



Instituto Politécnico de Bragança
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Digitalização 3D para Conservação do Patrimônio
Cultural – Máscara Histórica

Lucas Batista Panta

Orientadores: João da Rocha e Silva

Roger Nabeyama Michels

Bragança

Mai 2024



Instituto Politécnico de Bragança
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Digitalização 3D para Conservação do Patrimônio Cultural – Máscara Histórica

Lucas Batista Panta

Dissertação apresentada à Escola Superior De Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial e Engenharia Mecânica no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadores: João da Rocha e Silva

Roger Nabeyama Michels

Bragança

Mai 2024

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a todos meus familiares e amigos que apoiaram minha jornada até aqui. Especialmente minha mãe Elisabete Batista Panta, meu pai João Roberson Panta e meu irmão Matheus Batista Panta por todos os incentivos e conselhos. Também gostaria de agradecer pelas amizades que criei durante todo o caminho, em especial o João Victor Galvão, que esteve comigo desde o início, compartilhando as forças e se ajudando nessa jornada acadêmica e as amizades que criei cá em Portugal, sendo eles Lucas Neves, Luiz Felipe, Rafaela Schoeitzer, Paulo Bruno, Pedro Dalle e Arthur Marangoanha, que foram como uma família para mim.

Gostaria de agradecer aos meus professores orientadores Jorge Santos, João Rocha e Roger Michels, agradeço o apoio e orientação. Também agradeço ao FabLab, por tornar possível o desenvolvimento do projeto.

Por fim, gostaria de agradecer ao Instituto Politécnico de Bragança, juntamente com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por ter me proporcionado o programa de Dupla Diplomação.

RESUMO

Este trabalho aborda a digitalização 3D, modelagem e impressão de uma máscara tradicional das festas dos Caretos, uma cultura ancestral das terras de Trás-os-Montes, Portugal. Sendo um trabalho desenvolvido em parceria com o projeto “Cultura para Todos Bragança”. O objetivo principal é criar um recurso tátil 3D acessível para pessoas com deficiência visual, permitindo que elas experimentem e compreendam o artefato histórico através do toque.

Na etapa de digitalização, foi utilizado o *scanner 3D* de luz estruturada para a captura com precisão dos detalhes da máscara. A nuvem de pontos resultante foi processada utilizando o *software* especializado para criar uma malha STL detalhada, preservando a textura e aparência originais da máscara.

Os *softwares* utilizados incluem o *Colin3D*, *MeshLab* e *Meshmixer* para processamento e edição de dados da digitalização. A máscara digitalizada foi então impressa em 3D, através da junção do *software Ultimaker Cura* com a impressora *Ultimaker 3 Extended*, garantindo uma reprodução fiel e precisa do artefato em formato físico.

Os resultados demonstram uma exatidão que atende às exigências do projeto. O recurso tátil final permite uma experiência inclusiva, capacitando pessoas com deficiência visual a explorar e entender a máscara de forma tátil.

Além disso, o estudo destaca a importância da acessibilidade em museus e do uso de tecnologias como *scanners 3D* e impressora 3D para promover a inclusão cultural. Este trabalho contribui para um ambiente mais igualitário e acessível, permitindo que pessoas com deficiência desfrutem da herança cultural de forma significativa.

Palavras-chave: *inclusão cultural, impressão 3D, scanner 3D, acessibilidade, digitalização, malha STL, recurso tátil, modelagem 3D, nuvem de pontos.*

ABSTRACT

This work addresses the 3D scanning, modeling, and printing of a traditional mask from the Caretos's Carnival, an ancestral culture from the Trás-os-Montes region of Portugal. It was developed in partnership with the "Culture for all Bragança" project. The main objective is to create a 3D tactile resource accessible to people with visual impairments, allowing them to experience and understand the historical artifact through touch.

In the scanning phase, a structured light 3D scanner was used to accurately capture the details of the mask. The resulting point cloud was processed using specialized software to create a detailed STL mesh, preserving the original texture and appearance of the mask.

The software tools used include Colin3D, MeshLab, and Meshmixer for processing and editing scan data. The digitized mask was then 3D printed using Ultimaker Cura software with the Ultimaker 3 Extended printer, ensuring a faithful and precise reproduction of the artifact in physical form.

The results demonstrate good accuracy, meeting the project's requirements for precision. The final tactile resource enables an inclusive experience, empowering people with visual impairments to explore and understand the mask tactually.

Additionally, the study emphasizes the importance of accessibility in museums and the use of technologies such as 3D scanners and printers to promote cultural inclusion. This work contributes to a more equitable and accessible environment, allowing people with disabilities to enjoy cultural heritage in a meaningful way.

Keywords: *cultural inclusion, 3D printing, 3D scanner, accessibility, digitization, STL mesh, tactile resource, 3D modeling, point clouds.*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2.	OBJETIVOS PROPOSTOS	2
1.3.	ORGANIZAÇÃO	2
2.	ESTADO DA ARTE	4
2.1.	INCLUSÃO E ACESSIBILIDADE	4
2.2.	SCANNERS	5
2.2.1.	LUZ ESTRUTURADA	7
2.2.2.	LASER	10
2.2.3.	FOTOGRAMETRIA	12
2.3.	NUVEM DE PONTOS	16
2.4.	MALHAS	17
2.5.	SOFTWARES DE MODELAGEM	20
2.5.1.	Colin3D	20
2.5.2.	Meshmixer	21
2.5.3.	MeshLab	21
2.5.4.	Ultimaker Cura	22
2.6.	IMPRESSÃO 3D	22
2.6.1.	ESTEREOLITROGRAFIA (SLA)	25
2.6.2.	SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER (SLS)	26
2.6.3.	MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA (FDM)	27
2.6.4.	FABRICAÇÃO DE OBJETOS LAMINADOS (LOM)	28
2.6.5.	FUSÃO DE FEIXE DE ELÉTRONS (EBM)	29
2.6.6.	POLYJET	29
3.	PARTE EXPERIMENTAL	30
3.1.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1.1.	MATERIAIS	31
3.1.1.1.	MÁSCARA	31
3.1.1.2.	ZEISS COMET LED 2	32
3.1.1.3.	IMPRESSORA ULTIMAKER 3 EXTENDED	34

3.1.1.3.1. Filamentos utilizados	34
3.1.2. MÉTODOS	35
3.1.2.1. DIGITALIZAÇÃO	36
3.1.2.1.1. Processo	37
3.1.2.1.2. Ajustes	38
3.1.2.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS	41
3.1.2.3. IMPRESSÃO	54
3.1.3. DIGITALIZAÇÃO DA MÁSCARA IMPRESSA	55
4. RESULTADOS DISCUSSÕES.....	57
4.1. CUSTOS	65
5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	67
5.1. CONCLUSÃO	67
5.2. TRABALHOS FUTUROS	69
6. REFERÊNCIAS	70
ANEXO A – TUTORIAL	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Scanner</i> de contato [11]	6
Figura 2 – a. Digitalização por luz estruturada [13], b. Laser [14], c. Fotogrametria [15]	7
Figura 3 – Esquema de um <i>scanner</i> 3D de luz estruturada. Adaptado de [19]	8
Figura 4 – Projeção de padrões de luz e codificação dos planos iluminados/não iluminados [16].	9
Figura 5 – <i>Scanner</i> baseado no princípio da triangulação [24]	11
Figura 6 – Alcance do TLS [28]	11
Figura 7 – Fotogrametria Terrestre [36].....	13
Figura 8 – Fotogrametria aérea [38].....	14
Figura 9 – Fotogrametria dinâmica [40].....	15
Figura 10 – Fotogrametria curto alcance [43].....	16
Figura 11 – Representação de um cubo por triângulos [49]	18
Figura 12 – Exemplo de refino de triângulos inadequado [50]	18
Figura 13 – Ilustração intuitiva da reconstrução em 2D [55]	20
Figura 14 – Cronologia inicial dos processos aditivos [62].....	23
Figura 15 – Cronologia dos acontecimentos históricos no mundo e na técnica de 3D a partir de 1780 [49]	24
Figura 16 – Classificação das técnicas de manufatura aditiva [63]	25
Figura 17 – Princípio de construção do processo de estereolitografia [64]	26
Figura 18 – Diagrama de funcionamento SLS [65].....	27
Figura 19 – Funcionamento do FDM [68]	28
Figura 20 – Esquema da manufatura de objetos em lâminas [71]	29
Figura 21 – Esquema de manufatura da PolyJet [74]	30
Figura 22 – Máscara artesanal em madeira 1	32
Figura 23 – Máscara artesanal em madeira 2	32
Figura 24 – <i>Scanner</i> Zeiss Comet LED 2	33
Figura 25 – Fluxograma dos processos	36
Figura 26 – Digitalização	37
Figura 27 – Primeira digitalização	38
Figura 28 – Junção das digitalizações	39

Figura 29 – Primeira e segunda digitalização juntas	39
Figura 30 – Terceira digitalização	40
Figura 31 – Junção de todas as digitalizações.....	40
Figura 32 – Digitalização máscara 2	41
Figura 33 – Remoção de excesso.....	42
Figura 34 – Erros apontados	43
Figura 35 – Erros apontados máscara 2	43
Figura 36 – Primeira sugestão do software	44
Figura 37 – Malha utilizando o <i>Make Solid</i> do Meshmixer	44
Figura 38 – Todas as malhas disponíveis na digitalização	45
Figura 39 – Malhas importantes	46
Figura 40 – Procedimentos para criação da malha	47
Figura 41 – Configurações de reconstrução da malha.....	48
Figura 42 – Parte de dentro da reconstrução	50
Figura 43 – Parte de fora da reconstrução	50
Figura 44 – Passo a passo da transferência de textura	51
Figura 45 – Configurações da transferência.....	52
Figura 46 – Malha final da máscara 1	52
Figura 47 – Sobreposição de digitalização.....	53
Figura 48 – Malha final da máscara 2	54
Figura 49 – Fatiamento da máscara em escala real no <i>software</i> Cura	55
Figura 50 – Digitalização da máscara impressa.....	56
Figura 51 – Relatório de erro.....	57
Figura 52 – Máscara finalizada	58
Figura 53 – Máscara 2 finalizada	59
Figura 54 – Impressão miniatura.....	60
Figura 55 – Impressão da máscara 1 em escala real.....	61
Figura 56 – Medição do comprimento do olho direito.....	61
Figura 57 – Comparação das digitalizações.....	62
Figura 58 – Máscara com o primário	63
Figura 59 – Comparação da máscara modelada com a real.....	64
Figura 60 – Configurando o <i>scanner</i> a ser utilizado	75
Figura 61 – Definindo parâmetros das varreduras	75

Figura 62 – Conferindo se o <i>scanner</i> está pronto para trabalho	76
Figura 63 – Definindo o número de varreduras e o deslocamento	76
Figura 64 - Varreduras.....	77
Figura 65 – Pontuando os pontos em comum entre a primeira e segunda varredura	77
Figura 66 – Gerando a malha com base na sua futura função.....	78
Figura 67 – Relatório sobre a malha criada	78
Figura 68 – Conferindo a malha em relação a digitalização.....	79
Figura 69 – Salvando a digitalização.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo das digitalizações	62
Tabela 2 – Custos.....	65
Tabela 3 – Comparativo de preços.....	66

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Um tema que está em alta ultimamente é sobre a inclusão e acessibilidade de pessoas com deficiências. À medida que surgem desafios e oportunidades no século XXI, a acessibilidade e a inclusão se destacam como princípios que moldam a visão de equidade. Em um mundo cada vez mais conectado e diversificado, é essencial que se explore em profundidade a relevância da acessibilidade e da inclusão em todos os âmbitos da sociedade. Conforme tem-se um avanço na tecnologia, cria-se a possibilidade que antes era inviável, como a inclusão de cegos em museus.

De acordo com um estudo apenas 5,5% das pessoas cegas e com deficiência visual visitam museus na Europa [1], isso mostra que tem uma grande margem de melhorar a qualidade de afluência dos cegos em museus, através de vários projetos, como a melhora no atendimento dos próprios funcionários de museus, áudio descrição da exposição, além dos projetos de recursos táteis, onde possibilita as pessoas cegas explorar e compreender o que está em exposição através do tatear, que será o foco deste trabalho.

O projeto deste trabalho se deu através do Programa Operacional Regional do Norte 2014-2020 (NORTE 2020) do governo português, que é um programa que tem como objetivo investir na parte norte do país um total de 3,4 bilhões de euros de verbas comunitárias, com prioridade nos seguintes domínios: Recursos do Mar e Economia; Capital Humano e Serviços Especializados; Cultura, Criação e Moda; Indústria da Mobilidade e Ambiente; Sistemas Agroambientais e Alimentação; Ciências da Vida e Saúde; Capital Simbólico, Tecnologias e Serviços do Turismo; Tecnologias de Largo Espectro. O projeto foi realizado em parceria com a câmara municipal de Bragança e o Instituto Politécnico de Bragança, com o nome de “Cultura para Todos Bragança”, que visa propor uma maior acessibilidade através de maquetes táteis para cegos, sendo maquetes 3D de 5 edifícios históricos, uma locomotiva do Museu Nacional Ferroviário e uma máscara que está no museu da máscara [2], [3].

1.2. OBJETIVOS PROPOSTOS

O desenvolvimento de cada maquete tem como ponto de partida a digitalização, ocorrendo de formas diferentes, como os edifícios e a locomotiva são de grande porte, foi utilizado o *scanner* a laser. Em relação as máscaras, foi utilizado o *scanner* de luz estruturada. No que se refere à modelagem, cada uma é abordada de maneira distinta, devido às suas particularidades e peculiaridades. Por exemplo, os edifícios são modelados com base na nuvem de pontos, enquanto a locomotiva e a máscara têm as suas malhas geradas a partir das nuvens de pontos, devido à sua complexidade e aos detalhes envolvidos. Levando em consideração essas variações no processo, o desenvolvimento do recurso tátil a partir da máscara, estabelecem-se os seguintes objetivos:

- Garantir um bom entendimento ao tato;
- Preservar características físicas;
- Promover acessibilidade.

1.3. ORGANIZAÇÃO

O trabalho está dividido em cinco principais capítulos, cada um abordando uma fase específica do estudo.

Começando com a introdução, onde são apresentados o contexto, a motivação e os objetivos da pesquisa. Fornecendo uma visão geral do problema em estudo, demonstrando a relevância do tema e destacando a lacuna no conhecimento existente.

No segundo capítulo apresenta-se o estado da arte, fornecendo uma revisão detalhada da literatura existentes sobre o tema. Abordando a utilização de diversos tipos de *scanners*, em suas mais diversas áreas. Será também comentado como é o tipo de arquivos que são gerados na digitalização e modelagem. Além da impressão 3D e suas mais diversas formas de realizar impressão.

Em seguida, vem os materiais e métodos, descrevendo as técnicas, equipamentos e procedimentos utilizados no decorrer da pesquisa.

Os resultados e análise são discutidos no quarto capítulo. Onde se apresenta as validações dos resultados da parte da digitalização, da modelagem e por fim o resultado do recurso tátil.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões finais do estudo, juntamente com as recomendações para pesquisas futuras.

2. ESTADO DA ARTE

Com o enfoque na elaboração de recursos táteis, este tópico será dedicado à explicação da importância desse processo, bem como para a delimitação dos requisitos fundamentais necessários para sua efetiva implementação. Além disso, serão explorados os conceitos das tecnologias utilizadas em cada etapa desse processo. A consideração cuidadosa desses aspectos é essencial para uma compreensão abrangente das implicações práticas e conceituais associadas à criação de maquetes táteis, proporcionando, assim, uma base sólida para investigação mais aprofundadas e aplicações práticas na área.

2.1. INCLUSÃO E ACESSIBILIDADE

Pessoas com deficiência viviam à margem da sociedade até o final da década de 1940, onde a Organização das Nações Unidas (ONU) estabelece a Declaração dos Direitos Humanos, que são fundamentais para proteger e promover a dignidade, liberdade e igualdade de todas as pessoas ao redor do mundo, servindo assim como um conjunto de princípios universais que garantem que todos os indivíduos tenham direitos básicos, independentemente de sua nacionalidade, raça, religião, sexo, orientação sexual, origem social ou outras características [4]. A inclusão e acessibilidade são conceitos inter-relacionados que buscam garantir que todas as pessoas, independentemente de suas habilidades ou características individuais, tenham oportunidades iguais de participar em sociedade [5].

Atualmente, estão em andamento projetos dedicados a integração de pessoas com deficiência visual a ambientes físicos, de forma que melhore sua percepção espacial, através de recursos táteis, como as maquetes táteis. As maquetes táteis representam recursos valiosos de captação de informações, que auxiliam o deficiente visual na compreensão do espaço ao redor, contribuindo assim para sua independência na locomoção, com maior eficácia [6].

Partindo do conceito da maquete tátil e tendo como foco a integração dos cegos na cultura, tem-se diversos programas de acessibilidade de cegos a museus com projetos que tem objetivos parecidos com o deste trabalho, como na criação da maquete tátil do congresso nacional brasileiro e como também o que ocorreu no Museu de Arte da Universidade Federal do Ceará (UFC).

O congresso nacional, localizado em Brasília, uma das referências da arquitetura mundial. Faz com que o prédio que recebe visita de inúmeras pessoas no cotidiano, inclusive recebendo pessoas portadoras de algum tipo de deficiência. Para melhorar a acessibilidade e a inclusão das pessoas portadoras de deficiência visual foi criada uma maquete tátil do mesmo, assim auxiliando na percepção e na criação de uma imagem tridimensional no espaço mental do mesmo. No projeto foi empregado a Estereolitografia (SLA), juntamente com o software AutoCAD [7].

O programa que ocorreu no Museu de Arte da UFC, teve como objetivo promover cultura aos deficientes visuais, deixando acessível as obras do pintor Aldemir Martins, através de recursos táteis e audiodescrição. Seu desenvolvimento conta com de pesquisadores, museólogos, bolsistas e com o auxílio de pessoas com deficiências visuais atuando como consultores [8].

2.2. SCANNERS

Com os avanços tecnológicos, o *scanner* tem se consolidado como uma ferramenta versátil e amplamente empregada em diversas áreas. Em situações cotidianas, encontramos sua aplicação em supermercados para a leitura de códigos de barras e em ambientes odontológicos, onde é utilizado para digitalizar a arcada dentária. Um exemplo adicional é a geração de modelos tridimensionais em ambientes de realidade virtual, especialmente útil em acidentes de trânsito, permitindo a realização de estudos detalhados e a identificação de aspectos que poderiam ter passado despercebidos no momento da ocorrência, como observado em referências [9].

Considerando a ampla variedade de *scanners* disponíveis em diversas áreas, este estudo concentra-se especificamente nos *scanners 3D*. Esses dispositivos são capazes de capturar informações tridimensionais de objetos e criar modelos digitais 3D correspondentes. Existem diversos tipos de *scanners 3D*, distinguindo-se pelas características do sistema de varredura, pelos princípios de medição de distância, pela velocidade e pelos intervalos de captura.

No âmbito da engenharia, como evidenciado no presente trabalho, o *scanner* desempenha um papel crucial ao possibilitar a digitalização de edifícios e objetos caracterizados por geometrias complexas. Essa aplicação não apenas simplifica o

processo de levantamento e documentação, mas também contribui para uma análise mais aprofundada e precisa dessas estruturas.

Os dois principais grupos que estão disponíveis no mercado é o por contato e o sem contato. O *scanner* por contato, como mostrado na Figura 1, tem como base de funcionamento um sensor ou apalpador que é encostado em diversos pontos do objeto, obtendo assim uma medição precisa do mesmo. A sua vantagem é que possui uma precisão elevada, não depende de uma certa iluminação ou certa condição do ambiente para funcionar. Os pontos negativos deste método é que não pode ser realizado em objetos grandes, como por exemplo prédios, além de seu modo de medição é ocorrido de forma lenta [10] e por fim existe a possibilidade de ocorrer algum dano durante o processo de contato.



Figura 1 – *Scanner* de contato [11]

O *scanner* sem contato é o que mais recebe investimento em pesquisas, já que é possível cobrir grandes objetos, tem uma alta velocidade de digitalização e não gera danos para com o objeto. As desvantagens são que tem uma sensibilidade com o ambiente, depende de certa iluminação e temperatura, bem como uma restrição em certos objetos, como objetos transparentes ou objetos reflexivos. O *scanner* sem contato é subdividido em dois tipos, o com sistemas ótico ativo e o

passivo. Sendo o passivo o que depende da luz ambiente e o ativo necessitam de iluminação controlada [12].

Os principais *scanners* utilizados são por fotogrametria, laser e por luz estruturada, como mostrado na Figura 2. Como pode-se observar o que usa luz estruturada e o de laser é do tipo ativo, enquanto o por fotogrametria é do tipo passivo.

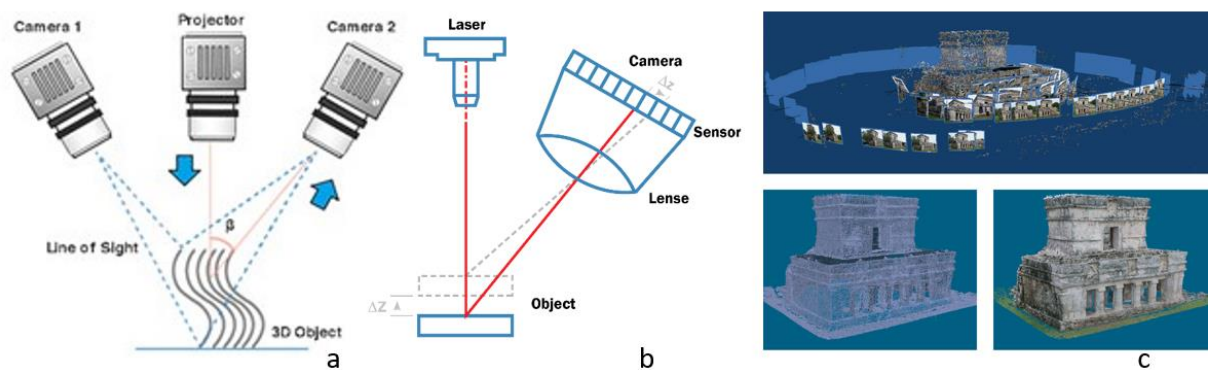


Figura 2 – a. Digitalização por luz estruturada [13], b. Laser [14], c. Fotogrametria [15]

Os três tipos têm o mesmo objetivo, onde capturam dados tridimensionais, de forma automática ou semiautomática, de um objeto do mundo real. À saída, fornece uma nuvem de pontos geométricos da superfície do objeto analisado [16]. Obtendo a nuvem de pontos, juntamente com a ajuda de um *software*, é possível reconstruir um modelo virtual 3D do objeto. Para um melhor entendimento de cada *scanner*, será comentado separadamente em subtópicos a seguir.

2.2.1. LUZ ESTRUTURADA

Nas últimas duas décadas o número de *scanners 3D* por luz estruturada vem tendo um crescimento comercial, isso devido ao seu uso em aplicações como garantia de qualidade, na engenharia reversa e na documentação de patrimônios [17].

O *scanner* por luz estruturada não projeta somente um plano de luz sobre o objeto, ele projeta uma sequência de padrões codificados de luz na sua superfície, como mostrado na Figura 3. O padrão pode ser tanto unidimensional, quanto bidimensional. Um exemplo de padrão unidimensional é uma linha, sendo essa

projetada no objeto utilizando um projetor e uma câmera, ligeiramente deslocada do projetor, registra o formato da linha em um ângulo, sendo uma técnica semelhante a triangulação. O exemplo bidimensional é o padrão de grade, onde uma câmera é usada para registrar a deformação do padrão e um algoritmo bastante complexo é usado para calcular a distância em cada ponto do padrão [16], [18].

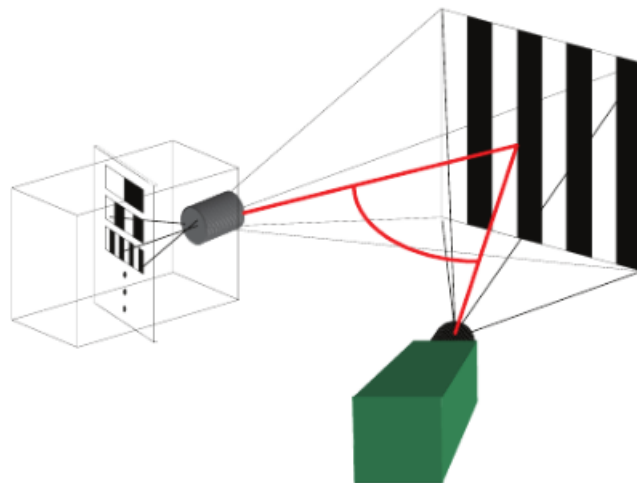


Figura 3 – Esquema de um *scanner* 3D de luz estruturada. Adaptado de [19]

Para realizar uma digitalização por luz estruturada existem diversas abordagens que podem ser empregadas, sendo algumas delas por Padrões de Faixa de Linhas (*Line Stripe Patterns*), a Padrões de Linhas Codificadas (*Coded Line Patterns*), Padrões de Grades (*Grid Patterns*), Padrões de Moiré, Padrões Aleatórios (*Random Patterns*), Padrões Fringe (*Fringe Patterns*), Padrões de Escala de Cinza (*Gray Code Patterns*) e Padrões de Sinusoides (*Sinusoidal Patterns*).

Explicando melhor sobre as mais utilizadas temos a técnica de linhas codificadas, também chamada de técnica topométrica, é baseada em uma codificação única de cada *token* de luz projetado no objeto. Quando um *token* é detectado na imagem, a correspondência é resolvida diretamente pela decodificação. Isto requer um sistema complexo de projeto de luz [19].

A técnica de faixa de linhas, que é amplamente utilizada devida sua simplicidade e eficácia. Utilizadas principalmente onde tem como exigência a precisão, como por exemplo em engenharia reversa. Sua base de funcionamento é em binário (assim como a de Grades, de Moiré, Escala Cinza e Sinusoidal), o

mesmo foi inicialmente proposto por Posdamer e Altschuker em 1982 [20]. O binário nada mais é que a projeção de uma sequência de padrões de luz com 2 níveis de iluminação, sendo que cada padrão corresponde a um conjunto de planos de luz codificados como 1 ou 0, sejam eles iluminados e não iluminados [21].

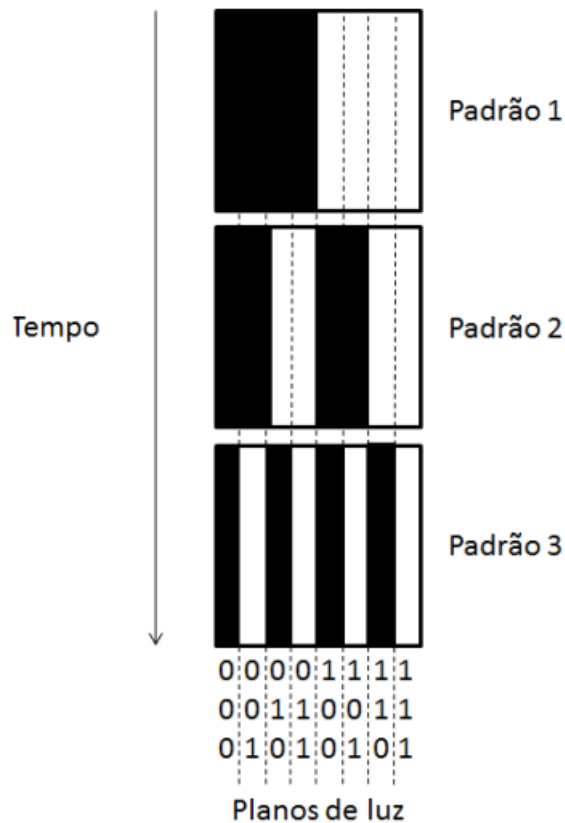


Figura 4 – Projeção de padrões de luz e codificação dos planos iluminados/não iluminados [16].

