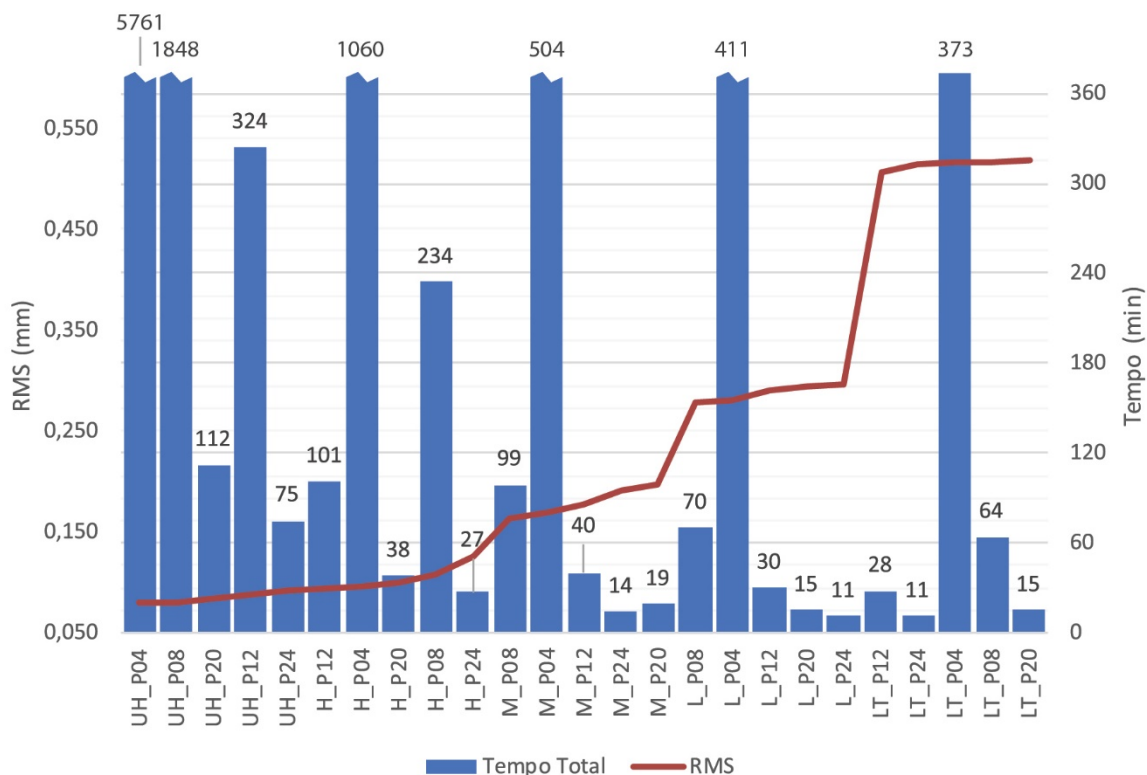
**Figura 84 – Relação RMS x Tempo de Processamento (CPedra)**



Diante desta representação dos dados, a melhor estratégia para escolha de parâmetros para a reconstrução geométrica é estabelecer, primeiro, um limite de tempo a ser gasto com o processamento de cada artefato. Um projeto que prevê a digitalização de poucas peças de um acervo poderá ser mais permissivo nesse sentido, disponibilizando, talvez, de 3 a 6 horas por artefato, enquanto a documentação de um grande acervo possivelmente terá que limitar esse tempo a no máximo 1 hora por peça. O tempo de processamento implica no custo do projeto, e

deve ser considerado durante a etapa de planejamento. Para poder estimar esse tempo é preciso tomar como base a configuração da estação de trabalho a ser utilizado.

Figura 85 – Relação RMS x Tempo de Processamento (Xixo)



De todo modo, os gráficos demonstram que, partindo-se de uma determinada configuração base, para o aperfeiçoamento dos resultados, a redução do tamanho do passo tende a ter menos vantagem, por conta do aumento significativo no tempo de processamento, do que aumento da razão de redimensionamento. Isto é, partindo-se, por exemplo, de uma configuração *Medium* com passo de 20° (M\_P20), a configuração subsequente de maior vantagem é *High* com passo de 20° (H\_P20), e não a *Medium* com passo de 12° (M\_P12). A redução do tamanho do passo da plataforma giratória apenas deve ser priorizada nos casos em que houver dificuldade de reconstrução das regiões do topo e da base dos artefatos, onde a sobreposição de imagens é menor.

Observa-se que em todos os ensaios realizados, o tamanho do passo foi mantido o mesmo durante as etapas de alinhamento das imagens e de geração da nuvem de pontos densa. Alternativamente, é possível efetuar o alinhamento das imagens e, na sequência, omitir parte das imagens para o processamento da nuvem

de pontos, assegurando, desta maneira, a precisão de alinhamento, mas reduzindo o tempo de processamento dos pontos.

#### **4.4 Reconstrução de Refletância**

Além dos ensaios de reconstrução geométrica, foram realizados ensaios para apurar o efeito das variáveis que influem sobre o processo de reconstrução de refletância. Verificou-se os diferentes modos de projeção de textura disponíveis no *software*, e, também, a influência do tamanho do passo de aquisição sobre os mapas de textura gerados.

##### **4.4.1 Modos de projeção de textura**

O *software* de processamento fotogramétrico utilizado, *Agisoft Photoscan*, disponibiliza cinco modos de combinação de imagens para a projeção de textura (*Build Texture*), a saber: *Mosaic*, *Average*, *Max Intensity*, *Min Intensity* e *Disabled*. A projeção de textura é realizada projetando informações de cor contidas nas imagens alinhadas sobre a superfície da malha poligonal. A combinação de imagens ocorre toda vez que houver mais de uma imagem como possível fonte para determinado ponto na superfície.

O modo *Mosaic* extrai a informação de uma única imagem, com base em sua orientação relativa à superfície. Após a projeção é realizado um ajuste de baixa frequência, uniformizando regiões adjacentes. O modo *Average* faz uma amostragem de todas as imagens, projetando o valor médio de cada ponto na superfície. Os modos *Max intensity* e *Min intensity* projetam, respectivamente, os valores de intensidade máxima e mínima de cada ponto na superfície. O modo *disabled* extrai a informação de uma única imagem, tal qual o modo *mosaic*, mas sem a etapa de uniformização das regiões adjacentes. Para averiguar seus efeitos, foram realizadas projeções com cada uma destas configurações.

A Figura 86 exhibe os resultados obtidos para a projeção do componente de refletância difuso. De imediato, pode-se observar que as projeções obtidas com as configurações de máxima e mínima intensidade destoam das demais, apresentando variações na tonalidade e ruídos de todo tipo. Isto se deve ao fato de que em ambos os casos, a projeção desconsidera a orientação da imagem relativa à superfície da malha. Assim ocorre, por exemplo, de pontos de máxima intensidade proporcionados



pelo efeito Fresnel, serem projetados de uma imagem adjacente à superfície, resultando em uma projeção distorcida. O mesmo pode ocorrer na projeção de mínima intensidade, por conta de erros de reprojeção e plano de fundo preto das imagens.

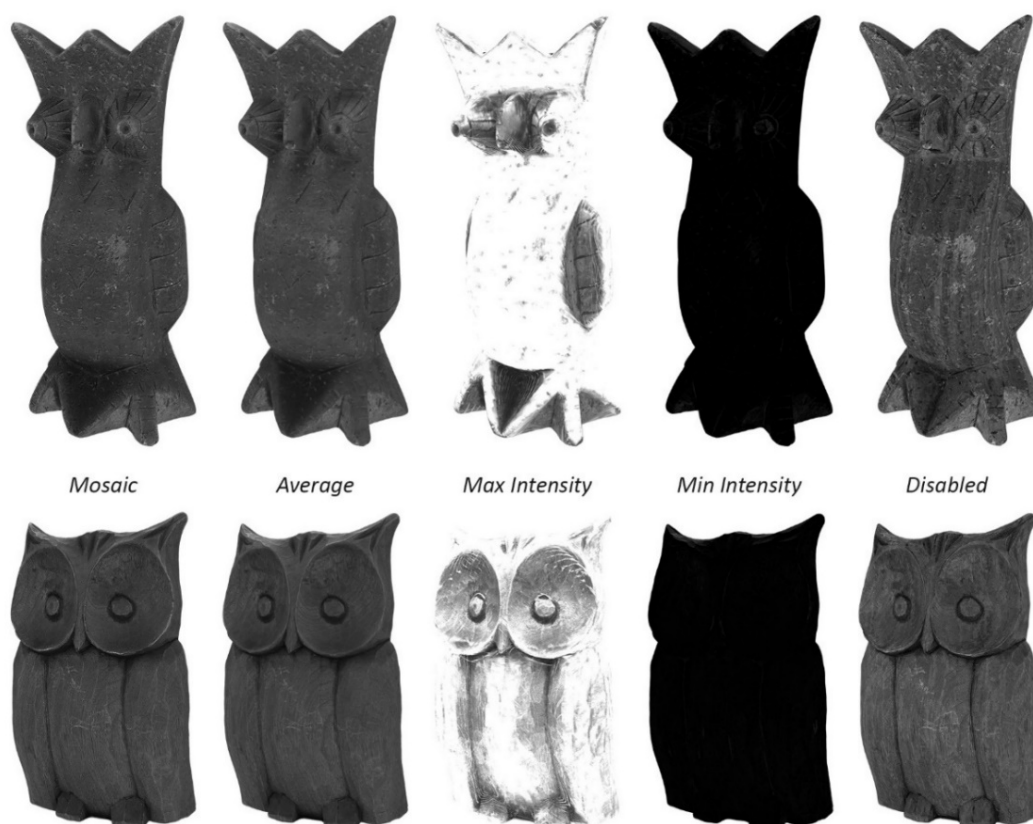
**Figura 86 – Projeção do componente difuso**



Os resultados das configurações *Mosaic*, *Average* e *Disabled* são bastante similares, o que pode ser explicado pela própria natureza da refletância difusa, que apresenta uma distribuição homogênea em todas as direções de observação. Analisando-se as texturas de forma mais rigorosa, é possível observar descontinuidades (serrilhamento) no resultado da configuração *Disabled*, provocadas pela falta de uniformização de regiões adjacentes. Também é possível perceber que há perda de definição na projeção em configuração *Average*, causada pela soma dos erros de reprojeção de todas as imagens. Verificou-se, portanto, que a configuração mais adequada para o componente de refletância difusa é a *Mosaic*. Pode-se, no entanto, usar a projeção em modo *Average*, se um resultado menos definido for desejável.

A projeção do componente de refletância especular reproduziu um comportamento semelhante (Figura 87) ao observado para o componente difuso. Novamente, as configurações *Max Intensity* e *Min Intensity* mostraram-se inaproveitáveis, tendendo ao branco ou preto absoluto. O componente especular, diferente do difuso, é dependente da direção de observação. A projeção na configuração *Disabled* apresenta, em consequência disso, discrepâncias muito mais evidentes. Também podem ser observadas diferenças entre o modo *Average* e o modo *Mosaic*, que, neste caso, além de maior nitidez também apresenta algumas imperfeições. Verificou-se, portanto, que para a projeção do componente de refletância especular a configuração *Average* apresenta um resultado mais homogêneo, preferível neste caso.

**Figura 87 – Projeção do componente especular**



O mapa de textura obtido pela projeção do componente de refletância especular exibe um gradiente da variação espacial da especularidade da superfície, provocado por diversos fatores, como variações nas características do material, ou acúmulo de outros materiais. É possível observar, por exemplo, tons mais escuros, de

menor intensidade, nas reentrâncias e regiões suscetíveis à acumulação de pó e sujeira. No caso do artefato Xixo, o mapa de especularidade permite distinguir detalhes dos veios da madeira, existentes no objeto real, mas que não constam na textura difusa, tampouco na geometria reconstruída. No entanto, é preciso atentar-se nas regiões onde há oclusão provocada pelo próprio artefato, como entre os olhos e bico do artefato CPedra. Estas regiões podem apresentar especularidade inferior ao restante da superfície, sem que este realmente seja o caso.

