

Instituto Politécnico de Bragança
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Utilização da Digitalização 3D na Elaboração de Maquete Tátil

Kauam Yago Piacentini

Profs.: João da Rocha e Silva

Jorge Henrique de Carvalho Santos

Janaina Fracaro de Souza Goncalves

Bragança

Junho 2023

Instituto Politécnico de Bragança
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Utilização da Digitalização 3D na Elaboração de Maquete Tátil

Kauam Yago Piacentini

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.

Prof.s.: João da Rocha e Silva

Jorge Henrique de Carvalho Santos

Janaina Fracaro de Souza Goncalves

Bragança

Junho 2023

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a todos meus familiares, amigos e namorada, que apoiaram minha jornada até aqui. Um agradecimento especial a minha mãe Jovana Dalagua e meu pai Edmar Piacentini Junior. Gostaria também de agradecer pelas amizades que criei durante esta etapa, em principal, á Big House, que foram como uma família para mim. Sem eles esses últimos meses teriam se tornado um fardo, entretanto, a presença destas pessoas fizera essa experiência marcante e maravilhosa.

Gostaria também de agradecer aos meus professores orientadores João Rocha, Jorge Santos e Janaína Goncalves, pelo acolhimento e pelo papel fundamental exercido nesta jornada acadêmica. Também agradeço ao FabLab, por proporcionar e tornar possível o desenvolvimento do projeto. Além deles, o Instituto Politécnico de Bragança e a Câmara municipal de Bragança foram fundamentais e sou grato pela confiança.

Agradeço minha universidade de origem, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em especial, o campus Londrina. Toda minha jornada acadêmica foi extremamente gratificante e levarei os ensinamentos adquiridos para toda uma vida. Por fim, agradeço a MECA Engenharia, que fizeram parte fundamental do meu crescimento dentro da universidade e levo no coração os momentos que passei com eles.

Resumo

Este trabalho de mestrado foi desenvolvido em parceria com o projeto "Cultura para Todos Bragança", um trabalho de prestação de serviços do Instituto Politécnico de Bragança para a Câmara Municipal de Bragança através de concurso público. O objetivo principal foi criar uma maquete tátil para pessoas cegas, visando proporcionar acessibilidade à cultura para indivíduos cegos ou com deficiência visual.

A maquete desenvolvida apresentou boas características físicas e foi capaz de transmitir noções de dimensões e detalhes ao tato. O objeto escolhido para representação foi a locomotiva CN1, localizada no Museu Nacional Ferroviário de Bragança. Um importante item para a história ferroviária local.

Este estudo contribui para a promoção da inclusão e acessibilidade, permitindo que pessoas tenham acesso a informações culturais através do tato e experiência tátil. A maquete desenvolvida demonstrou-se eficiente na preservação das peculiaridades e escalas do comboio, além de apresentar partes características do objeto.

Para realizar o projeto, utilizou-se o equipamento Faro Focus S150, em conjunto com o *software* SCENE para o tratamento das digitalizações e da nuvem de pontos. Além disso, *softwares* como *Meshmixer* e *SolidWorks* tiveram um papel importante no resultado final da maquete.

A metodologia utilizada ainda carece de novas experimentações e possui possibilidade de incremento. Devido as características do projeto, seu desenvolvimento deu-se com a utilização de *softwares* gratuitos ou que possuíssem licenças estudantis, com exceção do Faro SCENE.

Palavras-chave: Faro FOCUS S150, digitalização 3D, maquete tátil, impressão 3d.

Abstract

This master's thesis was developed in partnership with the "Culture for All Bragança" project, a service provided by the Polytechnic Institute of Bragança to the Municipal Council of Bragança through a public tender. The main objective was to create a tactile model for visually impaired individuals, aiming to provide accessibility to culture for the blind or visually impaired.

The developed model exhibited good physical characteristics and was able to convey dimensions and features through touch. The chosen object for representation was the CN1 locomotive, located in the National Railway Museum of Bragança, an important item for local railway history.

This study contributes to the promotion of inclusion and accessibility, enabling people to access cultural information through touch and tactile experience. The developed model proved to be efficient in preserving the dimensions and scales of the train, as well as presenting characteristic parts of the object.

To carry out the project, the Faro Focus S150 equipment was used, along with the SCENE software for processing the *scanners* and point cloud. Additionally, software such as *Meshmixer* and *SolidWorks* played an important role in the final result of the model.

The methodology used still requires further experimentation and has potential for improvement. Due to the project's characteristics, its development was carried out using free software or software with student licenses, with the exception of Faro SCENE.

Palavras-chave: Faro FOCUS S150, 3D scanning, tactile model, 3D printing.

Sumário

1. Introdução.....	1
1.1. Contexto e motivação.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organização do trabalho.....	2
2. Estado da arte	4
2.1. Aplicações	4
2.1.1. Acessibilidade.....	5
2.2. Métodos e tipos de <i>scanners</i>	7
2.2.1. Fotogrametria.....	10
2.2.2. Laser	14
2.3. Nuvem de pontos.....	19
2.4. Malhas	21
2.5. Impressão 3D.....	22
3. Materiais e métodos.....	30
3.1. Digitalização.....	31
3.2. Processamento e registro	35
3.3. Nuvem de pontos.....	36
3.4. Malha stl.....	39
3.5. Fatiamento e impressão	42
4. Resultados e análise.....	46
4.1. Registro	46
4.2. Nuvem de pontos e malha	50
4.2.1. Fase 1	50
4.2.2. Fase 2.....	53
4.2.3. Fase 3.....	55

4.2.4. Impressão.....	56
4.2.5. Custos	62
5. Conclusão	64
6. Referências	66
Anexo I – Relatório de registros do <i>software</i> SCENE	74

Lista de Figuras

Figura 1. a. Digitalização a laser [22], b. Fotogrametria [23], c. Luz estruturada [24]....	8
Figura 2. <i>Scanner</i> com contato [25].	9
Figura 3. Fotogrametria a curta distância [30].	11
Figura 4. Fotogrametria Aérea [23].	12
Figura 5. Fotogrametria Terrestre [33].	13
Figura 6. Fotogrametria em movimento [35].	14
Figura 7. Alcance do Faro Focus S150 [36].	15
Figura 8. LiDAR <i>laser scanner</i> [39].	16
Figura 9. <i>Scanner</i> laser terrestre [40].	17
Figura 10. <i>Laser Scanner</i> de localização e mapeamento simultâneo [42].	18
Figura 11. <i>Mobile laser scanner</i> [44].	19
Figura 12. Compreensão de tipos de nuvem de pontos 3D. [45]	20
Figura 13. Impressão por fusão e deposição do material [54].	23
Figura 14. Esteriolitografia [56].	25
Figura 15. Sintetização seletiva a laser [57].	26
Figura 16. Sinterização a <i>laser</i> de metal direto [58].	27
Figura 17. Fusão por feixe de elétrons [59].	28
Figura 18. Polyjet [60].	29
Figura 19. Fluxograma representativo da metodologia do projeto.	30
Figura 20. Faro Focus S150.	31
Figura 21. Locomotiva e <i>Scanner</i> utilizados no projeto.	33
Figura 22. Pontos de digitalização da locomotiva.	34
Figura 23. Registro de digitalização no <i>software</i> SCENE [61].	35
Figura 24. Nuvem de pontos criada pelo SCENE.	37
Figura 25. Objeto de estudo na nuvem de pontos criada pelo SCENE.	37
Figura 26. Limpeza de pontos externos na nuvem de pontos.	38
Figura 27. Exemplo de malha triangular (stl).	40
Figura 28. Aba de criação de malha pelo <i>software</i> SCENE [61].	41
Figura 29. a. Malha original, b. Malha com 50% de redução.	42
Figura 30. Fatiamento do comboio pelo <i>software</i> Cura.	43

Figura 31. a. Impressora <i>BigBuilder</i> , b. Impressora <i>Anycubi Mega</i> , c. Filamento <i>Devil Design</i>	44
Figura 32. <i>Ultimaker 3 Extended</i>	45
Figura 33. Filamento <i>Ultimaker Material PLA</i>	45
Figura 34. Relatório de erro máximo pelo SCENE (8,3 mm).	46
Figura 35. Relatório de erro médio pelo SCENE (2,6 mm).	47
Figura 36. Mínima sobreposição pelo SCENE (19,6%).....	47
Figura 37. Relatório geral gerado pelo SCENE.	48
Figura 38. Erros apontados pelo <i>software meshmixer</i>	51
Figura 39. Malha em STL do lado direito do Comboio em sua primeira versão.	51
Figura 40. Ruído na nuvem de pontos.	52
Figura 41. Malha após a utilização do " <i>Make Solid</i> " no <i>Meshmixer</i>	53
Figura 42. Nuvem de pontos limpa.	54
Figura 43. Visualização da malha intermediária no <i>Meshmixer</i>	54
Figura 44. Modelagem externa de elementos da locomotiva.	55
Figura 45. Locomotiva CN1 finalizada.	56
Figura 46. Primeira impressão de teste da locomotiva.	57
Figura 47. Segunda impressão de teste da locomotiva.	58
Figura 48. Impressão em partes do comboio.	59
Figura 49. Impressão completa do comboio com medidas de comprimento.	60
Figura 50. Impressão completa do comboio com medidas de largura.	60
Figura 51. Lanternas impressas separadamente.	61

Lista de Tabelas

Tabela 1. Relatório específico de erros obtida pelo SCENE.....	49
Tabela 2. Relação de peça por fabrico.....	62

1. Introdução

1.1. Contexto e motivação

A crescente e rápida adaptação das pessoas as novas tecnologias têm aberto inúmeras portas para que se possa explorar meios novos para a realização de uma tarefa antiga, ou ainda possibilidade de explorar ideias antes pouco cogitadas. A gama de novas tecnologias que surgem diariamente permitem com que novos mecanismos sejam utilizados em funções não triviais, mas que ainda conseguem cumprir bem seus objetivos. Não há momento melhor na história em que houvesse tantas formas de permitir com que pessoas portadoras de deficiências físicas fossem incluídas de forma mais eficiente, e que a distância que há entre estas pessoas e sociedade, diminua cada vez mais.