Como mostrado na Figura 4, cada plano de luz é codificado através de uma sequência de valores de luminosidade, onde 0 e 1 representam a intensidade luminosa em cada um dos m padrões projetados. É importante observar que o primeiro padrão corresponde ao *bit* mais significativo na codificação. À medida que as projeções consecutivas ocorrem, o número de planos projetados aumenta em um fator de 2. O número máximo de planos que podem ser projetados corresponde à resolução máxima do dispositivo de projeção.

2.2.2. LASER

O *scanner* a laser pode ser descrito como uma estação total motorizada, que mede automaticamente todos os pontos do seu campo horizontal e vertical. Para cada ponto medido, sua distância ao *scanner* a laser juntamente com os ângulos horizontal e vertical são registrados [22].

Quando se trata da digitalização a laser, existe dois tipos principais, os baseados em tempo de retorno e o por triangulação, dentro dos mesmos, tem algumas abordagens, na parte do tempo de retorno: por Varredura por Tempo de Voo (TOF), por Localização e Mapeamento Simultâneos (SLAM); e por triangulação: por Varredura por Triangulação, por Diferença de Fase e por portáteis. A seguir será melhor detalhado sobre cada um, visando mostrar o como funciona e onde é ideal aplicar o mesmo.

Começando com o por tempo de voo, onde mede o tempo que um feixe de laser leva para viajar até a superfície do objeto e retornar para o sensor.

O *LiDAR* (*Light Detection And Ranging*), é um sensor utilizado na digitalização por tempo de voo, sendo uma tecnologia onde se utiliza de pulsos lasers altamente precisos com o objetivo de medir distância nas três dimensões baseado no tempo de retorno do laser emitido do sensor ao objeto [23]. Cada disparo do laser contra o objeto é gerado uma coordenada nas 3 dimensões (x,y,z) e com base no acumulo dos dados é possível gerar a nuvem de pontos.

As aplicabilidades do *LiDAR* são enormes, sendo um maior foco em terrenos, como mapeamento topográfico, possibilitando a detecção de elevações e depressões, além de suas características geográficas, como a cobertura vegetal, por exemplo o tipo e altura de vegetação, como também suas mudanças ambientais [19]. Uma outra aplicabilidade é quando se trata de controle de drone, carros inteligentes e robôs, ou seja, utilizado para mapear o ambiente e evitar colisões e ter uma maior autonomia.

Quando se trata da varredura por triangulação, os *scanners* possuem uma fonte laser, além de um sensor CCD (dispositivo de carga acoplada), que captura a luz laser refletida pelo objeto, como mostrado na Figura 5 [24].

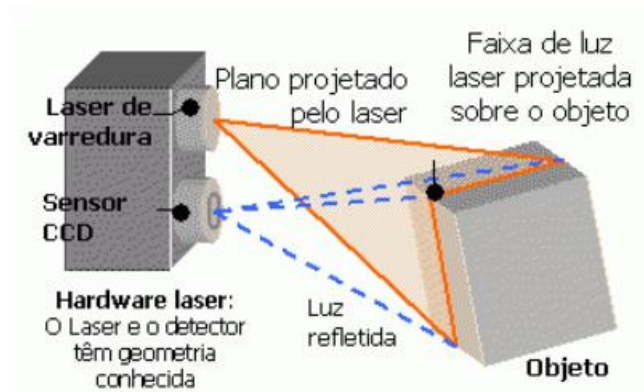


Figura 5 – *Scanner* baseado no princípio da triangulação [24]

O princípio de funcionamento é baseado na formação de um triângulo entre o ponto de emissão do laser, o ponto onde o feixe de laser atinge a superfície do objeto e o sensor que captura a luz refletida medindo os ângulos e distâncias nesse triângulo, é possível calcular a distância até o ponto na superfície do objeto [25].

Entre suas aplicabilidades, temos que é um método adequado para a digitalização de pequenos objetos ou com muitos detalhes (como estátuas e esculturas), sendo sua distância máxima de operação de 10 metros, mantendo uma precisão com ordem de grandeza de 10^{-4} m [26].

Na digitalização por diferença de fase, comumente encontrado em TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) [27], sendo um *scanner* que consegue fazer varredura em 360° na horizontal e 300° na vertical, como mostrado a seguir na Figura 6.

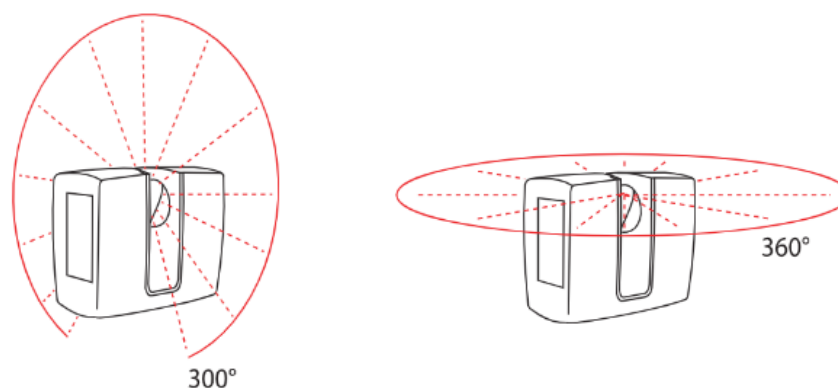


Figura 6 – Alcance do TLS [28]

Tendo como método de operação a comparação das fases da onda laser para coletar as coordenadas X, Y e Z dos pontos registrados. Diferentemente de outros métodos que envolvem a reflexão de um único pulso, esse método utiliza as variações na fase da onda para realizar medições precisas. A luz emitida pelo *scanner* é modulada em fase de maneira conhecida, e, ao atingir a superfície do objeto, a fase da luz refletida é comparada com a fase originalmente emitida [25]. As vantagens deste método são a sua rapidez e garantia de uma precisão maior que a por tempo de voo, mas isso para médias distâncias, de 0,6 m até 300 m. A desvantagem é no custo computacional e em relação dele precisar de uma fonte de varredura a laser de frequência cara e de alta velocidade [29].

Essa abordagem, reconhecida por sua precisão, é particularmente útil em aplicações que demandam medições detalhadas e confiáveis, como inspeção de qualidade em manufatura, engenharia reversa e na engenharia civil. No caso da engenharia civil, ela é empregada em diversas aplicações, incluindo o monitoramento de barragens, deslizamentos, de pontes, de rodovias e tuneis, de análise de deformações de fachadas, de avaliação patrimônio arquitetônico, além de documentação de patrimônio cultural [30].

2.2.3. FOTOGRAMETRIA

A fotogrametria reconstrói a estrutura 3D a partir de imagens em 2D em múltiplas posições ou vista de um objeto, bem como variados ângulos [31]. Tendo como base de funcionamento o mesmo princípio da percepção humana de profundidade, onde o cérebro utiliza da sobreposição de imagens de cada olho (onde cada olho tem uma perspectiva ligeiramente diferente) para calcular a geometria 3D de um objeto e a distância entre o objeto e o observador [32]. Para a realização da fotogrametria, é necessário minimamente do objeto a ser analisado, o equipamento fotográfico e *software* especializado[33].

A fotogrametria desempenha um papel cada vez mais significativo na pesquisa arqueológica, especialmente no estudo da sua variação tridimensional em artefatos, características e paisagens. Sua crescente importância é atribuída à sua notável versatilidade, custo acessível e simplicidade conceitual [34]. A capacidade da fotogrametria em capturar e modelar tridimensionalmente objetos e cenários arqueológicos oferece uma abordagem eficaz para a análise e preservação do

patrimônio histórico e cultural. A aplicação generalizada dessa técnica representa uma valiosa contribuição para a pesquisa arqueológica contemporânea e seus métodos de documentação.

Dentro do escopo da digitalização por fotogrametria, surgem diversas técnicas, cada uma com suas características específicas e aplicações. Se tratando dessas técnicas, destacam-se a fotogrametria terrestre, aérea, dinâmica e de curto alcance. A aplicabilidade de cada uma dessas abordagens será melhor detalhada a seguir.

Começando pela terrestre (Figura 7), contando com equipamentos para estabilizar o mesmo no chão, como por exemplo um tripé. As aplicações mais essenciais são no monitoramento topológico, como por exemplo em projetores costeiros e deslizamento de terras [35]. A coleta de imagens a partir de superfície terrestre viabiliza a obtenção de detalhes precisos em áreas de acesso restrito, tornando ideal para estudos urbanos, inspeções de infraestruturas e modelagem de pequenas áreas. Tendo limitações quando se trata da dependência climática, como por exemplo a iluminação e condições meteorológicas.



Figura 7 – Fotogrametria Terrestre [36]

Se tratando de fotogrametria aérea (Figura 8), muito utilizada no âmbito de mapeamento de extensas áreas geográficas. Sendo uma técnica essencial para o planejamento urbano, monitoramento agrícola de precisão, além de estudos

ambientais e geográficos em larga escala [37]. Para utilização da mesma é utilizado drones, satélites e VANT's (Veículos Aéreos não Tripulados), juntamente com uma câmera de alta precisão, sendo assim possível gerar uma nuvem de pontos com precisão em nível de cm [35]. Essa técnica é mais barata do que LiDAR usando aeronaves tradicionais e pode ser utilizada sob demanda com retorno muito mais rápido em comparação com o longo planejamento de missão, aquisição de dados e processamento exigido para LiDAR. A desvantagem se tem por conta de ser um método de digitalização passivo, ou seja, depende da iluminação do ambiente e em locais com superfícies de solo obscurecidas pela vegetação ou outros objetos não podem ser capturadas [34].

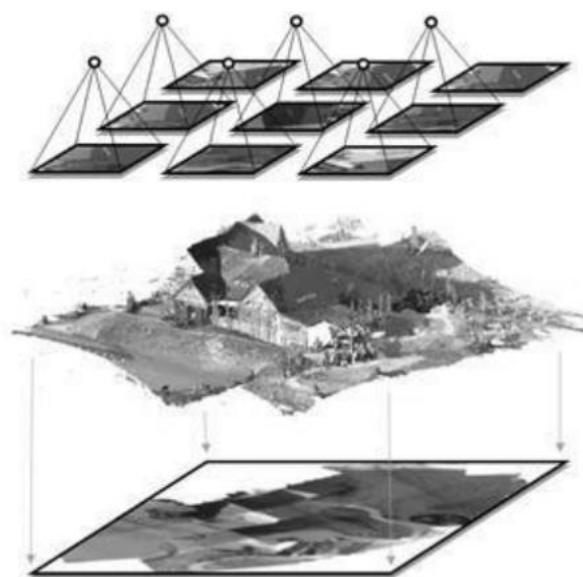


Figura 8 – Fotogrametria aérea [38]

A fotogrametria dinâmica (Figura 9), empregada em diversos setores, como por exemplo na indústria do entretenimento, em animações para filmes e jogos, bem como na área forense para a reconstrução detalhadas de cenas dinâmicas. Seu funcionamento se dá por conta das múltiplas capturas de imagens em movimento. Geralmente é empregada múltiplas câmeras para evitar algumas inconveniências que teria com utilizando apenas uma, como por exemplo a limitação de profundidade, a ambiguidade de escala, precisão reduzida, além da limitação de cobertura. De acordo com [39] um sistema de fotogrametria multicâmera, bastante

utilizado em estudo dos efeitos dinâmicos de estruturas, é chamado de sistema de fotogrametria dinâmica.

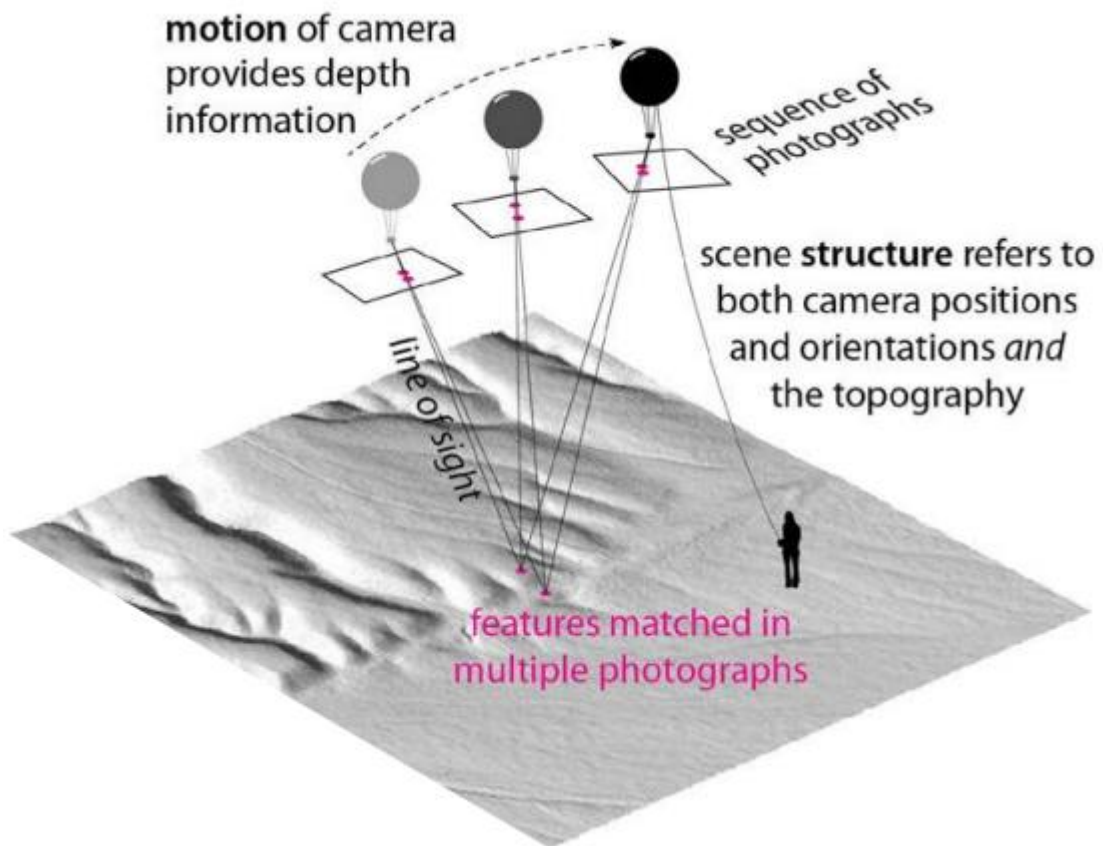


Figura 9 – Fotogrametria dinâmica [40]

A fotogrametria de curto alcance (Figura 10), sendo um tipo de fotogrametria terrestre, já que a forma de posicionamento da câmera é na superfície terrestre, tem como distância máxima entre o objeto e a câmera de 100m [41]. Excelente por sua eficiência na captura de detalhes precisos em objetos próximos da câmera, sendo aplicado em inspeções industriais detalhadas, em modelagens 3D de objetos de arte, na medicina e engenharia [42].



Figura 10 – Fotogrametria curto alcance [43]

2.3. NUVEM DE PONTOS

A nuvem de pontos é um amontoado de pontos que carregam consigo micro parcela de informação, ou seja, cada ponto tem suas coordenadas (X, Y e Z), quanto maior o número de pontos e mais amontoados esses pontos estiverem, ou seja, quanto maior for sua densidade, maior será sua resolução, sendo assim uma maior representação da realidade. Não podendo esquecer também que com maior número de pontos terá um maior consumo computacional devido a grande quantidade de cálculos geométricos envolvidos no processo [44].

A representação por nuvem de pontos consegue preservar informações geométricas originais no espaço 3D sem qualquer fragmentação, ou seja, consegue armazenar suas texturas, detalhes finos e características complexas. Logo, é a representação mais utilizada em muitas aplicações relacionada à compreensão de cenas, como direção autônoma e robótica [45].

Podendo ser gerada através de diferentes métodos de aquisição de dados, como por laser, fotogrametria, luz estruturada ou por meios de técnicas de escaneamento manual [46]. Sendo caracterizada pela junção de todas as leituras em arquivo bidimensional ou tridimensional. São frequentemente empregadas na geração de modelos 3D detalhados. Suas maiores aplicabilidades são em torno da geociência, mapeamento, arqueologia, engenharia e arquitetura [47].

Além de gerar modelos 3D, as nuvens de pontos são muito utilizadas em análises avançadas, como medições precisas, engenharia inversa e até simulações virtuais. Uma outra utilidade para a mesma é em relação a integração com outras tecnologias, como sensores inerciais, imagens de alta resolução e dados GIS (Geographic Information System), assim proporcionando uma visão mais completa e rica do ambiente capturado [47].

Por fim, os desafios em relação a nuvem de pontos se encontram com o processamento de grandes volumes de dados e a tendência de mercado vai no sentido de otimizar esse problema. A exemplo disso mesmo, no estudo de formas de melhorar esse processamento, como no caso de [44], onde se utilizou funções de Morse discretas.

2.4. MALHAS

Uma forma simples de definir uma superfície é representá-la como um plano, que pode ser construído com três pontos distintos e que não estão alinhados na mesma reta, formando assim um triângulo. Esse triângulo é uma das formas mais básicas de representação de superfícies no espaço tridimensional, servindo como bloco de construção para modelos mais complexos [48]. Conectando esses três pontos, cria-se uma superfície plana que pode ser estendida infinitamente em todas as direções.

Na geração de um modelo 3D virtualmente, é comumente utilizado para sua representação o modelo de malha STL (*stereolithography tessellation language*). O STL é um formato de arquivo desenvolvido pela empresa *3D Systems*, em 1987, que gera finitos triângulos [49]. Sendo que essa representação em triângulos torna o processamento computacional mais fácil, em comparação a outros formatos, ou seja, o STL é o tipo de representação essencial em diversas áreas, como em impressão 3D, simulações computacionais, engenharia e design de produtos, se tornando um modelo padrão quando se trata de impressão 3D.

Um ponto importante na criação da malha STL é em relação ao dimensionamento do tamanho e escala, já que a representação é em forma de triângulo [50]. Quanto mais complexo for o objeto, menor terá que ser o triângulo, como por exemplo na Figura 11, onde é possível representar um cubo com

triângulos maiores, mas no caso da Figura 12, o mesmo não é possível, pois a representação fica deformada em relação ao objeto.

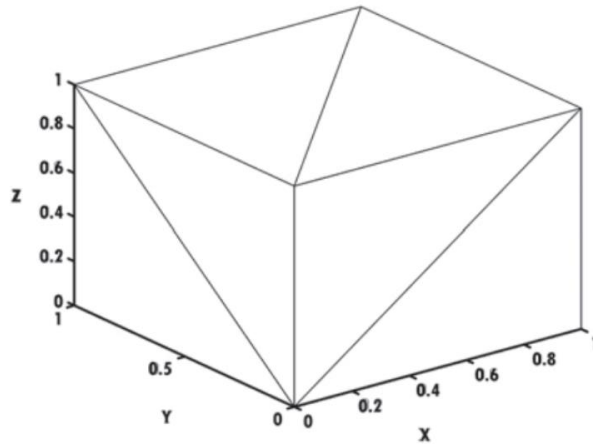


Figura 11 – Representação de um cubo por triângulos [49]

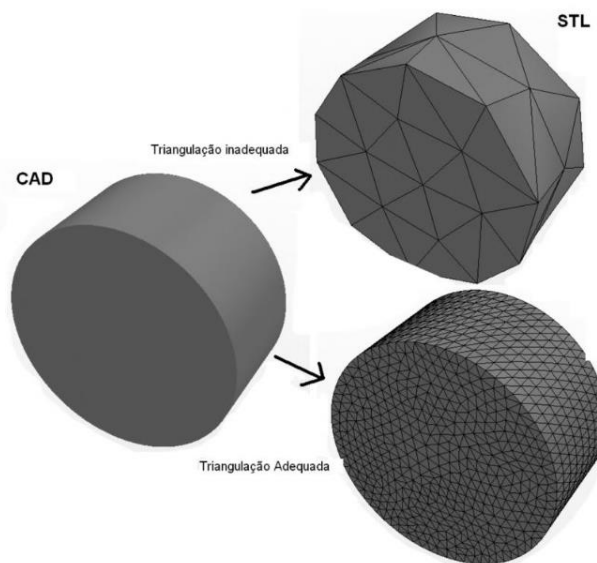


Figura 12 – Exemplo de refino de triângulos inadequado [50]

Entretanto, alguns problemas surgem quando exporta nuvem de pontos para STL, que afetam sua qualidade ou precisão do modelo resultante, por exemplo em relação a perda de detalhes, quando converte para uma malha triangular, pode ocasionar uma perda de detalhe em partes que contenham superfícies complexas ou texturizadas, além disso pode ocorrer problemas com a parte da conectividade, com a triangulação inadequada e com o tamanho do arquivo.

Devido a isso, existem alguns modelos matemáticos utilizados na solução de preenchimentos de aberturas e lacunas na reconstrução de partes faltantes, como a triangulação de Delaunay, *marching cubes*, interpolação e por Poisson. A escolha de qual método utilizar depende das características do projeto em mãos. Cada método tem suas próprias vantagens e desvantagens em relação à eficiência, precisão e capacidade de lidar com diferentes tipos de formas, ruídos e peculiaridades presentes em cada nuvem de pontos [51].

O modelo da triangulação de Delaunay, a malha de Delaunay de um conjunto de pontos é como um quebra-cabeça triangular em que cada peça, ou triângulo, é criada de forma especial. Pensando que cada triângulo tem um círculo imaginário em torno dele, chamado circuncírculo, e nenhum outro ponto pode estar dentro desse círculo. Isso significa que os triângulos são feitos de forma que não haja pontos dentro deles, o que ajuda a tornar os ângulos dos triângulos o mais próximo possível do ideal [52].

O modelo de *marching cubes* é um algoritmo que cria malhas a partir de dados volumétricos, assume uma construção de cubos imaginários, onde a superfície será construída. Tendo como principais aplicações na área médica, principalmente malhas construídas a partir de tomografia computadorizada e imagens de ressonância magnética [53].

O modelo de reconstrução de superfície de Poisson tem como base o uso da equação de Laplace, partindo do ponto que utiliza da nuvem de pontos para a reconstrução, logo irá pegar os pontos flutuantes que formam a superfície e ao invés de somente conectar os pontos, o algorítmico faz com que a densidade dos pontos seja levada em questão e cria uma superfície suave e coesa, mantendo as curvas complexas e precisa. Partindo da orientação dos pontos, o algoritmo define 0 para a parte exterior do modelo e 1 para a parte interna, como mostrado na Figura 13 [54].

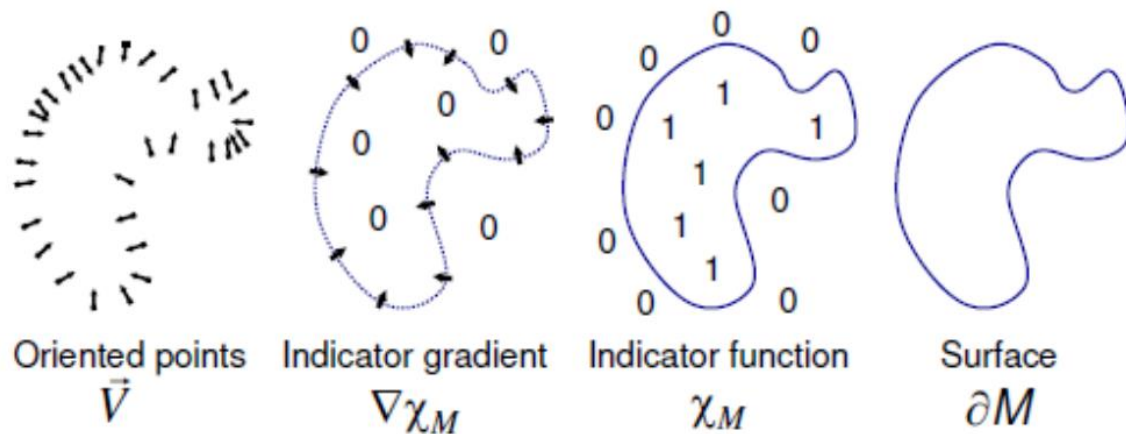


Figura 13 – Ilustração intuitiva da reconstrução em 2D [55]

2.5. SOFTWARES DE MODELAGEM

Nesta seção, será realizado um desenvolvimento mais detalhado sobre os *softwares* empregados ao longo do processo de fabricação das máscaras. Serão abordadas as ferramentas digitais utilizadas para a digitalização, processamento e modelagem dos dados tridimensionais, bem como para a preparação e ajustes necessários antes da impressão das máscaras. O objetivo é fornecer uma análise abrangente das plataformas de *softwares* adotadas, destacando suas funcionalidades específicas e sua relevância para cada etapa do projeto de confecção do recurso tátil.

2.5.1. Colin3D

O Colin3D é um *software* desenvolvido pela ZEISS para análise e medição de dados tridimensionais. Sendo projetado para ser um complemento ideal para os sistemas de sensores 3D Optotechnik, como o *scanner* Zeiss Comet LED 2 e o T-SCAN. O colin3D oferece uma variedade de funcionalidades inovadoras, como a rápida geração de rede triangular, comparação de superfícies com relatórios detalhados e processamento em rede intuitivo.

Uma das vantagens do colin3D é a capacidade de integrar-se com sistemas CAD, fornecendo *feedback* contínuo sobre áreas da superfície do componente que ainda requerem captura ou ajuste. Essa integração facilita a colaboração entre equipes de digitalização 3D e design de produtos. Com uma interface intuitiva, o

colin3D promove um fluxo de trabalho eficiente e integrado, garantindo maior precisão e qualidade nos resultados [56].

2.5.2. Meshmixer

O Meshmixer é um software de última geração para trabalhar com malhas triangulares desenvolvido pela Autodesk. Seu foco é na modelagem 3D, oferecendo uma variedade de ferramentas poderosas para remoção de imperfeições, suavização de superfície, criação de estruturas de suporte, combinação de diferentes modelos, simplificação/redução de malha, análise de estabilidade e espessura, entre diversas funcionalidades, sendo uma espécie de “canivete suíço” para malhas 3D [57].

2.5.3. MeshLab

O MeshLab é uma ferramenta para visualização, edição e processamento de modelos 3D, especialmente malhas. Oferecendo uma interface que permite aos usuários carregar e inspecionar objetos 3D de forma interativa, utilizando recursos de arrastar e clicar. Um ponto positivo desse software é o fato de suportar uma ampla variedade de formatos 3D, garantindo uma compatibilidade com diferentes tipos de dados [58]:

- Ser fácil de utilização, sendo uma ferramenta projetada para usuários sem grandes habilidades conseguir realizar as modelagens mais básicas, como por exemplo executar tarefas automáticas, como a suavização, re-malha ou simplificação;
- Conseguindo ter uma profundidade de uso, ou seja, para usuários de avançados conseguem editar funcionalidades e/ou alterar todos os parâmetros envolvidos, como modificar manualmente a geometria da malha conforme necessário;
- Capacidade de trabalhar com múltiplas malhas simultaneamente. Carregando diversas malhas e processando separadamente ou em conjunto, seguindo uma abordagem em camada, permitindo uma flexibilidade significativa;
- Não é uma ferramenta de design, não oferecendo recursos avançados para modelagem ou edição de estruturas complexas;

- Tendo uma ênfase na eficiência de malhas.