#### 4.4.2 Influência do tamanho do passo sobre a refletância

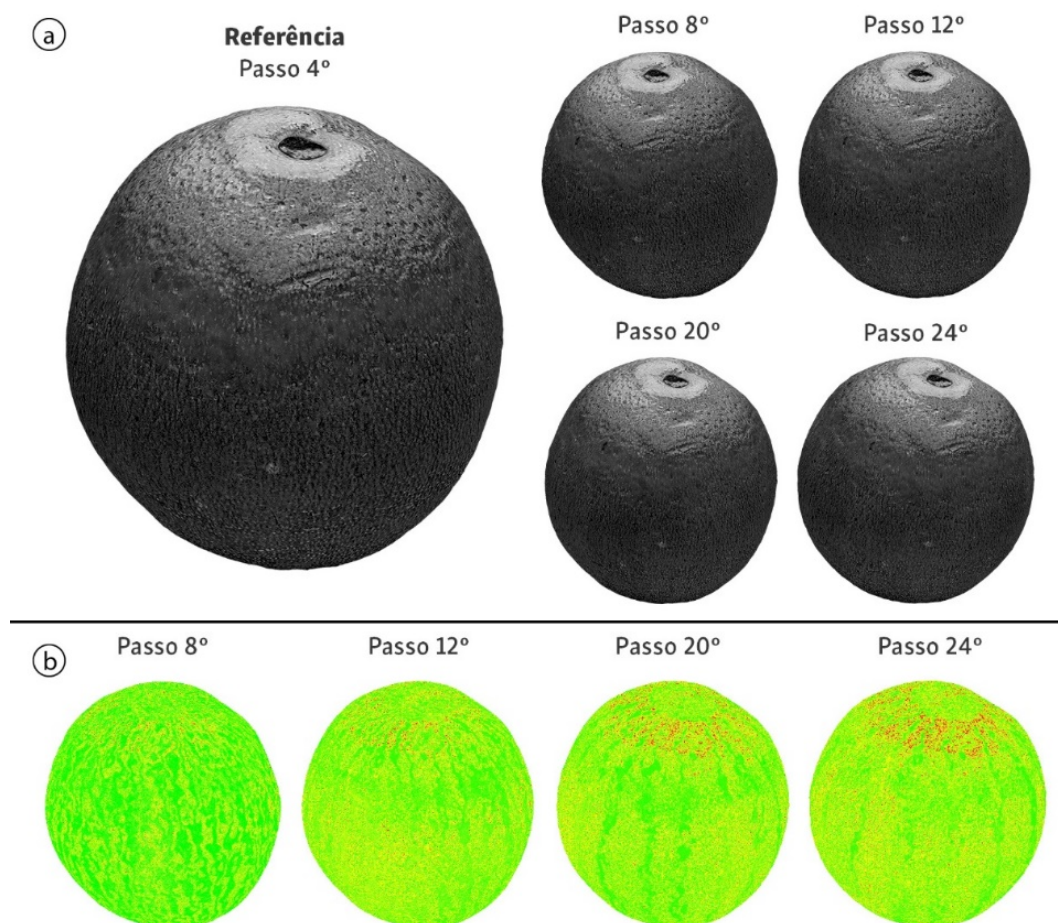
Assim como na aquisição de imagens e na reconstrução geométrica, foram realizados ensaios para verificar se o tamanho do passo usado na aquisição das imagens influi sobre a etapa de reconstrução da refletância. Para isso foram realizadas projeções de textura para cada subconjunto de imagens (Figura 53), simulando as diferentes configurações de passo. Sabendo-se da distribuição homogênea do componente de refletância difuso, restringiu-se o ensaio ao componente de refletância especular, sabidamente dependente da direção de observação. De modo a evitar efeitos adversos provocados pela geometria, como regiões de oclusão, realizou-se o ensaio com a laranja usada no item 4.2.1 do presente trabalho.

Em primeira análise dos resultados, visualmente, não foi possível detectar quaisquer efeitos provocados pela variação do tamanho do passo. Esses só se tornaram visíveis após empregar recursos de processamento de imagem. As projeções de textura geradas com passo de 8°, 12°, 20° e 24° (Figura 88a), foram sobrepostos à projeção de 4° graus usando o modo de mesclagem de diferença do *Photoshop*. Dessa maneira foi possível realçar as regiões que apresentaram algum desvio de intensidade da especularidade, representado em escala de cinza. Para facilitar a visualização, aplicou-se um espectro colorido (Figura 88b), no qual verde representa a ausência de desvio, amarelo algum desvio, e vermelho muito desvio.

Os resultados demonstram que a aquisição do componente especular também sofre influência do tamanho do passo. Na Figura 88b pode-se observar que quanto maior o passo, maior a distribuição e intensidade de desvios na representação do componente especular. A magnitude destes desvios, no entanto, é tão pequena, que não é possível visualizá-los a olho nu nos dados capturados. Portanto, ainda que sofra

influência, seus efeitos podem ser desconsiderados. Em consequência disso, o tamanho do passo de aquisição pode ser definido respeitando apenas as implicações para o tempo de aquisição e a qualidade da reconstrução geométrica. Reitera-se, no entanto, que no mapa de textura esse desvio é visualmente imperceptível.

**Figura 88 – Análise de desvio de intensidade da refletância especular**



Projeções do componente especular (a), e resultados da análise de desvio de intensidade (b).

Todavia, é importante ressaltar que essas observações dizem respeito à artefatos com superfície material de comportamento de refletância misto e rugosidade média para elevada. Os resultados não podem ser extrapolados para superfícies polidas ou metálicas, que não fizeram parte do escopo do presente estudo.

#### 4.5 Validação dos Resultados

Os resultados apresentados atingiram os objetos geral e específicos estabelecidos no início do presente trabalho. O sistema desenvolvido mostrou-se

como uma alternativa viável para a aquisição geométrica e de dados de refletância. O método proposto substitui algoritmos avançados (TUNWATTANAPONG et al., 2013) e sistemas complexos (EINARSSON et al., 2006), encontrados nas referências, por uma solução mecânica simples, como girar filtros, tornada menos enfadonha por meio da automação.

O método proposto se mostrou eficiente, com potencial de aplicação na documentação de grandes acervos. Conforme demonstrado, podem ser obtidos ótimos resultados a partir de aquisições de imagens com duração de 10 a 20 minutos. O maior dispêndio de tempo fica por conta da reconstrução geométrica, que varia em função da qualidade pretendida. No entanto, não há a necessidade de realizar o processamento de forma consecutiva à aquisição das imagens. A reconstrução dos dados de refletância da superfície, em si, é uma etapa de curta duração. Alternativamente, conforme visto na revisão bibliográfica (WEINMANN; KLEIN, 2015), pode-se incorporar técnicas de aquisição geométrica mais rápidas ao sistema, reduzindo o tempo total de processamento.

Nas análises de tempo de processamento apresentadas, levou-se apenas o tempo de processamento do computador em conta, desconsiderando a intervenção do operador. O método, conforme realizado neste estudo, no entanto, requer a conversão e transferência de dados entre múltiplos *softwares*, o que pode dificultar a tarefa. O uso de múltiplos *softwares* comerciais também pode ser visto como um ponto negativo, pois aumenta significativamente o custo de implementação e manutenção do sistema. O uso de *softwares* comerciais, no entanto, facilitou a comprovação do conceito, recomendando-se para trabalhos futuros o desenvolvimento de uma solução de *software* integrada, baseada em código livre e aberto.

Outro inconveniente do protótipo, em seu atual estado, é a necessidade de um ambiente completamente escuro, que impôs algumas dificuldades durante os ensaios. Em consequência disso, os ensaios de aquisição de imagens tiveram que ser realizados de noite em uma sala especialmente preparada, o que pode não ser viável em cenários de uso real. Não houve tempo hábil, durante a realização deste estudo, para apresentar uma solução, mas acredita-se que este inconveniente possa ser contornado com o desenvolvimento de uma estrutura fechada, que isole a região de captura da luz ambiente.

Os dados de refletância capturados na aquisição de imagens, possibilitaram a criação de mapas de textura para reconstrução da aparência dos artefatos por meio de PBR. Não coube no escopo do presente trabalho, apresentar uma sistematização desse processo, das imagens brutas ao conjunto mapas de textura final. Ainda assim, foram experimentadas diversas abordagens de manipulação dos mapas de refletância difusa e especular para chegar a um resultado visual fisicamente aceitável. Para o componente de refletância difuso, bastou a realização de ajustes de exposição e de matiz, orientando-se sempre pelo alvo de referência cromática digital.

A criação de mapas de rugosidade a partir do componente especular se mostrou mais difícil. Da forma como consta agora, o mapa de especularidade gerado com ajuda da polarização linear apenas exibe variações relativas de intensidade, sem indicações de valores absolutos ou relações com o parâmetro rugosidade usado na PBR. Para este propósito, recomenda-se a realização de um estudo aprofundado do processo, considerando-se também o desenvolvimento de um alvo de referência de especularidade/rugosidade, a partir do qual se possa chegar a valores absolutos.

O produto visual resultante da metodologia proposta é de altíssima qualidade, como mostra a visualização 3D interativa com renderização baseada em física (Figura 89). A reprodução dos componentes de refletância difuso e especular a partir de dados separados, obtidos pela documentação da superfície do artefato real, resulta em uma aparência dinâmica e fisicamente aceitável. A aquisição da cor base, desprovida de informações de luz e sombra e calibrada, contribui para a representação precisa das cores em diferentes condições de luz do ambiente virtual. Além disso, o componente especular reconstruído dota os artefatos de um senso de materialidade, complementando a aparência dos artefatos com detalhes que não podem ser observados na cor base, nem na geometria. Esses efeitos se mostram mais aparentes no artefato Xixo, no qual os veios da madeira são revelados de acordo com o ângulo de incidência da luz.

Observa-se que o artefato CPedra, ainda que também tenha gerado um modelo virtual de aparência atraente e fisicamente aceitável, impôs maiores dificuldades dadas as especificidades de seu material, pedra-sabão. A presença de grãos de composição e orientação variada, resultou na captura de dados de refletância especular imprevisíveis. Recomenda-se, portanto, a realização de um estudo mais



amplo, documentando uma gama maior de materiais, a fim de investigar os limites do método proposto.

**Figura 89 – Visualização 3D interativa dos modelos gerados**



Os artefatos digitalizados em cenários virtuais de iluminação ambiente, respectivamente, noturna e diurna: (a)(b) artefato Xixo, e (c)(d) artefato CPedra.

Por fim, comparou-se o resultado visual obtido com o sistema proposto ao resultado obtido por métodos de digitalização tridimensional convencionais. A Figura 90 e a Figura 91 exibem as imagens geradas para essa análise. As colunas correspondem aos diferentes métodos, respectivamente: a método proposto no presente trabalho; Fotogrametria convencional, conforme explicitado na metodologia; e digitalização com o escâner *Artec EVA*. As linhas correspondem às diferentes condições de luz nas quais os dados foram analisados: apenas a cor base sem iluminação virtual, todos os mapas com luz incidindo do canto esquerdo superior, e todos os mapas com luz incidindo do canto direito inferior.

Analisando primeiro a cor base sem nenhuma fonte de luz no ambiente virtual, constata-se que os resultados do método proposto dificultam a percepção da tridimensionalidade dos artefatos. Esse, no entanto, é o efeito esperado da visualização da cor base nessas condições. A cor base deve estar desprovida de quaisquer informações de luz e sombra.

Diferente disso, pode-se observar nos resultados obtidos por Fotogrametria convencional efeitos de luz e sombra de projetados de cima pra baixo. Essa iluminação é oriunda do ambiente no qual as imagens para o processamento fotogramétrico foram capturadas, e não do ambiente virtual. Já o resultado do *Artec EVA* apresenta, especialmente no artefato Xixo, diversas regiões de especularidade intensa. Nesse caso o efeito observado também não está sendo provocado por uma luz contada no ambiente virtual, mas sim é oriundo das luzes do próprio escâner do momento da aquisição.