A Agência Europeia para o Desenvolvimento da Educação Especial, em parceria com grandes instituições, a exemplo da UNESCO, realizam um estudo implementado meios tecnológicos de comunicação para auxiliar na aprendizagem de alunos com algum tipo de deficiência. O projeto abrange todos os tipos de barreira, físicas e mentais, buscando proporcionar uma melhor qualidade de vida a estes alunos dentro de sala de aula. Isto mostra a relevância deste assunto e que grandes organizações têm trabalhado em conjunto para buscar novas formas de inovar no quesito acessibilidade [1].

Olhando de maneira mais regional, Portugal, por meio do projeto NORTE 2020, fomentou este tema ao incluir “Inclusão Social e Pobreza” como um dos temas de seus eixos, abrindo espaço para o desenvolvimento do presente projeto. Em parceria com o Instituto Politécnico de Bragança, a Câmara Municipal de Bragança passa a contribuir com essa causa por meio do projeto “Cultura para Todos Bragança”, cujo objetivo é proporcionar maior acessibilidade, por meio de maquetes 3D de edifícios e veículos históricos, a pessoas cegas [2]–[4].

A totalidade do projeto é contabilizado por 5 edifícios localizado na cidade de Bragança, 1 máscara localizada no Museu da máscara e 1 Locomotiva do Museu Nacional Ferroviário de Bragança. O objetivo individual é o desenvolvimento de uma estratégia e

metodologia que permita a criação de modelos tridimensionais passíveis de impressão por uma impressora 3D do tipo *Fused Deposition Modeling* (FDM). Para tal, contam-se com um *scan* 3D TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) que servirá como fonte primária de informações dos objetos, contendo grande densidade de informações em formato tridimensional e permitindo uma varredura de velocidade relativamente elevada.

1.2. Objetivos

Os métodos utilizados para o desenvolvimento dos edifícios, da locomotiva, e da máscara, possuem suas próprias peculiaridades. Eles compartilham de um mesmo princípio, porém seus caminhos se divergem em algum ponto da criação. A exemplo dos edifícios, a estratégia é a utilização da nuvem de pontos para a modelação fiel do modelo digitalizado [5]. Em termos da locomotiva, devido a sua complexidade de partes metálicas, busca-se a criação de uma malha a partir da nuvem de pontos. É necessário que contenha todas as características principais e transmita a percepção de dimensões do objeto como todo.

Com o objetivo de imprimir uma maquete da Locomotiva CN1, espera-se:

- Encontrar *softwares* que permitam o manuseio do arquivo
- Garantir um bom entendimento ao tato
- Preservar características físicas
- Promover acessibilidade

1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho será apresentado em 4 etapas, sendo estas: estado da arte, materiais e métodos, resultados e análise, considerações finais e trabalhos futuros.

Busca-se no estado da arte, garantir com que os principais itens teóricos sejam revisados para que haja um melhor entendimento e compreensão do trabalho. Para tal,

será abordado desde a utilização de *scanners em diversas áreas*, até a impressão 3D, passando também pelos métodos de digitalizações e as formas de se trabalhar com os arquivos.

Busca-se, em materiais e métodos, apresentar os caminhos tomados e decisões feitas ao longo do processo. A utilização de *softwares* e algumas técnicas também estão disposta nesta etapa.

Complementando, em resultados e análise, são apresentados os resultados parciais e finais. Devido a estrutura de andamento do projeto, buscou-se nesta seção, mostrar a curva de evolução obtida, juntamente com discussões pertinentes as respectivas etapas.

Por fim, tratando-se de considerações finais e trabalhos futuros, é apresentada e discutida se os objetivos e expectativas iniciais foram atingidos. Discute-se também em como dar continuidade para aperfeiçoar os métodos aprendidos e otimizar o processo como um todo.

2. Estado da arte

2.1. Aplicações

O princípio de desenvolvimento do projeto é com a utilização de um equipamento de *scanner 3D a laser*. Este possui diversas aplicações no mercado e tem crescido bastante nos últimos anos. Devido a maneira com que as informações são registradas por estes dispositivos, através da nuvem de pontos, distâncias e características construtivas são muito bem representadas. Estes dados podem ser destinados à registro em banco de dados para acompanhamento de mudança físicas, reconstrução para fins de preservação, estudos estruturais, documentação tridimensional, engenharia reversa e por diante.

Falando um pouco melhor sobre as aplicabilidades destes métodos, o registro de dados para obter medidas muito próximas a realidade é muito utilizada em diversos campos. Pode-se, por exemplo, mensurar informações espaciais de uma fábrica para estudar a viabilidade de alocar um novo equipamento na linha de produção. Para alguns casos a medição manual destas medidas se torna um trabalho complicado, o que torna a digitalização uma boa ferramenta para diversos momentos. Além de ser um documento com relevâncias parecidas as da planta baixa da construção [6], [7].

Indo mais além, se tratando de indústria 4.0, uma nova forma de se analisar e realizar estudos sobre a linha de produção e outros aspectos de uma instalação de fabrico têm surgido. Com a utilização de ferramentas que permitem uma virtualização do espaço, através de digitalizações, modelagens e entre outros, esta técnica busca uma maneira de simular situações diversas para que melhores otimizações sejam realizadas em uma linha de produção [8]–[10].

Em requisitos de preservação, os *scanners* podem ter mais de uma finalidade. Alguns monumentos e artefatos de grande valor histórico são constantemente digitalizados, visando principalmente um registro digital ou auxílio em sua reconstrução, por meio de modelagem computacional. Note que também há a possibilidade de realização de mais de uma digitalização, com espaçamento de tempo, para que se possa

analisar e mensurar o desgaste superficial. Quando se trata de artefatos históricos a finalidade é diversa, mas o processo inicial tende a ser o mesmo [11].

Notre Dame, em Paris, passou por um preceito de estudos com a utilização de *scan* 3D que teve início em 2010 e foi crucial para a geração das reconstruções atuais após seu incêndio. Em abril de 2019 a igreja pegou fogo e grande parte destruída. Inúmeras entidades têm se esforçado desde então para reconstituir esta importante construção histórica. Empresas como *Autodesk* passaram a auxiliar no que se tratava de reconstrução em BIM a partir das digitalizações já previamente feitas [12].

Algumas outras técnicas de modelagem através dos dados obtidos do *scan* são muito utilizados no campo da engenharia reversa e reconstrução de peças antigas ou mesmo de estruturas humanas. A metodologia da técnica é similar as outras, sendo esta, a digitalização de uma peça ou parte do corpo desconhecido e a utilização dos dados tridimensionais para obter medidas geométricas precisas e com possibilidade de recriar o objeto por conta própria, a fim de otimizar ou estudar. Alguns mecânicos automobilísticos utilizam esta técnica para recriar peças difíceis de se encontrar no mercado ou que possuem valor monetário muito elevado [13].

2.1.1. Acessibilidade

No que diz respeito à acessibilidade, usualmente vêm à mente pessoas com necessidades especiais, sendo estas físicas ou mentais. Entretanto, como bem explica (Garcia, Mineiro, & Neves, 2017) em seu “Guia de Boas Práticas a Acessibilidade”, pessoas de diferentes nacionalidades, de maior idade, condições de saúde debilitada ou ainda com outros contextos econômicos, culturais e éticos, possuem necessidades específicas que afetam a experiência em questão [14]. Indo um pouco mais além e mostrando que acessibilidade pode ser levada a qualquer pessoa, como relata (Fischer, p. 244), uma simples mensagem pode não ser acessível se não estiver adequada para o entendimento de todas as pessoas [15].

Se tratando especificamente de pessoas com deficiência visual, a utilização de novas tecnologias para entregar acessibilidades a este grupo não é uma inovação, mas vem ano a ano apresentando grandes avanços. Existem inúmeros trabalhos que possuem boa similaridade com o objetivo desta pesquisa. Projetos como o “*T3 Tactile Tablet*”, desenvolvido pela *Touch Graphics INC*, é um excelente exemplo da utilização de novos mecanismos para apresentar e levar cultura para todos. Outros exemplos, que possuem finalidades semelhantes, são o “*hi-Storia*”, como pode ser visto em Giulianova TE, Itália, e o trabalho realizado pela empresa “*3D Photo Works*”.

O projeto *T3 Tactil Tablet* é uma mesa digital que conta com uma câmera voltada para leitura de QR Codes. Esta mesa é um suporte para folhas especiais, desenvolvida juntamente ao equipamento, que possuem informações táteis e audíveis sobre algum determinado assunto. O usuário pode optar por utilizar o reconhecimento de sua preferência, tátil ou audível. A partir do momento em que o dispositivo reconhece o QR Code da folha, e busca em sua biblioteca o áudio descritivo referente ao contexto, o leitor pode acionar a descrição do conteúdo quando preferir. Desta maneira, proporcionam uma experiência com maior grau de liberdade e com capacidade de transmitir conhecimentos sobre arte, cultura, geografia, história e entre outros, de forma mais completa e livre [16].