2.5.4. Ultimaker Cura

O Ultimaker Cura é um *software* amplamente utilizado em preparação de modelos e no fatiamento para impressão 3D. Oferecendo uma interface intuitiva, projetado para qualquer pessoa possa utilizá-lo, sendo usuário experientes ou novatos em impressão 3D, além de recursos avançados para a preparação de modelos para impressão. Sendo um poderoso *software* de código aberto, desenvolvido através de anos por programadores interno, juntamente com a contribuição de usuários.

É um software que permite importar modelos em diversos formatos, como o STL, OBJ, X3D, 3MF, BMP, Gif, JPG e PNG, oferecendo ferramentas para posicionar, redimensionar e ajustar modelos conforme necessário. Além de proporcionar opções avançadas em relação a configuração da impressão, como ajustar a velocidade de impressão, como a densidade de preenchimento e suporte de estrutura [59].

2.6. IMPRESSÃO 3D

O processo de impressão 3D envolve a fabricação de uma peça por meio da adição de progressiva de material, que é o depósito em camadas sobrepostas sucessivas. Essas camadas são construídas gradualmente, uma sobre a outra, até que a peça esteja totalmente formada [60]. Este método, também conhecido como fabricação aditiva, permite a criação de objetos complexos em três dimensões a partir de modelos digitais. Ao contrário dos processos de fabricações tradicionais, onde geralmente ocorre por remoção de materiais de um bloco sólido, a impressão 3D adiciona material conforme necessário. Resultando em menos desperdício e maior liberdade de design. Importante destacar que a impressão 3D é dependente de *softwares* de modelagem de objetos 3D, como o Cura, Slic3r, 3D Slash, o OctoPrint e o CAD (*Computer-Aided Desing*) [61].

Embora seja uma tecnologia relativamente nova, os conceitos fundamentais da impressão 3D, como a construção em camadas e deposição de materiais, têm

raízes antigas e podem ser observados em patentes datadas de tempos remotos, conforme a Figura 14.

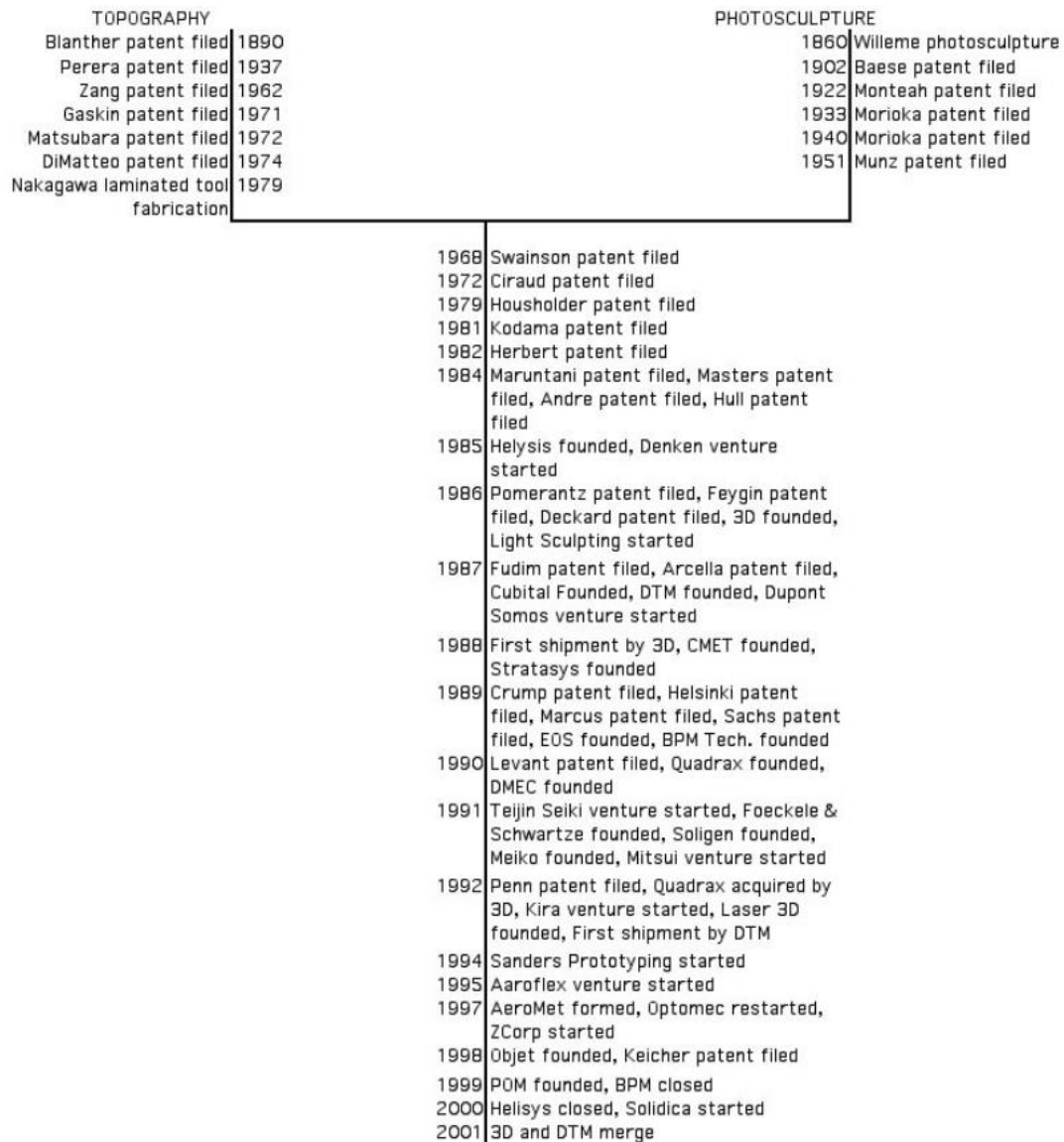


Figura 14 – Cronologia inicial dos processos aditivos [62]

Os primeiros passos da representação de objetos 3D começaram por volta de 1860, através do francês François Willème, por meio de suas habilidades de esculpir e fotografar. Em 1892, Blanthier sugeriu a fabricação de mapas de relevo de contorno usando folhas de cera cortadas e empilhadas e depois alisadas. Em 1922, Frederick Hutchison Monteath patenteou um processo fotomecânico para produção de baixos-relevos, esse processo consistia em produzir relevos de retratos e outros

objetos utilizando gesso, cera ou substâncias semelhantes por posterior cobrimento em bronze, assim obtendo uma camada superficial do objeto. Em 1933, Isao Morioka propôs um processo que era um mix de fotoescultura e topografia para criar reproduções 3D de objetos a partir de fotografias. Em 1951, Morioka, juntamente com Otto John Munz, patenteou um dispositivo cuja função era expor uma camada de fotoemulsão confinada em um recipiente em forma de cilindro [49]. Na Figura 15 representa o que estava ocorrendo no mundo juntamente com o que surgia em tecnologia de impressão 3D.

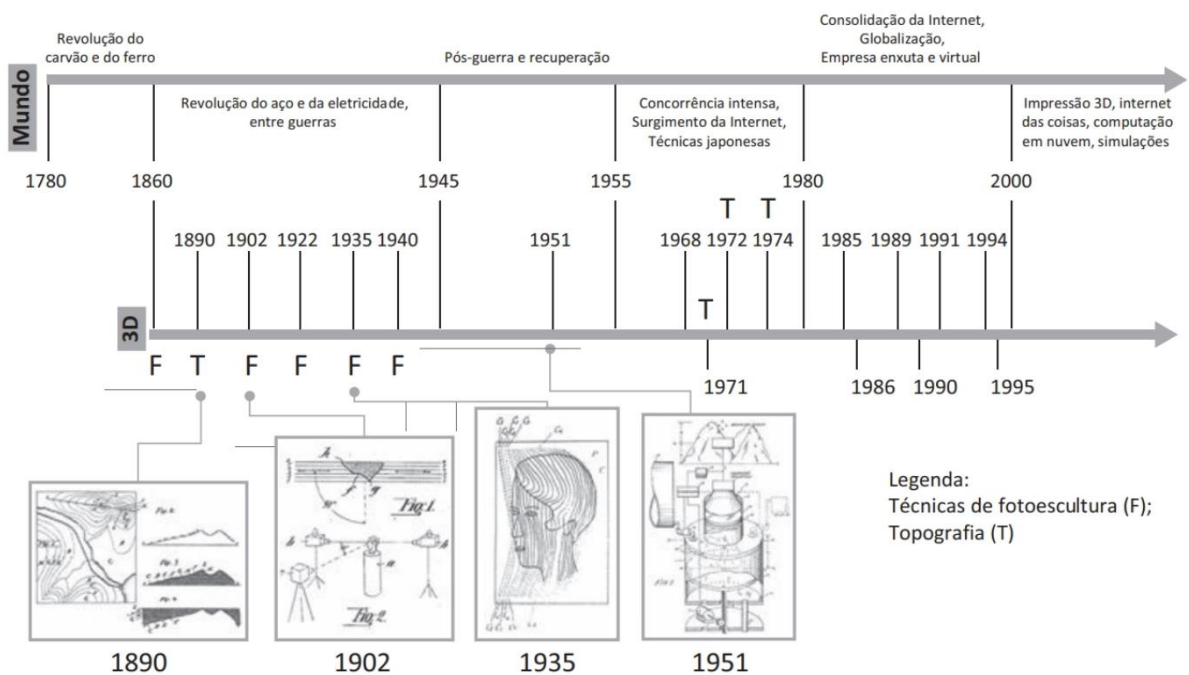


Figura 15 – Cronologia dos acontecimentos históricos no mundo e na técnica de 3D a partir de 1780 [49]

Todas as pesquisas ocorridas até 1980 serviram de base para o boom do desenvolvimento do processo de impressão 3D, que se intensificaram entre os anos 1980 a 2000 [49]. Em 1983 a primeira aplicação comercial da impressão 3D surge através da empresa *3D Systems*, que utilizava o sistemas de estereolitografia (SLA), no qual uma resina fotossensível era solidificada ao ser exposta à luz ultravioleta [60]. Em 1987, a DTM, fabricava peças via *selective laser sintering* (SLS). Em 1990 Scott Crump inventou o processo de modelagem por depósito de material fundido (*fused deposition modeling* – FDM). Em 1993 os professores do MIT (*Massachusetts*

Institute of Technology) patentaram o primeiro equipamento denominado impressora 3D para imprimir plástico, metal e peças cerâmicas [49].

Como mencionado anteriormente, o primeiro tipo foi a estereolitografia (SLA), mas além dela, existem vários outros tipos, cada qual com sua própria técnica e propósito. Os mais comumente encontrados são a sinterização seletiva a laser (SLS), a modelagem por deposição fundida (FDM), fabricação de objetos laminados (LOM), derretimento de feixe de elétrons (EBM) e polyjet [61], como observado na Figura 16.

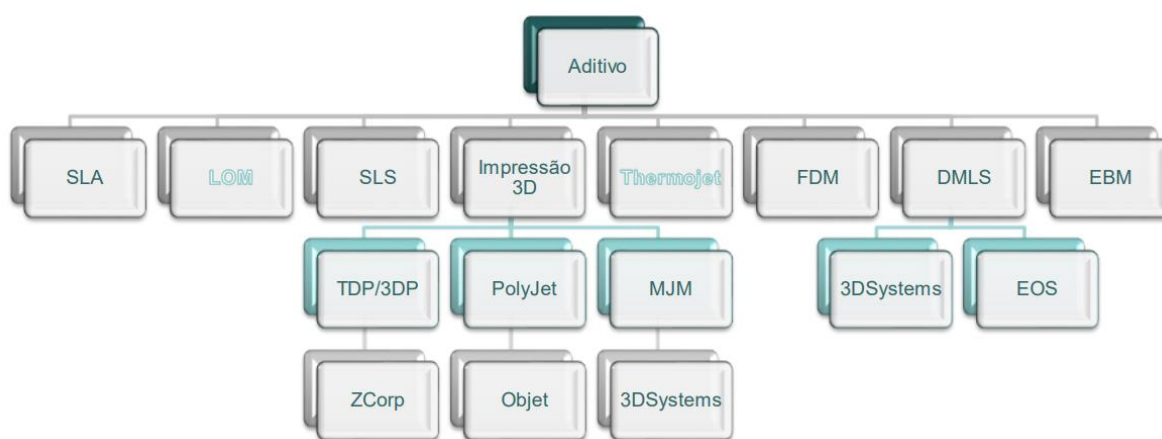


Figura 16 – Classificação das técnicas de manufatura aditiva [63]

Com base na norma ISO 17296-2:2017, que fornece uma visão geral das categorias de processos e materiais de alimentação para manufatura aditiva, houve uma padronização na terminologia utilizada para descrever diferentes tipos de processos de impressão 3D. Esta padronização é essencial para garantir uma comunicação clara e consistente entre os profissionais da área. No entanto, como os técnicos estavam habituados com os nomes antigos dos processos de impressão, optou-se por manter essas denominações tradicionais neste trabalho. Isso facilita a transição e evita confusões.

2.6.1. ESTEREOLITROGRAFIA (SLA)

A estereolitografia tem como princípio de funcionamento uma plataforma, que se movimenta verticalmente, em um tanque cheio de fotopolímero líquido, conforme a Figura 17. Um canhão laser, guiado por espelhos galvanométricos, é

utilizado para solidificar a resina que está sobre a plataforma através do processo de fotopolimerização, ou seja, o laser percorre o caminho previamente traçado pelo software e solidifica a camada. Conforme ele termina a camada, a plataforma desce na espessura da próxima camada, isto permite que a resina líquida cubra a última recém solidificada, levando em conta que é necessário um tempo para que ocorra o nivelamento da camada líquida. Após ter finalizado todo o processo de impressão, um elevador sobe a plataforma, retirando consigo o objeto sólido de dentro do reservatório, permitindo que a resina líquida esorra e seja drenada [64].

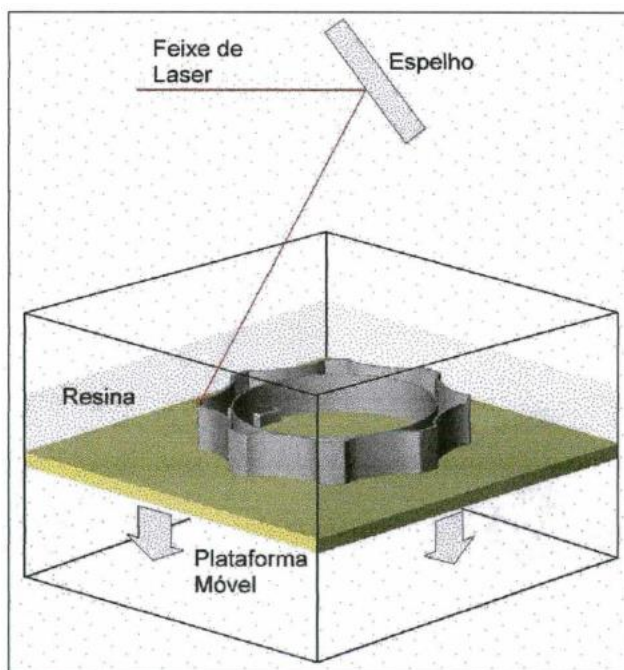


Figura 17 – Princípio de construção do processo de estereolitografia [64]

2.6.2. SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER (SLS)

A sinterização seletiva a laser (SLS) é um sistema de impressão que permite a construção de objetos físicos utilizando materiais na forma de pó, portanto, é possível trabalhar com uma grande variedade de materiais. O funcionamento é dado por uma plataforma móvel, onde um rolo que espalha o pó sobre a mesa aquecida já na espessura que será a camada, em seguida é aquecido o material até próximo ao ponto de fusão através de aquecedores resistivos controlados (Termopar), finalmente sendo fundido por um laser de dióxido de carbono (CO₂). O controle do laser é feito através de espelhos defletores galvanizados, ressaltando que a variação

temperatura e potência pode alterar os aspectos visuais e mecânicos da peça [64], [65], [66]. Na Figura 18 pode ser observado o funcionamento da impressora.

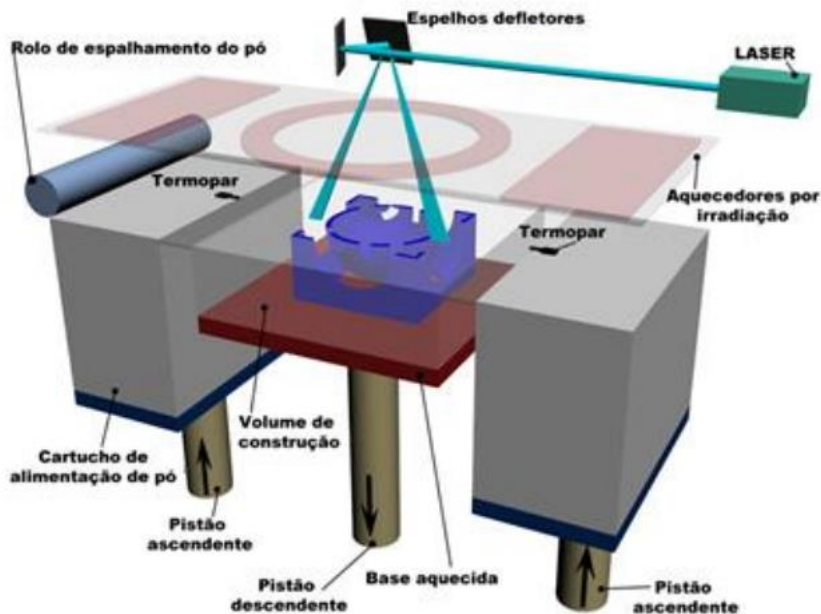


Figura 18 – Diagrama de funcionamento SLS [65]

2.6.3. MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA (FDM)

A modelagem por deposição fundida (FDM) é o método predominante de impressão 3D, contribuindo significativamente para a difusão e popularização dessa tecnologia. Sua operação se baseia na extrusão de termoplástico, no qual o objeto é construído camada por camada em uma plataforma móvel que se move verticalmente em incrementos correspondentes à espessura da camada. Simultaneamente, a extrusora se desloca nos eixos X e Y, permitindo a criação precisa do objeto tridimensional. A ilustração mostrada na Figura 19 proporciona uma melhor compreensão do funcionamento do processo, detalhando a alimentação do filamento e o momento em que ocorre a fusão do material durante a impressão [67], [61], [64].

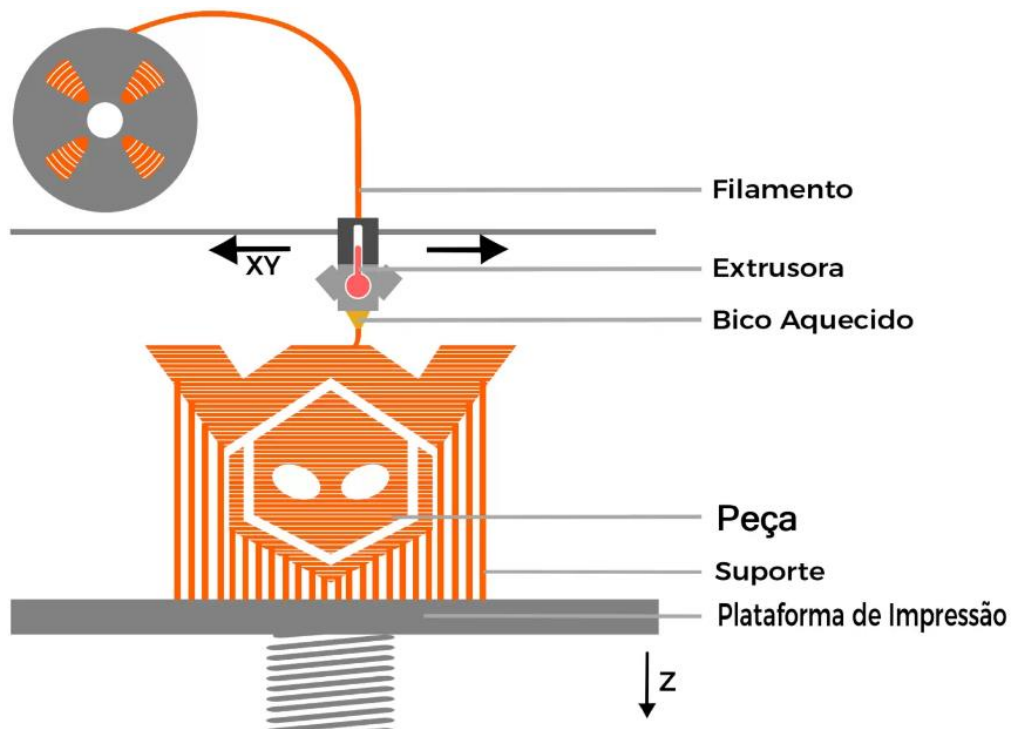


Figura 19 – Funcionamento do FDM [68]

2.6.4. FABRICAÇÃO DE OBJETOS LAMINADOS (LOM)

Na fabricação de objetos laminados (LOM), o objeto é criado por meio da adesão sucessiva de folhas de papel, utilizando um rolo de laminação aquecido. Um laser de calor (CO₂) é empregado para cortar o papel conforme a geometria descrita pelas bordas das diversas camadas da peça. O processo tem início com uma camada de papel posicionada sobre uma plataforma de construção. Após o corte do papel pelo laser, uma nova folha de papel é automaticamente posicionada sobre a anterior, e um rolo de laminação aquecido passa sobre elas, unindo as folhas devido à película de cola termoplástica presente no papel. Esse processo se repete até que todas as camadas do objeto sejam completadas. As regiões do papel próximas ao objeto em construção também são cortadas pelo laser e removidas manualmente ao final da construção. O resultado são objetos com uma aparência similar à madeira, apresentando textura e densidade semelhantes. Uma limitação desse processo é a dificuldade em fabricar objetos com regiões internas sem material, como orifícios ou regiões ocas, devido à impossibilidade de remover o papel que não faz parte do objeto após a fabricação. Apesar dos materiais disponíveis comercialmente serem à base de celulose (papel), existem pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de

novos materiais, como plástico, metal ou cerâmica, dispostos em forma de folhas para o processo LOM [64], [69], [70]. A Figura 20 proporciona uma maior compreensão do funcionamento do processo.

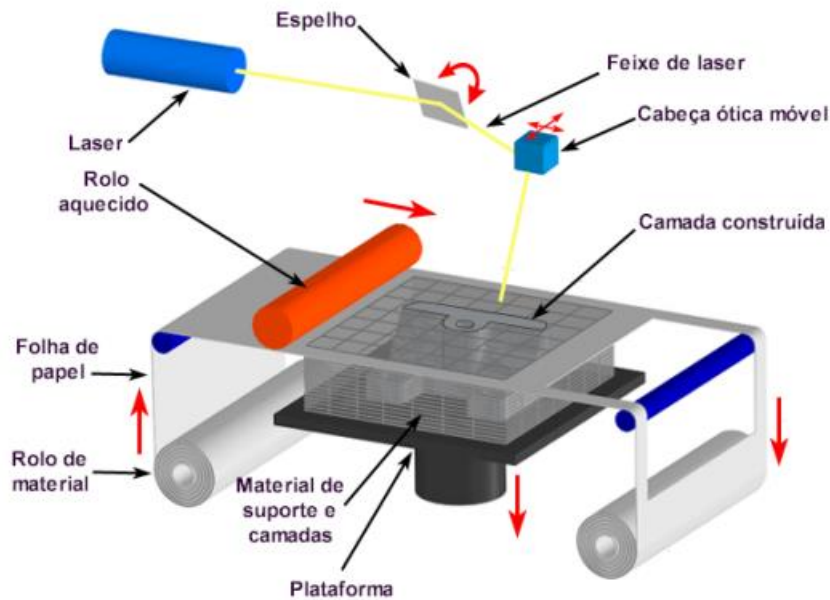


Figura 20 – Esquema da manufatura de objetos em lâminas [71]

2.6.5. FUSÃO DE FEIXE DE ELÉTRONS (EBM)

A fusão de feixe de elétrons (EBM) é semelhante ao SLS, sendo uma técnica que utiliza da fusão de pó, a diferença consiste que na SLS é utilizado um laser de alta potência de gás nobre e no caso do EBM é utilizado um poderoso feixe de elétrons no vácuo, lembrando que ocorre a impressão em um ambiente controlado. A fusão por feixe de elétrons é especialmente adequada para materiais metálicos, como titânio e ligas de níquel, sendo bastante utilizada medicina, como em próteses, além da parte industriais, como na aeroespacial e automotiva [69], [72].

2.6.6. POLYJET

Por fim, a tecnologia de impressão em jato de resina, a PolyJet, contém a mais complexa tecnologia de manufatura aditiva de resina. Tem como princípio de funcionamento a resina líquida sendo seletivamente expelida por centenas de bicos e polimerizada com luz UV. Bem parecido com a ideia de uma impressora 2D, onde no lugar de tintas no cartucho tem resina fotopolimerizável, ou seja, na hora da

impressão é possível utiliza mais que um tipo de cor ou material. Nessa tecnologia, o material é jateado na plataforma de forma líquida e imediatamente é curado através de lâmpadas UV, sendo progressivamente depositada em forma de camada. Sua aplicabilidade é voltada para odontologia, na impressão de próteses dentárias, além de também ser utilizadas em joalheria, arquitetura, design de produtos, entre outros. Na Figura 21 proporciona um maior entendimento do processo de impressão [73].

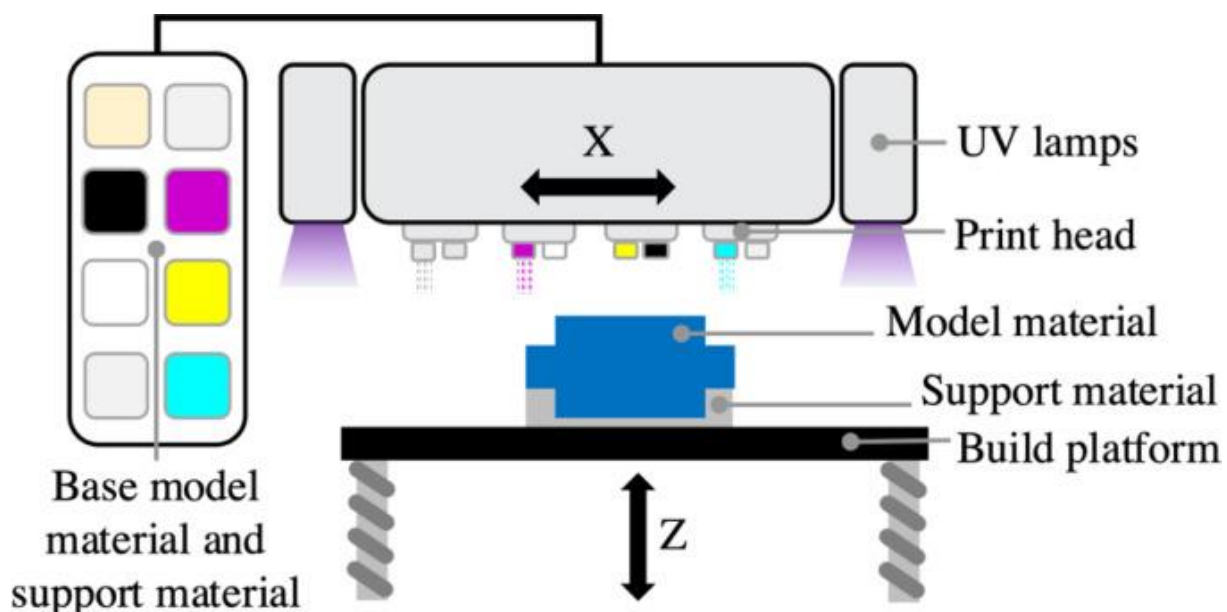


Figura 21 – Esquema de manufatura da PolyJet [74]

Além das técnicas convencionais de impressão 3D mostradas neste trabalho, existem várias outras técnicas menos utilizadas que oferecem potenciais vantagens e aplicações. No entanto, uma análise detalhada dessas técnicas está além do escopo deste trabalho.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, serão detalhados os materiais e procedimentos utilizados na produção do modelo tridimensional por meio da tecnologia de impressão 3D. Abordaremos os softwares e ferramentas empregados, bem como os desafios enfrentados durante o processo. A geração do modelo 3D ocorreu da seguinte maneira: inicialmente, as máscaras foram digitalizadas e registradas por meio de um software, onde simultaneamente ocorreu a criação da nuvem de pontos e da malha

STL. Em seguida, a malha resultante passou por etapas de modelagem e reparo. Uma vez preparada, a malha foi submetida ao processo de fatiamento e, por fim, à impressão.