**Figura 90 – Comparativo com métodos convencionais (CPedra)**

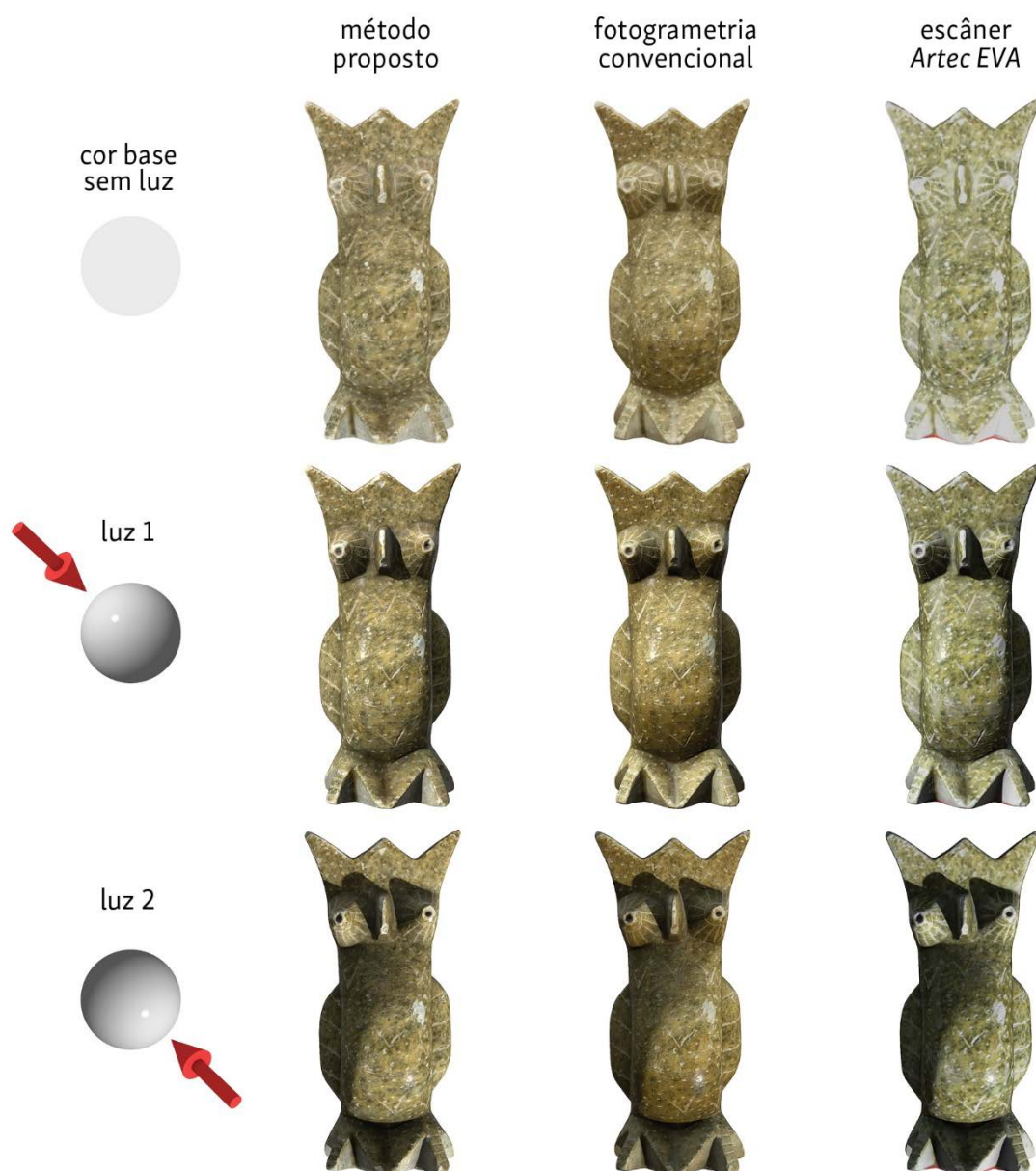
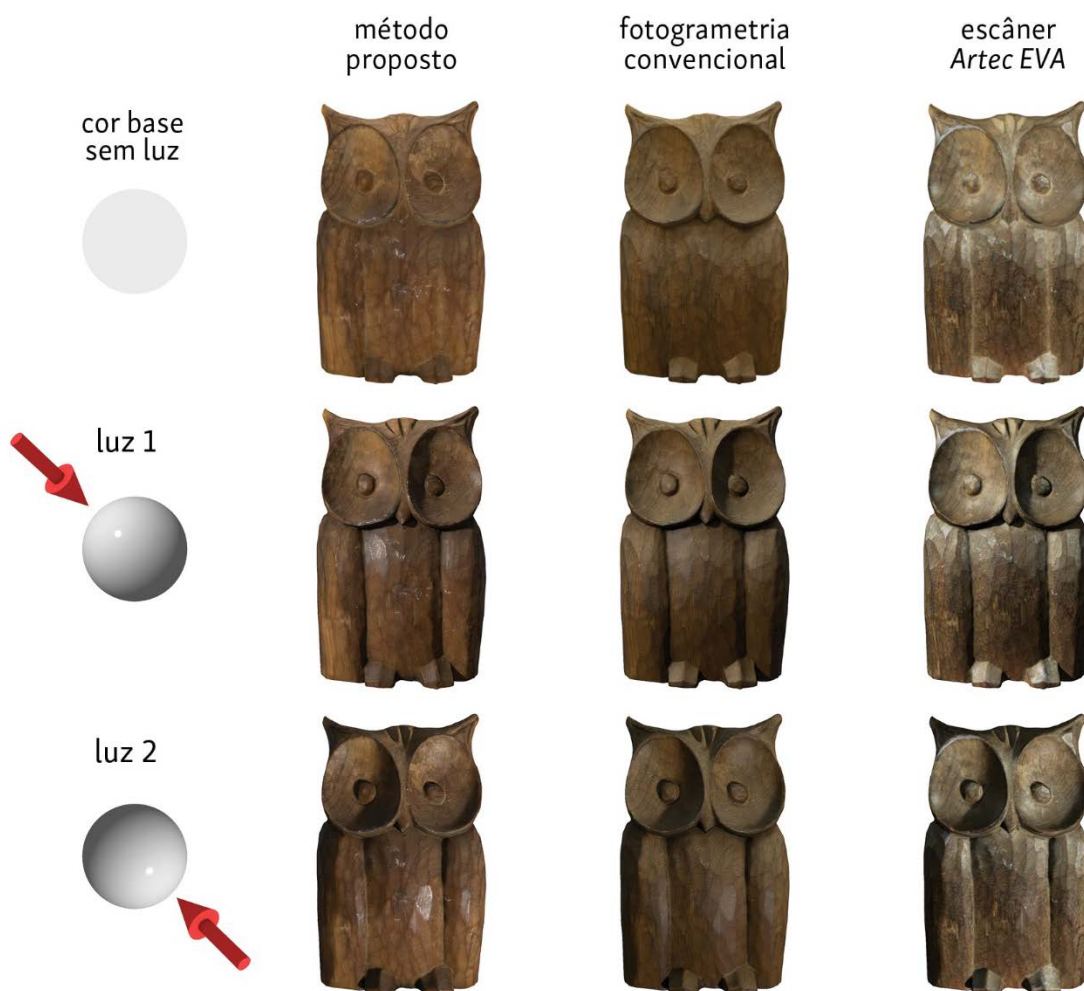


Figura 91 – Comparativo com métodos convencionais (Xixo)



Os modelos representados nas condições de luz 1 e 2 permitem visualizar as consequências dessa informação de luz registrada de forma residual na cor base dos artefatos. Em todos os casos das técnicas comparadas, os efeitos da luz virtual se somam à essa contida na cor base. No caso da Fotogrametria convencional, a luz que incide do canto esquerdo superior quase coincide com a iluminação ambiente residual, resultando em áreas de sombra muito mais escuras do que o esperado. Com a luz incidindo do canto direito inferior as duas informações praticamente se anulam. Observando o modelo CPedra percebe-se que a sombra contida na cor base não permite que a luz inserida no ambiente virtual ilumine a parte de baixo dos olhos do artefato. Já no caso do *Artec EVA*, observa-se que o dispositivo e o *software* correspondente não dispõem de nenhum recurso de calibração de cor, o que dificulta a obtenção de resultados consistentes. Além disso, a especularidade registrada junto

à cor base impede a reprodução correta das cores do artefato, bem como dificulta a identificação da direção de incidência da luz contida na cena.

A análise comparativa evidenciou a eficiência do sistema de iluminação homogênea e da separação dos componentes de refletância por meio da polarização linear implementados no sistema desenvolvido. A cor base obtida a partir do componente de refletância difuso não contém nenhuma iluminação residual perceptível, dessa maneira, o modelo virtual gerado apresenta uma aparência dinâmica, que se adapta completamente às condições de iluminação do ambiente virtual. Os resultados validam o método proposto, evidenciando o aumento na qualidade visual das representações dos artefatos.

No que diz respeito ao armazenamento, a metodologia proposta gera aproximadamente 10 *gigabytes* de dados por artefato, da aquisição de imagens ao modelo final. O modelo tridimensional otimizado e os mapas de texturas gerados, ocupam aproximadamente de 10 a 15 *megabytes*. É oportuno guardar os dados brutos de aquisição ao final do processamento, que podem ser compactados para esse fim. Esses números são relativamente baixos se comparados aos resultados apresentados por Köhler et al. (2013). Observa-se que o preço por *gigabyte*, na aquisição de discos rígidos novos, está em torno de R\$ 0,12 (março de 2018), não sendo necessário, portanto, grandes investimentos.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou o problema da aquisição e representação digital da aparência de objetos físicos, em especial, aqueles pertencentes ao patrimônio cultural. Conforme explicitado, a aparência de uma superfície material é consequência de sua geometria e de seu comportamento de refletância. O estudo permitiu uma maior compreensão dos fenômenos que atuam sobre a formação dessa aparência, e forneceu bases para a identificação de diferentes comportamentos de interação luz-superfície, e dos modelos de representação correspondentes.

Salientou-se que sistemas de digitalização tridimensional convencionais se destacam pela aquisição da geometria, mas, frequentemente, negligenciam outros aspectos da aparência. Em vista disso, propôs-se o desenvolvimento de um sistema de aquisição de aparência para a documentação digital de artefatos do patrimônio cultural, que combinasse técnicas de aquisição geométrica e refletância acessíveis, e ferramentas de texturização para PBR. O estudo apresentado foi bem-sucedido não apenas na configuração desse sistema, como também na fabricação de um protótipo funcional, usado nos ensaios realizados. Os ensaios de aquisição de imagens verificaram o funcionamento do protótipo, e demonstraram seu potencial para aplicação num cenário real. Conforme visto, dependendo da densidade de amostragem desejada, determinada pelo tamanho do passo da plataforma giratória, é possível realizar a captura de imagens de um grande número de artefatos em um curto período. Na configuração com passo de  $20^\circ$  e tempo de exposição de 2 segundos, por exemplo, é possível documentar até 12 artefatos por hora. Para uma amostragem mais densa, com passo de  $8^\circ$ , esse número cai para 5 artefatos por hora.

A implementação da reconstrução geométrica por Fotogrametria mostrou-se eficiente, gerando modelos com desvio quadrático médio abaixo de 0,1 mm, considerado bastante satisfatório para a finalidade de documentação e visualização 3D interativa do patrimônio cultural. Os ensaios realizados verificaram a influência da razão de redimensionamento de imagens e do tamanho do passo sobre a reconstrução geométrica, fornecendo dados para uma tomada de decisão informada. Mostrou-se que, dada uma configuração de aquisição de referência considerada aceitável, por exemplo, passo de  $12^\circ$  com razão de redimensionamento de  $1/4$ , desejando-se obter resultados melhores, a melhor decisão a ser tomada é aumentar a razão para  $1/2$ . A redução do tamanho do passo, isso é, o aumento do número de

imagens, por outro lado, resultaria em poucas melhorias e um aumento significativo no tempo de processamento.

Os módulos de iluminação e polarização do sistema desenvolvidos atenderam aos objetivos estabelecidos, e permitiram realizar a aquisição separada dos componentes de refletância. O uso da polarização linear em conjunto com o sistema de iluminação esférica possibilitou a reconstrução de mapas de cor base desprovidos de informação de luz e sombra. Também foi possível, através do isolamento do componente de refletância especular, gerar mapas de especularidade, convertidos posteriormente em mapas de rugosidade para PBR.

A aquisição de refletância levou ainda em consideração a captura e reprodução correta das cores, que foi possível de ser controlada da aquisição de imagens até a construção do ambiente virtual de visualização, utilizando um alvo de referência cromática. Observa-se, no entanto, que uma vez que a disponibilização online dos modelos possibilita o acesso de inúmeros usuários com diferentes dispositivos, a reprodução final das cores dependerá da calibração de cor de cada equipamento. De todo modo, o produto visual obtido pela utilização dos dados capturados para renderização baseada em física consegue se equiparar à qualidade visual de filmes e jogos digitais da atualidade, sem abrir mão de documentar o artefato como ele realmente é.

O sistema desenvolvido, embora já funcional, reserva diversas oportunidades de otimização para o uso em instituições dedicadas à preservação do patrimônio cultural. Além da parte mecânica e eletrônica do sistema, também deve ser considerado o processamento dos dados, que ainda é distribuído entre diferentes *softwares* comerciais. O desenvolvimento de um *software* próprio, pode não apenas simplificar a operação para o usuário, como também reduzir drasticamente o custo de implementação do sistema.

O presente estudo apresentou uma alternativa técnica e financeiramente viável para a documentação da aparência completa de artefatos do patrimônio cultural. O método proposto pode encontrar aplicação em outras áreas, mas ênfase na preservação do patrimônio cultural se deu por essa ser uma área que carece de soluções tecnológicas e acessíveis. Ainda no que tange à acessibilidade financeira do método apresentado, sua implementação não é restrita ao número de câmeras utilizadas, podendo ser ensaiadas estratégias para utilização de apenas uma ou duas.



## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Estudar e implementar estratégias para a calibração geométrica do sistema de aquisição, e obtenção de modelos em escala real.
- Estudar e implementar estratégias para captura da silhueta do artefato durante a aquisição de imagens, de modo a dispensar etapas subsequentes de criação de máscaras.
- Aprimorar o sistema de iluminação; corrigindo a intensidade nos polos da esfera luminosa formada, bem como provendo isolamento da luz ambiente.
- Desenvolver um alvo de referência de specularidade/ rugosidade, para auxiliar na calibração dos dados capturados.
- Realizar um estudo de aquisição mais amplo, documentando uma gama maior de superfícies materiais, a fim de investigar os limites do método proposto.
- Ensaia a integração de técnicas de aquisição geométrica por triangulação ativa (laser ou luz estruturada), de modo a reduzir o tempo de processamento.
- Ensaia o uso de *softwares* de processamento fotogramétrico de código livre e aberto, a fim de reduzir os custos de implementação do sistema.
- Avaliar o uso do sistema em cenários reais, por profissionais da área de preservação do patrimônio cultural.
- Revisar o projeto do protótipo, em especial o isolamento da luz ambiente, visando alcançar um produto final.
- Desenvolver um *software* próprio, com todas as etapas de processamento integradas.

## REFERÊNCIAS

- ABEL, R. L. et al. Digital preservation and dissemination of ancient lithic technology with modern micro-CT. **Computers & Graphics**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 878–884, 2011.
- ADDY, R. **Chilled Food Association challenges frozen emissions report**. 2012. Disponível em: <<https://www.bakeryandsnacks.com/Article/2012/09/05/Chilled-Food-Association-challenges-frozen-food-emissions-study>>. Acesso em: 12 mar. 2018.
- AJAX-ZOOM. **AJAX-ZOOM 360°/3D with objects gallery**. 2017. Disponível em: <[http://www.ajax-zoom.com/examples/example15\\_gallery\\_clean.php](http://www.ajax-zoom.com/examples/example15_gallery_clean.php)>. Acesso em: 3 fev. 2017.
- AKENINE-MÖLLER, T.; HAINES, E.; HOFFMAN, N. **Real-Time Rendering**. 3. ed. Natick, Massachusetts: A K Peters, 2008.
- ANDRADE, B. T. **A utilização de fotografias digitais de alta qualidade na geração de textura para modelos 3D: uma abordagem prática na preservação digital de acervos culturais e naturais**. 2009. 101 fl. Dissertação (Mestrado em Informática) - Programa de Pós-Graduação em Informática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- ARBACE, L. et al. Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. **Journal of Cultural Heritage**, Nova Iorque, v. 14, n. 4, p. 332–345, 2013.
- ARTEC3D. **3D Object Scanner Artec EVA**. 2018. Disponível em: <<https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva>>. Acesso em: 12 mar. 2018.
- BAUER, W.; WESTFALL, G. D. **University physics with modern physics**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2011.
- BAXTER, M. **Projeto de produto guia prático para o design de novos produtos**. São Paulo: E. Blucher, 2011.
- BECK, L. S. Digital documentation in the conservation of cultural heritage: Finding the practical in best practice. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci**, [s. l.], p. 85–90, 2013.
- BERTANI, D.; CONSOLANDI, L. High resolution imaging in the near infrared. In: MACDONALD, L. (Ed.). **Digital heritage: applying digital imaging to cultural heritage**. 1. ed. Amsterdã: Elsevier, 2006.
- B&H PHOTO VIDEO. **B&H Photo Video**. 2018. Disponível em: <<https://www.bhphotovideo.com/>>. Acesso em: 12 mar. 2018.
- BRUNO, F. et al. From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition. **Journal of Cultural Heritage**, Nova Iorque, v. 11, n. 1, p. 42–49, 2010.

BUENO, A. S. et al. Implementação de técnica reflectance transformation imaging para análise de superfície de manuscritos antigos. In: III ENCONTRO LUSO-BRASILEIRO DE CONSERVAÇÃO E RESTAURO, 2015, Évora. **Anais...** Évora, 2015.

BURLEY, B. Physically-based shading at disney. In: ACM SIGGRAPH, 2012, Los Angeles. **Anais...** Nova Iorque: ACM Press, 2012. Disponível em: <[http://disney-animation.s3.amazonaws.com/uploads/production/publication\\_asset/48/asset/s2012\\_pbs\\_disney\\_brdf\\_notes\\_v3.pdf](http://disney-animation.s3.amazonaws.com/uploads/production/publication_asset/48/asset/s2012_pbs_disney_brdf_notes_v3.pdf)>. Acesso em: 20 dez. 2016.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.

CONSENTINO, A. et al. Pre and post Conservation Diagnostic on a 14th Century Gilded Icon from Taormina, Sicily. **E-conservation Journal**, Évora, 2015. Disponível em: <<http://www.e-conservation.org/issue-3/49-Diagnostics-on-a-14th-Century-Gilded-Icon-from-Taormina>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

COSENTINO, A. Identification of pigments by multispectral imaging; a flowchart method. **Heritage Science**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 8, 2014.

COSENTINO, A. Infrared technical photography for art examination. **e-Preservation Science**, [s. l.], 2016. Disponível em: <[http://www.morana-rtd.com/e-preservationscience/2016/ePS\\_2016\\_a1\\_Cosentino.pdf](http://www.morana-rtd.com/e-preservationscience/2016/ePS_2016_a1_Cosentino.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2017.

CULTURAL HERITAGE IMAGING. **Reflectance Transformation Imaging: Guide to Highlight Image Capture, V2.0**, 2007. Disponível em: <[http://culturalheritageimaging.org/What\\_We\\_Offer/Downloads/Capture/index.html](http://culturalheritageimaging.org/What_We_Offer/Downloads/Capture/index.html)> Acesso em: 18 jan. 2017.

CVAST. **About Us**. 2018. Disponível em: <<https://cvast.usf.edu/about-us/technology/>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

DANA, K. J. et al. Reflectance and texture of real-world surfaces. **ACM Transactions on Graphics**, Nova Iorque, v. 18, n. 1, p. 1–34, 1999.

DEBEVEC, P. et al. Acquiring the reflectance field of a human face. In: SIGGRAPH 2000, **Anais...** Nova Iorque: ACM Press, 2000. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=344779.344855>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

DEBEVEC, P. et al. A Lighting Reproduction Approach to Live-Action Compositing. **ACM Transactions on Graphics**, Nova Iorque, v. 21, n. 3, 2002.

DEBEVEC, P. et al. Estimating surface reflectance properties of a complex scene under captured natural illumination. **ACM Transactions on Graphics**, Nova Iorque, v. 19, 2004. Disponível em: <<http://gl.ict.usc.edu/Research/reflectance/parth-ict-tr-06.2004.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

DELLEPIANE, M. et al. High Quality PTM Acquisition: Reflection Transformation Imaging for Large Objects. In: VAST, 2006, Nicósia. **Anais...** [s. l.]: Eurographics Association, p, 179-186. Disponível em: <<http://vcg.isti.cnr.it/Publications/2006/DCCS06/>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

DELLEPIANE, M. et al. Using Digital 3D Models for Study and Restoration of Cultural Heritage Artifacts. In: STANCO, F.; BATTIATO, S.; GALLO, G. (Eds.). **Digital imaging for cultural heritage preservation: analysis, restoration, and reconstruction of ancient artworks**. Boca Raton: CRC Press, 2011. p. 37–68.

DESVALLÉES, A.; MAIRESSE, A. **Conceitos-chave de museologia**. Armand Colin. Disponível em: <[http://icom.museum/fileadmin/user\\_upload/pdf/Key\\_Concepts\\_of\\_Museology/Conceitos-ChavedeMuseologia\\_pt.pdf](http://icom.museum/fileadmin/user_upload/pdf/Key_Concepts_of_Museology/Conceitos-ChavedeMuseologia_pt.pdf)>. Acesso em: 23 jan. 2017.

DORSEY, J.; RUSHMEIER, H.; SILLION, F. **Digital modeling of material appearance**. 1. ed. Burlington: Morgan Kaufmann, 2007.

DUTTA, A. Face shape and reflectance acquisition using a multispectral light stage. **arXiv preprint arXiv:1105.3617**, [s. l.], 2011. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1105.3617>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

EARL, G. et al. Reflectance transformation imaging systems for ancient documentary artefacts. In: Electronic Visualisation and the Arts, 2011, Londres. **Anais...** Londres: BCS, 2011. Disponível em: <<https://ewic.bcs.org/content/ConWebDoc/40587>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

EARL, G.; MARTINEZ, K.; MALZBENDER, T. Archaeological applications of polynomial texture mapping: analysis, conservation and representation. **Journal of Archaeological Science**, Nova Iorque, v. 37, n. 8, p. 2040–2050, 2010.

EINARSSON, P. et al. Relighting human locomotion with flowed reflectance fields. **Rendering techniques**, [s. l.], v. 2006, p. 17th, 2006.

EXPERT CAR BODY REPAIRS. **Car Scratch DIY**. 2013. Disponível em: <<http://expertcarbodyrepairs.blogspot.com.br/2012/02/car-scratch-diy.html>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

FARO BRASIL. **FARO Brasil**. 2018. Disponível em: <<https://www.faro.com/pt-br/produtos/>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

GHOSH, A. et al. Multiview face capture using polarized spherical gradient illumination. In: SIGGRAPH, 2011, Vancouver. **Anais...** Nova Iorque: ACM Press, 2011. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2024156.2024163>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

GIBSON, J. J. The ecological approach to the visual perception of pictures. **Leonardo**, Cambridge, v. 11, n. 3, p. 227–235, 1978.

GOMES, L.; SILVA, L.; BELLON, O. R. P. 3D reconstruction methods for digital preservation of cultural heritage: A survey. **Pattern Recognition Letters**, Nova Iorque, v. 50, p. 3–14, 2014.

GRÜN, A.; REMONDINO, F.; ZHANG, L. Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. **The Photogrammetric Record**, [s. l.], v. 19, n. 107, p. 177–199, 2004.

GUARNIERI, A.; PIROTTI, F.; VETTORE, A. Cultural heritage interactive 3D models on the web: An approach using open source and free software. **Journal of Cultural Heritage**, Nova lorque, v. 11, n. 3, p. 350–353, 2010.

GUIDI, G.; RUSSO, M.; ANGHELEDDU, D. 3D survey and virtual reconstruction of archeological sites. **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**, Nova lorque, v. 1, n. 2, p. 55–69, 2014.

HAINDL, M.; FILIP, J.; VÁVRA, R. Digital material appearance: the curse of terabytes. **ERCIM News**, [s. l.], v. 90, p. 49–50, 2012.

HAINDL, M.; FILIP, J. **Visual Texture**: accurate material appearance measurement, representation and modeling. London: Springer, 2013.

HAMMER, Ø. et al. Imaging fossils using reflectance transformation and interactive manipulation of virtual light sources. **Palaeontologia Electronica**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 1–9, 2002.

HAWKINS, T. et al. Animatable Facial Reflectance Fields. In: EGSR, 2004, Norrköping. **Anais...** [s. l.]: The Eurographics Association, 2004.

HEWLETT-PACKARD. **HP 3D Scan**. 2016. Disponível em: <<http://www.hp.com/us/en/campaign/3Dscanner/overview.html>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

HOLROYD, M.; LAWRENCE, J.; ZICKLER, T. A coaxial optical scanner for synchronous acquisition of 3D geometry and surface reflectance. **ACM Transactions on Graphics**, Nova lorque, v. 29, n. 4, 2010. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1778836>>. Acesso em: 18 nov. 2016.

IHRKE, I. et al. Transparent and Specular Object Reconstruction. **Computer Graphics Forum**, Nova lorque, v. 29, n. 8, p. 2400–2426, 2010.

INFINITE-REALITIES. **Infinite-Realities**. 2018. Disponível em: <<http://ir-ltd.net/>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

INSTITUTE FOR CREATIVE TECHNOLOGIES. **The Light Stages at UC Berkeley and USC ICT**. 2017. Disponível em: <<http://gl.ict.usc.edu/LightStages/>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

IPHAN. **Patrimônio Cultural**. 2004. Disponível em: <<http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/218/>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

IPHAN. **O Iphan**. 2014a. Disponível em: <<http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/872/>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

IPHAN. **Bens Tombados**. 2014b. Disponível em: <<http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/126/>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

KARASIK, A.; SMILANSKY, U. 3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory. **Journal of Archaeological Science**, Nova lorque, v. 35, n. 5, p. 1148–1168, 2008.