Se tratando do projeto *hi-Storia*, ele tem por finalidade levar cultura de forma mais acessível a deficientes visuais, através de maquetes feiras de forma artesanal e criação de áudios descritivos que acompanham a experiência do deficiente visual. Seu desenvolvimento ainda conta com o auxílio de alunos, o que também leva ao desenvolvimento de habilidades específicas para seus colaboradores, assim como a aprendizagem de novas tecnologias e *soft skills*. Sua metodologia é bem definida, tornando o projeto mais colaborativo e assim abrangendo um maior número de grupos sociais beneficiados [17].

Quanto ao trabalho realizado pela *3D Photo Works*, suas soluções buscam entregar interação de cegos em museus, de forma a desenvolverem imagens em alto relevo dos quadros e itens dispostos no espaço. Desta forma, cria-se a possibilidade e abre portas

para a apreciação cultural a um novo público. Seus projetos já fazem parte de vários museus pelo mundo, como *Virginia Museum of Fine Arts*, *Panhandle-Plains Historical Museum*, *Newseum*, *Sacramento History Museum*, e por diante [18].

Alguns trabalhos acadêmicos ainda buscam melhorar a experiência e transmissão de informações para cegos, podendo ser tomados como base para implementação. A exemplo do trabalho realizado por Rossetti et al. (2018), onde apresentam a construção de um modelo 3D da “*Piazza dei Miracoli*”, Itália. O estudo ainda relata que há uma baixa quantidade de material acadêmico sobre o tema, portanto, buscaram estabelecer alguns testes de reconhecimento e localização com a impressão 3D do monumento escolhido. Para atingir tal objetivos, a maquete conta também com audiodescrições que são ativadas por botões estrategicamente posicionados, de forma a serem acionadas pelo utilizador no momento que preferirem. Ao final do projeto, um grupo de amostragem foi adotado, e eles receberam a tarefa de localizar e identificar alguns itens da maquete. Seus objetivos eram determinar algumas características, a exemplo de entradas e saídas, com o tempo sendo cronometrado. Desta forma, tem-se um parâmetro de velocidade de reconhecimento, e entendimento da maquete, em relação aos itens expostos [19].

Existem ainda estudos acadêmicos que buscam o desenvolvimento de uma melhor comunicação por meio de símbolos e fontes ortográficas. O trabalho realizado por De Bem e Trevisan Pupo (2019), apresenta alguns padrões de fabricação para símbolos de mapas táteis, de forma a facilitar e melhorar a legibilidade dos mapas. Estes são fundamentais para proporcionar maior autonomia a cegos, e ainda fornecer um melhor entendimento do espaço urbano em que o cidadão se encontra [20].

2.2.Métodos e tipos de *scanners*

Observa-se, nos últimos anos, uma forte tendência de mercado quanto a utilização de *scanners 3D*. Esta tecnologia permite uma rápida captura de informações em formato tridimensional, permitindo alta aplicabilidade. Os primeiros registros da utilização efetiva

da digitalização 3D são voltados para preservação de artefatos históricos. Devido à alta fiabilidade e possibilidade de registro rápido de forma não invasiva, na maioria dos casos, essa metodologia tornou-se muito agradável para aqueles que buscavam criar um documento digital que contivesse precisão nas dimensões, formas, cores e curvas, do objeto.

(Boehler & Marbs, 2002), discutem uma definição que permita distinguir um *scanner 3D* de outras técnicas que também buscam gerar um sistema de coordenadas tridimensional computadorizado. Concluindo que o método, da digitalização 3D, contempla a captura das coordenadas tridimensionais de forma automática, sistemática, com alta taxa e gerando um resultado quase, quando não, em tempo real [21].

Existem ainda muitas outras áreas das quais se beneficiam desta metodologia, e as maneiras de se atingir um resultado satisfatório são fortemente ligadas a forma de aquisição de dados a ser utilizado. Atualmente existem diversas alternativas para a captura digital de um objeto de estudo, podendo-se distinguir essas em 2 grupos, “contato” e “sem contato”. Sendo este ainda é mais utilizado e contemplando mais 3 metodologias, “fotogrametria”, “laser” e “luz estruturada” (Figura 1).

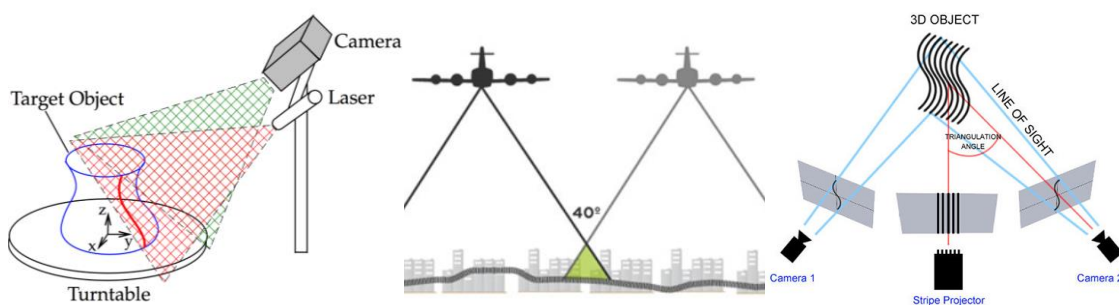


Figura 1. a. Digitalização a laser [22], b. Fotogrametria [23], c. Luz estruturada [24].

Digitalizações por contato (Figura 2) são pouco utilizados pois requerem um equipamento robusto, lento e com potencial de danificar o objeto, dependendo do caso. O equipamento utilizado nesta metodologia funciona de forma similar a uma impressora

3D, fazendo-se necessário uma estrutura capaz de deslocamento nos 3 eixos e um braço que force o contato com o objeto, para que consiga mensurar sua dimensão e formato. Desta maneira, tem-se então, a digitalização sem contato como a mais encontrada no mercado e a qual constantemente recebe novas tecnologias para aprimorar seu desempenho, qualidade e precisão.



Figura 2. *Scanner com contato* [25].

A técnica de luz estruturada (Figura 1c) consiste na utilização de uma malha de luz emitida por um projetor, e devido a deformação das linhas, o *software* consegue determinar a forma da superfície. Geralmente esta metodologia é utilizada em pequenos objetos, portanto não sendo adequada ao projeto.

Independentemente da forma ou metodologia para a digitalização, o resultado esperado é o mesmo para todos, a geração de uma nuvem de pontos densa e bem definida, capaz de determinar com precisão as dimensões do objeto de estudo e permitir análises futuras. O conceito de Nuvem de Pontos (*Point Cloud*) será discutido mais a frente, entretanto é importante estabelecer esse objetivo inicial para conseguir observar algumas diferenças entre as opções de *scanners* que serão apresentadas.

2.2.1. Fotogrametria

Esta técnica tem como principal característica a junção de diversas fotos, com diversos ângulos, retiradas do objeto como material primário na geração do arquivo digital tridimensional. Amplamente utilizada no mapeamento topográfico, uma vez que câmeras de alta resolução conseguem atingir qualidade e precisão de detalhes mesmo que tiradas a longas distâncias. A utilização de drones torna essa variante da fotogrametria bem atrativa para essa variante que conhecida por fotogrametria aérea.

A fotogrametria tem sido definida pela Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto como a arte, ciência e tecnologia de obter informações confiáveis sobre objetos físicos e o ambiente por meio de processos de registro, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos registrados [26, p. 1].

Ainda existem outras maneiras de se obter uma digitalização por meio da fotogrametria e o nome da técnica sempre é vinculado com a forma de se obter as imagens. Alguns exemplos de fotogrametria são: curta distância, aérea, terrestre e em movimento. Dependendo do tipo de trabalho, a minuciosidade e padronização da forma de captura tem de ser bem definidas para que se atinja boa qualidade. É importante lembrar que ainda existem mais métodos de utilização e aplicações para a fotogrametria, entretanto, estes serão os explicados a seguir para que se possa perceber suas peculiaridades e compreender melhor seu funcionamento.

Se tratando da fotogrametria a curta distância (Figura 3), ou ainda “*close range*”, possui como principal característica a capacidade de capturar bem os detalhes do objeto. Este método fica restrito a pequenos objetos, uma vez que a distância entre a câmera e o objeto é pequena. O processamento das imagens pode apresentar um custo computacional elevado, uma vez que é preciso uma grande quantidade de fotos em diferentes ângulos e posições, para uma reconstrução fiel. Com a utilização de câmeras com melhor resolução, o processamento das imagens tende levar mais tempo. Outro ponto a se destacar é que

esse método necessita de um controle de luminosidade adequado, para que as imagens não possuam ruídos devido a sombras criadas sobre o objeto [27]–[29].

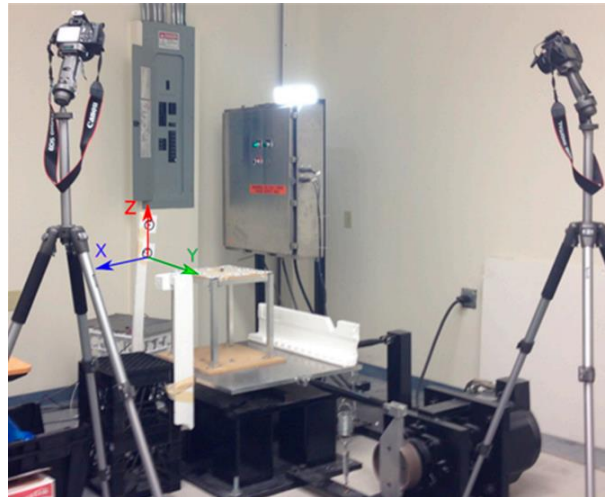


Figura 3. Fotogrametria a curta distância [30].