Importante observar que apenas a máscara 1 foi impressa, já que era o real objetivo, a máscara 2 a qual possui dimensões maiores, foi digitalizada para observar as possíveis limitações que encontra com base no tamanho do objeto. A máscara 2 foi desenvolvido somente o modelo virtual.

3.1.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados para confecção das máscaras foram:

- 2 Máscaras artesanais originais;
- *Scanner* Zeiss Comet LED 2;
- Softwares: Colin3D, Meshmixer, MeshLab, UltiMaker Cura;
- Impressora 3 Extended.

3.1.1.1. MÁSCARA

Os objetos digitalizados foram duas máscaras de madeira (Figura 22 e Figura 23), localizadas no Museu Ibérico da Máscara e do Traje, na cidade de Bragança, Portugal. O museu é um espaço dedicado à promoção das tradições relacionadas com as máscaras do Nordeste Transmontano e da região de Zamora, fruto de uma parceria entre o Município de Bragança e a Diputación de Zamora. Seu objetivo principal é dinamizar culturalmente uma região do interior peninsular, destacando um elemento cultural único: as máscaras, presentes nas conhecidas "Festas de Inverno". Essas festas são manifestações culturais transmitidas oralmente ao longo do tempo, convertendo-se em costumes, tradições e estilos de vida específicos dessa região transfronteiriça. O museu expõe máscaras, trajes, adereços e objetos utilizados nessas festas, tanto em Trás-os-Montes e Alto Douro quanto na região de Zamora. Ele surge como resultado de uma aposta na temática da máscara como elemento identificador de uma região que preserva suas características e tradições [75].



Figura 22 – Máscara artesanal em madeira 1



Figura 23 – Máscara artesanal em madeira 2

3.1.1.2. ZEISS COMET LED 2

O *scanner* utilizado foi o Zeiss Comet LED 2 (Figura 24), sendo um *scanner* 3D de alta precisão. A tecnologia empregada é de luz estruturada para capturar geometria de objetos com detalhes precisos. O Comet LED 2 oferece uma combinação de alta resolução e rapidez na digitalização, tornando adequado para uma variedade de aplicações, como em engenharia reversa, controle/inspeção de

qualidade, arqueologia, documentação de objetos históricos-artísticos. Sua interface amigável e seu design ergonômico facilitam o manuseio e a operação do dispositivo.



Figura 24 – Scanner Zeiss Comet LED 2

O *scanner* conta com uma mesa rotativa, onde é possível editar quantos graus irá girar por digitalização, sendo assim garantindo uma maior captação de pontos, lembrando que quanto maior a captação de pontos, maior será o custo computacional. Tendo uma distância entre os pontos variando de 18 μm até 196 μm , garantindo assim uma precisão na casa dos micrometros [76].

O *scanner* tem a capacidade de realizar o registro da captura, criação da nuvem de pontos e a geração da malha quase simultaneamente, ou pelo menos a criação da nuvem em um fluxo de trabalho sequencial contínuo. Na digitalização o *scanner* captura os dados em forma de nuvem de pontos. Durante o processo, o *software* pode realizar registro automático ou semiautomático dos dados, alinhando as diferentes vistas ou varreduras para criar uma única representação coerente do objeto.

A partir da nuvem de pontos, o *software* pode gerar uma malha 3D, que é uma representação mais sólida e contínua do objeto, formada por triângulos ou outros polígonos. Logo, o registro, a criação da nuvem de pontos e a geração da malha possam ser considerados processos distintos, essas etapas ocorrem de forma integrada e contínua durante a digitalização com o Zeiss Comet LED 2. Esse *scanner* é capaz de capturar objetos variando entre 45 mm até 500 mm, mantendo uma distância de 760 mm [76].

3.1.1.3. IMPRESSORA ULTIMAKER 3 EXTENDED

A Ultimaker 3 Extended é uma impressora que utiliza da tecnologia FDM, desenvolvida pela empresa Ultimaker, sendo uma versão *extended* da Ultimaker 3. Algumas das características a serem destacadas são ter 2 extrusoras, é uma impressora com um volume maior que a versão padrão e sua temperatura de trabalho. Devido ao fato de ter 2 extrusora, permite ter dois tipos de filamentos na hora da impressão, assim sendo possível utilizar um para a fabricação da peça e outro para o suporte.

Quando se trata do volume, a Ultimaker 3 Extended possui uma capacidade de produção de 216 mm x 216 mm x 255 mm. Permitindo assim trabalhar com objetos mais volumosos, comparando com sua versão padrão, tem um ganho de 100 mm em relação à altura da impressão. As dimensões externas da impressora são de 342 mm x 505 mm x 688 mm, sendo assim não ocupa muito espaço na bancada [77].

Finalmente se tratando da temperatura de trabalho, ela chega aos 280°C, permitindo assim a utilização de uma maior variedade de filamentos. Tendo uma mesa aquecida, auxiliando na aderência adequada de certos materiais à mesa, reduzindo assim as chances de deslocamento ou deformação de peça durante o processo de impressão.

3.1.1.3.1. Filamentos utilizados

Os materiais utilizados na impressão foram o Ultimaker Material PLA e o UltiMaker PVA.

As características comerciais do PLA para a Ultimaker são de um diâmetro de filamento de 2,85 mm, com a temperatura de impressão variando entre 200-210

°C, o peso do carretel é de 750 g e a temperatura da placa de construção é de 60 °C. É também possível aceder ao datasheet dos diversos materiais deste fabricante, podendo obter informações detalhadas sobre aspectos como: tensão de corte, temperatura de impressão, temperatura limite de resistência, entre outros [78].

O UltiMaker PVA (Álcool polivinílico) é um filamento desenvolvido pela UltiMaker. É um material de suporte avançado, utilizado essencialmente para modelos complexos que requerem suportes para cavidades internas, grandes saliências e geometrias complexas, sendo sua vantagem de ser solúvel em água. Suas especificações são de um diâmetro de filamento de 2,85 mm, com uma temperatura de impressão de 230 °C e 250 °C, com o carretel de 750 g e sua temperatura de placa de construção entre 90 – 110 °C [79].

3.1.2. MÉTODOS

Nos métodos, será detalhado o uso dos materiais na construção das máscaras, como mostrado na Figura 25, dividindo-os em três etapas. Inicialmente, será comentado da digitalização, onde os materiais foram utilizados na obtenção de informações do objeto de estudo. Em seguida, será comentado sobre a parte do processamento dos dados da digitalização, destacando como os softwares foram empregados. Finalizando no processo de impressão, detalhando os procedimentos utilizados.

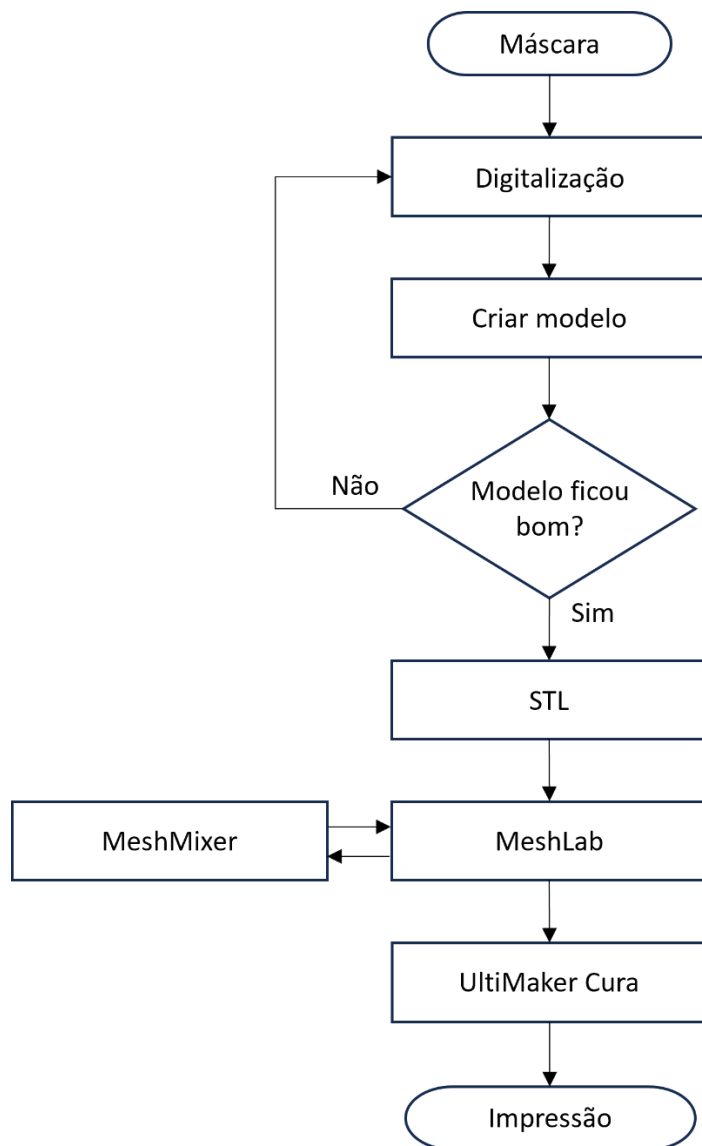


Figura 25 – Fluxograma dos processos

3.1.2.1. DIGITALIZAÇÃO

Na etapa de digitalização, foram estabelecidas duas seções: a primeira detalha o procedimento geral do processo da digitalização, enquanto a segunda aborda os ajustes específicos realizados durante essa etapa.

3.1.2.1.1. Processo

Falando sobre a máscara 1, temos que a digitalização da máscara ocorreu em três posições diferentes na mesa, isso se deu pelo fato de que em apenas uma posição não era possível capturar todos os detalhes contidos na máscara. Num primeiro dia de digitalização a máscara tinha sido digitalizada de com a parte superior servindo de apoio, conforme a Figura 26, mas os dados da digitalização não estavam satisfatórios. Então em um segundo dia foi realizada uma nova digitalização, não contendo registros fotográficos, apenas em arquivos STL.



Figura 26 – Digitalização

Antes de realizar a digitalização da máscara, foi realizado as preparações do equipamento através do *software* colin3D. Começando por definir os parâmetros que serão empregados, como o tempo de exposição, qualidade da digitalização e a configuração da câmera, como mostrado na Figura 61, esses parâmetros variam de acordo com cada objeto a ser digitalizado, para ter certeza se os parâmetros definidos são suficientes, é possível realizar o teste, para isso basta ir em *test settings*, localizadas em *comet* → *3D measurement*. Importante ressaltar que o *scanner* precisa ser ligado com umas horas de antecedência para poder esquentar o sensor, que foi configurado para funcionar na faixa de temperatura de 46,4 °C a 53,4 °C (especificações do fornecedor).

Após realizar o teste e verificar que está funcionando adequadamente, é preciso definir como vai ocorrer a captura das varreduras. Para uma maior captura de detalhes, foi definido que iria ocorrer a varredura a cada 15°, totalizando 24 varreduras por digitalização.

Após ocorrer as digitalizações, procedeu-se à criação da malha pelo próprio colin3D, para isso foi necessário ir ao *Mesh creation* → *Optimization* → *Design*. Com a malha criada, o programa mostra a estatísticas da malha, como erro, número de triângulos, entre outros. Para uma maior clareza do processo, no ANEXO A tem imagens mostrando a sequência a ser seguida.

A digitalização da máscara 2 ocorreu da mesma forma que a máscara 1, com a diferença no número de digitalizações necessárias para conseguir capturar todos os detalhes. Todo o processo a seguir será referente à máscara 1. Como as duas máscaras seguiram o mesmo processo de construção, para evitar ficar redundância, será mostrado apenas imagens de como estava a máscara 2 em cada etapa.

3.1.2.1.2. Ajustes

Na primeira posição ocorreu com a máscara em pé, com o *scanner* acima da máscara e não foi possível capturar alguns detalhes da máscara, como mostrado na Figura 27.

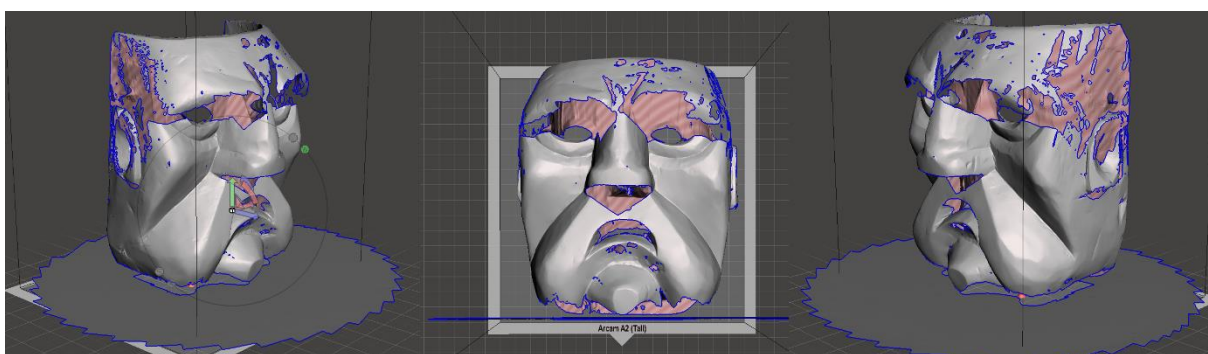


Figura 27 – Primeira digitalização

Quando começa uma nova digitalização no colin3 e queremos conectar com alguma digitalização já realizada, é preciso colocar quais são os pontos em comum

que as mesmas têm, sendo assim, na Figura 28 é mostrado como ocorre, sendo necessário no mínimo 3 pontos em comum.

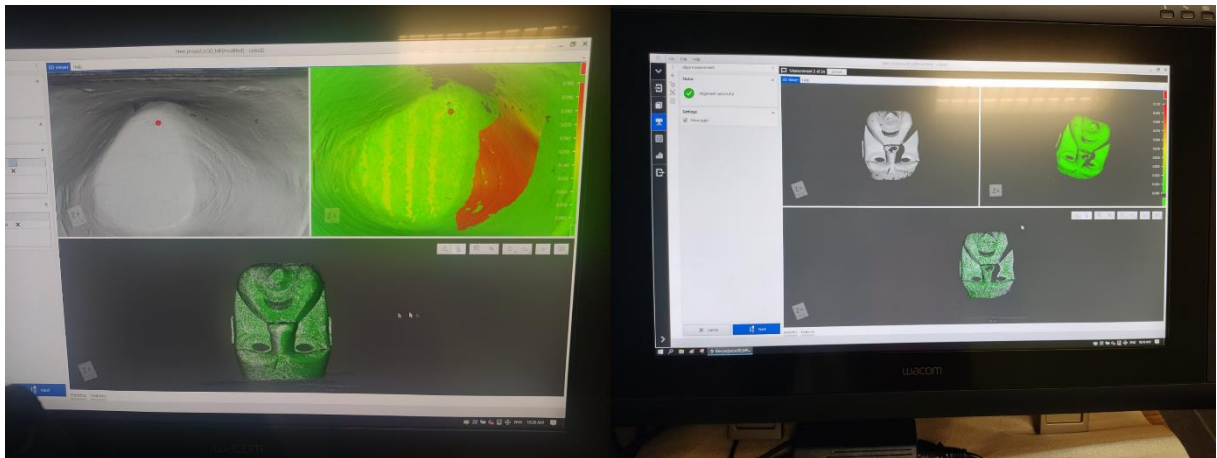


Figura 28 – Junção das digitalizações

Na segunda digitalização, o *scanner* foi colocado em uma altura que ficasse de frente com a máscara, obtendo assim um preenchimento nas partes que faltaram anteriormente, como mostrado na Figura 29, mesmo assim não foi possível obter todos os detalhes da máscara, necessitando que realizasse mais uma digitalização.

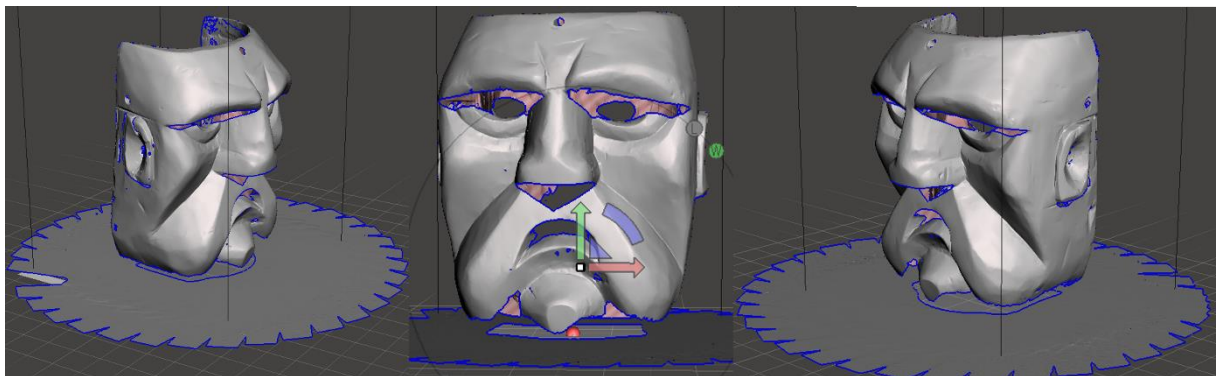


Figura 29 – Primeira e segunda digitalização juntas

Na terceira digitalização a máscara (Figura 30) foi posicionada deitada, com a parte de dentro para baixo, assim sendo possível captar os dados que se encontravam na base da máscara e em outros locais que não estava sendo possível, como a parte de baixo do nariz, além da sobrancelha e outros pequenos detalhes na parte interna da máscara.

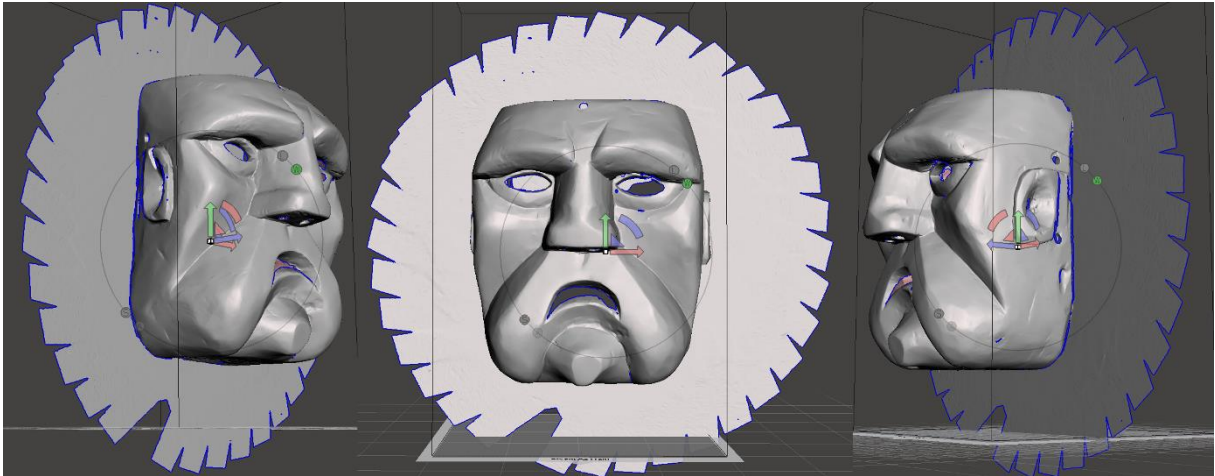


Figura 30 – Terceira digitalização

Por fim, juntando todas as digitalizações, foi possível obter o primeiro modelo tridimensional da máscara, como mostrado na Figura 31.

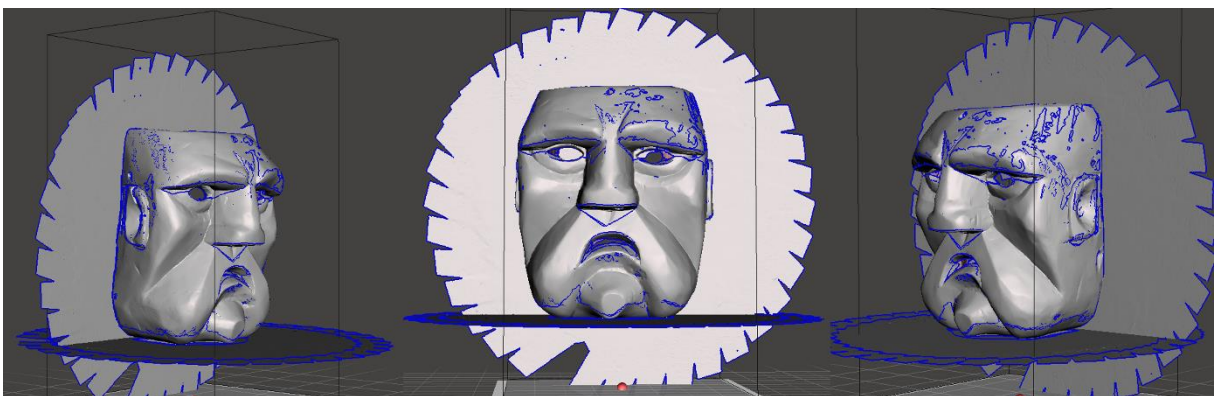


Figura 31 – Junção de todas as digitalizações

Na Figura 32 é possível observar o como ficou a digitalização final da máscara 2, sendo possível observar que será necessário um trabalho mais detalhado sobre a mesma.

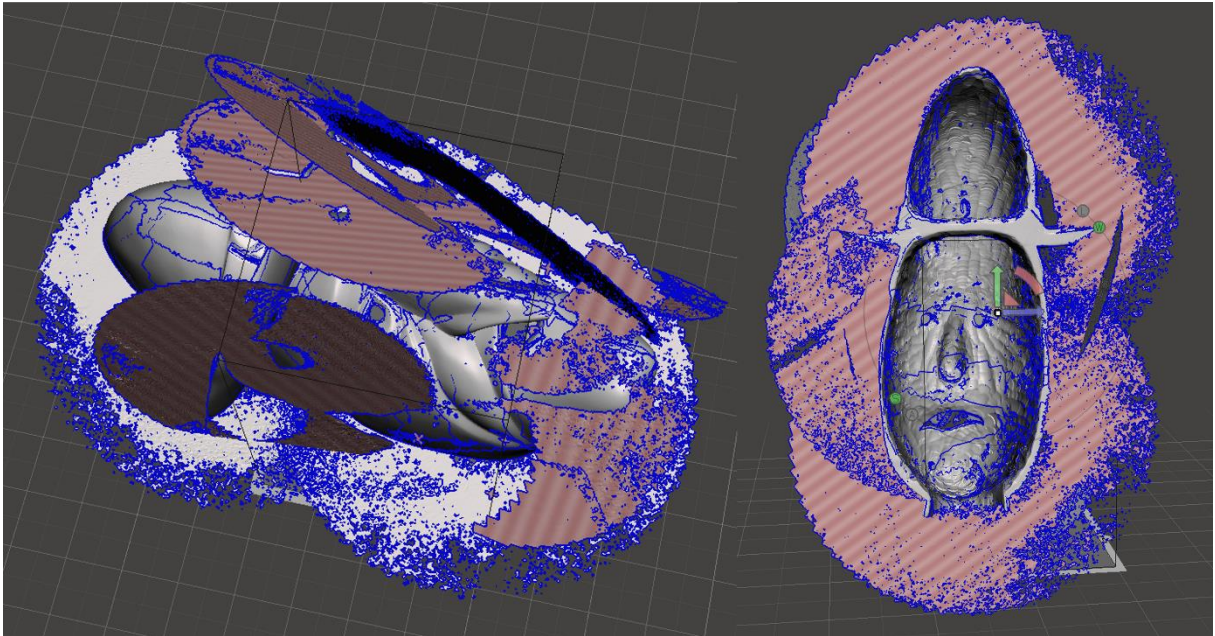


Figura 32 – Digitalização máscara 2

3.1.2.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS

Com as digitalizações já realizadas, começa o processamento dos dados, para isto, no primeiro passo foi utilizado o *software* meshmixer. Primeiramente realizando a remoção do excesso que não fazem parte das máscaras, para realizar a remoção foi utilizado a ferramenta *select*, como mostrado na Figura 33, após selecionada a área que deseja apagar, aperte a tecla Del do computador.

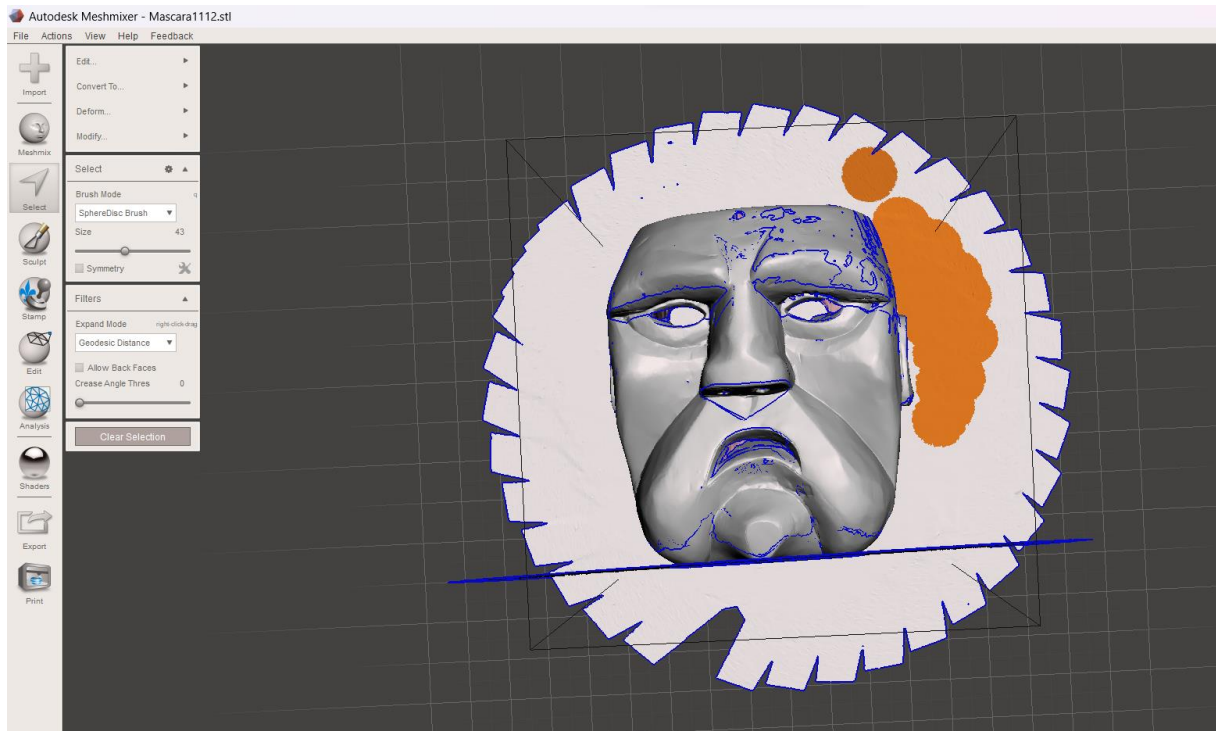


Figura 33 – Remoção de excesso

Removendo o excesso, começa o real processamento da malha. Utilizando a ferramenta *Analysis* -> Inspector é possível observar os erros que contém na malha, como mostrado na Figura 34, sendo um total de 359. No próprio Inspector possui a ferramenta que repara automaticamente os mesmos erros, como mostrado na Figura 36.