KASTRENAKES, J. **Google made an insanely high-res camera to preserve great works of art**. 2016. Disponível em: <<http://www.theverge.com/2016/5/17/11686296/art-camera-google-cultural-institute>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

KÖHLER, J. et al. A full-spherical device for simultaneous geometry and reflectance acquisition. In: IEEE Applications of Computer Vision (WACV), 2013, [s. l.]. **Anais...**, [s. l.]: IEEE Press, 2013. p. 355-362.

KOPF, J. et al. Capturing and viewing gigapixel images. **ACM Transactions on Graphics**, Nova lorque, v. 26, n. 3, 2007. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1276494>>. Acesso em: 23 jan. 2017.

LEVOY, M. et al. The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. In: SIGGRAPH 2000, Nova lorque. **Anais...** Nova lorque: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1145/344779.344849>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

LOVEJOY, M. **Digital Currents: art in the Electronic Age**. Nova lorque: Routledge, 2004.

MALZBENDER, T.; GELB, D.; WOLTERS, H. Polynomial texture maps. In: ACM SIGGRAPH'01, 2001, Los Angeles. **Anais...** Nova lorque: ACM Press, 2001.

MARIST COLLEGE. **Marist Archives & Special Collections**. 2010. Disponível em: <<http://library.marist.edu/archives/index.html>>. Acesso em: 20 jan. 2017.

MATUSIK, W. et al. A data-driven reflectance model. In: ACM SIGGRAPH, 2003, San Diego. **Anais...** Nova lorque: ACM Press, 2003.

MCDERMOTT, W. **The Comprehensive PBR Guide, Vol. 1: The Theory of Physically Based Rendering**, 2015a. Disponível em: <<https://www.allegorithmic.com/pbr-guide>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

MCDERMOTT, W. **The comprehensive PBR guide, vol. 2 - Light and Matter: practical guidelines for creating PBR textures**, 2015b. Disponível em: <<https://www.allegorithmic.com/pbr-guide>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

MEIRA, A. L. G. **O passado no futuro da cidade: políticas públicas e participação dos cidadãos na preservação do patrimônio cultural de Porto Alegre nas décadas de 70 a 90**. 273 f. Dissertação (Mestrado em Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

MEJIA, P. **Wet Pebble Stones**. 2013. Disponível em: <[http://www.paolomejia.com/?attachment\\_id=1717](http://www.paolomejia.com/?attachment_id=1717)>. Acesso em: 10 mar. 2018

MICROSOFT. **The Creators Update | New Windows Features Coming 2017**. 2016. Disponível em: <[www.microsoft.com/en-us/windows/upcoming-features](http://www.microsoft.com/en-us/windows/upcoming-features)>. Acesso em: 9 dez. 2016.



MUDGE, M. et al. Reflection transformation imaging and virtual representations of coins from the hospice of the Grand St. Bernard. In: VAST'05, 2005, Pisa. **Anais...** [s. l.]: Eurographics Association, 2005.

MUDGE, M.; ASHLEY, M.; SCHROER, C. A digital future for cultural heritage. In: CIPA, 2007, Atenas. **Anais...** [s. l.]: CIPA, 2017. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/5-c53/papers/FP104.pdf>>. Acesso em: 27 jan. 2017.

MÜLLER, G. et al. Acquisition, synthesis, and rendering of bidirectional texture functions. **COMPUTER GRAPHICS FORUM**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 83-109, 2005. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-8659.2005.00830.x/full>>. Acesso em: 22 out. 2016.

MÜLLER, V. (ED.). Polarization-based separation of diffuse and specular surface reflection. In: MUSTERERKENNUNG, 1995, Berlin. **Anais...** Berlin: Springer, 1995.

MUNIZ, G. R. **O uso do design e das tecnologias 3D na criação do repositório digital de elementos de fachada dos prédios históricos UFRGS**. 2015. 140 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

NEWELL, J. Old objects, new media: Historical collections, digitization and affect. **Journal of Material Culture**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 287–306, 2012.

NEWMAN, S. E. Applications of Reflectance Transformation Imaging (RTI) to the study of bone surface modifications. **Journal of Archaeological Science**, [s. l.], v. 53, p. 536–549, 2015.

NEWZOO. **The Global Games Market 2016 | Per Region & Segment**. 2016. Disponível em: <<https://newzoo.com/insights/articles/global-games-market-reaches-99-6-billion-2016-mobile-generating-37/>>. Acesso em: 7 dez. 2016.

NICODEMUS, F. E. et al. **Considerations and Nomenclature for Reflectance**. Washington D.C.: UNT Digital Library, 1977.

NÖLL, T. et al. Faithful, compact and complete digitization of cultural heritage using a full-spherical scanner. In: DIGITAL HERITAGE, 2013, Marselha. **Anais...** [s. l.]: Eurographics Association, 2013.

NUNES, A. L. P. **Rendering baseado em amostragem da BRDF de órgãos vivos por videolaparoscopia**. 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/105049>>. Acesso em: 22 out. 2016.

OSORIO, M. F. et al. A novel approach to documenting artifacts at the Gold Museum in Bogota. **Computers & Graphics**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 894–903, 2011.

PAVLIDIS, G. et al. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. **Journal of Cultural Heritage**, Nova Iorque, v. 8, n. 1, p. 93–98, 2007.

PIXEL LIGHT EFFECTS. **Pixel light effects - cross polarized photogrammetry Scanning**. 2015. Disponível em: <<http://pixellighteffects.com/new-cross-polarized-scanning/>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

PORTER, S. T. et al. Portable and low-cost solutions to the imaging of Paleolithic art objects: A comparison of photogrammetry and reflectance transformation imaging. **Journal of Archaeological Science: Reports**, Nova Iorque, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352409X16303753>>. Acesso em: 3 out. 2016.

REINHARD, E. (ED.). **High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting**. 2nd ed. Burlington, MA: Morgan Kaufmann/Elsevier, 2010.

RUBY LANE, INC. **Antique chinese red translucent stone snuff bottle carved, signed/ snuffbottle**. 2018. Disponível em: <<https://www.rubylane.com/item/589451-RLES2888/Antique-Chinese-red-translucent-stone-snuff>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

RUSSEL, J. **Basic theory of physically-based rendering**, 2015. Disponível em: <<https://www.marmoset.co/posts/basic-theory-of-physically-based-rendering/>>. Acesso em: 6 mar. 2017.

SANTOS JUNIOR, J. O. et al. 3D reconstruction of cultural heritages: Challenges and advances on precise mesh integration. **Computer Vision and Image Understanding**, [s. l.], v. 116, n. 12, p. 1195–1207, 2012.

SCHROER, C. Advanced imaging tools for museum and library conservation and research. **Bulletin of the American Society for Information Science and Technology**, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 38–42, 2012.

SCHWARTZ, C. et al. Integrated high-quality acquisition of geometry and appearance for cultural heritage. In: VAST, 2011, Prato. **Anais...** [s. l.]: Eurographics Association, 2011. Disponível em: <<http://diglib.eg.org/EG/DL/WS/VAST/VAST11/025-032.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

SCHWARTZ, C.; KLEIN, R. Acquisition and Presentation of Virtual Surrogates for Cultural Heritage Artefacts. **Proceedings of EVA 2012**, [s. l.], p. 50–57, 2012.

SILVA, F. P. **O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos**. 2006. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SILVA, F. P. **Usinagem de espumas de poliuretano e digitalização tridimensional para fabricação de assentos personalizados para pessoas com deficiência**. 2011. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SKETCHFAB. **Art Spotlight: Ravasch Cario**. 2017a. Disponível em: <<https://blog.sketchfab.com/art-spotlight-ravasch-cario/>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

SKETCHFAB. **Over 500 cultural institutions have joined Sketchfab.** 2017b. Disponível em: <<https://blog.sketchfab.com/500-cultural-institutions-joined-sketchfab/>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

SMITH, W. A. P.; HANCOCK, E. R. Estimating Facial Reflectance Properties Using Shape-from-Shading. **International Journal of Computer Vision**, [s. l.], v. 86, n. 2–3, p. 152–170, 2010.

SMITHSONIAN INSTITUTE. **Smithsonian X 3D.** 2017. Disponível em: <<https://3d.si.edu/>>. Acesso em: 3 fev. 2017.

SNAPDEAL. **Indian arts museum textured brass artifact brass music man.** 2017. Disponível em: <<https://www.snapdeal.com/product/indian-arts-museum-textured-brass/659442743499>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

SOARES, S. J. **Usinagem a laser de modelos 3D por meio de gravação de múltiplas camadas em máquinas galvanométricas pós-objetivas.** 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SOTHEBY'S. **LOT 267:** An Italian neoclassical painted side chair late 18th century, attributed Michelangelo Pergolesi. 2008. Disponível em: <<http://www.sothebys.com/en/auctions/ecatalogue/2008/fine-european-furniture-including-ceramics-tapestries-carpets-and-works-of-art-n08472/lot.267.html>>. Acesso em: 8 fev. 2017.

SOUTH AUSTRALIAN MUSEUM. **Australian aboriginal collections digitisation project.** 2018. Disponível em: <<http://www.samuseum.sa.gov.au/explore/image-galleries/australian-aboriginal-collections-digitisation-project>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

STANCO, F.; TANASI, D. Experiencing the past: computer graphics in archeology. In: STANCO, F.; BATTIATO, S.; GALLO, G. (Eds.). **Digital imaging for cultural heritage preservation: analysis, restoration, and reconstruction of ancient artworks.** Boca Raton: CRC Press, 2011. p. 1–36.

TAYLOR, A. E. F. **Illumination Fundamentals.** Troy, NY: Rensselaer, 2000. Disponível em: <<http://www.lrc.rpi.edu/resources/publications/pdf/illuminationfund.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2016.

THE METROPOLITAN MUSEUM OF ART. **Terracotta bowl.** 2018a. Disponível em: <<https://www.metmuseum.org/toah/works-of-art/10.210.37/>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

THE METROPOLITAN MUSEUM OF ART. **Pair of keros with carved feline handles.** 2018b. Disponível em: <<https://www.metmuseum.org/toah/works-of-art/1994.35.22,.23/>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

TUNWATTANAPONG, B. et al. Acquiring reflectance and shape from continuous spherical harmonic illumination. **Transactions on Graphics**, Nova Iorque, v. 32, n. 4, p. 109, 2013.

TUNWATTANAPONG, B.; EAKSARAYUT, W.; SITTHI-AMORN, P. Lumio3D: Rapid 3D Geometry and Reflectance Acquisition from Continuous Spherical Illumination. In: ACM SIGGRAPH'16, 2016, Anaheim. **Anais...** Nova Iorque: ACM Press, 2016. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2929484.2929486>>. Acesso em: 19 out. 2016.

WADE, N. J.; SWANSTON, M. T. **Visual perception: an introduction**. 2. ed. Hove: Psychology Press [u.a.], 2001.

WARD, G. J. Measuring and modeling anisotropic reflection. **ACM SIGGRAPH Computer Graphics**, Nova Iorque, v. 26, n. 2, p. 265–272, 1992.

WARE, C. **Information visualization: perception for design**. Third edition ed. Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2013.

WEINMANN, M.; KLEIN, R. Advances in Geometry and Reflectance Acquisition (Course Notes). In: SIGGRAPH ASIA, 2015, Kobe. **Anais...** Nova Iorque: ACM Press, 2015. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2818143.2818165>>. Acesso em: 19 out. 2016.

WHITE, D. R. et al. Reflectometer for measuring the bidirectional reflectance of rough surfaces. **Applied Optics**, [s. l.], v. 37, n. 16, p. 3450–3454, 1998.

WIKIPEDIA. **Espectro visível**. 2016. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Espectro\\_vis%C3%ADvel&oldid=47221962](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Espectro_vis%C3%ADvel&oldid=47221962)>. Acesso em: 7 dez. 2016.

WIKIPEDIA. **Incandescence**. 2017. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Incandescence>>. Acesso em: 7 dez. 2016.

WIKIPEDIA. **Mold**. 2018. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Mold>>. Acesso em: 7 dez. 2016.

YASSUDA, S. N. **Documentação museológica: uma reflexão sobre o tratamento descritivo do objeto no Museu Paulista**. 2009. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Informação) – Programa de Pós-Graduação em Ciência da Informação, Universidade Estadual Paulista, Marília, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/handle/11449/93662>>. Acesso em: 26 jan. 2017.

YOUNAN, S.; TREADAWAY, C. Digital 3D models of heritage artefacts: Towards a digital dream space. **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 240–247, 2015.

ZARA, J. Virtual reality and cultural heritage on the web. **Proceedings of the 7th International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence**, Limoges, p. 101-112, 2004. Disponível em: <<http://dcgi.felk.cvut.cz/home/zara/papers/Zara-3IA04.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2017.