A fotogrametria aérea (Figura 4) apresenta grande aplicabilidade no mapeamento de terrenos e território. Com a utilização de drones, por exemplo, pode-se realizar em um curto período o mapeamento de toda uma região. Utilizando câmeras com bom alcance e resolução, pode-se obter uma nuvem de pontos com grande exatidão e servir de base para estudos, projetos e entre outros. Estes métodos também contêm algumas dificuldades, assim como a dependência das condições meteorológicas e restrições de voos. Na maioria dos casos, a utilização de veículos não tripulados requer autorização para poder sobrevoar a região, que nem sempre é simples de se obter [29], [31].

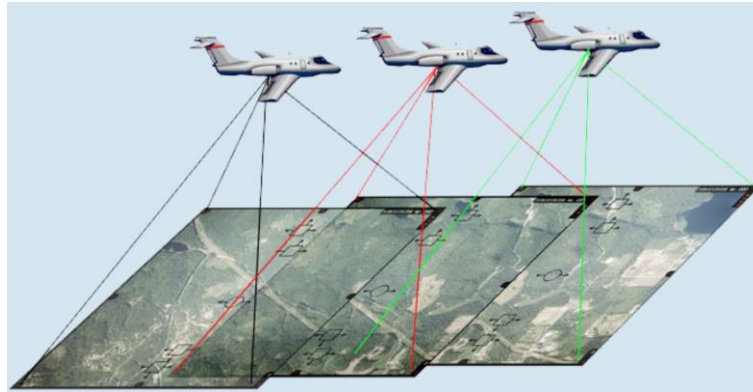


Figura 4. Fotogrametria Aérea [23].

Em termos de fotogrametria terrestre (Figura 5), sua aplicação é mais ampla e genérica. Este método geralmente conta com a utilização de uma câmera de alta resolução e equipamentos para deixá-la estável o chão, geralmente um tripé. Desta forma, pode-se utilizar essa metodologia para se trabalhar com áreas e objetos de pequeno, médio e grandes dimensões, contanto que a câmera consiga boa capturas. Similar a fotogrametria aérea, a terrestre também depende das condições climáticas no local e é fortemente afetada pela iluminação [29], [32].



Figura 5. Fotogrametria Terrestre [33].

A fotogrametria em movimento (Figura 6) tem como característica a captura contínua de imagens enquanto algum veículo se desloca ininterruptamente. Desta maneira, pode-se criar uma varredura com rápida velocidade para ocasiões que o tempo é um limitador. Devido ao grande número de fotos tiradas, este método tende a fornecer uma nuvem de pontos mais densa e completa. Entretanto, isto afeta diretamente a capacidade de processamento computacional. Ainda se pode utilizar este princípio de captura para veículos terrestres, aéreos ou aquáticos [29], [34].

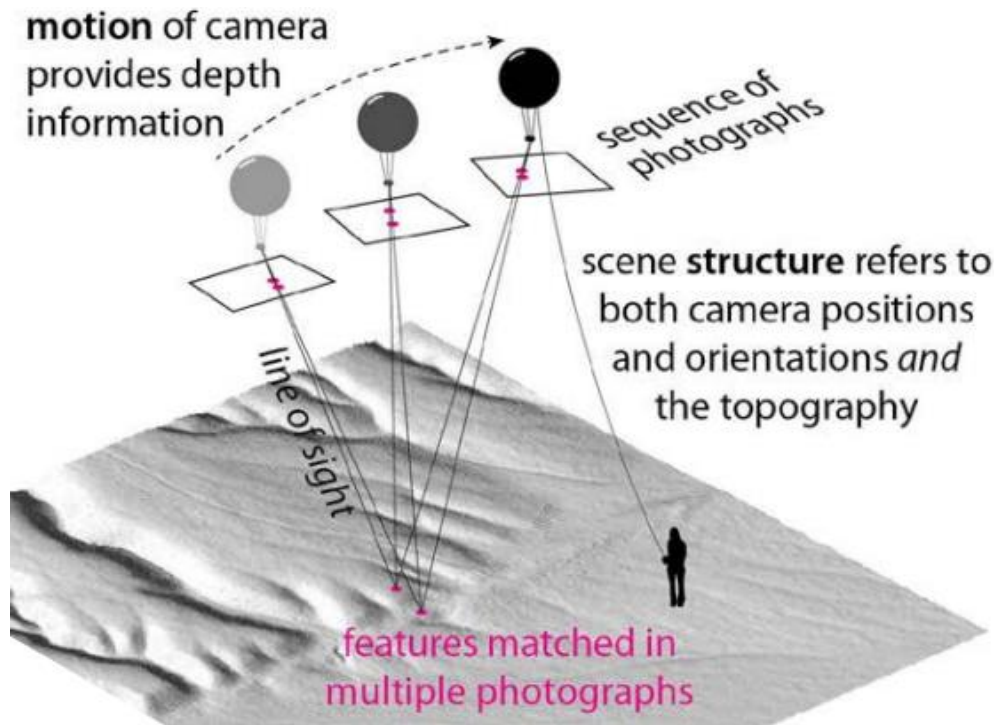


Figura 6. Fotogramtria em movimento [35].

2.2.2. Laser

Entrando no conceito de *scanner* a laser, torna-se importante o entendimento da metodologia para depois a apresentação dos tipos de equipamentos e modelos encontrados no mercado. A ideia generalizada da técnica é utilizar um pulso infravermelho, emitido pelo *scanner*, e computar seu retorno, após ser colidido e refletido pelo objeto. Isso é feito de forma contínua e com alta velocidade, o que permite uma varredura eficaz do objeto. Para que o laser consiga atingir todas as partes que compõe o objeto, é importante que haja variação de movimentação durante a digitalização. Alguns equipamentos fazem esse trabalho de diferentes formas, a exemplo do dispositivo utilizado na realização deste trabalho que conta com uma cabeça rotativa permitindo uma varredura na horizontal de 360° além de uma varredura de 300° na vertical com seu espelho refletivo (Figura 7) [36].

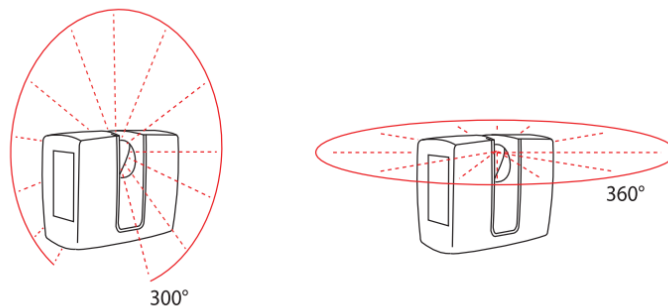


Figura 7. Alcance do Faro Focus S150 [36].

Falando um pouco sobre os tipos de *scanners a laser*, podemos citar: terrestre, localização e mapeamento simultâneo, detecção de luzes e mobile, como as mais comuns no mercado. Suas aplicações são diversas, assim como na fotogrametria, mas possuem maior precisão e agilidade, o que permite novas tecnologias com elevado desempenho. Embora todos esses modelos utilizem o mesmo princípio, explicado anteriormente, suas diferenças são observadas nas aplicações [29], [37].

Ao falar de detecção de luzes (Figura 8), ou ainda *light detection and ranging* (LiDAR), é a metodologia mais ampla que conseguimos encontrar. Ela mede além das distâncias e cores dos pontos, ao fazer a varredura, mas também sua intensidade e direção, tornando uma excelente candidata quando se busca mapear objetos em tempo real, mesmo em movimento, para ambientes internos e externo. Este método possui boa precisão e apresenta um resultado muito fiel, em requisitos de dimensão e detalhes, quando comparado com outros métodos. Recentemente, novas tecnologia têm tornado o uso deste método mais acessível, em requisitos financeiros. Vale ainda ressaltar que o LiDAR possui um amplo campo de aplicação, aumentando a popularização do método [29], [38].

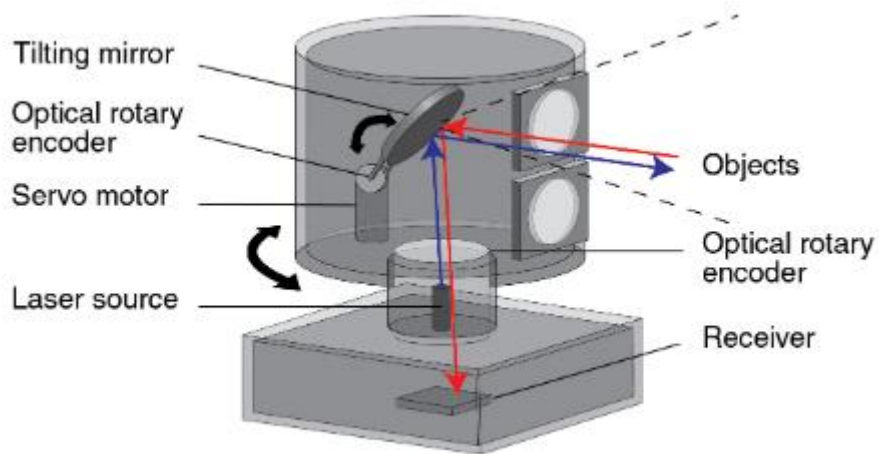


Figura 8. LiDAR *laser scanner* [39].