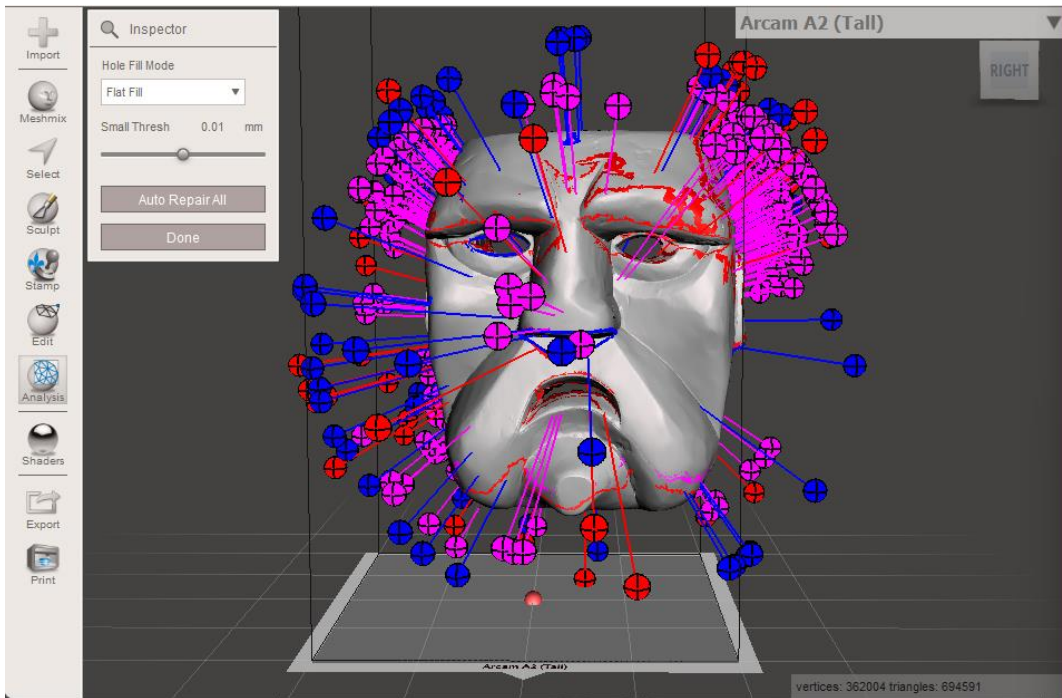


Figura 34 – Erros apontados

Na Figura 35 é possível observar os erros apontados da máscara 2 após a remoção de impurezas.

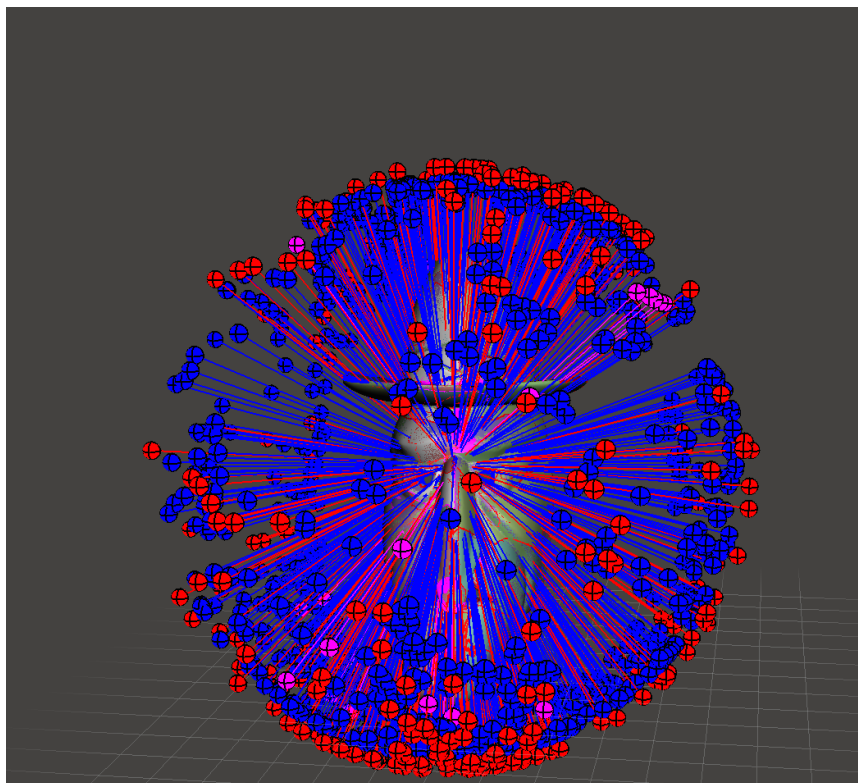


Figura 35 – Erros apontados máscara 2

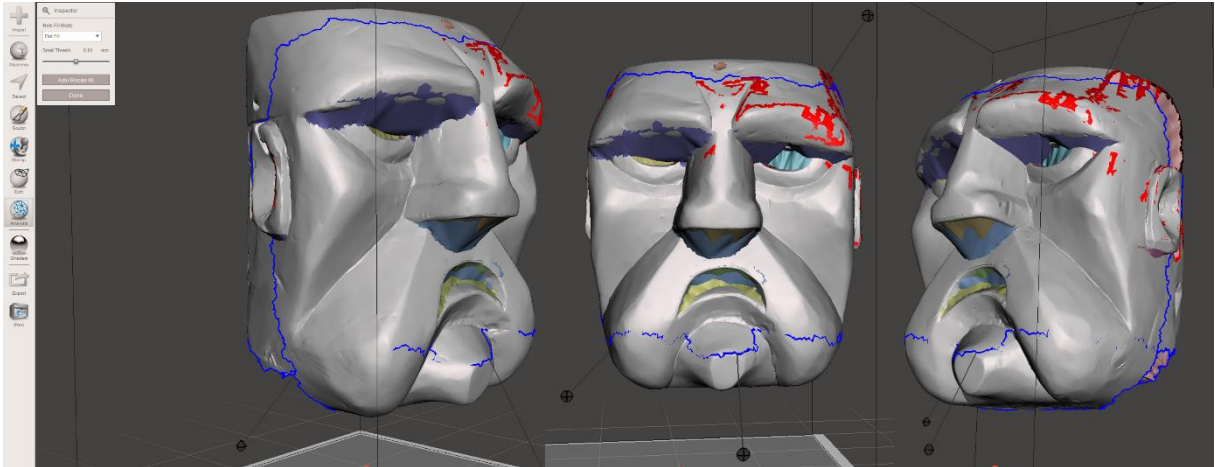


Figura 36 – Primeira sugestão do software

Como observado na Figura 36, que mesmo utilizando dessa ferramenta, o resultado não é satisfatório e chegando a deletar parte que são de extrema importância na máscara, sendo assim não foi realizado o mesmo processo para a máscara 2. Existe outra ferramenta no meshmixer, chamada *make solid*, que tem a função de tornar o objeto em um sólido impermeável. Utilizando esta ferramenta, chegou-se ao resultado mostrado na Figura 37.

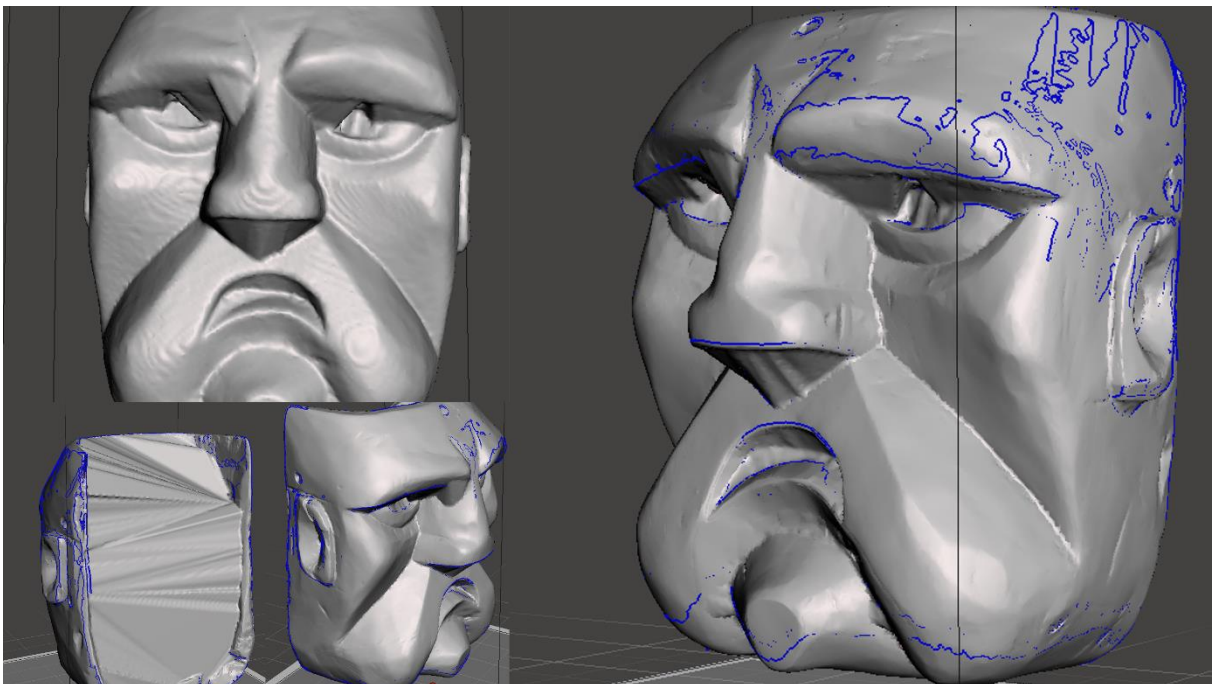


Figura 37 – Malha utilizando o *Make Solid* do Meshmixer

Também resultando em um resultado insatisfatório. Para corrigir os erros utilizou a ferramenta *Edit -> Separate Shells*, sendo possível realizar a separação de todas as malhas e foi observado que continha um número 273, como mostrado na Figura 38.



Figura 38 – Todas as malhas disponíveis na digitalização

Através da opção de deixar visível ou não a malha, foi constatado que a maioria das malhas não é relevante, como mostrado na Figura 39. Apenas três era necessária para a modelagem, sendo assim, foram deletadas todas as outras malhas.

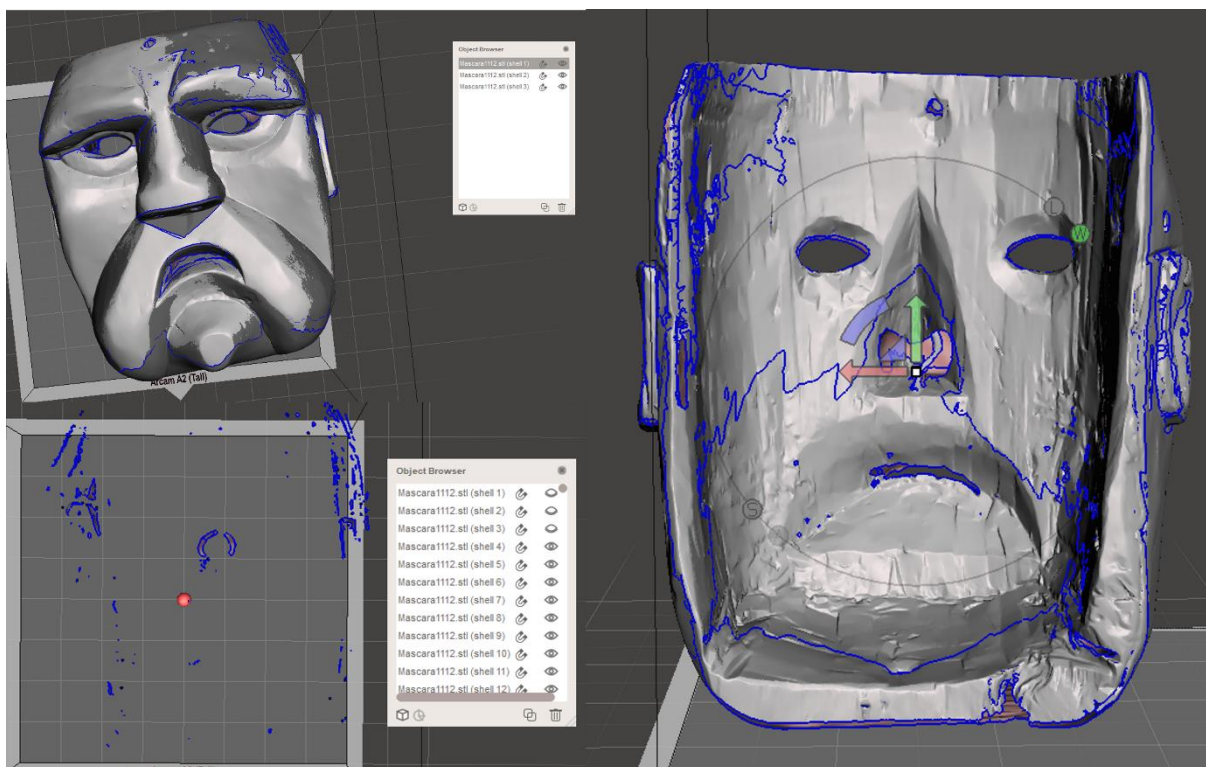


Figura 39 – Malhas importantes

Após eliminar os resíduos, foi necessário juntar novamente as malhas, sendo feitas no próprio meshmixer, utilizando o *combine*. Para conseguir uma malha imprimível, é necessário deixá-la impermeável, para isso foi utilizado o programa do meshlab, onde nos oferece diversas ferramentas, entre elas a *surface reconstruction: Screened Poisson*, sendo um método desenvolvido pelo Michael Kazhdan [55], como mostrado na Figura 40.

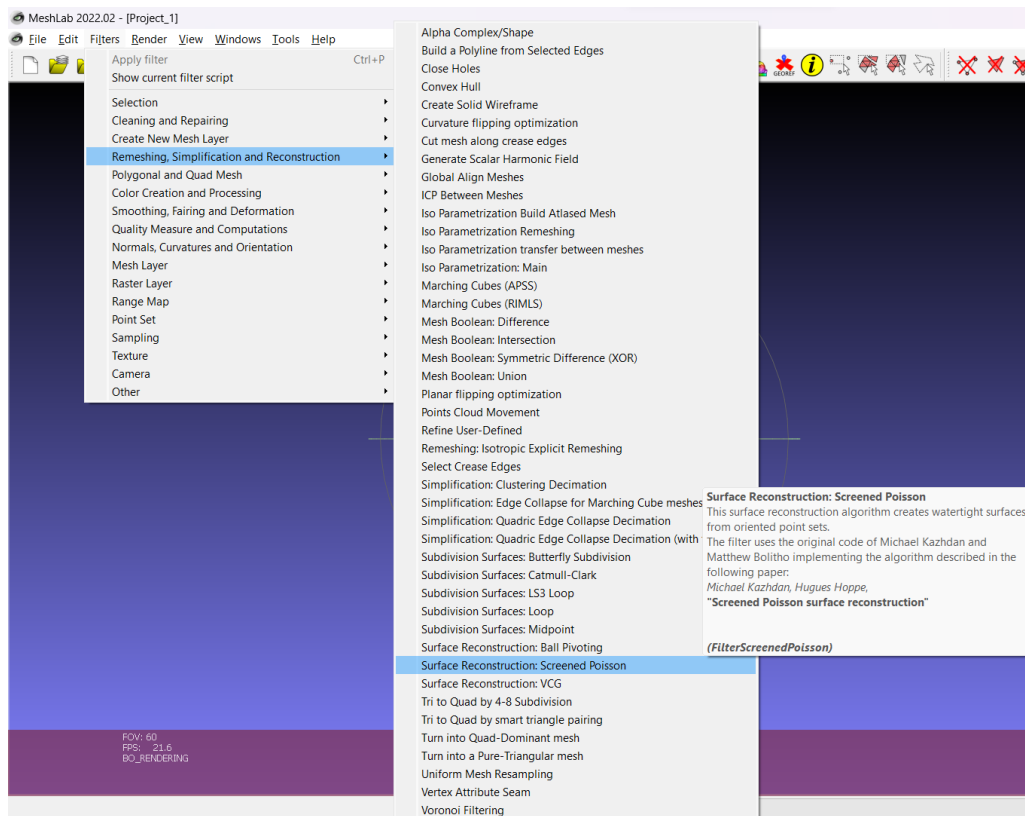


Figura 40 – Procedimentos para criação da malha

Assim é possível alterar alguns parâmetros que influenciam na reconstrução final, como a resolução, o nível de detalhe e a suavidade da superfície. Devido à flexibilidade de edição oferecida pelo MeshLab, os usuários podem refinar o resultado da reconstrução de acordo com suas necessidades específicas e os requisitos do projeto, como mostrado na Figura 41.

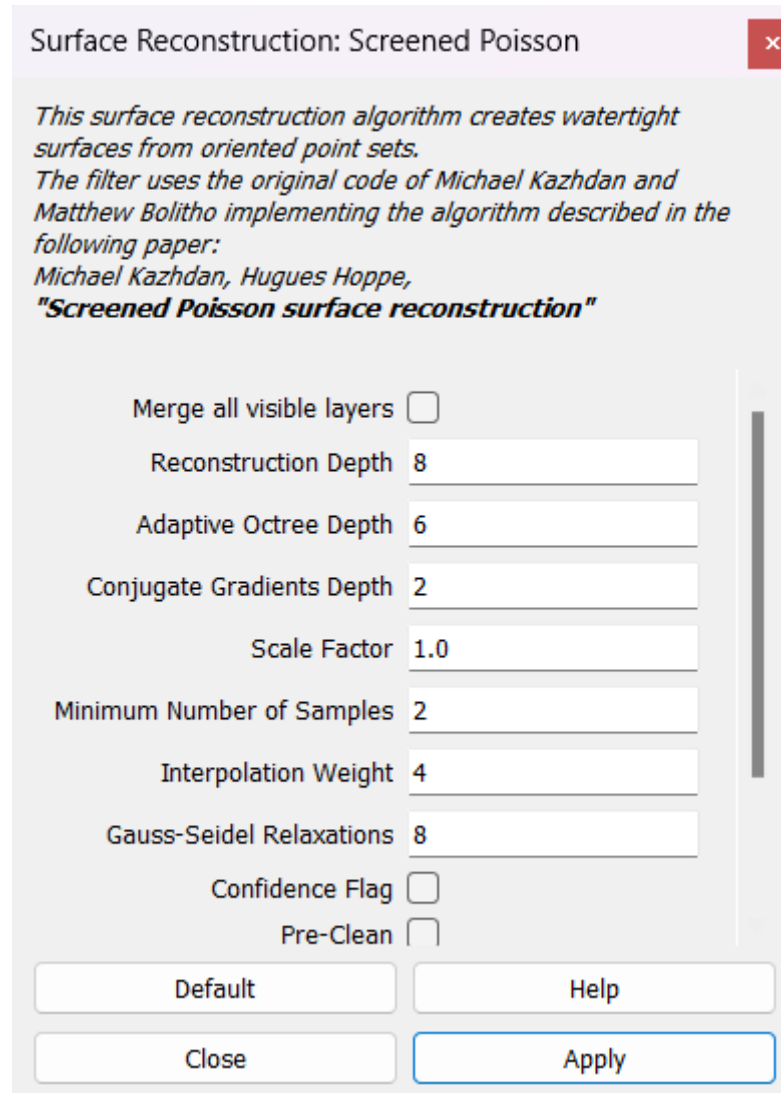


Figura 41 – Configurações de reconstrução da malha

Explicando um pouco sobre cada um dos parâmetros, lembrando que conforme for maior o número de cada parâmetro, o consumo computacional será maior, sendo assim, foram definidos valores que conseguissem alcançar uma boa reconstrução, atendendo todos os detalhes necessários e que também economizasse recursos computacionais.

Começando com o *Reconstruction Depth* esse parâmetro controla a resolução da reconstrução, determinando o nível de detalhes da malha. Valores mais altos produzem uma malha com a reconstrução mais detalhada, capturando até as menores características da superfície, com isso é necessário um uso muito elevado do tempo de processamento e uso de memória.

O *Adaptive Octree Depth* define a profundidade da estrutura de octree adaptativo utilizada durante a reconstrução. Sendo assim, quanto maior for o número, resulta na representação mais detalhada da geometria.

O *Conjugate Gradients Depth* define a profundidade dos sistemas lineares usando o método dos gradientes conjugados. Valores mais altos podem melhorar a precisão da solução, especialmente em superfícies complexas.

O *Scale Factor* define o quanto será aplicado nas amostras durante a reconstrução, controlando a escala geral da geometria resultante. Conforme altera o fator de escala, se colocar um fator de 0.8, será reconstruído 80% da malha.

O *Minimum Number of Samples* define o número mínimo de amostras necessárias em cada nó do octree para realizar a reconstrução, ou seja, tem influência na distribuição adequada de amostras em toda a estrutura.

O *Interpolation Weight* influencia a suavidade da superfície reconstruída. Um valor mais alto resulta em superfície mais suave, enquanto valores mais baixos podem preservar características mais detalhadas.

O parâmetro *Gauss-Seidel Relaxations* afeta a convergência e estabilidade do método de solução, especialmente em regiões complexas da geometria.

Por fim, temos o *Number Threads*, esse parâmetro especifica quantos núcleos de processamento podem ser utilizados durante a reconstrução, ou seja, quanto maior o número, menos tempo leva o processamento da reconstrução.

Após ajustar os parâmetros, os resultados foram bastante satisfatórios. A qualidade da reconstrução foi considerável, com uma boa representação dos detalhes da máscara, como mostrado nas Figura 42 e Figura 43. A máscara foi reproduzida com alta precisão, como se mostrará à frente, capturando os detalhes e características do design original. Além disso, a aplicação desses parâmetros permitiu uma reconstrução suave e sem objetos indesejados, resultando em um modelo tridimensional limpo e bem definido.



Figura 42 – Parte de dentro da reconstrução

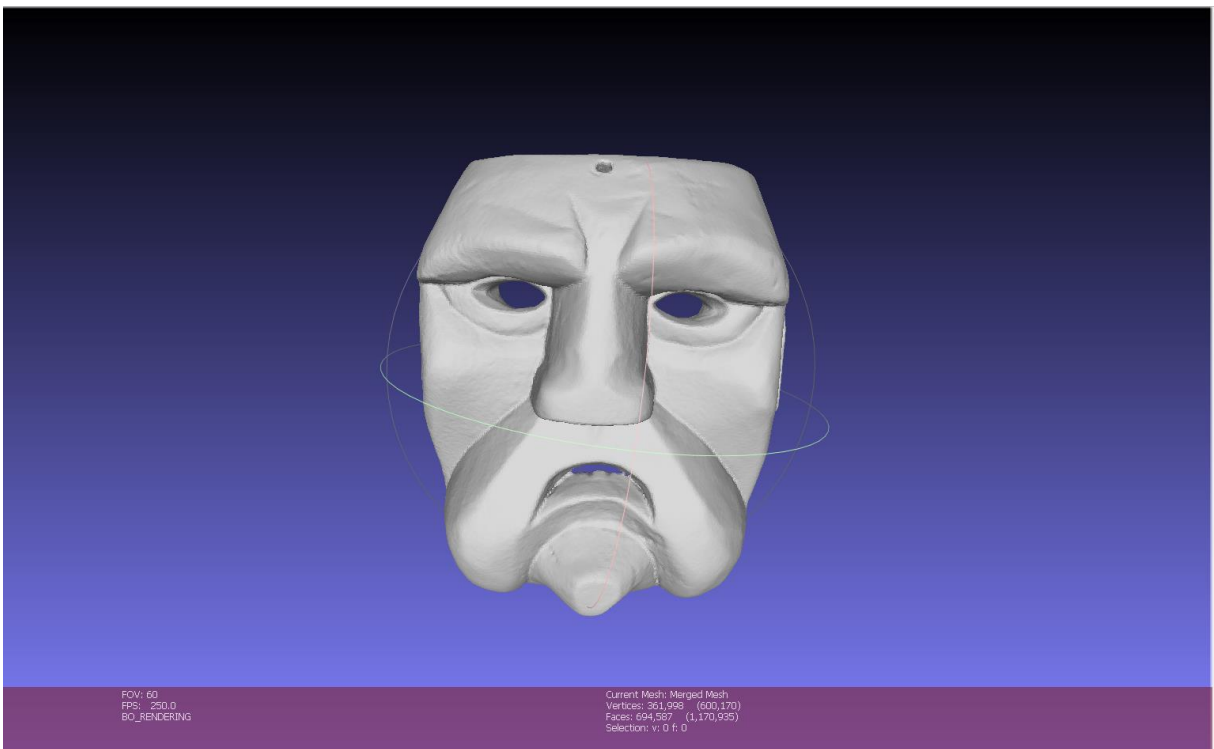


Figura 43 – Parte de fora da reconstrução

Finalizando em com a parte da reconstrução da máscara, o próximo passo foi transferir a textura do modelo real para o modelo digital recriado. O objetivo desse processo era garantir que além de preservar a forma, o modelo digital mantivesse uma aparência visual autêntica da máscara original. Ao transferir a textura para o modelo digital, é possível criar uma representação virtual que proporciona uma experiência tátil mais rica e imersiva ao usuário final, para isso é necessário ir em *sampling* -> *vertex attribute transfer*, como mostrado na Figura 44 e Figura 45.