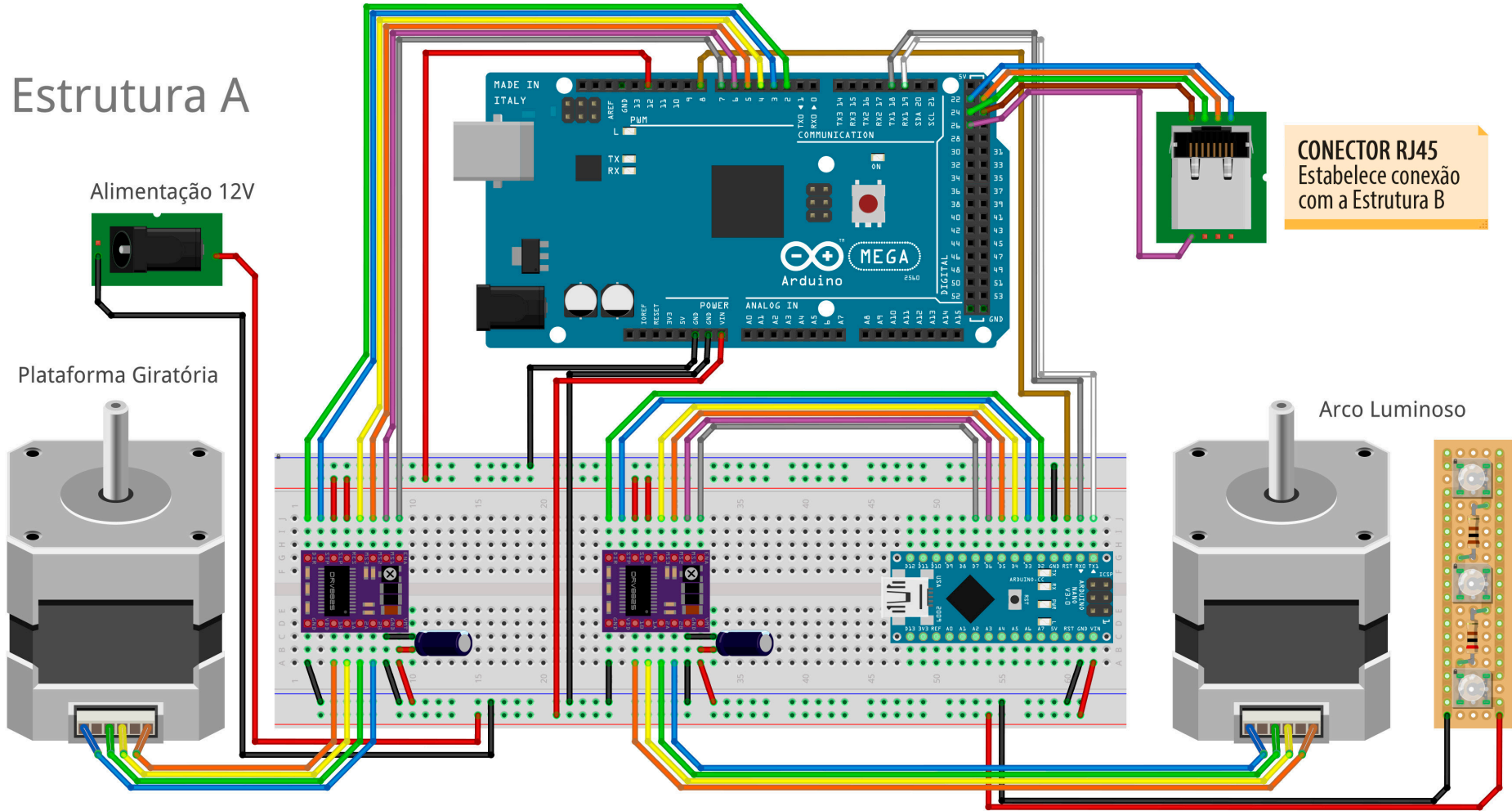
ZHENG, Z. et al. An extended photometric stereo algorithm for recovering specular object shape and its reflectance properties. **Computer Science and Information Systems**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 1–12, 2010.

## APÊNDICE A

- **Esquema eletrônico do sistema de aquisição**
- **Programação do microcontrolador principal**
- **Programação do microcontrolador auxiliar**

Esquema eletrônico do sistema de aquisição

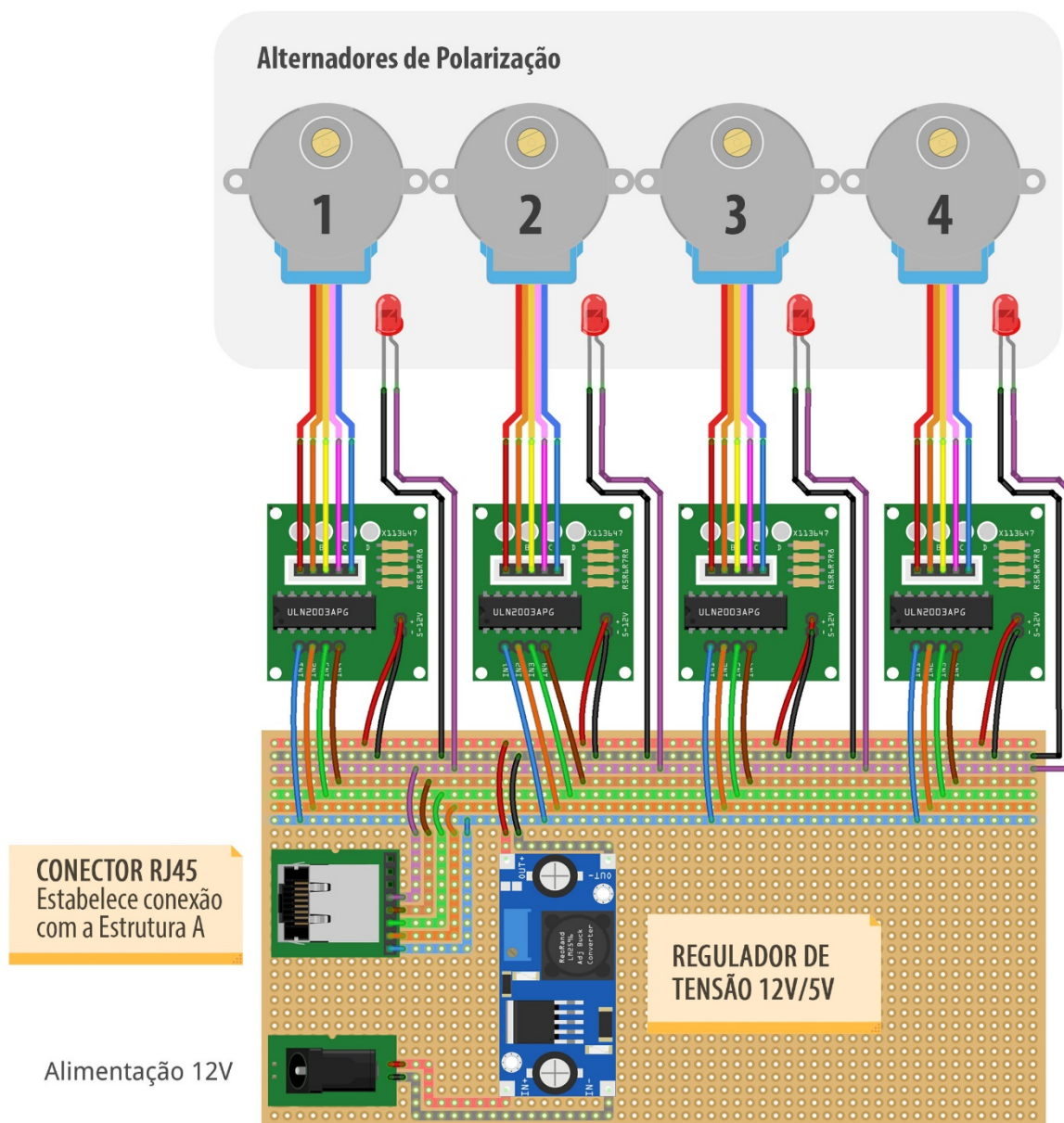
Estrutura A





## Esquema eletrônico do sistema de aquisição

### Estrutura B



## Programação do microcontrolador principal

```

/*
Nome: ControladorPrincipal.ino
Autores: DANTAS, P. V. F.; BOHRER, V. C.; SILVA, F. P.
Data: 07/02/2018
Descrição: Programacao para o microcontrolador principal do sistema de
aquisicao. Estabelece comunicacao com o controlador auxiliar, e controla o
sequenciamento da aquisição de imagens.
*/

//inicio do script

#include <Arduino.h>
#include <DRV8825.h>
#include <multiCameraIrControl.h>

#define MOTOR_STEPS 200 // especificao de passos por revolucao do motor

// pinos necessarios para o funcionamento pleno
#define DIR 2
#define STEP 3
#define MODE2 4
#define MODE1 5
#define MODE0 6
#define ENBL 7
#define AUX 12
#define RESET 8
#define IN1 22
#define IN2 23
#define IN3 24
#define IN4 25

DRV8825 stepper(MOTOR_STEPS, DIR, STEP, MODE0, MODE1, MODE2);

Nikon D90(26); // especificao da camera para acionamento remoto

int MSTP = 32;
int RPM = 2;
int expT = 4000;
int passo[] = {4, 5, 8, 10, 12, 15, 20, 24, 30}; // tamanho do passo em
graus
int passoBUT;
int posCUR;
int posMAX;
int posMED;
int comando = 0; // indica o comando escolhido pelo operador
int arco = 0; // envia comando para o controlador auxiliar
int flag = 0; // indica o estatus do arco
float ajuste = 1.2;
int passos = 4096 * ajuste; // passos por revolucao do 28BYJ-48
int cstep = 1;

// funcao para inicializar os parametros da plataforma
void inicializa() {
digitalWrite(AUX, HIGH); // regula o estado de RESET e SLEEP
stepper.begin(RPM, MSTP);
passoBUT = 0;
posCUR = 0;
posMAX = (360 / passo[passoBUT]) - 1;
posMED = (posMAX + 1) / 2;

Serial.println("#####\nPARAMETROS DE INICIALIZACAO");
Serial.print("Velocidade (RPM): ");

```

```

Serial.println(RPM);
Serial.print("Micropasso: ");
Serial.println(MSTP);
Serial.print("Tamanho do Passo (graus): ");
Serial.println(passo[passoBUT]);
Serial.print("Total de Posicoes: ");
Serial.println(360 / passo[passoBUT]) ;
Serial.println("#####\n");
}

// funcao para retornar a posicao inicial da plataforma
void posInicial() {
  // se a posição atual for menor do que a posicao media (posMED), retorna
  para a posicao inicial decrementando o contador de posicao
  if (posCUR < posMED) {
    for (int x = 0; x < posCUR; x++) {
      stepper.rotate(-passo[passoBUT]);
    }
    posCUR = 0;
  }

  // se a posicao atual for maior do que a posicao media (posMED), retorna
  para a posicao inicial incrementando o contador de posicao
  else if (posCUR >= posMED) {
    for (int x = posCUR; x < (posMAX + 1); x++) {
      stepper.rotate(passo[passoBUT]);
    }
    posCUR = 0;
  }
  Serial.println("\nMaquina na posicao inicial.\n");
}

// funcao para avançar um passo
void giraFrente() {
  // se a posicao atual for menor do que a posicao final, avançar um passo
  e incrementar o contador de posicao
  if (posCUR < posMAX) {
    stepper.rotate(passo[passoBUT]);
    posCUR++;
  }

  // se estiver na posicao final, avançar um passo e zerar o contador de
  posicao
  else if (posCUR == posMAX) {
    stepper.rotate(passo[passoBUT]);
    posCUR = 0;
  }
  Serial.println("\nGiro concluido.");
  Serial.print("Posicao: ");
  Serial.println(posCUR);
  Serial.print("\n");
}

// funcao para voltar um passo
void giraTras() {
  if (posCUR > 0) {
    stepper.rotate(-passo[passoBUT]);
    posCUR--;
  }
  Serial.println("\nGiro concluido.");
  Serial.print("Posicao: ");
  Serial.println(posCUR);
}