Quando o assunto é o *scanner* terrestre (Figura 9), ou ainda *terrestrial laser scanning* (TLS), sua aplicação fica mais restrita a objetos estáticos. O equipamento geralmente é montado sob um tripé e é amplamente utilizado na captura e digitalização de monumentos e estruturas, preservação histórica e acompanhamento de deformações. Por se tratar de um equipamento estático, sua vantagem está na densa e bem definida nuvem de pontos. Em contrapartida, a alta densidade de nuvem exige uma maior capacidade computacional. Para aplicações onde se pretende uma reconstrução do objeto em formato STL (*standard triangle language*), uma boa captura faz toda a diferença [29].



Figura 9. *Scanner* laser terrestre [40].

Em termos de localização e mapeamento simultâneo (Figura 10), ou *simultaneous localization and mapping* (SLAM), tem-se como principal característica a criação de um mapa enquanto a digitalização é realizada. Amplamente utilizado em robótica, esse método une a alta velocidade do *scanner*, sua movimentação e muitos sensores, para gerar um mapa em tempo real que possa ser utilizado de guia para a direcionamento de robôs autônomos. Sua junção de diferentes sistemas permitem uma excelente localização, mesmo em locais sem gps, mas seu custo de processamento de informações é elevado, necessitando de uma boa capacidade computacional [29], [41].



Figura 10. *Laser Scanner* de localização e mapeamento simultâneo [42].

Se tratando do *scanner mobile* ou ainda *mobile laser scanning* (MLS), a sua característica está na utilização do equipamento em movimento para cobrir uma grande área. Para tal, acopla-se o dispositivo a um veículo, tripulado ou não, e que vá percorrer a área de interesse de estudo. O MLS tem como principal finalidade o planejamento de áreas urbanas, mapeamento de áreas naturais, rodovias, entre outros. O método ainda apresenta uma densa e definida nuvem de pontos, permitindo melhor análise e um mapeamento mais efetivo [29], [43].

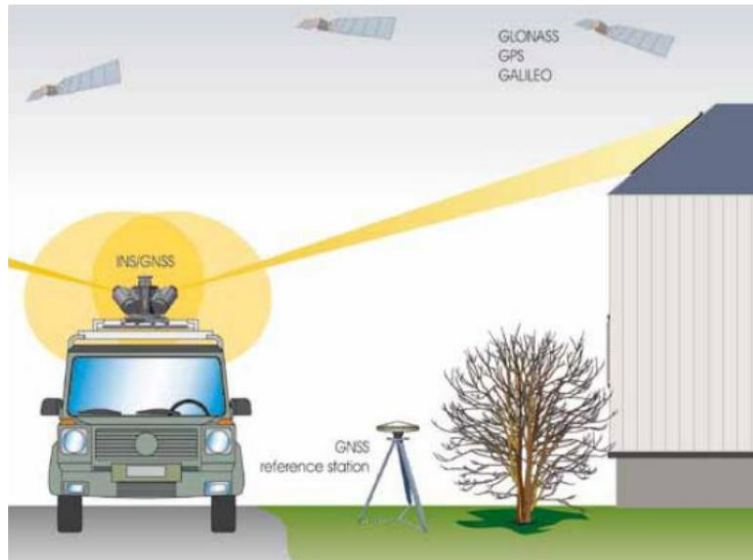


Figura 11. *Mobile laser scanner* [44].

2.3. Nuvem de pontos

Esta terminologia é utilizada para o resultado que se encontra dos *scanners*, independente da metodologia utilizada. É caracterizada pela junção de todas as leituras em um arquivo bidimensional ou tridimensional que contemple as características geométricas, assim como: dimensão, formatos, cores e peculiaridades. O processo de criação deste arquivo é puramente computacional e possui diversas maneiras de se alcançar, como muito bem explica Guo et al., 2021, comparando os resultados de estudos e analisando as possibilidades para as diversas finalidades [45].

Muitos dos avanços desta área se dão na otimização e criação de novos algoritmos e métodos, dos quais permitam um melhor reconhecimento e tradução da nuvem de pontos. A utilização do método adequado para a finalidade pretendida também é extremamente importante, uma vez que o custo computacional neste campo é bem grande. Pode-se observar pela figura a seguir (Figura 12), a diversidade de métodos.

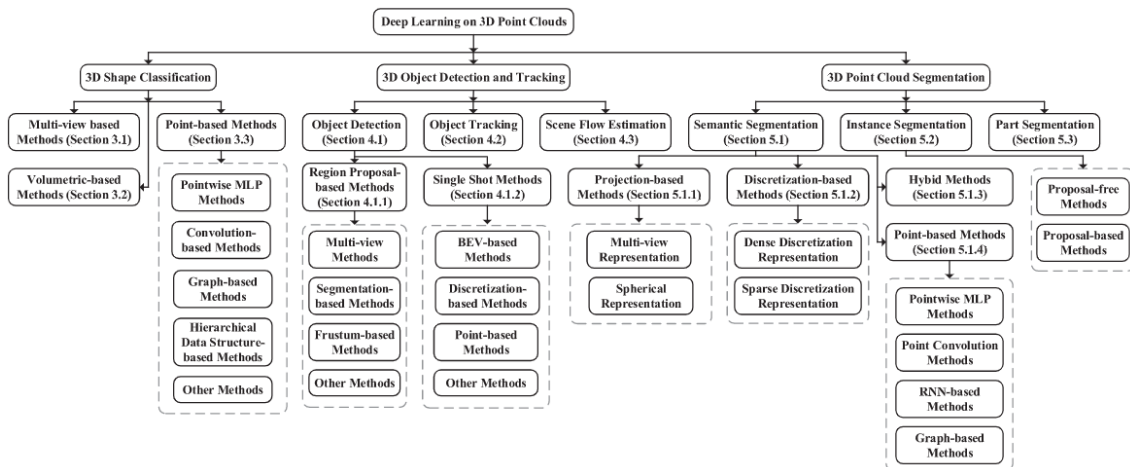


Figura 12. Compreensão de tipos de nuvem de pontos 3D. [45]

Durante o processo de mapeamento do objeto ou de superfícies, sendo este por *scanners a* laser ou fotogrametria, a varredura registra milhares de coordenadas x , y e z , no espaço e que quando unidas tem-se a origem da nuvem de pontos. Esse processo ocorre de forma diferente para os diversos tipos de equipamentos e metodologias, mas se mantém o conceito geral de marcação de pontos que posteriormente possam ser mantidas como registro tridimensional ou bidimensional do objeto. Existem informações de cores e intensidade que alguns mecanismos conseguem captar, aumentando a precisão e melhorando a geometria e nitidez no resultado [6], [46].

Muitos dos desafios encontrados se dão na coleta, interpretação e processamento dos dados obtidos. Como a grande maioria dos cálculos matemáticos são efetivamente realizados por computador, algumas problemáticas triviais, porém não simples, tendem a aparecer. Os algoritmos muitas vezes não conseguem interpretar ou complementar partes de objeto, uma vez que sua programação não consegue definir padrões dos quais humanos se baseiam para determinar se há, ou não, falta de dados em uma região ou se está de fato correta.

Uma captura uniforme, padronizada, que contemplando todos os possíveis ângulos e forneça posteriormente aos *softwares* uma nítida identificação de curvas, formas e cores, é indispensável para aqueles que buscam criar sólidos tridimensionais

complexos. Edições posteriores dos objetos são de baixa precisão e difícil manuseio, uma dedicação extra nas varreduras é recomendada e de grande importância para que os algoritmos consigam realizar os cálculos e traçar o objeto com maior precisão.

2.4.Malhas

As malhas STL são uma representação digital de superfícies tridimensionais, geralmente criadas a partir de nuvens de pontos. São compostas por uma série de triângulos conectados, que são usados para representar a geometria de um objeto ou superfície com alta precisão e resolução. Uma das principais vantagens destes modelos é a facilidade de uso em *software* de modelagem 3D e impressoras 3D, que aceitam o formato como padrão de arquivo. Além disso, a representação em forma de triângulos torna as malhas mais fáceis de processar computacionalmente em comparação com outras representações.

No entanto, há desafios associados à criação de malhas STL a partir de nuvens de pontos. Por exemplo, a densidade desigual de pontos e o ruído podem afetar a precisão da malha, enquanto a falta de informações de cor pode dificultar a interpretação visual dos resultados. Além disso, a criação de malhas precisas pode ser um processo demorado e exigir um alto nível de conhecimento técnico, além de processamento computacional.

Existem diversos modelos matemáticos utilizados para criar malhas a partir de nuvens de pontos, alguns dos mais comuns são o *marching cubes*, a triangulação de Delaunay e a reconstrução de superfície de Poisson. Cada um desses algoritmos tem características próprias e aplicações, e a escolha do modelo adequado depende das especificidades do projeto em questão. Esses métodos apresentam diferenças em termos de eficiência, precisão e capacidade de lidar com diferentes tipos de geometrias, ruídos e peculiaridades de cada nuvens de pontos.

- O modelo de *marching cubes* [47], por exemplo, é um algoritmo que cria uma malha a partir de uma nuvem de pontos por meio da divisão do espaço em

cubos e da triangulação de suas faces. Esse modelo é útil para objetos com superfícies complexas, mas pode resultar em malhas com muitos triângulos e que requerem muito poder de processamento para serem manipuladas.