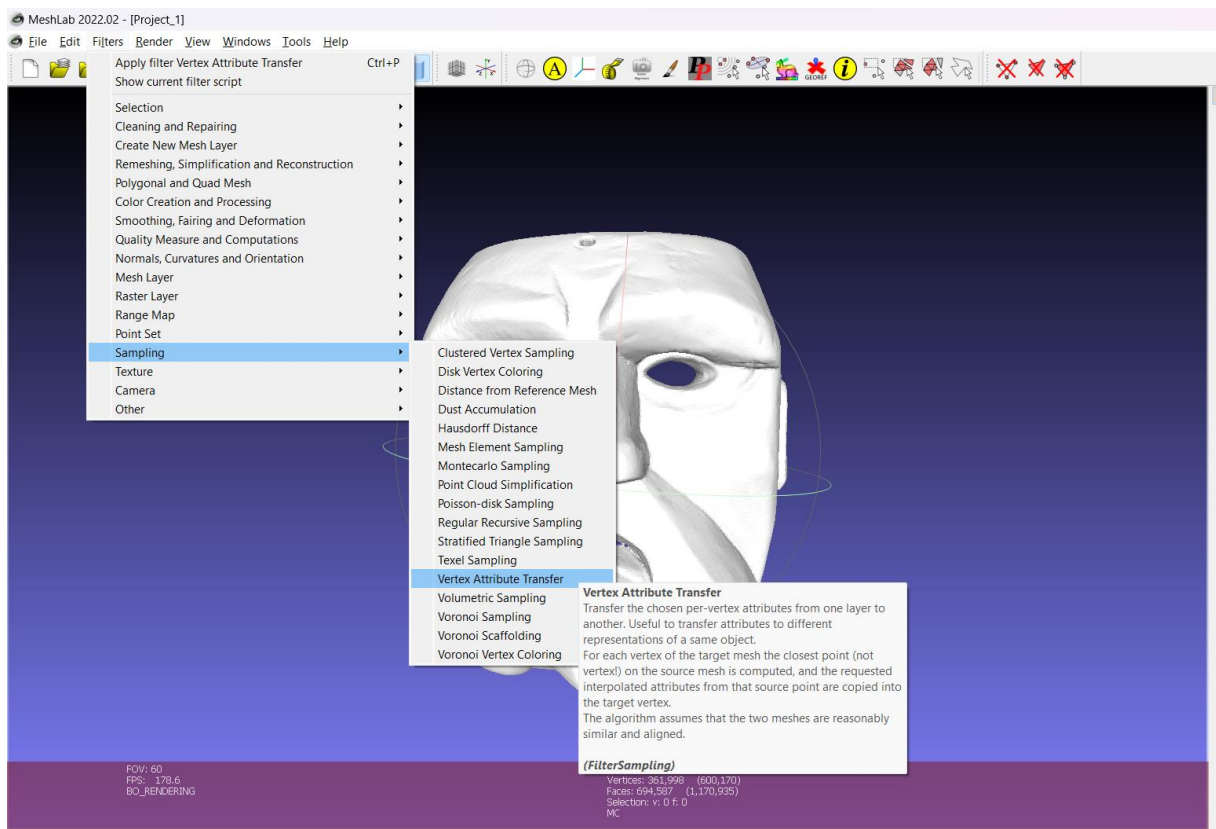


Figura 44 – Passo a passo da transferência de textura

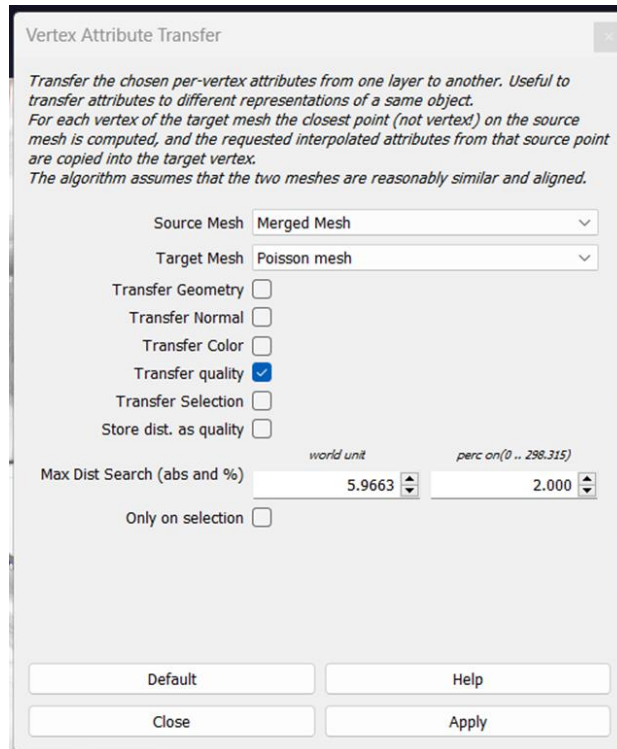


Figura 45 – Configurações da transferência

Em seguida, é possível escolher qual atributo será transferido. A malha é então importada para o *software* Meshmixer, onde é conduzida uma última análise para detectar eventuais falhas ou imperfeições, como mostrado na Figura 46.

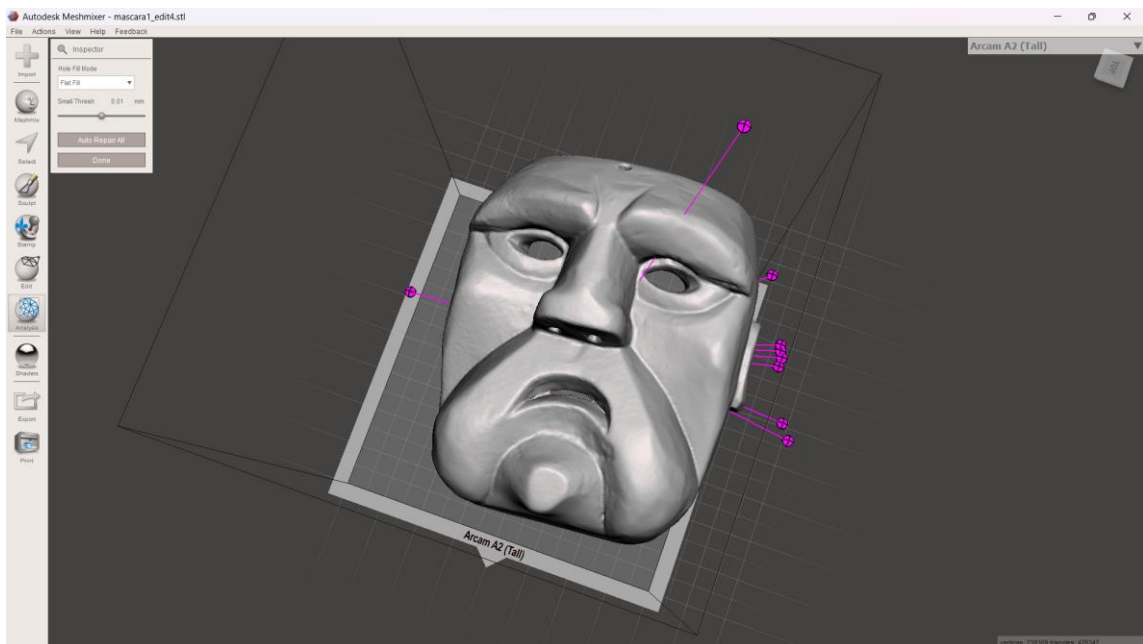


Figura 46 – Malha final da máscara 1

Corrigindo os erros, a fase de tratamento dos dados da malha se encerra. Durante essa etapa foram adotadas diversas medidas para assegurar a qualidade e integridade da malha, incluindo a correção de imperfeições e otimização de geometria. Cada passo foi meticulosamente executado visando garantir que a malha esteja completamente preparada para o próximo estágio, a impressão.

A máscara 2 teve o mesmo processo de tratamento que a máscara 1, uma diferença que ocorreu na máscara 2 foi de ter que fazer duas reconstruções, sendo a primeira com o foco na parte da frente da máscara e a segunda com o foco na parte de trás da máscara, onde contém mais detalhes. A razão disso é devido a quantidade de digitalizações necessárias para capturar todos os detalhes da máscara, com isso mesmo juntando as digitalizações ainda era possível observar alguns espaços entre elas, como observado na Figura 47. Conforme aumenta a precisão da reconstrução esse vão ficava marcando e quando a precisão da reconstrução era menor, não era possível capturar os detalhes de trás da máscara.

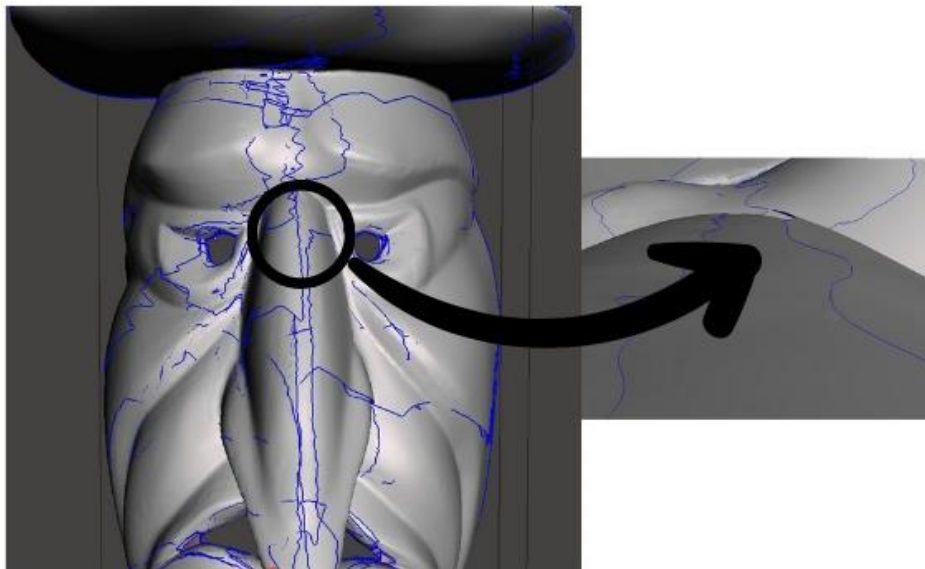


Figura 47 – Sobreposição de digitalização

Com as duas reconstruções realizadas, foram unidas uma com a outra (Figura 48) e realizado os mesmos processos de qualidade aplicados na máscara 1. Como a máscara 2 não foi impressa, daqui em diante os dados da impressão serão apenas da máscara 1.

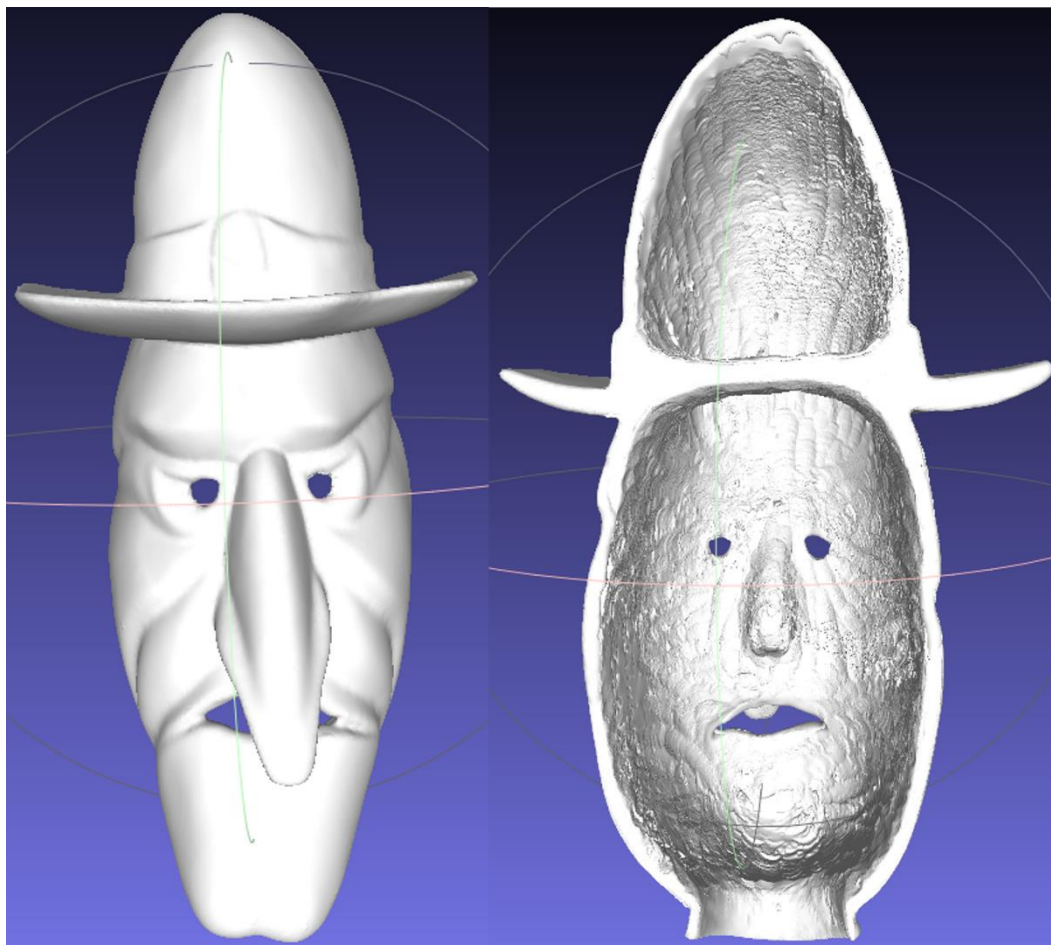


Figura 48 – Malha final da máscara 2

3.1.2.3. IMPRESSÃO

Com a finalização da etapa de processamento de dados, a malha está pronta para ser trazida do mundo virtual para o físico, culminando no processo de impressão tridimensional, para isso será utilizado o *software* UltiMaker Cura. No *software* é realizado o fatiamento do objeto, onde é possível definir certos parâmetros que são fundamentais para a qualidade de acabamento e resistência.

Antes de imprimir a máscara em escala real, foi realizado o fatiamento de um protótipo em uma escala de 1:5, ou seja, com o tamanho de 20% do objeto real no *software* UltiMaker Cura, com o objetivo de realizar uma análise visual, as configurações para a impressão foram as seguintes:

- Preenchimento de 20%;
- Espessura da parede de 0,8 mm;

- *Layer* de 0,2 mm;
- Camadas inferiores e superiores de 1 mm.

Após a impressão do protótipo, foi constatado uma boa representação da máscara real. Sendo assim foi realizada o fatiamento da máscara em escala 1:1 no software Ultimaker Cura (Figura 49) mantendo quase todas configurações da realizada anteriormente em escala 1:5, sendo o preenchimento de 35% devido a dois fatores. O primeiro fator é que a máscara precisava ser resistente para suportar o manuseio táctil das pessoas cegas. O segundo fator é relacionado ao consumo de material, sendo que foram utilizados 621,6 gramas de filamento, enquanto um rolo novo contém 750 gramas. Este equilíbrio permitiu não apenas a economia de material, mas também garantiu a durabilidade necessária do objeto impresso.

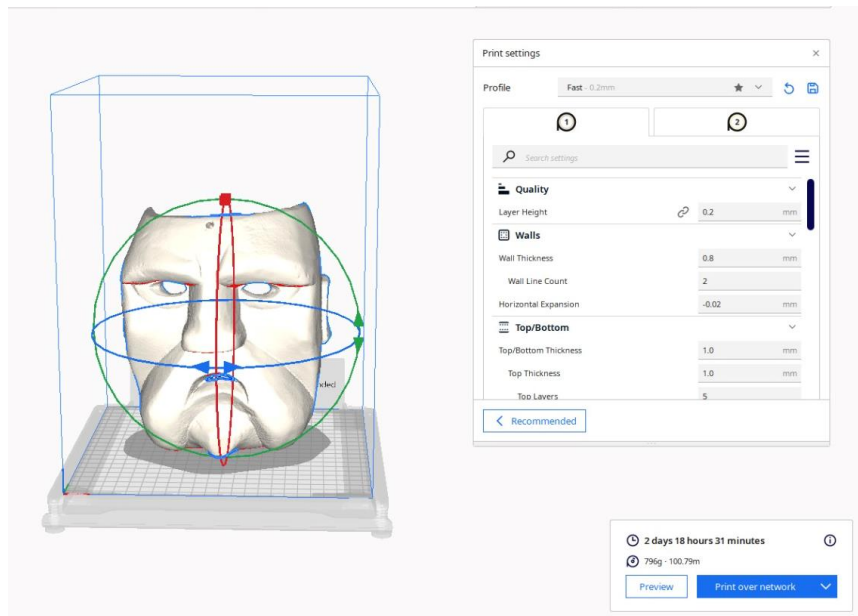


Figura 49 – Fatiamento da máscara em escala real no *software* Cura

3.1.3. DIGITALIZAÇÃO DA MÁSCARA IMPRESSA

Seguindo o mesmo processo da DIGITALIZAÇÃO, obteve-se o modelo digital (Figura 50) da máscara impressa, com a finalidade de realizar uma comparação com a digitalização da máscara original.

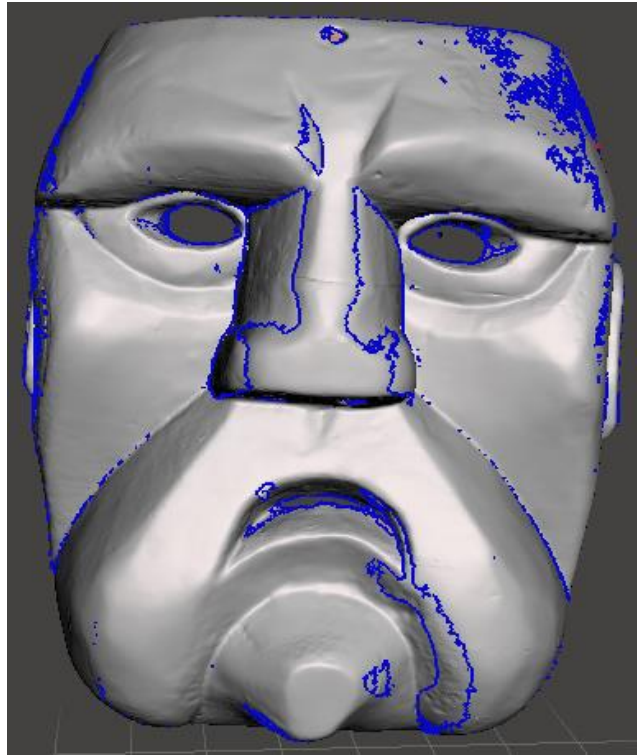
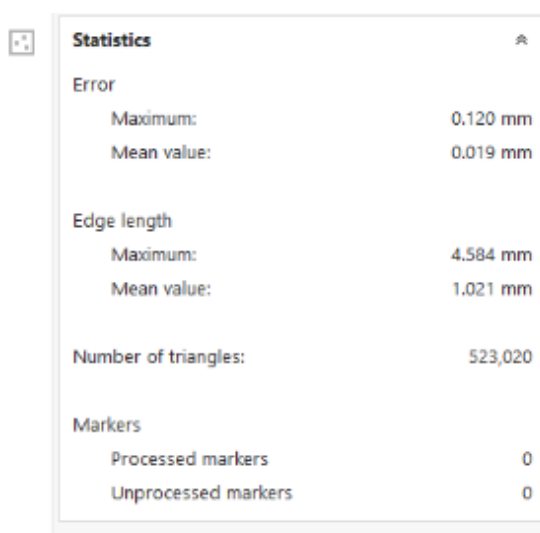


Figura 50 – Digitalização da máscara impressa

4. RESULTADOS DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do projeto, comentando sobre os principais aspectos relacionados à modelagem em *software*, à utilização do *scanner* 3D, dos processos até a impressão e o tratamento final das máscaras. Serão analisados a qualidade dos resultados.

Através do *software* colin3D, foram realizados os alinhamentos das digitalizações da máscara 1, permitindo a análise das estatísticas relacionadas à digitalização, incluindo seu erro máximo, como mostrado na Figura 51. Verificou-se que os valores obtidos foram razoáveis, sendo um erro praticamente imperceptível ao tato.



Statistics	
Error	
Maximum:	0.120 mm
Mean value:	0.019 mm
Edge length	
Maximum:	4.584 mm
Mean value:	1.021 mm
Number of triangles:	523,020
Markers	
Processed markers	0
Unprocessed markers	0

Figura 51 – Relatório de erro

Sendo essas estatísticas importantes para justificar a confiabilidade e precisão da digitalização. Portanto, o objetivo desta etapa foi atingido, deu-se seguimento no desenvolvimento do projeto.

Prosseguindo com a parte da modelagem da malha, como foi mostrado nos materiais e métodos, no primeiro momento não tinha uma malha impermeável (Figura 34), e utilizando o recurso de auto reparo (Figura 36) não foi possível obter um bom resultado, já que deixava a máscara deformada, fechando lugares de extrema importância, como os olhos e a boca, e partes que precisaria fechar ficaram abertas, como a base e o topo da máscara. Utilizando o *make solid* (Figura 37)

também não foi possível obter um resultado decente, sendo necessário um trabalho minucioso.

Após realizar a limpeza da malha (Figura 34) e criado a reconstrução de Poisson (Figura 42 e Figura 43) é possível observar o primeiro resultado significativo, mas ainda era necessário transferir a textura e qualidade da primeira digitalização da máscara para a reconstrução, assim obtendo o melhor modelo 3D (Figura 52).



Figura 52 – Máscara finalizada

Em relação a máscara 2, tem-se o seguinte resultado (Figura 53), sendo possível notar que foi possível preservar todos os detalhes, chegando assim em um resultado satisfatório.

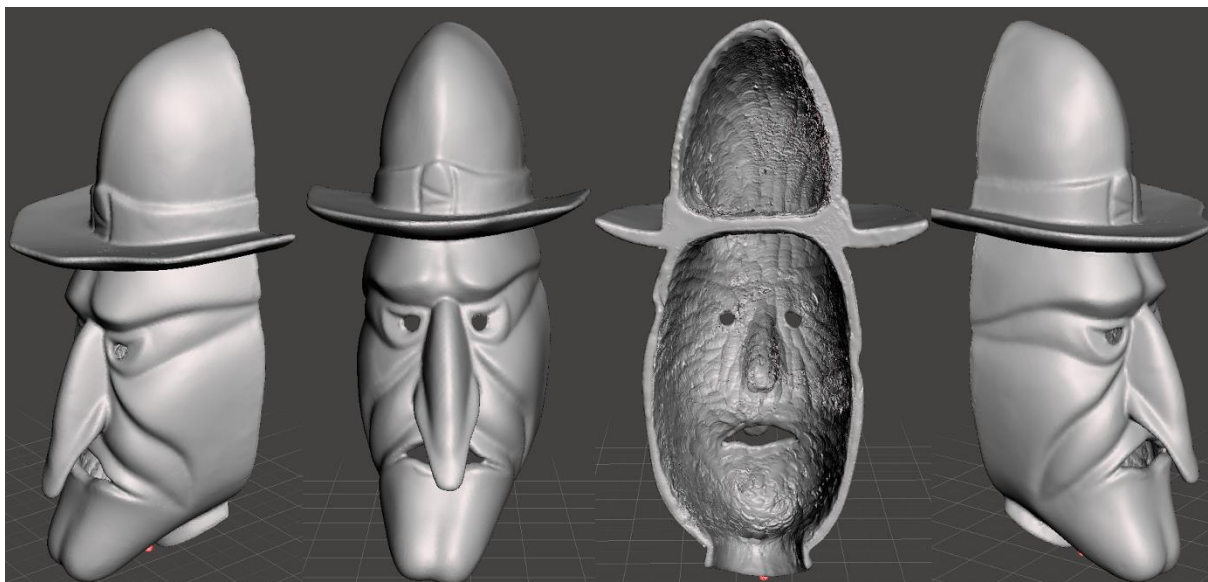


Figura 53 – Máscara 2 finalizada

Com o modelo 3D em STL obtido, partiu-se para a impressão. Um dos primeiros problemas que foi deparado na impressão era em relação à posição a ser impressa, a primeira opção era com ela em pé, mas gerou muitos suportes na região frontal da máscara, influenciando na qualidade final. Então foi pensado em colocá-la deitada, com a traseira para a cama da impressora, utilizando o suporte solúvel em água, mas antes de realizar a impressão da máscara em tamanho real, foi realizado a impressão de uma com 20% do seu tamanho (Figura 54).



Figura 54 – Impressão miniatura

Após observar a qualidade da impressão, decidiu-se prosseguir com a impressão em escala 1:1. Ao final do processo de impressão, a máscara resultante apresentou uma boa representação dos detalhes originais, preservando a fidelidade do artefato histórico. O uso do preenchimento adequado e o gerenciamento eficiente dos recursos garantiram a produção de um modelo táctil robusto e preciso.

No modelo final foi necessário deixar um dia na água para a remoção dos suportes, com a remoção dos suportes, criou-se pequenas aberturas na máscara, onde entrou água, então foi deixada mais um dia secando, finalmente chegando na Figura 55.

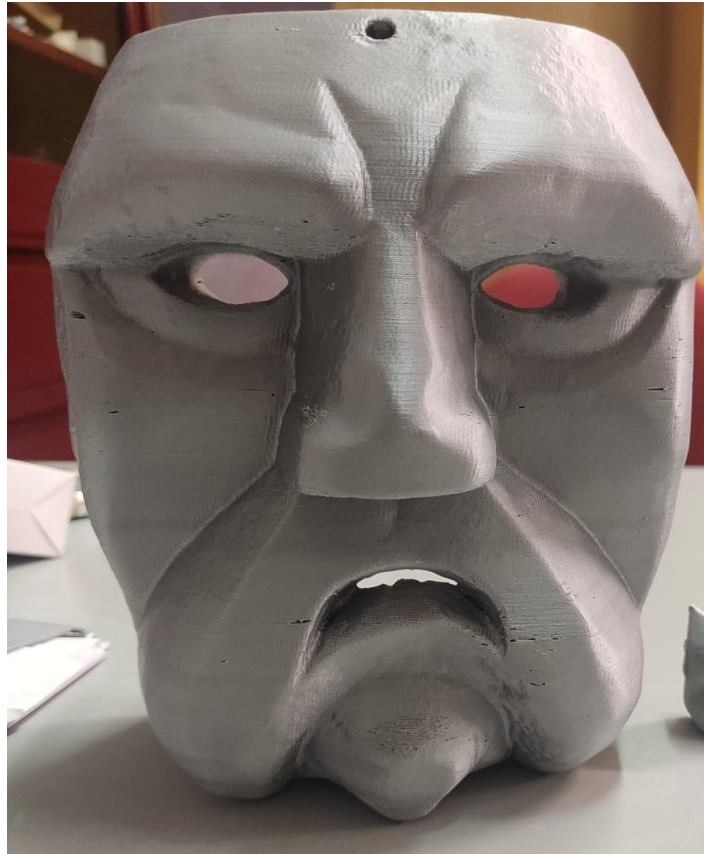


Figura 55 – Impressão da máscara 1 em escala real

Com a máscara impressa, foi realizada uma nova digitalização, para serem realizadas as medições e compará-las, na Figura 56 temos um exemplo de como foi realizada a medição. Na Figura 57 temos as digitalizações sobrepostas para ser possível ter uma visualização da diferença entre a real e a impressa.