```

```

Serial.print("\n");
}

// funcao para dar uma volta completa
void giraVolta() {
  if (posCUR == 0) {
    stepper.rotate(360);
  }
  else {
    Serial.println("\nColoque a plataforma na posicao inicial.\n");
  }
}

// funcao passo do motor 28BYJ-48
void step1(int sentido) {
  switch (cstep)
  {
    case 0:
      digitalWrite(IN1, LOW);
      digitalWrite(IN2, LOW);
      digitalWrite(IN3, LOW);
      digitalWrite(IN4, HIGH);
      break;
    case 1:
      digitalWrite(IN1, LOW);
      digitalWrite(IN2, LOW);
      digitalWrite(IN3, HIGH);
      digitalWrite(IN4, HIGH);
      break;
    case 2:
      digitalWrite(IN1, LOW);
      digitalWrite(IN2, LOW);
      digitalWrite(IN3, HIGH);
      digitalWrite(IN4, LOW);
      break;
    case 3:
      digitalWrite(IN1, LOW);
      digitalWrite(IN2, HIGH);
      digitalWrite(IN3, HIGH);
      digitalWrite(IN4, LOW);
      break;
    case 4:
      digitalWrite(IN1, LOW);
      digitalWrite(IN2, HIGH);
      digitalWrite(IN3, LOW);
      digitalWrite(IN4, LOW);
      break;
    case 5:
      digitalWrite(IN1, HIGH);
      digitalWrite(IN2, HIGH);
      digitalWrite(IN3, LOW);
      digitalWrite(IN4, LOW);
      break;
    case 6:
      digitalWrite(IN1, HIGH);
      digitalWrite(IN2, LOW);
      digitalWrite(IN3, LOW);
      digitalWrite(IN4, LOW);
      break;
    case 7:
      digitalWrite(IN1, HIGH);
      digitalWrite(IN2, LOW);

```

```

        digitalWrite(IN3, LOW);
        digitalWrite(IN4, HIGH);
        break;
    default:
        digitalWrite(IN1, LOW);
        digitalWrite(IN2, LOW);
        digitalWrite(IN3, LOW);
        digitalWrite(IN4, LOW);
        break;
    }
    if (sentido == 1) {
        cstep = cstep + 1;
        if (cstep == 8) {
            cstep = 0;
        }
    } else {
        cstep = cstep - 1;
        if (cstep == -1) {
            cstep = 7;
        }
    }
}

// funcao para captura de fotos polarizadas
void tiraFoto() {
    delay(500);
    D90.shotNow();
    delay(expT + 500);
    for (int x = 0; x < passos; x++) {
        step1(1);
        delayMicroseconds(900);
    }
    D90.shotNow();
    delay(expT + 500);
    for (int x = 0; x < passos; x++) {
        step1(-1);
        delayMicroseconds(900);
    }
    Serial.println("\nFotos tiradas.\n");
}

// funcao para iniciar ou interromper sequencia de aquisicao automatica
void seqAuto() {
    if (posCUR == 0) {
        Serial.println("\nIniciando sequencia automatica...\n");
        delay(1000);
        int rep = 0;
        while (rep < (360 / passo[passoBUT])) {
            Serial.print("Posicao: ");
            Serial.println(posCUR);
            delay(500);
            D90.shotNow();
            delay(expT + 500);
            for (int x = 0; x < passos; x++) {
                step1(1);
                delayMicroseconds(900);
            }
            D90.shotNow();
            delay(expT + 500);
            for (int x = 0; x < passos; x++) {
                step1(-1);
                delayMicroseconds(900);
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    stepper.rotate(passo[passoBUT]);
    rep++;
    posCUR++;
    if (Serial.available() > 0) {
        int com = Serial.parseInt();
        if (com == 6) {
            rep = 360;
        }
    }
}
posCUR = 0;
Serial.println("\nSequencia automatica concluida.\n");
} else {
    Serial.println("\nRetorne a plataforma para a posicao inicial.\n");
}
}

// funca para iniciar ou interromper sequencia de fotogrametria
convencional
void fotogrametria() {
    if (posCUR == 0) {
        Serial.println("\nIniciando sequencia automatica...\n");
        delay(1000);
        int rep = 0;
        while (rep < (360 / passo[passoBUT])) {
            Serial.print("Posicao: ");
            Serial.println(posCUR);
            delay(500);
            D90.shotNow();
            delay(2000);
            stepper.rotate(passo[passoBUT]);
            rep++;
            posCUR++;
            if (Serial.available() > 0) {
                int com = Serial.parseInt();
                if (com == 7) {
                    rep = 360;
                }
            }
        }
        posCUR = 0;
        Serial.println("\nFotogrametria concluida.\n");
    }
    else {
        Serial.println("\nRetorne a plataforma para a posicao inicial.\n");
    }
}

// funcao para alterar tamanho do passo
void alteraPasso() {
    Serial.println("\nEscolha o passo da plataforma:");
    Serial.println("\n1. 4 graus.");
    Serial.println("2. 5 graus.");
    Serial.println("3. 8 graus.");
    Serial.println("4. 10 graus.");
    Serial.println("5. 12 graus.");
    Serial.println("6. 15 graus.");
    Serial.println("7. 20 graus.");
    Serial.println("8. 24 graus.");
    Serial.println("9. 30 graus.");
    while (Serial.available() <= 0) {}
}

```



```

int com = Serial.parseInt();
switch (com) {
  case 1:
    passoBUT = 0;
    break;
  case 2:
    passoBUT = 1;
    break;
  case 3:
    passoBUT = 2;
    break;
  case 4:
    passoBUT = 3;
    break;
  case 5:
    passoBUT = 4;
    break;
  case 6:
    passoBUT = 5;
    break;
  case 7:
    passoBUT = 6;
    break;
  case 8:
    passoBUT = 7;
    break;
  case 9:
    passoBUT = 8;
    break;
  default:
    Serial.println("\nComando invalido!\n");
    break;
}
Serial.print("\nPasso alterado para (graus): ");
Serial.println(passo[passoBUT]);
Serial.print("Total de Posicoes: ");
Serial.println(360 / passo[passoBUT]);
Serial.print("\n");
posMAX = (360 / passo[passoBUT]) - 1;
posMED = (posMAX + 1) / 2;
}

// funcao para ligar ou desligar a rotaçao do arco luminoso
void acionaArco() {
  // a variavel flag armazena o estado do arco (ligado ou desligado)
  if (flag == 0) {
    Serial.println("\nEscolha a velocidade de rotacao do arco:");
    Serial.println("\n1. 20 rpm.");
    Serial.println("2. 30 rpm.");
    Serial.println("3. 60 rpm.");
    while (Serial.available() <= 0) {}
    int com = Serial.parseInt();
    int rpm = 0;
    int invalido = 0;
    switch (com) {
      case 1:
        arco = 2;
        rpm = 20;
        expT = 3000;
        break;
      case 2:
        arco = 3;

```

```

        rpm = 30;
        expT = 2000;
        break;
    case 3:
        arco = 4;
        rpm = 60;
        expT = 1000;
        break;
    default:
        invalido = 1;
        Serial.println("\nComando invalido!\n");
        break;
}
if (invalido == 0) {
    Serial1.print(arco);
    Serial.print("\nVelocidade de rotacao do arco alterada para (rpm):
");
    Serial.println(rpm);
    delay(3000);
    Serial.println("Iniciando a rotacao do arco...\n");
    arco = 1;
    Serial1.print(arco);
    flag = 1;
}
}
else if (flag == 1) {
    Serial.println("\nRotacao do arco interrompida.\n");
    digitalWrite(RESET, LOW);
    delay(2000);
    digitalWrite(RESET, HIGH);
    flag = 0;
}
}

void setup() {
    digitalWrite(RESET, HIGH);
    Serial.begin(9600);
    Serial1.begin(9600);
    pinMode(AUX, OUTPUT);
    pinMode(RESET, OUTPUT);
    pinMode(IN1, OUTPUT);
    pinMode(IN2, OUTPUT);
    pinMode(IN3, OUTPUT);
    pinMode(IN4, OUTPUT);
    inicializa();
    delay(1000);
}

void loop() {
    Serial.println("MENU");
    Serial.println("\n1. Posicao inicial.");
    Serial.println("2. Proxima posicao.");
    Serial.println("3. Posicao anterior.");
    Serial.println("4. Volta completa.");
    Serial.println("5. Tirar foto.");
    Serial.println("6. Iniciar/Parar sequencia automatica.");
    Serial.println("7. Iniciar/Parar fotogrametria convencional.");
    Serial.println("8. Alterar o tamanho passo da plataforma.");
    Serial.println("9. Ligar/Desligar rotacao do arco.");
    while (Serial.available() <= 0) {}
    comando = Serial.parseInt();
    switch (comando) {

```

```
    case 1:
        posInicial();
        break;
    case 2:
        giraFrente();
        break;
    case 3:
        giraTras();
        break;
    case 4:
        giraVolta();
        break;
    case 5:
        tiraFoto();
        break;
    case 6:
        seqAuto();
        break;
    case 7:
        fotogrametria();
        break;
    case 8:
        alteraPasso();
        break;
    case 9:
        acionaArco();
        break;
    default:
        Serial.println("\nComando invalido!\n");
        break;
}
delay(1000);
}
```

// fim do script

## Programação do microcontrolador auxiliar

```

/*
Nome: ControladorAuxiliar.ino
Autores: DANTAS, P. V. F.; BOHRER, V. C.; SILVA, F. P.
Data: 07/02/2018
Descrição: Programacao para o microcontrolador auxiliar do sistema de
aquisicao. Desempenha as funcoes de comunicacao com o microcontrolador
principal e rotaçao do arco luminoso.
*/

//inicio do script

#include <Arduino.h>
#include <DRV8825.h>

#define MOTOR_STEPS 200 // especificacao de passos por revolucao do motor

// pinos necessarios para o funcionamento pleno
#define DIR 2
#define STEP 3
#define MODE2 4
#define MODE1 5
#define MODE0 6
#define ENBL 7
#define AUX 12

DRV8825 stepper(MOTOR_STEPS, DIR, STEP, MODE0, MODE1, MODE2);

int MSTP = 32;
int RPM = 35;
int comando = 0;

void setup() {
  pinMode(AUX, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  digitalWrite(AUX, HIGH);
  stepper.begin(RPM, MSTP);
  stepper.setSpeedProfile(LINEAR_SPEED, 50, 50);
  delay(1000);
}

void loop() {
  delay(2000);
  if (Serial.available()) {
    comando = Serial.parseInt();
    if (comando == 1) {
      stepper.rotate(7200000);
    }
    if (comando == 2) {
      stepper.setRPM(22);
    }
    if (comando == 3) {
      stepper.setRPM(35);
    }
    if (comando == 4) {
      stepper.setRPM(84);
    }
  }
}

// fim do script

```

## APÊNDICE B

- Script de *Photoshop* para criação de máscaras
- Script de *Photoshop* para separação do componente especular

## Script para automação da criação de máscaras

```

/*
Nome: CriarMascara.jsx
Autores: DANTAS, P. V. F.; BOHRER, V. C.; SILVA, F. P.
Data: 07/02/2018
Descrição: Script para photoshop que gera mascaras para cada imagem contida
no ditetorio informado.
*/

// inicio do script

app.preferences.rulerUnits = Units.PIXELS;

var inFolder = new Folder(Folder.selectDialog())

if(inFolder != null){

    var fileList = inFolder.GetFiles(/\.(\.jpg|tif|psd|bmp|gif|png|)\$/i);

}

for(var a = 0; a < fileList.length; a++){

    var docRef = open(fileList[a]);

    var dir1 = "Difuso"; // imagens da refletancia difusa
    var dir2 = "Composto"; // imagens da refletancia composta
    var dir3 = "Mascara"; // destino para mascaras

    var tempDoc = app.activeDocument;

    var fileName = tempDoc.name;
    var filePath = tempDoc.path.toString();
    var tempDir = filePath.substring(filePath.lastIndexOf("/") + 1,
filePath.length);

    if (tempDir == dir1){

        var otherImagePath = filePath.substring(0, filePath.lastIndexOf(dir1));

    }

    if (tempDir == dir2){

        var otherImagePath = filePath.substring(0, filePath.lastIndexOf(dir2));

    }

    // redefine cores de primeiro e segundo plano
    var BGcolor = new SolidColor();
    BGcolor.rgb.red = 255;
    BGcolor.rgb.green = 255;
    BGcolor.rgb.blue = 255;

    var FGcolor = new SolidColor();
    FGcolor.rgb.red = 0;
    FGcolor.rgb.green = 0;
    FGcolor.rgb.blue = 0;

    backgroundColor.rgb.hexValue = BGcolor.rgb.hexValue;
    foregroundColor.rgb.hexValue = FGcolor.rgb.hexValue;