- A triangulação de Delaunay [48], por sua vez, é um modelo que cria uma malha a partir da triangulação de um conjunto de pontos, de forma a maximizar a circunferência vazia em torno de cada triângulo. Sendo bastante utilizado em aplicações de engenharia e ciências geoespaciais, podendo gerar malhas mais eficientes e precisas do que o modelo anterior.
- A reconstrução de superfície de Poisson, cria uma malha por meio da solução de uma equação de Poisson que descreve a superfície a ser reconstruída[49]. Esse modelo é útil para objetos com formas suaves e curvas complexas, e pode gerar malhas mais suaves e precisas do que os modelos de *marching cubes* e Delaunay.

2.5.Impressão 3D

A impressão 3D como é conhecida hoje tem sua origem do método de fabricação de manufatura aditiva, onde Volpato (2021) define como o fatiamento eletrônico em camadas, formando curvas de níveis que são sobrepostas continuamente, dando origem a peça quando se sobrepuser a última camada. Vale ressaltar que esta técnica é codependente de outros avanços computacionais que se facilitam e permitem avanços tecnológicos na área, a exemplo de: CAD (*computer-aided design*), CAM (*computer-aided manufacturing*) e CNC (*computer numerical control*) [50].

Os primeiros grandes avanços da impressão 3D aconteceram no Texas, por meados de 1980, onde o Dr. Joe Beaman desenvolveu o primeiro equipamento com capacidade de realizar sobreposição de material de forma automática e sistemática, conhecida como *Selective Laser Sintering* (SLS) [51]. Nota-se que esta técnica é relativamente nova e muitas tecnologias surgem a cada ano, tornando assim uma tendência no mercado de fabricação.

Existem ainda muitas formas de se realizar a sobreposição das curvas de níveis, como muito bem revisa Wong & Hernandez (2012). É válido destacar alguns dos processos mais utilizados atualmente, como: modelagem de deposição fundida (FDM), estereolitografia (SLA), sinterização seletiva a *laser* (SLS), sinterização a laser de metal direto (DMLS), derretimento seletivo a *laser* (SLM), derretimento de feixe de elétrons (EBM) e polyjet [52].

A impressão de deposição fundida (FDM) (Figura 13) é a metodologia mais difundida e mais acessível para aqueles que buscam a criação de objetos tridimensionais de finalidade estética. Seu conceito é a fundição do material, geralmente polímeros, que são depositados em uma cama utilizando um bico. Desta forma, devido a tecnologias CNC, pode-se controlar com precisão o assentamento de material e formar camada por camada o objeto desejado. Este modelo de equipamento é muito utilizado por pessoas adeptas do “faça você mesmo”, sendo está, uma corrente que propõe a criação, elaboração e execução de ideias por pessoas comuns. Sendo assim, a principal responsável pela popularização de difusão do conceito de impressão 3D [52], [53].

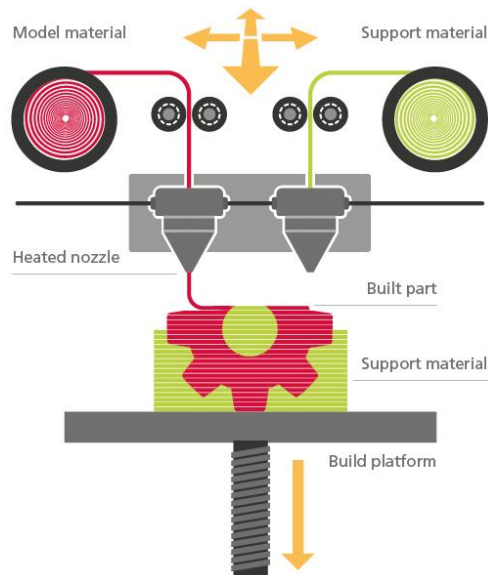


Figura 13. Impressão por fusão e deposição do material [54].

Ainda existem uma série de materiais que a impressão por FDM pode utilizar. Abordaremos em específico o PLA, material utilizado na impressão da locomotiva. O PLA é amplamente utilizado em impressões 3D pelas características e facilidades que ele apresenta. Possui um bom acabamento superficial. Apresenta boa resistência mecânica para impressões de pequena, média e grande dimensão. Sua temperatura de trabalho é facilmente atingida pela maioria dos equipamentos de impressão, de 200°C a 210°C, e não necessita de uma mesa aquecida para aderir na plataforma. O material não apresenta uma longa vida útil quando exposta ao sol por longos períodos, podendo ficar mole caso atinja temperaturas próximas a 60°C [55].

A estereolitografia (SLA) (Figura 14) é uma das técnicas mais antigas onde consiste em usar um laser para solidificar camadas de resina líquida fotossensível. O laser é controlado por *software*, que traça caminhos precisos em cada camada de resina, solidificando a resina nos locais desejados. À medida que cada camada é solidificada, o objeto é construído de baixo para cima até a conclusão. Essa técnica é capaz de produzir objetos com alta resolução e precisão, com detalhes finos e complexos, além de produzir objetos com superfícies suaves e sem linhas de camada visíveis. Tornando-se assim especialmente útil em aplicações que exigem peças precisas e detalhadas, como na medicina, na indústria aeroespacial e na produção de joias. Suas desvantagens ficam visíveis no quesito velocidade de fabricação e material para impressão, uma vez que a resina utilizada tem composição específica [52], [53].

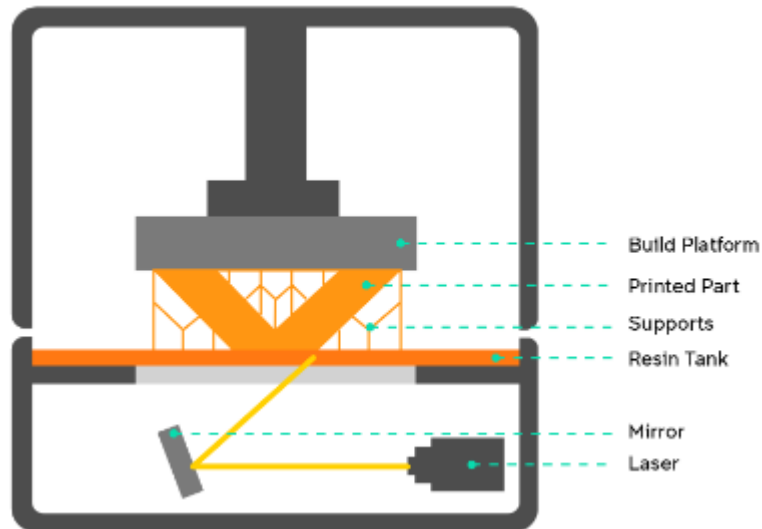


Figura 14. Estereolitografia [56].

A sinterização seletiva a laser (SLS) é uma técnica de fabricação aditiva que utiliza um laser para solidificar camadas de pó de polímero ou metal. O laser aquece seletivamente as áreas desejadas do pó, fundindo-as e criando um objeto sólido. Suas principais vantagens estão na capacidade de produzir objetos com alta resolução e precisão, com uma ampla variedade de materiais. Além disso, a técnica é capaz de construir objetos com alta resistência mecânica e térmica, tornando-a especialmente útil em aplicações que exigem peças funcionais, como na indústria automotiva e aeroespacial. Devido a seu alto custo de fabricação, esta tecnologia apresenta sua principal desvantagem no preço das peças, além da necessidade de ambientes controlados para que o pó não seja contaminado com partículas no ar [52], [53].

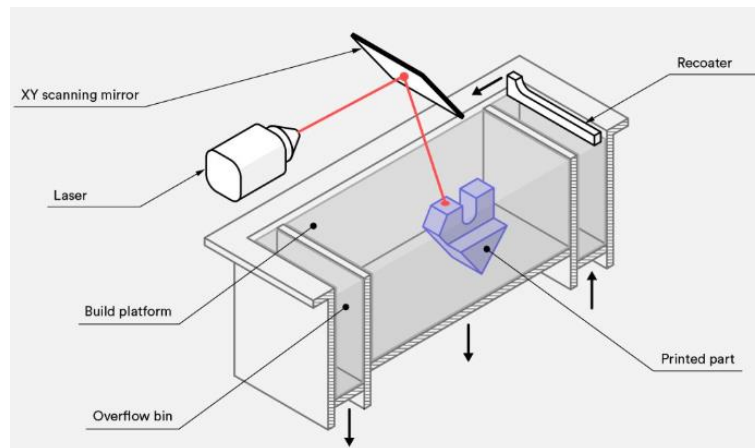


Figura 15. Síntese seletiva a laser [57].

A sinterização a laser de metal direto (DMLS) (Figura 16) utiliza um laser para fundir camadas de pó metálico, como titânio, alumínio e aço inoxidável, para construir objetos sólidos. Esta técnica é muito semelhante a SLS, entretanto o material a ser solidificado deixa de ser polimérico e o equipamento trabalha com metais. Sua principal vantagem está no material que é utilizado, possibilitando assim o fabrico de peças metálicas com alta complexidade e conseqüentemente uma boa resistência mecânica. Não é possível a confecção de partes mecânicas muito grandes, uma vez que a geometria fica limitada ao tamanho da impressora, portanto sua aplicabilidade é voltada para pequenos e médios objetos. Assim como o SLS, o ambiente controlado é indispensável, entretanto, o custo por peça, ao comparar com outros meios de fabricação, é atrativo para situações de baixo volume e rápida produção [53].