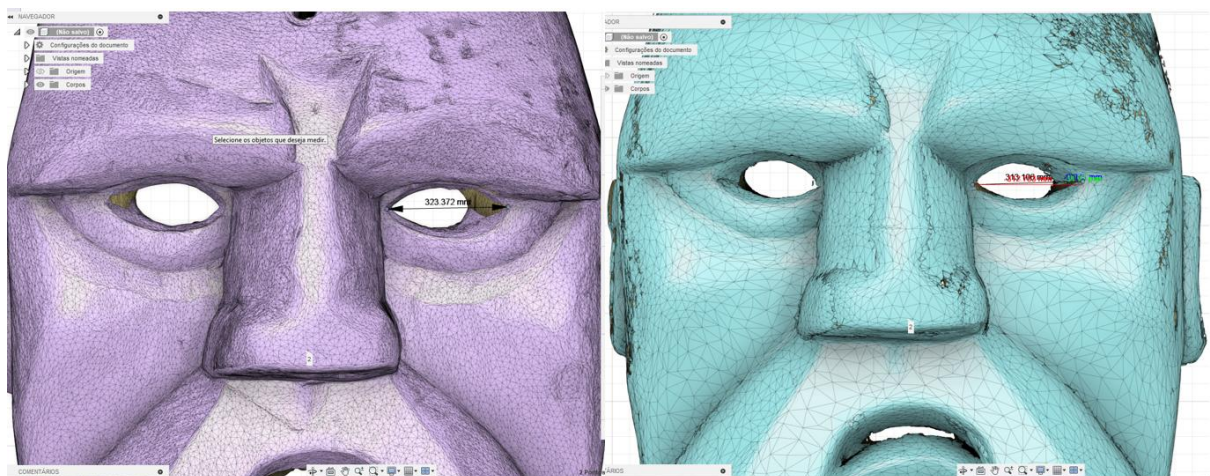


Figura 56 – Medição do comprimento do olho direito

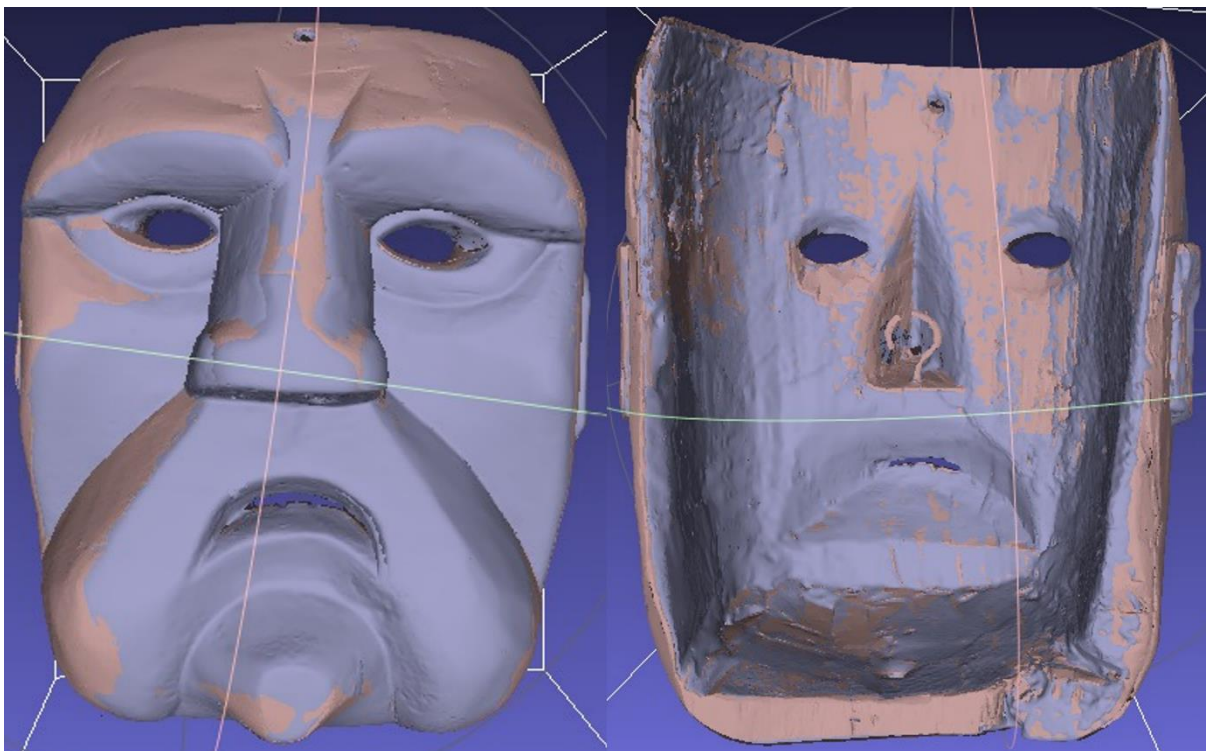


Figura 57 – Comparação das digitalizações

Na Tabela 1, apresentamos uma comparação detalhada entre as medidas da digitalização da máscara original e da versão impressa em 3D. A tabela também inclui o erro de medição, permitindo uma análise precisa da fidelidade da impressão em relação ao modelo original. Esses dados são fundamentais para avaliar a precisão do processo de digitalização, modelação e impressão, garantindo que a máscara reproduza os detalhes essenciais do artefato original.

Tabela 1 – Comparativo das digitalizações

<i>Local de medição</i>	Digitalização	Modelo Impresso	Erro Relativo
	Modelo Original (10 ⁻⁴ m)	digitalizado (10 ⁻⁴ m)	
<i>Comprimento da boca</i>	501,335	497,934	-0,68%
<i>Altura do queixo</i>	211,630	207,858	-1,78%
<i>Espaçamento da sobancelha</i>	107,57	103,744	-3,56%
<i>Comprimento do olho direito</i>	323,372	313,106	-3,17%

<i>Altura da máscara</i>	1974,902	1962,022	-0,65%
<i>Comprimento da máscara</i>	1672,256	1680,998	0,52%
<i>Distância entre os extremos dos olhos</i>	1079,639	1062,406	-1,60%
<i>Profundidade do Nariz</i>	275,016	270,21	-1,75%
<i>Largura do nariz</i>	535,276	545,602	1,93%
ERRO RELATIVO MÉDIO			-1,19%

Com um erro relativo médio de -1,19%, concluiu-se que o modelo atendia a todos os pré-requisitos estabelecidos. Assim, foi possível prosseguir com a finalização da máscara. Na Figura 55 é possível reparar nas aberturas, para a correção da mesma, foi passada a massa modeladora 3M nas aberturas e lixadas com extremo cuidado para não interferir em nenhum detalhe da máscara. Após ter passado a pasta e lixado, foi realizado a pintura da máscara, para conseguir ter uma maior preservação e para ficar mais parecido possível com a máscara real, sendo assim, a primeira etapa é passar o primário, como na Figura 58.



Figura 58 – Máscara com o primário

Após a aplicação do primário, a máscara foi pintada com a cor marrom, visando se aproximar ao máximo da cor da madeira. Na Figura 59 é possível observar o resultado da mesma.



Figura 59 – Comparação da máscara modelada com a real

Como resultado final da máscara, observou-se uma alta fidelidade entre o modelo impresso e a máscara real. A reprodução dos detalhes, como texturas e relevos, foi notável, representando fielmente as características originais da máscara. A resolução da impressão também se mostrou satisfatória. Além disso, a integridade estrutural da peça final foi garantida, sem deformidades ou defeitos significativos. Durante o processo de impressão, os desafios enfrentados foram abordados com sucesso, com um resultado que atendeu plenamente às expectativas. As análises visuais comparativas entre o modelo impresso e a máscara real corroboraram essa observação, evidenciando a precisão alcançada na reprodução do modelo digital. Também foi realizada a validação tátil da máscara impressa por um grupo de pessoas cegas. Em suma, a impressão da máscara foi concluída com êxito, demonstrando a eficácia do processo de modelagem e impressão 3D na recriação precisa de objetos complexos como este.

A máscara encontra-se em exposição no Museu Iberico da Máscara e do Traje.

4.1. CUSTOS

Este tópico apresenta uma análise detalhada dos custos associados no processo da criação da máscara 1. Sendo realizada uma análise focada nos custos operacionais e de materiais. Sendo mais específico, os custos de materiais são levados em conta o filamento utilizado na impressão. O custo operacional é levado em conta o tempo de funcionamento da impressora e o custo com mão de obra é levada em conta as horas de trabalho na digitalização, da preparação do arquivo e da configuração e monitoramento no processo da impressão.

Na Tabela 2, são apresentados todos os custos envolvidos no processo de criação da máscara. Esta tabela permite uma visão clara e detalhada dos recursos necessários, facilitando a análise.

Tabela 2 – Custos

Máscara	Consumo	Tempo (h)	Preço
<i>Material de construção (PLA)</i>	621,6 g		34,85 €
<i>Material de construção (Nylon)</i>	613,5 g		58,61 €
<i>Material de suporte (PVA)</i>	174,3 g		14,50 €
<i>Mão de obra digitalização</i>		3h	109,74 €
<i>Mão de obra tratamento digital</i>		30h	1097,40 €
<i>Impressão de peça/ tx ocupação máquina</i>		63h34'	635,00 €
<i>Total</i>	795,9 g	96h34'	1890,35 €

Com isso temos que a máscara produzida no FabLab custa 1890,35€. Vale ressaltar que este seria o valor total da fabricação da máscara, considerando a tabela de valores do FabLab, onde a hora da impressora é 10 € e a hora do técnico

é 36,58 €. Para meios comparativos, levando em conta apenas a impressão 3D, foram realizados 2 orçamentos, sendo o preenchimento em ambos fornecedores de 20%, na Tabela 3 contém o resultado da comparação do custo de fabricação da máscara 1 no FabLab com o preço de dois fornecedores (A e B).

Tabela 3 – Comparativo de preços

Comparação de preços

<i>Fabricação pelo FabLab apenas material PLA</i>	49,35 €
<i>Fabricação pelo FabLab apenas material Nylon</i>	73,11 €
<i>Fabricação pelo FabLab Nylon</i>	708,11 €
<i>Fornecedora A Nylon</i>	454,21 €
<i>Fornecedora B Nylon</i>	729,20 €

Essa investigação permitiu analisar a viabilidade e a eficiência de manter a produção interna da maquete física em vez de optar por terceirização, devido ao fato de o preço não levar em conta o valor do frete e o tempo que teria com a entrega. Os dados comparativos fornecidos foram cruciais para assegurar uma tomada de decisão fundamentada, avaliando aspectos como custo, tempo e qualidade.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma das inúmeras soluções em relação ao problema com a digitalização 3D e construção de recursos táteis para cegos. Os resultados obtidos foram considerados um sucesso que viu sua validação efetuada por um grupo de pessoas cegas. Partindo da utilização da tecnologia de *scanner* 3D, foi possível obter uma digitalização precisa da máscara, capturando suas características e detalhes em uma nuvem de pontos tridimensional.

A partir da nuvem de pontos, foi criada a malha STL para dar seguimento no processo de modelagem 3D, gerando um objeto virtual detalhado através de softwares especializados, criando assim uma representação digital precisa da máscara, levando em conta sua textura, aparência e todos seus detalhes relevantes.

Quando se trata do erro na parte da digitalização, foi observado que o erro máximo era de 0,120 mm. Logo, podemos concluir que o processo de digitalização está dentro de um limite aceitável para a reprodução fiel do artefato. Esta precisão é essencial para garantir que a máscara impressa preserve os detalhes importantes do original.

Após uma análise em relação aos *softwares* disponíveis, foram escolhidos os seguintes softwares: colin3D, meshmixer, MeshLab e o UltiMaker Cura para realizar todo o processo, desde a captação dos dados até à impressão. Os *softwares* foram escolhidos devido a diversos fatores, bem como a recursos avançados, ser de fácil utilização, sua eficiência na construção de modelos para impressão 3D e a sua compatibilidade com o *scanner* 3D. Após uma série de testes, trabalho previamente efetuado pelo orientador Jorge Santos, concluiu-se que foi uma excelente combinação, já que atende todos as demandas do projeto, além de garantir uma precisão detalhada.

Na etapa seguinte, procedeu-se com a impressão da maquete tátil através da tecnologia de impressão 3D, onde produziu-se um modelo físico que contém todas as formas e características da máscara. A impressora utilizada possui uma precisão de 0,0125 mm nos eixos, o que garante que cada detalhe seja fielmente reproduzido. O recurso tátil permite que pessoas cegas consigam ter uma

experiência inclusiva através do toque, proporcionando uma experiência tátil autêntica para usuários com deficiência visual.

Se tratando do custo, foram analisados todos os custos envolvidos na criação da máscara, foram calculadas diversas variáveis para garantir uma avaliação mais abrangente. Foi evidenciado que o custo local da impressão era maior que um dos terceirizados. No entanto, uma análise mais detalhada indica que essa escolha traz uma série de benefícios estratégicos e operacionais que justificam o investimento adicional. Primeiramente, com a impressão local proporciona realizar ajustes imediatos durante o processo de produção, além da capacidade de realizar correções necessárias é significativamente aprimorada, reduzindo assim o tempo de entrega do produto final. Outro aspecto vital é a proteção da propriedade intelectual, assegurando que informações sensíveis sobre os artefatos culturais não sejam divulgadas a terceiros, protegendo assim o valor histórico e cultural dos objetos.

Além de cumprir os objetivos específicos da digitalização, modelagem e impressão da maquete tátil, este trabalho apresenta um impacto significativo em várias áreas. A utilização do *scanner* 3D, juntamente com a modelação e impressão da maquete tátil provou ser uma grande adição ao campo da engenharia e tecnologia, conseguindo assim armazenar um modelo digital e/ou impresso de objetos culturais do país, criando um tutorial que consegue partir desde a captura de nuvem de pontos até a criação do modelo digital 3D. Em anexo mostra que este procedimento funciona com outros tipos de objetos, sendo uma máscara com maior quantidade de detalhes e dimensões maiores.

Durante a construção deste trabalho, surgiram desafios que exigiram soluções criativas e habilidades de resolução de problemas. Ocorrendo dificuldades na modelagem para conseguir criar uma malha impermeável e que mantivesse a precisão nos detalhes. Que foram ultrapassadas recorrendo a uma combinação de técnicas avançadas de processamento de nuvem de pontos, utilizando *softwares* especializados e ajustando parâmetros críticos no processo de reconstrução, tais como profundidade de reconstrução, profundidade da árvore octree adaptativa e número de iterações do método Gauss-Seidel. Além disso, a escolha cuidadosa de materiais de impressão 3D e a calibração precisa da impressora garantiram a

durabilidade e a fidelidade do modelo final, resultando em uma representação tátil fiel e acessível do artefato cultural.

Por fim, é importante salientar que o impacto social deste trabalho, conseguindo proporcionar experiência tátil e acessível do artefato histórico para pessoas cegas, contribuindo para a inclusão e acessibilidade no âmbito cultural, que é o objetivo do projeto “Cultura para todos em Bragança”, no qual o trabalho faz parte. Promovendo assim uma sociedade mais igualitária, onde as pessoas consigam ter a oportunidade de apreciar e compreender a herança cultural.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Em relação a discussão sobre digitalização 3D, modelagem e impressão de recursos táteis para a acessibilidade revela diversas áreas promissoras para trabalhos futuros. Uma sugestão é na parte de desenvolvimento de *softwares* especializados, onde tenha um foco na simplificação do fluxo de trabalho e na otimização da conversão de nuvens de pontos em modelos 3D precisos.

Outra sugestão é em relação à ampliação para outros contextos culturais, como expandir o uso dessa tecnologia para digitalizar e criar recursos táteis de outros objetos culturais em museus ou locais históricos, explorando uma maior diversidade cultural.

Investir na integração de recursos táteis com tecnologias de realidade aumentada, assim conseguindo obter informações adicionais por meio de áudio ou *feedback* tátil durante a exploração.

Promover uma colaboração com especialistas em tecnologia assistiva, museologia e design inclusivo para desenvolver abordagens mais eficazes para a acessibilidade cultural.

Essas recomendações visam aprimorar a tecnologia existente e expandir o alcance da acessibilidade para pessoas com deficiência visual em ambientes culturais, contribuindo para uma sociedade mais inclusiva e acessível. A implementação dessas propostas pode resultar em avanços significativos na experiência tátil de usuários com deficiência visual, além de fortalecer a preservação e a disseminação do patrimônio cultural através de métodos inovadores.

6. REFERÊNCIAS

- [1] R. Vaz, P. O. Fernandes, and A. C. Rocha Veiga, "Designing an Interactive Exhibitor for Assisting Blind and Visually Impaired Visitors in Tactile Exploration of Original Museum Pieces," *Procedia Computer Science*, vol. 138, pp. 561–570, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.10.076.
- [2] "Norte2020." Accessed: Nov. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.cm-braganca.pt/investir/projetos-cofinanciados/norte2020>
- [3] "Apresentação | Norte 2020." Accessed: Nov. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.norte2020.pt/programa/apresentacao>
- [4] S. C. Pimentel and M. C. Pimentel, "Acessibilidade Para Inclusão da Pessoa com Deficiência: Sobre o que Estamos Falando?," vol. 26, no. 50, 2017.
- [5] S. Omote, "A integração do deficiente: um pseudo-problema científico," *Temas em Psicologia*, vol. 3, no. 2, pp. 55–62, Aug. 1995.
- [6] L. F. Milan, "Maquetes táteis: infográficos tridimensionais para a orientação espacial de deficientes visuais," *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, vol. 1, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2008, doi: 10.20396/parc.v1i2.8634522.
- [7] A. C. Mottin, J. O. Dias, P. M. de Oliveira, and P. H. P. Nascimento, "Acessibilidade para todos: maquete tátil do Congresso Nacional: um estudo do caso," *Revista Tecnologia e Sociedade*, vol. 5, no. 9, Art. no. 9, Dec. 2009, doi: 10.3895/rts.v5n9.2544.
- [8] R. C. C. Vieira *et al.*, "Museu e recursos táteis para pessoas cegas: Acessibilização da Sala Aldemir Martins no Museu de Arte da UFC (MAUC)," 2021, Accessed: Mar. 21, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/70153>
- [9] D. F. Moutinho, "Utilização de Scanners 3D na Investigação de Acidentes de Viação," Mestrado Integrado em Ciências Policiais, Instituto Superior de Ciências Policiais e Segurança Interna, Lisboa, 2021.
- [10] G. Celani and L. Cancherini, "Digitalização tridimensional de objetos: um estudo de caso.," presented at the SIGraDi 2009, São Paulo, SP, 2009.
- [11] "Brazo de medición de alta precisión Onyx," Kreon Technologies. Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://kreon3d.com/es/brazo-de-medicion-mmc-portatil/brazo-de-medicion-de-alta-precision-onyx/>
- [12] M. A. M. C. Inês, "Digitalização 3D por meio de fotogrametria: uma análise comparativa," masterThesis, 2022. Accessed: Jan. 22, 2024. [Online]. Available: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/83016>
- [13] "https://global3d.pl/en/module/psblog/module-psblog-blog?id=65." Accessed: Feb. 27, 2024. [Online]. Available: <https://global3d.pl/en/module/psblog/module-psblog-blog?id=65>
- [14] L. inc, "What Is the Best 3D Scanner?," Creiform's Blog - News, Tips & Tricks about 3D technologies, 3D Scanning, QC/Inspection, Reverse Engineering & More. Accessed: Feb. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.creaform3d.com/blog/what-is-the-best-3d-scanner/>
- [15] I.-U. Mecate, "Mecate." Accessed: Feb. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.mecate.esteticas.unam.mx>
- [16] N. T. P. A. Fernandes, "Reconstrução de Superfícies usando um Scanner 3D de Luz Estruturada," Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2012.

- [17] F. Dickin, S. Pollard, and G. Adams, "Mapping and correcting the distortion of 3D structured light scanners," *Precision Engineering*, vol. 72, pp. 543–555, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.precisioneng.2021.06.001.
- [18] A. Georgopoulos, C. Ioannidis, and A. Valanis, "Assessing the Performance of a Structured Light Scanner," 2010.
- [19] D. Akca *et al.*, "3D modeling of the Weary Herakles statue with a coded structured light system," Sep. 2006.
- [20] J. L. Posdamer and M. D. Altschuler, "Surface measurement by space-encoded projected beam systems," *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 18, no. 1, pp. 1–17, Jan. 1982, doi: 10.1016/0146-664X(82)90096-X.
- [21] J. Salvi, J. Pagès, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems," *Pattern Recognition*, vol. 37, no. 4, pp. 827–849, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.patcog.2003.10.002.
- [22] M. Edl, M. Mizerák, and J. Trojan, "3D Laser Scanners: History and Applications," *AS*, vol. 4, no. 4, pp. 1–5, Dec. 2018, doi: 10.22306/asim.v4i4.54.
- [23] T. D. Conto, "Performance of tree stem isolation algorithms for terrestrial laser scanning point clouds," Aug. 2016. Accessed: Jan. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Performance-of-tree-stem-isolation-algorithms-for-Conto/1fc042e4deff09c1e38d50f1ecea36d66252793>
- [24] A. Tommaselli, "Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3d a curta Distância," *Geodésia On line*, Jan. 2003.
- [25] R. Gonçalves, "Dispositivo de varredura laser 3D terrestre e suas aplicações na engenharia, com ênfase em túneis.," Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. doi: 10.11606/D.3.2007.tde-10082007-173531.
- [26] M. Kašpar, M. Stroner, T. Kremer, and M. Tejkal, *Laser scanning in civil engineering and land surveying*. Republika Czeska: VEGA, 2004.
- [27] J. I. San José Alonso, J. Martínez Rubio, J. J. Fernández Martín, and J. García Fernández, "Comparing Time-Of-Flight and Phase-Shift. The Survey of The Royal Pantheon In the Basilica of San Isidoro (León)," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII-5-W16, pp. 377–385, Sep. 2012, doi: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-377-2011.
- [28] "Hogyan működik a térszkenner?" Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.faro3d.hu/tudasbazis/hardverek/faro-focus/altalanos/hogyan-mukodik-a-terszkenner>
- [29] H. Yoon, H. Song, and K. Park, "A phase-shift laser scanner based on a time-counting method for high linearity performance," *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, no. 7, p. 075108, Jul. 2011, doi: 10.1063/1.3600456.
- [30] C. Suchocki, "Comparison of Time-of-Flight and Phase-Shift TLS Intensity Data for the Diagnostics Measurements of Buildings," *Materials*, vol. 13, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13020353.
- [31] I. T. Simão, *Engenharia reversa e prototipagem*. Saraiva, 2021.
- [32] A. Anzai and G. C. DeAngelis, "Neural computations underlying depth perception," *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 20, no. 3, pp. 367–375, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.conb.2010.04.006.
- [33] C. H. S. Lamas, S. P. Davis, C. Patzlaff, and R. C. Pinheiro, "Digitalização 3D com Fotogrametria," presented at the Anais do 4o simpósio de pós-graduação em design da Esdi, Nov. 2018, p. 1. Accessed: May 06, 2024. [Online].

- Available: https://www.even3.com.br/anais/spgd_2018/121324-digitalizacao-3d-com-fotogrametria
- [34] J. M. Lambert and B. Jacob Skousen, “A critical review of UAS-based aerial photography and photogrammetry of Cahokia’s Grand Plaza,” *Journal of Archaeological Science: Reports*, vol. 47, p. 103789, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jasrep.2022.103789.
- [35] M. Daneshmand *et al.*, “3D Scanning: A Comprehensive Survey.” arXiv, Jan. 23, 2018. Accessed: Jan. 25, 2024. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1801.08863>
- [36] Loganx, “Fotogrametria Terrestre,” Cranes and Machines. Accessed: Mar. 26, 2024. [Online]. Available: <https://gruasyaparejos.com/topografia/fotogrametria-terrestre/>
- [37] M. Zhao, S. Song, F. Wang, C. Zhu, D. Liu, and S. Wang, “A method to interpret fracture aperture of rock slope using adaptive shape and unmanned aerial vehicle multi-angle nap-of-the-object photogrammetry,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 924–941, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jrmge.2023.07.010.
- [38] D. R. dos Santos and H. C. de Oliveira, *Princípios de Aquisição e Processamento de Dados Espaciais*. São Paulo: Blucher, 2022.
- [39] K. Blume, M. Röger, T. Schlichting, A. Macke, and R. Pitz-Paal, “Dynamic photogrammetry applied to a real scale heliostat: Insights into the wind-induced behavior and effects on the optical performance,” *Solar Energy*, vol. 212, pp. 297–308, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.10.056.
- [40] “nissen-OpenTopo-ASU-APR-2016-structure-from-motion.pdf.” Accessed: Mar. 27, 2024. [Online]. Available: https://cloud.sdsc.edu/v1/AUTH_opentopography/www/shortcourses/16UNAVCO/nissen-OpenTopo-ASU-APR-2016-structure-from-motion.pdf
- [41] S. S. Yanaga, “Fotogrametria digital à curta distância na documentação do patrimônio arquitetônico: estudo de caso,” 2006.
- [42] A. Tommaselli, J. Silva, J. Hasegawa, M. Galo, and A. Dal Poz, “FOTOGAMETRIA: aplicações a curta distância,” 1999, pp. 147–159. doi: 10.13140/2.1.1594.6246.
- [43] “A fotogrametria e os seus benefícios para casos totais em Implantodontia,” *Revista ImplantNews*. Accessed: Mar. 27, 2024. [Online]. Available: <https://revistaimplantnews.com.br/a-fotogrametria-e-os-seus-beneficios-para-casos-totais-em-implantodontia/>
- [44] “Reconstrução a partir de nuvem de pontos com a utilização de funções de Morse di...” Accessed: Feb. 05, 2024. [Online]. Available: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-13112014-163149/es.php>
- [45] Y. Guo, H. Wang, Q. Hu, H. Liu, L. Liu, and M. Bennamoun, “Deep Learning for 3D Point Clouds: A Survey,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 43, no. 12, pp. 4338–4364, Dec. 2021, doi: 10.1109/TPAMI.2020.3005434.
- [46] J. Lima, A. Amorim, and F. Schmidt, *Levantamento da Portada das Igrejas de São Francisco e do Rosário com Nuvens de Pontos*. 2010.
- [47] N. J. Groetelaars, “Criação de Modelos BIM a partir de ‘nuvens de pontos’: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica,” Sep. 2016, Accessed: Apr. 11, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/20220>

- [48] L. Chesini, “Comparação de malhas triangulares reconstruídas a partir de nuvem de pontos com o uso de métrica da qualidade do elemento,” bachelorThesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022. Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/31829>
- [49] V. M. Lira, *Processos de fabricação por impressão 3D: tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3D*. São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher, 2022.
- [50] M. W. M. Cunico, *Impressoras 3D: O novo Meio Produtivo*. Concep3d Pesquisas Científicas.
- [51] M. Centin, N. Pezzotti, and A. Signoroni, “Poisson-driven seamless completion of triangular meshes,” *Computer Aided Geometric Design*, vol. 35–36, pp. 42–55, May 2015, doi: 10.1016/j.cagd.2015.03.006.
- [52] M. M. Sakamoto, J. R. Cardoso, and J. M. Machado, “Uma estrutura de dados dinâmica para geração de malhas de Delaunay bidimensionais e tridimensionais,” *Exacta*, vol. 5, no. 2, pp. 291–300, Aug. 2008, doi: 10.5585/exacta.v5i2.1178.
- [53] S. Andrade and T. Buck, *Marching Cubes Multiresolução*. 1998.
- [54] T. R. Ribeiro, “Reconstrução da superfície da mama a partir de câmera de profundidade,” *Reconstruction of the breast surface from deep camera*, Feb. 2013, Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: <http://rosario.ufma.br:8080/jspui/handle/123456789/3580>
- [55] M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe, *Poisson Surface Reconstruction*. The Eurographics Association, 2006. doi: 10.2312/SGP/SGP06/061-070.
- [56] “ZEISS colin3D.” Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.zeiss.com.sg/metrology/products/software/colin3d.html>
- [57] “Autodesk Meshmixer.” Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://meshmixer.com/>
- [58] P. Cignoni, “MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool,” presented at the Eurographics Italian Chapter Conferenc, Pisa, 2008.
- [59] “UltiMaker Cura,” UltiMaker. Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>
- [60] M. T. F. Monteiro, “A Impressão 3D no Meio Produtivo e o Design: um estudo na fabricação de joias,” Mestrado em Desing, Universidade Do Estado De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- [61] M. M. Morandini and G. H. D. Vechio, “Impressão 3D, Tipos e Possibilidades: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências,” *Revista Interface Tecnológica*, vol. 17, no. 2, Art. no. 2, Dec. 2020, doi: 10.31510/infa.v17i2.866.
- [62] D. L. Bourell, J. J. Beaman, M. C. Leu, and D. W. Rosen, “A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead,” 2009.
- [63] L. Queijo, “Apontamentos de UC Processamento de Materiais em veículo 1,” IPB, 2023.
- [64] R. B. Gomide, “Fabricação de Componentes Injetados em Insertos Produzidos por Estereolitografia,” Mestrado em Engenharia Mecânica, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, 2000.
- [65] J. de O. Diniz, “Impressão em alumina por meio da tecnologia SLS,” 2019.
- [66] A. C. M. Fogaça, “Análise dimensional dos biomodelos por sinterização seletiva a laser e impressão tridimensional após esterilização em autoclave,” 2008,

- Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/576>
- [67] T. M. S. Porto, "Estudo dos Avanços da Tecnologia de Impressão 3D e da sua Aplicação na Construção Civil," Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [68] R. Wishbox, "Tudo Sobre Impressão 3D: O Que é, Como Funciona e Tipos," Wishbox Technologies. Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.wishbox.net.br/blog/impressao-3d/>
- [69] A. A. de S. Pereira, "Uso comercial de impressoras 3D FDM Desktop: um estudo de caso," Dec. 2021, Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.cruzeirosul.edu.br/jspui/handle/123456789/3073>
- [70] F. D. B. Gluck, "Determinação das Propriedades Termomecânicas em Filamentos Reciclados de PLA Para Impressoras 3D," Mestrado Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais, INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL, Caxias do Sul, 2023.
- [71] A. L. Ichi, "Análise da viabilidade da aplicação da tecnologia CAD-CAM por prototipagem rápida na confecção de estrutura metálica da prótese parcial removível comparando-a ao método convencional," text, Universidade de São Paulo, 2010. doi: 10.11606/D.23.2010.tde-22122010-120126.
- [72] L. C. Miraldo, "Impressão 3D em ortopedia - aplicações no presente e futuro," in *Impressão 3D em ortopedia - aplicações no presente e futuro*, Jun. 2019. Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/89834>
- [73] A. B. N. Pereira, "Custo-benefício de diferentes impressoras 3D na Ortodontia," *Cost-benefit of different 3d printers in orthodontics*, Feb. 2020, Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.bdttd.uerj.br:8443/handle/1/18862>
- [74] X. Wei, N. Zou, L. Zeng, and Z. Pei, "PolyJet 3D printing: Predicting color by multilayer perceptron neural network," *Annals of 3D Printed Medicine*, vol. 5, p. 100049, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.stlm.2022.100049.
- [75] "Museu Ibérico da Máscara e do Traje / O Museu." Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: <https://museudamascara.cm-braganca.pt/pages/117>
- [76] "Optotechnik_COMET-L3D.pdf."
- [77] "Ultimaker 3 Extended 3D Printer Dimensions & Drawings | Dimensions.com." Accessed: Feb. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.dimensions.com/element/ultimaker-3-extended-3d-printer>
- [78] "How to print with UltiMaker PLA." Accessed: Feb. 22, 2024. [Online]. Available: <https://support.makerbot.com/s/article/1667337611872>
- [79] "Filamento PVA 750g da UltiMaker." Accessed: Feb. 28, 2024. [Online]. Available: <https://ultimaker.utopica3d.com/ultimaker-PVA-transparente-750g>

ANEXO A – TUTORIAL

Neste anexo será mostrado em imagens o passo a passo de cada etapa da construção digital da primeira máscara, desde sua digitalização e o tratamento de da malha. O objeto utilizado serve apenas como demonstração de como foi realizado cada etapa.