```

```

// =====
var idinvokeCommand = stringIDToTypeID( "invokeCommand" );
var desc136 = new ActionDescriptor();
var idcommandID = stringIDToTypeID( "commandID" );
desc136.putInteger( idcommandID, 1460 );
var idkcanDispatchWhileModal = stringIDToTypeID(
"kcanDispatchWhileModal" );
desc136.putBoolean( idkcanDispatchWhileModal, true );

// =====

var idmodalStateChanged = stringIDToTypeID( "modalStateChanged" );
var desc137 = new ActionDescriptor();
var idLvl = charIDToTypeID( "Lvl " );
desc137.putInteger( idLvl, 1 );
var idStte = charIDToTypeID( "Stte" );
var idStte = charIDToTypeID( "Stte" );
var identer = stringIDToTypeID( "enter" );
desc137.putEnumerated( idStte, idStte, identer );
var idkcanDispatchWhileModal = stringIDToTypeID(
"kcanDispatchWhileModal" );
desc137.putBoolean( idkcanDispatchWhileModal, true );
var idTtl = charIDToTypeID( "Ttl " );
desc137.putString( idTtl, ""Focus Area"" );

// =====
var idlayersFiltered = stringIDToTypeID( "layersFiltered" );

// =====
var idmodalStateChanged = stringIDToTypeID( "modalStateChanged" );
var desc138 = new ActionDescriptor();
var idLvl = charIDToTypeID( "Lvl " );
desc138.putInteger( idLvl, 0 );
var idStte = charIDToTypeID( "Stte" );
var idStte = charIDToTypeID( "Stte" );
var idexit = stringIDToTypeID( "exit" );
desc138.putEnumerated( idStte, idStte, idexit );
var idkcanDispatchWhileModal = stringIDToTypeID(
"kcanDispatchWhileModal" );
desc138.putBoolean( idkcanDispatchWhileModal, true );
var idTtl = charIDToTypeID( "Ttl " );
desc138.putString( idTtl, ""Focus Area"" );

// =====
var idlayersFiltered = stringIDToTypeID( "layersFiltered" );

// =====
var idlayersFiltered = stringIDToTypeID( "layersFiltered" );

// =====
var idfocusMask = stringIDToTypeID( "focusMask" );
var desc139 = new ActionDescriptor();
var idfocusMaskUseAutoInFocusRadius = stringIDToTypeID(
"focusMaskUseAutoInFocusRadius" );
desc139.putBoolean( idfocusMaskUseAutoInFocusRadius, true );
var idfocusMaskUseAutoImageNoiseLevel = stringIDToTypeID(
"focusMaskUseAutoImageNoiseLevel" );
desc139.putBoolean( idfocusMaskUseAutoImageNoiseLevel, true );

```



```

    var idfocusMaskBinarySegLambda = stringIDToTypeID(
"focusMaskBinarySegLambda" );
    desc139.putDouble( idfocusMaskBinarySegLambda, 500.000000 );
    var idfocusMaskUseSoftMask = stringIDToTypeID( "focusMaskUseSoftMask" );
    desc139.putBoolean( idfocusMaskUseSoftMask, false );
    var idfocusMaskUseAutoBinarySegSigma = stringIDToTypeID(
"focusMaskUseAutoBinarySegSigma" );
    desc139.putBoolean( idfocusMaskUseAutoBinarySegSigma, true );
    var idfocusMaskPowerLaw = stringIDToTypeID( "focusMaskPowerLaw" );
    desc139.putDouble( idfocusMaskPowerLaw, 1.000000 );
    var idfocusMaskOutput = stringIDToTypeID( "focusMaskOutput" );
    var idfocusMaskOutput = stringIDToTypeID( "focusMaskOutput" );
    var idselectionOutputToSelection = stringIDToTypeID(
"selectionOutputToSelection" );
    desc139.putEnumerated( idfocusMaskOutput, idfocusMaskOutput,
idselectionOutputToSelection );
    executeAction( idfocusMask, desc139, DialogModes.NO );

tempDoc.selection.expand(new UnitValue (30, "px"));
tempDoc.selection.smooth(new UnitValue (10, "px"));

tempDoc.selection.fill(app.backgroundColor);

tempDoc.selection.invert();

tempDoc.selection.fill(app.foregroundColor);

tempDoc.selection.deselect();

save();

tempDoc.close(SaveOptions.DONOTSAVECHANGES);
}

function save(){
    var doc = app.activeDocument;
    var file = new File(otherImagePath + "/" + dir3 + "/" + fileName);

    var opts = new JPEGSaveOptions();
    opts.quality = 10;

    doc.saveAs(file, opts, true);
}

// fim do script

```

## Script para automação da separação do componente especular

```

/*
Nome: IsolarEspecular.jsx
Autores: DANTAS, P. V. F.; BOHRER, V. C.; SILVA, F. P.
Data: 07/02/2018
Descrição: Script para photoshop que isola o componente especular,
subtraindo o conjunto de imagens do componente de refletancia difuso do
conjunto de imagens do componente de refletancia composto.
*/

// inicio do script

app.preferences.rulerUnits = Units.PIXELS;

var inFolder = new Folder(Folder.selectDialog())

if(inFolder != null){

    var fileList = inFolder.GetFiles(/\.(\.jpg|tif|psd|bmp|gif|png|)\$/i);

}

for(var a = 0; a < fileList.length; a++){

    var docRef = open(fileList[a]);

    var dir1 = "Difuso"; // imagens da refletancia difusa
    var dir2 = "Composto"; // imagens da refletancia composta
    var dir3 = "Especular"; // destino para a refletancia especular

    // chama o documento atual
    var tempDoc = app.activeDocument;

    // extrai informacoes do documento aberto
    var fileName = tempDoc.name;
    var filePath = tempDoc.path.toString();
    var fileNameAndPath = filePath + '/' + fileName;
    var tempDir = filePath.substring(filePath.lastIndexOf("/") + 1,
filePath.length);
    var goCode = false;
    var docName = fileName.substring(0,fileName.length -4);

    if (tempDir == dir1){

        var otherImagePath = filePath.substring(0,
filePath.lastIndexOf(dir1));
        var tempFile = decodeURI(otherImagePath + "/" + dir2 + "/" +
fileName);
        goCode = true;

    }

    if (tempDir == dir2){

        var otherImagePath = filePath.substring(0,
filePath.lastIndexOf(dir2));
        var tempFile = decodeURI(otherImagePath + "/" + dir1 + "/" +
fileName);
        goCode = true;

    }

    if (tempDir != dir1 && tempDir != dir2){

        alert("Nao foi possivel encontrar a imagem correspondente.")
        goCode = false;
    }
}

```

```

}
if (goCode){
    // abre a imagem correspondente
    var fileRef = new File(tempFile)
    if (fileRef.exists){
        app.open(fileRef);
        #target photoshop;
        while(app.documents.length>1){
            app.activeDocument = app.documents[1];
            var layerName =
decodeURI(activeDocument.name).replace(/\.\/\.\.\.\$/,'');
            activeDocument.activeLayer.duplicate(documents[0]);
            app.activeDocument.close(SaveOptions.DONOTSAVECHANGES);
            activeDocument.activeLayer.name = layerName;
        }
    }
    else{
        alert("Imagem correspondente nao existe.")
    }
}

var layer = tempDoc.layers[0];
layer.blendMode = BlendMode.DIFFERENCE;
layer.desaturate();

layer = tempDoc.layers[1];
layer.desaturate();
tempDoc.flatten();
save();

tempDoc.close(SaveOptions.DONOTSAVECHANGES);
}

function save(){
    var doc = app.activeDocument;
    var file = new File(otherImagePath + "/" + dir3 + "/" + fileName);

    var opts = new JPEGSaveOptions();
    opts.quality = 10;

    doc.saveAs(file, opts, true);
}

// fim do script

```

## APÊNDICE C

- **Planilha de Custos**

## Planilha de Custos

MATERIAIS & EQUIPAMENTOS			
Quant.	Descrição	Custo Unit.	Origem do Material
<b>Equipamento Eletrônico</b>			
4	Corpo Câmera DSLR Nikon D90 ou similar (D5300)	R\$ 2.080,00	Disponib. pelo LdSM/UFRGS
4	Lente p/ DSLR Af-S DX Nikkor 18-105 mm ED VR	R\$ 1.029,00	Disponib. pelo LdSM/UFRGS
1	Notebook ou PC p/ operação do Sistema	R\$ 3.000,00	Disponib. pelo LdSM/UFRGS
<b>Componentes Estruturais e Mecânicos</b>			
1	Acoplamento Flexível 10x6,35 mm	R\$ 15,00	Adquirido pelo Autor
1	Eixo retificado de 200x10mm	R\$ 16,00	Disponib. pelo LdSM/UFRGS
1	Estruturas em Cantoneira de Aço	R\$ 600,00	Adquirido pelo Autor
1	Mancal c/ Rolamento (KFL000)	R\$ 16,50	Adquirido pelo Autor
1	1m Niple (Rosca M10)	R\$ 16,50	Adquirido pelo Autor
8	Pé Vibra-Stop Micro 1	R\$ 9,50	Adquirido pelo Autor
1	Rolamento Axial (GBR 51108)	R\$ 18,00	Adquirido pelo Autor
1	Rolamento c/ fixação por parafuso (UC 205-16)	R\$ 30,00	Adquirido pelo Autor
1	Suporte para Eixo (SHF10)	R\$ 13,50	Adquirido pelo Autor
1	1m Tubo de Aço 1"	R\$ 20,00	Adquirido pelo Autor
1	Ferragens diversas (Parafusos, porcas, arruelas, etc.)	R\$ 100,00	Adquirido pelo Autor
<b>Consumíveis*</b>			
1	Rolo de Filamento PLA 1,75 mm	R\$ 129,00	Disponib. pelo LdSM/UFRGS
1	Chapa de MDF 3 mm (2,75m x 1,85m)	R\$ 30,00	Disponib. pelo LdSM/UFRGS
1	Chapa de MDF 6 mm (2,75m x 1,85m)	R\$ 55,00	Disponib. pelo LdSM/UFRGS
1	Chapa de Nylon 250x220x25 mm	R\$ 90,00	Cedido pelo fabricante (Plastfera)
1	Chapa de Nylon 220x220x12 mm	R\$ 30,00	Cedido pelo fabricante (Plastfera)
2	Tinta Spray Preta Fosca	R\$ 16,90	Adquirido pelo Autor
<b>Componentes Elétricos e Eletrônicos</b>			
4	Cabo USB de 3 m	R\$ 9,00	Adquirido pelo Autor
2	Driver p/ Motor de Passo (DRV8825)	R\$ 7,50	Adquirido pelo Autor
1	Fonte de Alimentação Bivolt (12V 10A)	R\$ 25,00	Adquirido pelo Autor
1	HUB USB 3.0 7 portas	R\$ 40,00	Adquirido pelo Autor
1	Microcontrolador tipo Arduino Mega	R\$ 60,00	Adquirido pelo Autor
1	Microcontrolador tipo Arduino Nano	R\$ 30,00	Adquirido pelo Autor
4	Motor de Passo 5V (28BYJ-48) + Driver (ULN2003)	R\$ 12,00	Adquirido pelo Autor
1	Motor de Passo Nema 17 3Kgf	R\$ 50,00	Adquirido pelo Autor
1	Motor de Passo Nema 23 10 Kgf	R\$ 100,00	Adquirido pelo Autor
1	Protoboard 830 furos	R\$ 10,90	Adquirido pelo Autor
1	Regulador de Tensão (LM2596)	R\$ 10,00	Adquirido pelo Autor
1	5m Fita LED SMD5050 12V IP20	R\$ 40,00	Adquirido pelo Autor
1	5m de Cabo Flexível 1,5mm + Plugue Macho	R\$ 15,00	Adquirido pelo Autor

1	Componentes diversos (cabos de rede, fios, jumpers, bornes, terminais, placas de fenolite, etc.)	R\$ 100,00	Adquirido pelo Autor
---	--	------------	----------------------

#### Outros Componentes

100	Lentes de 30º p/ LED SMD5050	R\$ 0,22	Adquirido pelo Autor
3	Película Polarizadora Linear (27x34 cm)	R\$ 55,00	Adquirido pelo Autor
1	XRite Colorchecker Passport	R\$ 540,00	Adquirido pelo Autor

\* Não estão contabilizados os valores de serviços de corte a laser, usinagem CNC e impressão 3D.

**Custo total de materiais e equipamentos R\$ 18.032,20**

#### SOFTWARES

Quant.	Descrição	Custo	Origem do Material
1	Assinatura Mensal <i>Adobe Photoshop CC</i>	R\$ 71,00	Adquirido pelo Autor
1	Licença <i>Agisoft Photoscan Pro</i>	R\$ 12.645,00	Disponib. pelo LAFOTO/UFRGS
1	Licença <i>Allegorithmic Substance Painter</i>	R\$ 550,00	Cedido pelo Desenvolvedor
1	Licença <i>Kuvacode Smart Shooter Pro</i>	R\$ 705,00	Cedido pelo Desenvolvedor

**Custo total de softwares R\$ 13.971,00**