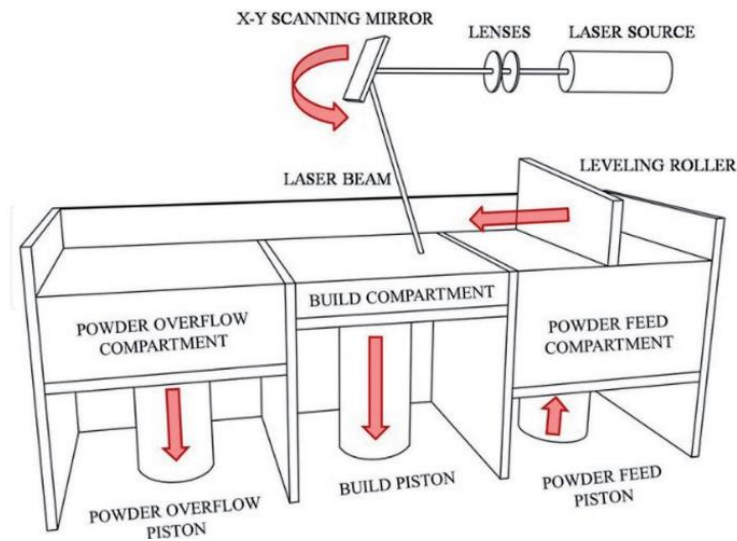


Figura 16. Sinterização a laser de metal direto [58].

A fusão seletiva a laser (SLM) é muito semelhante à sinterização seletiva a laser, mas difere no fato de que o pó é completamente fundido para criar um objeto sólido, em vez de apenas sinterizado. Enquanto para o DMLS o metal é fundido a nível molecular e há a possibilidade de se trabalhar com ligas metálicas, para o SLM, um material homogêneo é formado, além de ter a limitação de um único elemento. As vantagens e desvantagens do método é similar a sua concorrente, porém apresenta menor custo quando colocado em comparação. Outra vantagem destes métodos é a facilidade de produção de peças rápidas para prototipagem [53].

A fusão de feixe de elétrons (EBM) (Figura 17) é uma técnica que possui grande semelhança com os dois últimos métodos apresentados, entretanto, se diferencia na maneira com que se derrete o metal. Este se dá a partir de um feixe de elétron, que elevam a temperatura do metal base a temperaturas de 1000°C. A metodologia ainda apresenta uma maior velocidade de impressão e melhores propriedades mecânicas. Suas vantagens e desvantagens se assemelham ao SLM e DMLS, sendo estas o ambiente controlado e custo por peça as maiores problemáticas, e alta qualidade de impressão como grande vantagem. As indústrias que mais utilizam estas tecnologias são de áreas médicas, automotivas e industriais aeroespaciais [53].

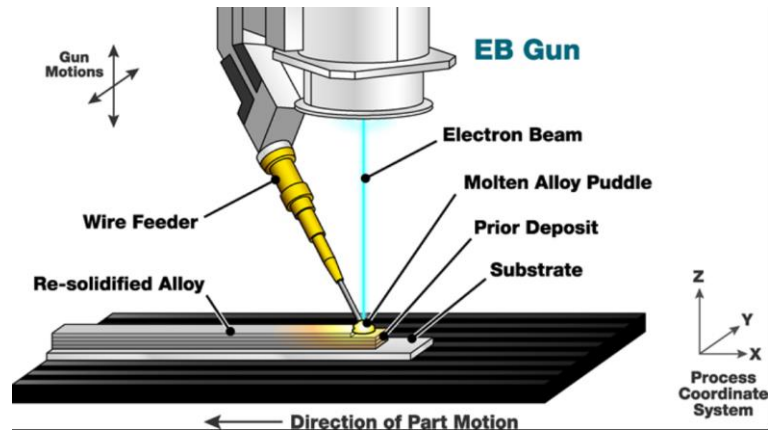


Figura 17. Fusão por feixe de elétrons [59].

A tecnologia de impressão 3D PolyJet é uma técnica de fabricação aditiva que usa uma cabeça de impressão para pulverizar gotículas finas de fotopolímero líquido em uma plataforma de construção. A tecnologia é baseada em jateamento de tinta de jato de tinta e pode produzir peças em cores múltiplas e com alta resolução. À medida que a cabeça de impressão se move sobre a plataforma de construção, ela pulveriza finas gotículas do fluido, que são curadas por luz UV para solidificar e formar a peça camada por camada. Uma de suas principais vantagens é a capacidade de produzir objetos com alta precisão e detalhes finos, com resolução de até 16 microns. Além disso, a tecnologia permite a criação de objetos em múltiplas cores e com uma ampla variedade de propriedades de material, incluindo materiais flexíveis e transparentes. Suas limitações de construção são a maior desvantagem, uma vez que há a necessidade de suportes de apoio para partes suspensas e dificuldade de imprimir objetos muito grandes devido ao tamanho limitado da plataforma de construção [52], [53].

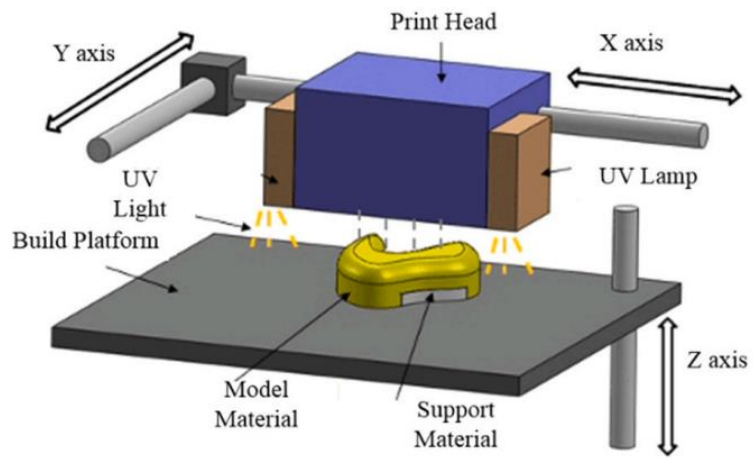


Figura 18. Polyjet [60].

3. Materiais e métodos

O percurso percorrido até a impressão da maquete 3d se deu início com a digitalização da Locomotiva. O processamento e registro das capturas são realizadas todas em *software*, e em seguida é gerada a nuvem de pontos de forma automática. Sua limpeza é necessária para atingir melhor acabamento superficial na malha em stl. Com as edições corretas na malha, e modelagem de algumas partes, consegue-se um modelo que mantenha a maioria das características físicas e que seja compreensível ao tato. A Figura 19 mostra o processo como todo para um melhor entendimento dos processos descritos a seguir.

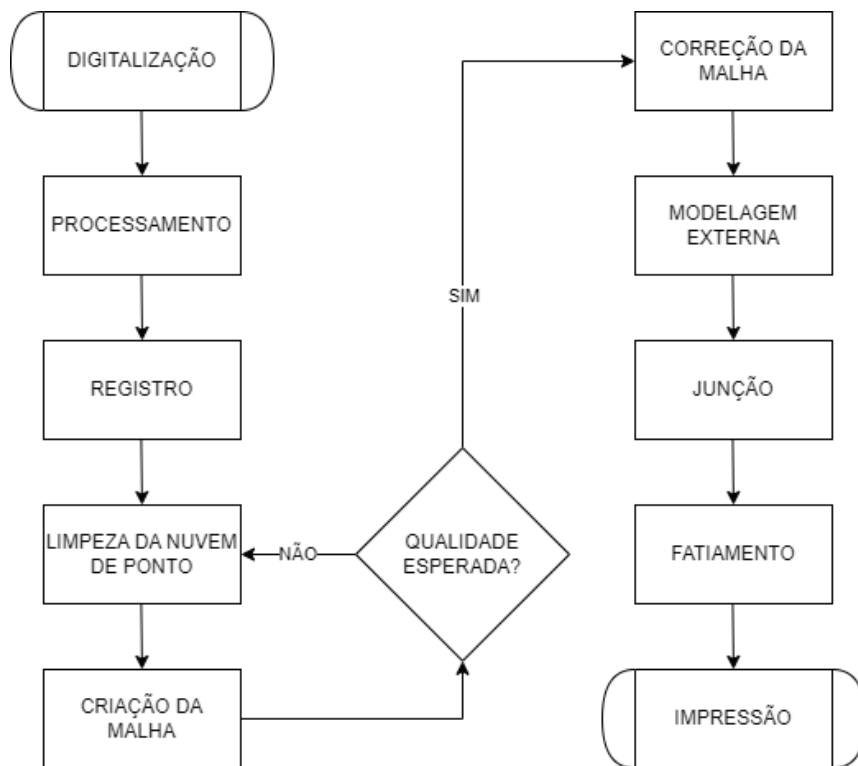


Figura 19. Fluxograma representativo da metodologia do projeto.

3.1. Digitalização

Para a execução do projeto, alguns equipamentos foram dispostos e alguns *softwares* pré-estabelecidos. O *laser scanner* utilizado foi o Faro Focus S150 (Figura 20), fabricado e comercializado pela FARO. A escolha do modelo deu-se principalmente na precisão que pode se atingir, uma vez que uma maior precisão na digitalização implica diretamente na melhor qualidade da impressão 3D final. O dispositivo ainda apresenta outras grandes vantagens como a facilidade de transporte, uma vez que é composto por partes removíveis e com uma mochila de transporte, facilitando a digitalização de objetos grandes onde necessita-se o deslocamento até o local.



Figura 20. Faro Focus S150.

Outros pontos positivos que vale destacar são: versatilidade, curva de aprendizagem rápida, velocidade de digitalização e distância de captura. Comentando um

pouco quanto a versatilidade, o equipamento possui um *range* que vai de 0,6m a 150m, o que permite digitalizações de objetos a média e longa distância. Infelizmente a limitação mínima na distância dificultou algumas partes do trabalho, que será discutido mais a diante. Se tratando de velocidade e curva de aprendizagem, o dispositivo apresenta uma série de configurações como resolução e qualidade, que alteram tanto a qualidade e tempo. É possível encontrar, com um pouco de prática, as especificações ideais para cada caso, buscando uma boa qualidade e baixo/médio tempo.