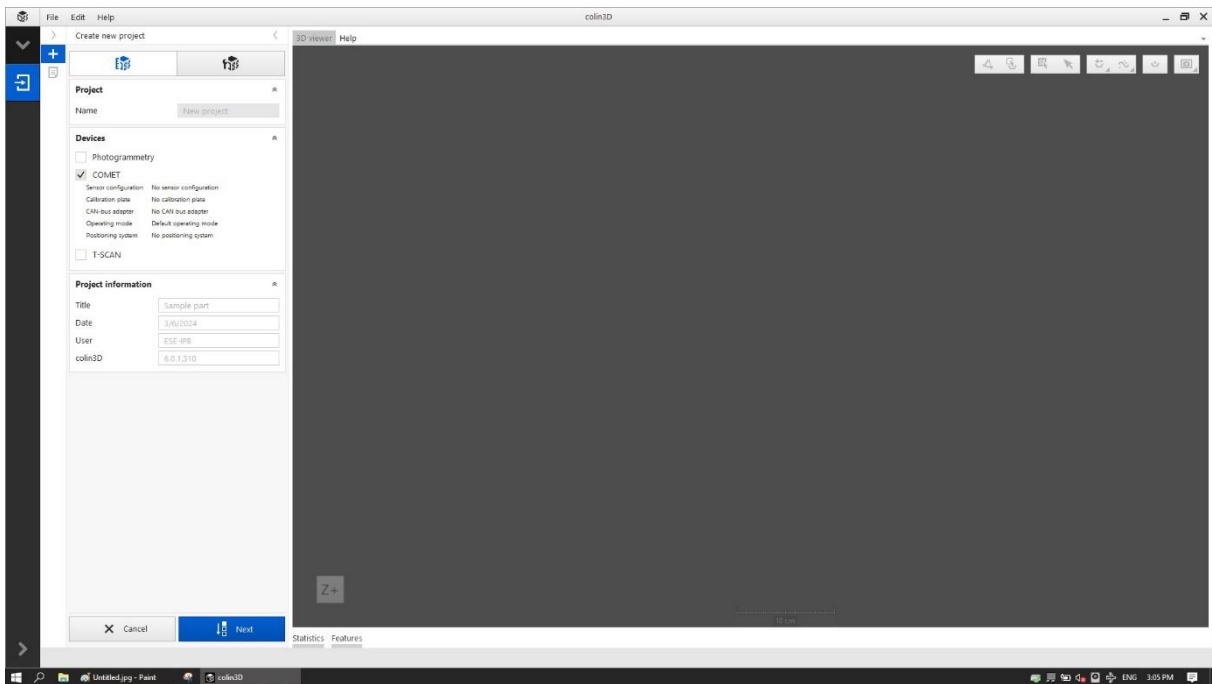


Figura 60 – Configurando o scanner a ser utilizado

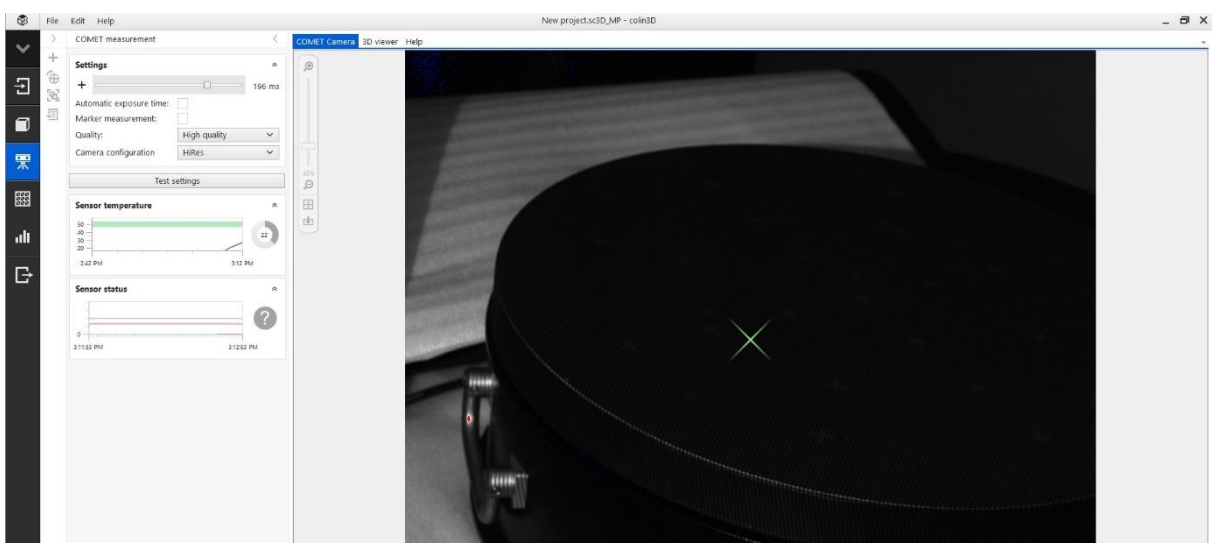


Figura 61 – Definindo parâmetros das varreduras

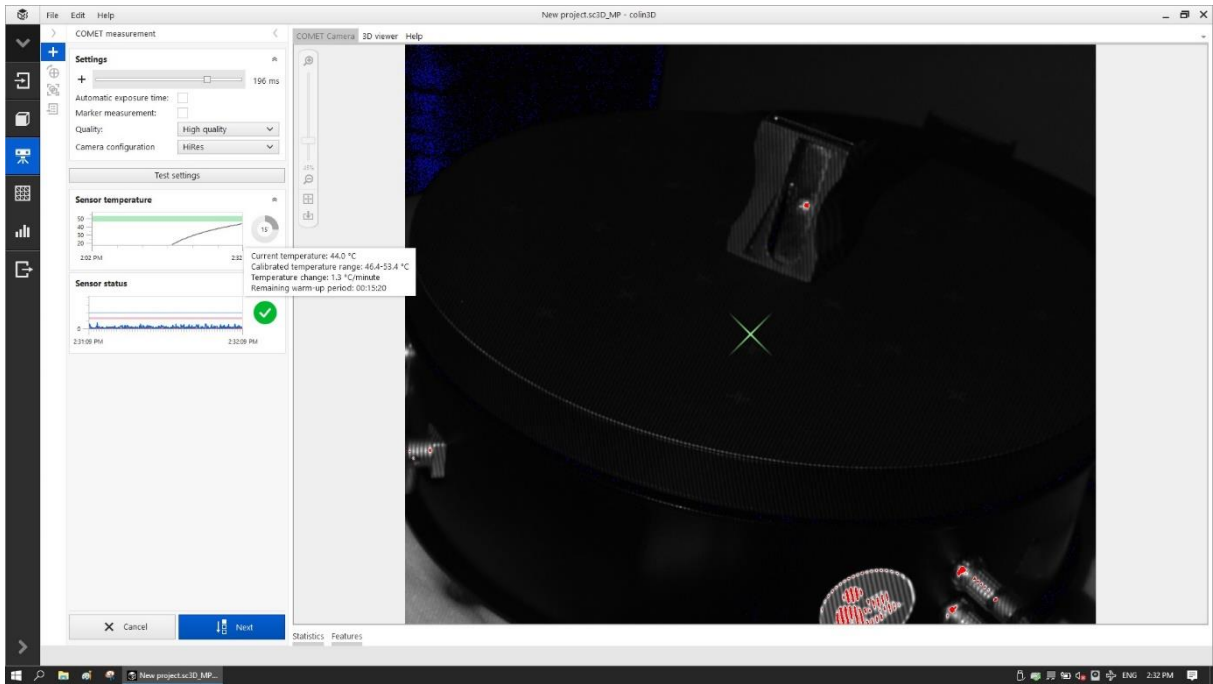


Figura 62 – Conferindo se o scanner está pronto para trabalho

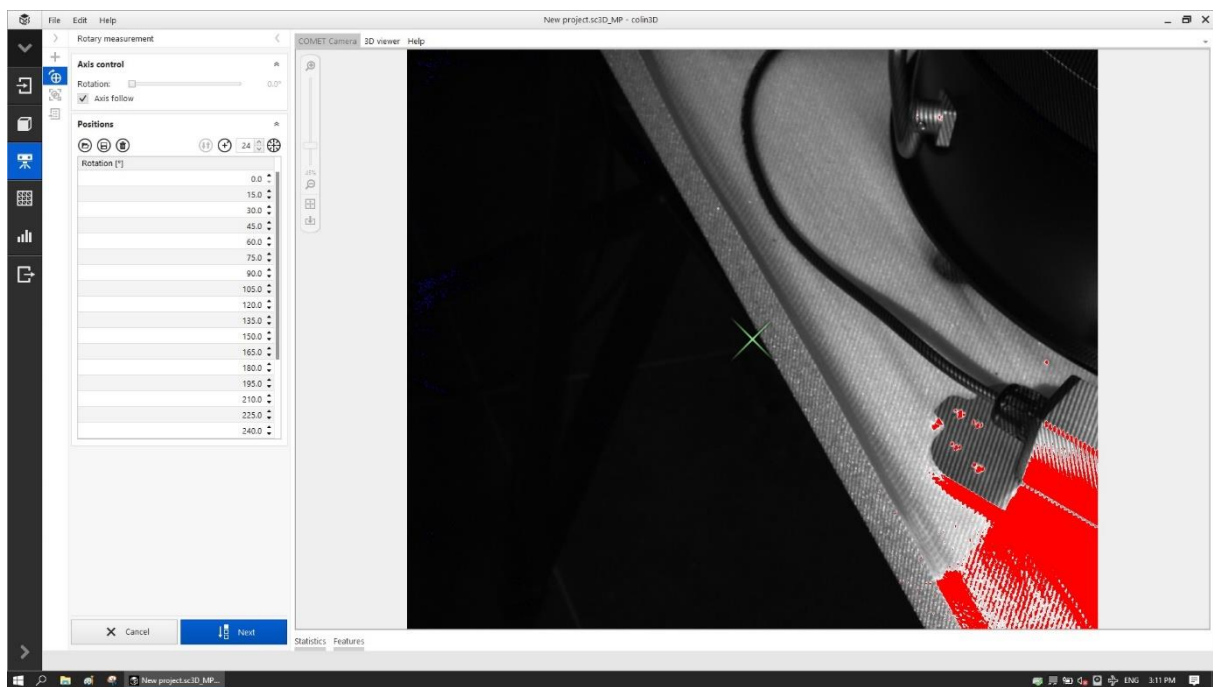


Figura 63 – Definindo o número de varreduras e o deslocamento

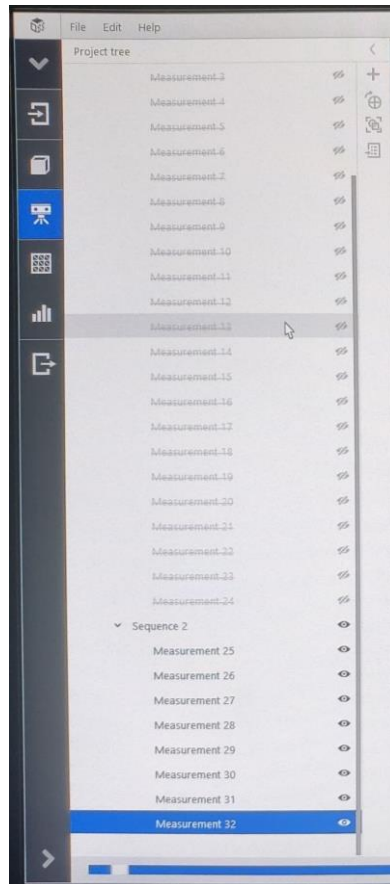


Figura 64 - Varreduras

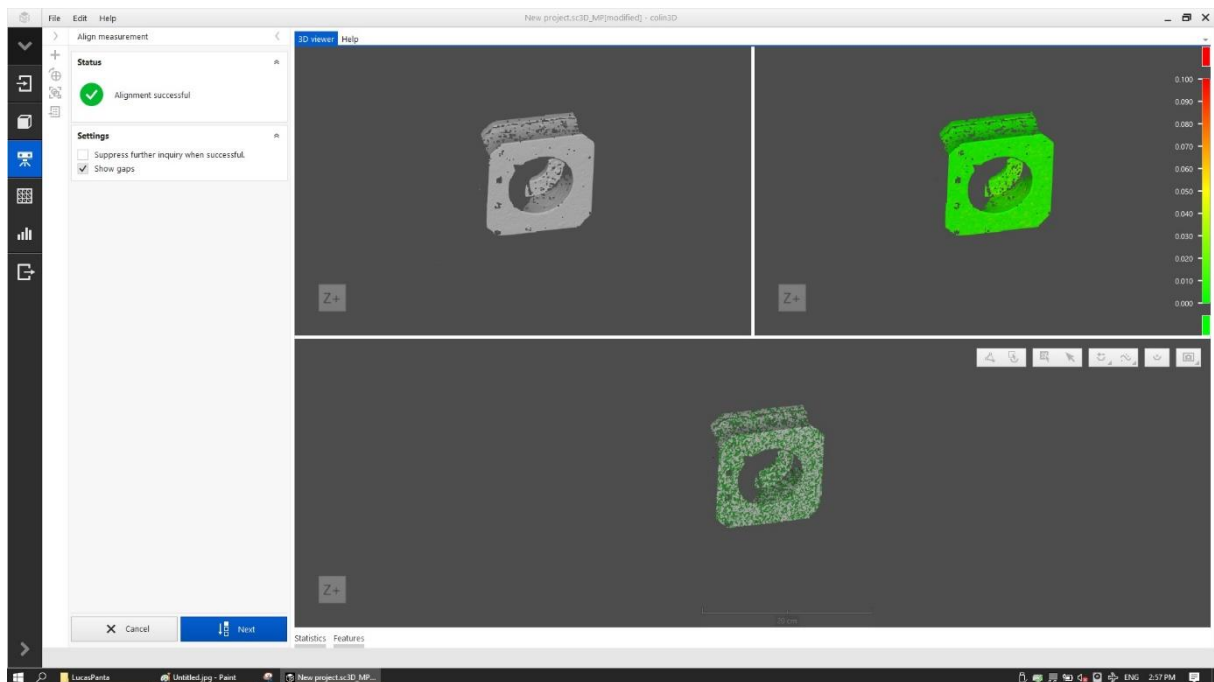


Figura 65 – Pontuando os pontos em comum entre a primeira e segunda varredura

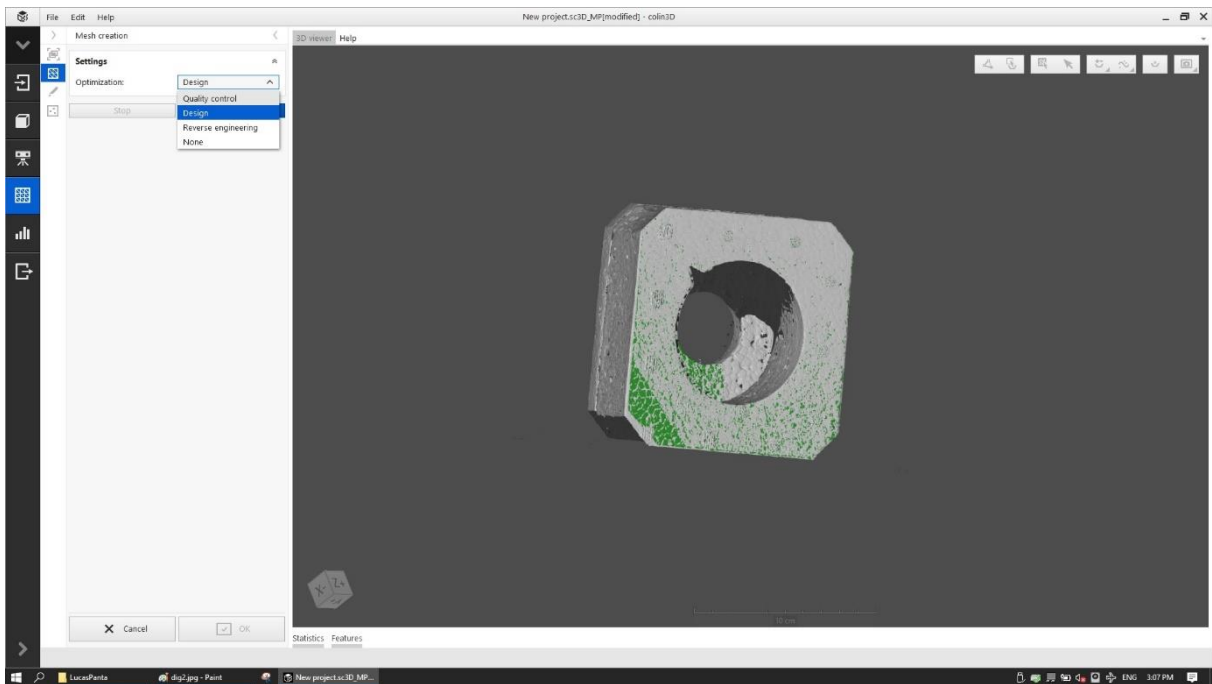


Figura 66 – Gerando a malha com base na sua futura função

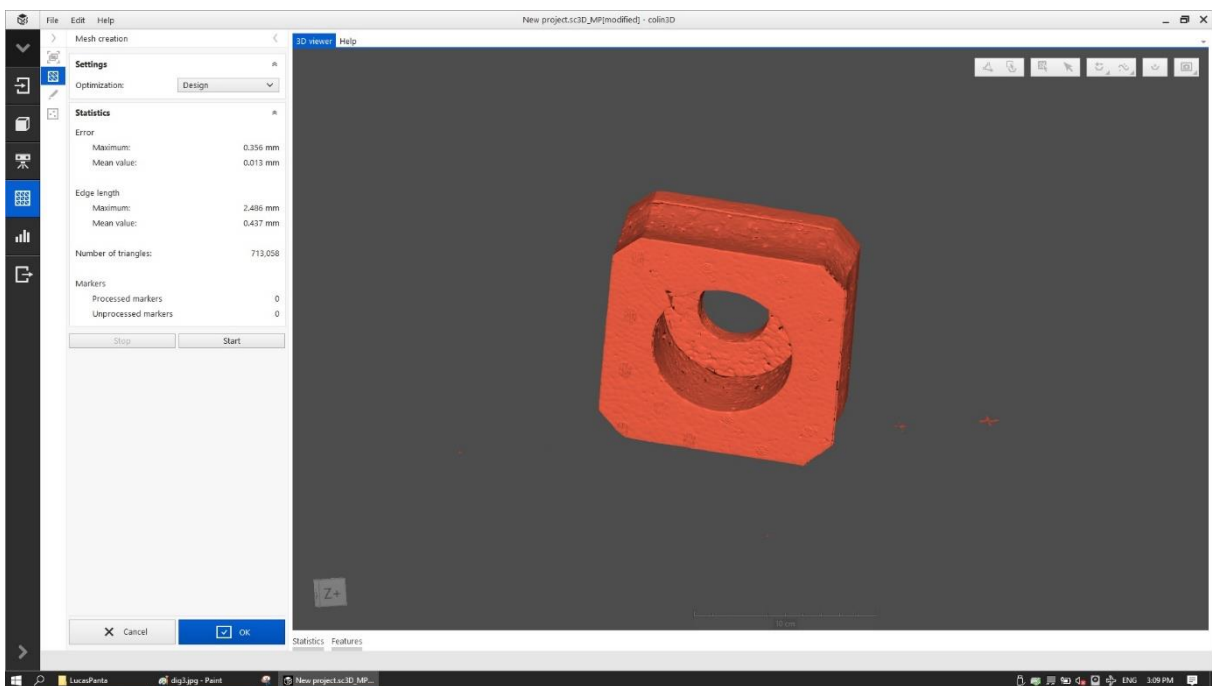


Figura 67 – Relatório sobre a malha criada

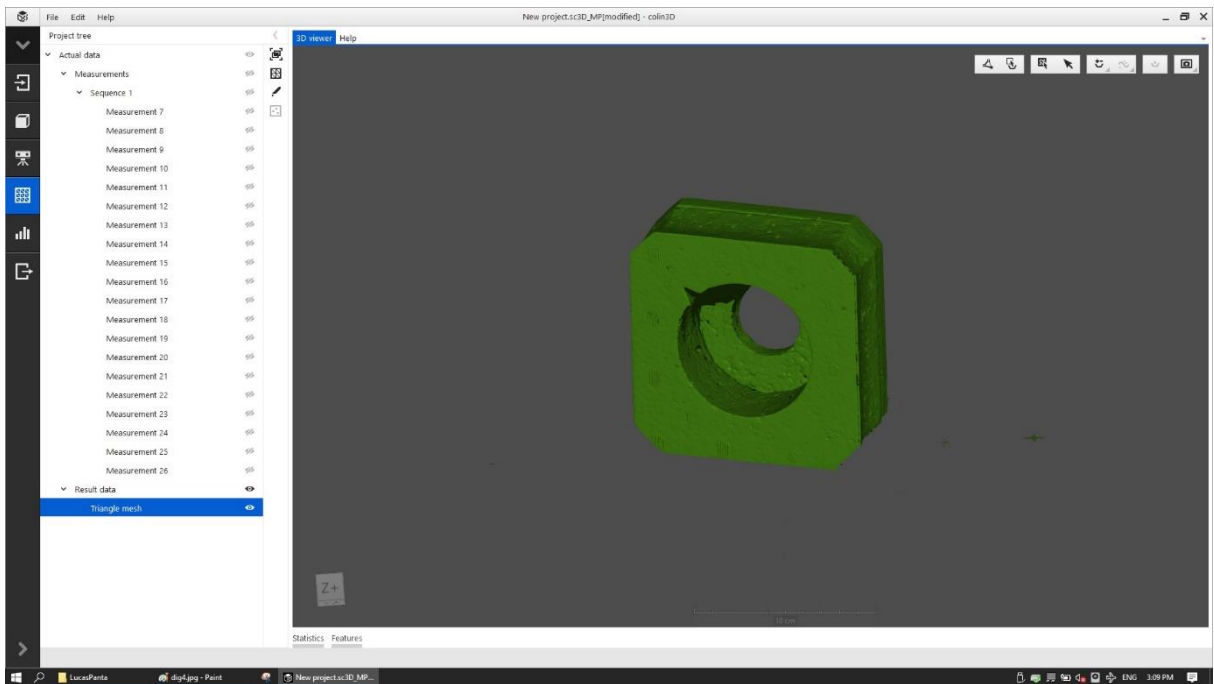


Figura 68 – Conferindo a malha em relação a digitalização

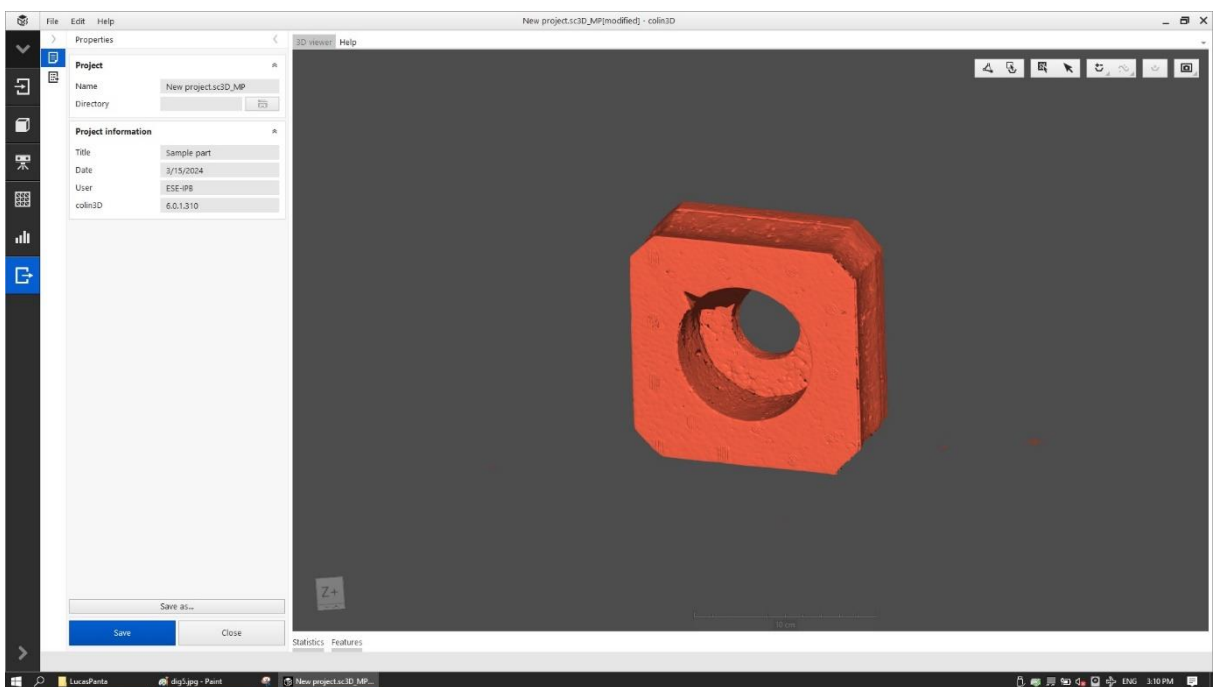


Figura 69 – Salvando a digitalização