Vale ressaltar que as configurações máximas do Faro Focus S150 não foram exploradas, uma vez que para este *setup*, o tempo de digitalização era muito grande e o local onde encontrava-se o objeto é de acesso aberto e congestionaria o acesso das pessoas no museu. O tempo estimado para cada uma destas digitalizações era superior a 1 hora e vários ângulos deveriam ser explorados para uma captura mais completa e que não apresentasse grandes focos de falta de informações. Portanto, optou-se por uma configuração intermediária que retornaria em uma nuvem de pontos com densidade adequada, mas que não comprometesse o tempo de digitalização.

O objeto a ser digitalizado e impresso é a Locomotiva CN1 (Figura 21), localizada no Museu Nacional Ferroviário de Bragança, na cidade de Bragança, Portugal. O comboio é um objeto de grande valor histórico para a cultura local, já que foi um dos muitos que fizeram a integração ferroviária da cidade com o país, além de conectar Portugal com outros países da Europa. Portugal tem uma forte história ferroviária e a locomotiva representa muito bem a importância e o valor desta época no País.



Figura 21. Locomotiva e *Scanner* utilizados no projeto.

Observa-se pela Figura 21, acima, ambos os itens mencionados anteriormente, sendo estes a Locomotiva CN1 e o Faro Focus S150. Pode-se notar também algumas características do local onde se realizaram as digitalizações. O primeiro grande ponto importante a ser destacado é sobre a iluminação do local, que tem grande influência da luz solar externa e traz algumas mudanças de parâmetros para otimizar a digitalização. Sendo um local com luz não controlado, o surgimento de reflexos fortes é inevitável, aumentando o número de ruídos na nuvem de pontos posteriormente.

Observe, pela Figura 21, que a lanterna frontal da locomotiva possui uma região coberta por vidro. Isto dificulta a captura correta de pontos naquela região, criando a necessidade de repensar em possibilidades de representar a lanterna posteriormente. Também pode-se observar que não havia muito espaço disponível alocar o *scanner* em diferentes ângulos, uma vez que o comboio era estático, perto a parede e outros itens em exposição estavam ao redor.

Para um resultado mais uniforme, é importante que haja uma padronização das posições em que se aloca o equipamento para realizar as varreduras. Em casos como este, essa tarefa se torna difícil e alguns ângulos são perdidos no meio do processo.

Infelizmente isto causa uma de falta de informações localizadas na nuvem de pontos, que posteriormente deve ser corrigida para que a impressão possa ser realizada.

Conhecendo o local do objeto de estudo, pode-se planejar previamente alguns pontos e entender melhor quantos locais de digitalizações (Figura 22) serão necessários para uma boa densidade na nuvem de pontos. Note que a imagem abaixo identifica estes locais e indica com número onde ocorreram mais de uma digitalização na proximidade, sendo o valor indicado a quantidade realizada.

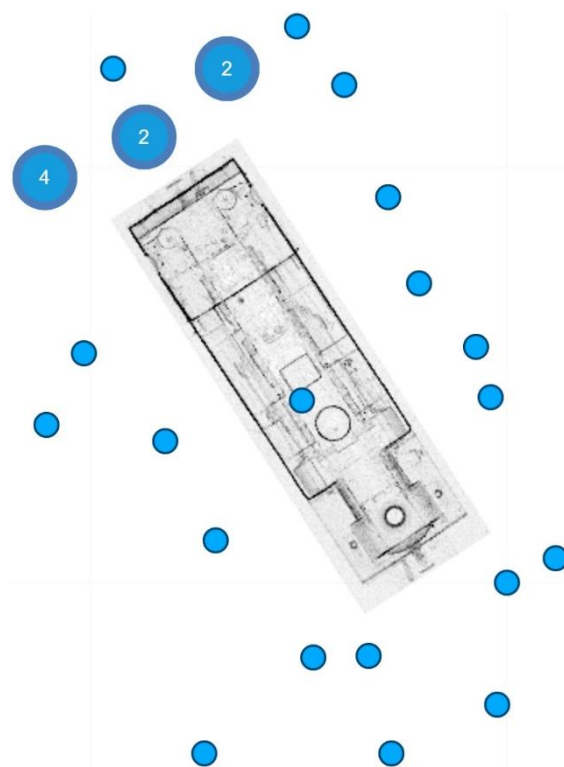


Figura 22. Pontos de digitalização da locomotiva.

Por fim, mas não menos importante, a altura máxima que o tripé do Faro Focus S150 atingia não era suficiente para uma nítida captura da parte superior do comboio, o que tornou necessário o pedido ao Corpo de Bombeiros da cidade de Bragança por uma plataforma. Permitindo realizar uma digitalização muito melhor dos itens dispostos no

topo da locomotiva, além de preencher várias lacunas de informações na digitalização. A parte inferior do Comboio foi uma região onde não havia muito o que fazer com o equipamento disponível. As informações desta região foram pouco exploradas e a representação dos itens mecânicos comprometida, na impressão final.

3.2. Processamento e registro

Com as capturas realizadas, inicia-se o processo de alinhamento e edição da nuvem de pontos. O *software* utilizado nesta seção é o SCENE (Figura 23), distribuído pela FARO, e sua licença foi adquirida juntamente ao *scanner*. Sua utilização é de fácil assimilação e com uma boa curva de aprendizagem, tornando-se uma boa opção para trabalhos rápidos e que utilizam o equipamento da empresa.

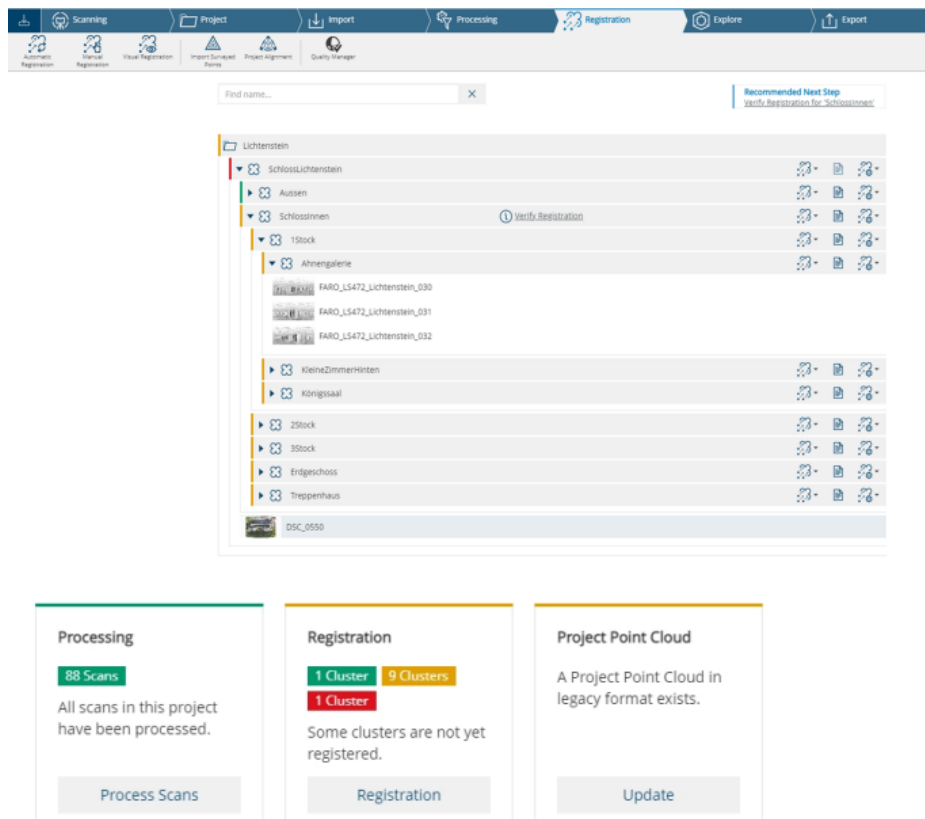


Figura 23. Registro de digitalização no *software* SCENE [61].

Após o *upload* das imagens no *software*, faz-se o processamento. Etapa requerida e necessária pelo *software*. As configurações padrões já fornecem um bom resultado, não necessitando de modificações nesta etapa. Posteriormente, há a etapa de registro, onde para nosso caso, foi executado de forma automática e resultou em um alinhamento satisfatório. Na aba “explorar” pode-se observar uma primeira visualização tridimensional do objeto, sendo necessário a limpeza da nuvem para que haja melhor visibilidade.

Para a criação da malha, após a limpeza, utiliza-se a ferramenta de “criar malha” através do *clipping box* e caixa de recorte ativa, onde algumas configurações são necessárias. Buscando uma melhor definição e visando a impressão 3D, optou-se por dar a liberdade do *software* gerar o maior número de triângulos possíveis, 40.000.000. Devido a necessidade do arquivo para impressão 3D, a configuração “pronta para impressão 3D” foi bastante utilizada.

3.3.Nuvem de pontos

A criação da nuvem de pontos é feita de forma automática pelo *software*, após a união e alinhamento de todas as digitalizações realizadas (Figura 24 e 25). A resolução das etapas adiantes têm forte dependência da qualidade das digitalizações e alinhamento das imagens. Note que ainda há a possibilidade da adição de imagens futuras, caso necessárias e a mesma deve ser acoplada no conjunto já criado.

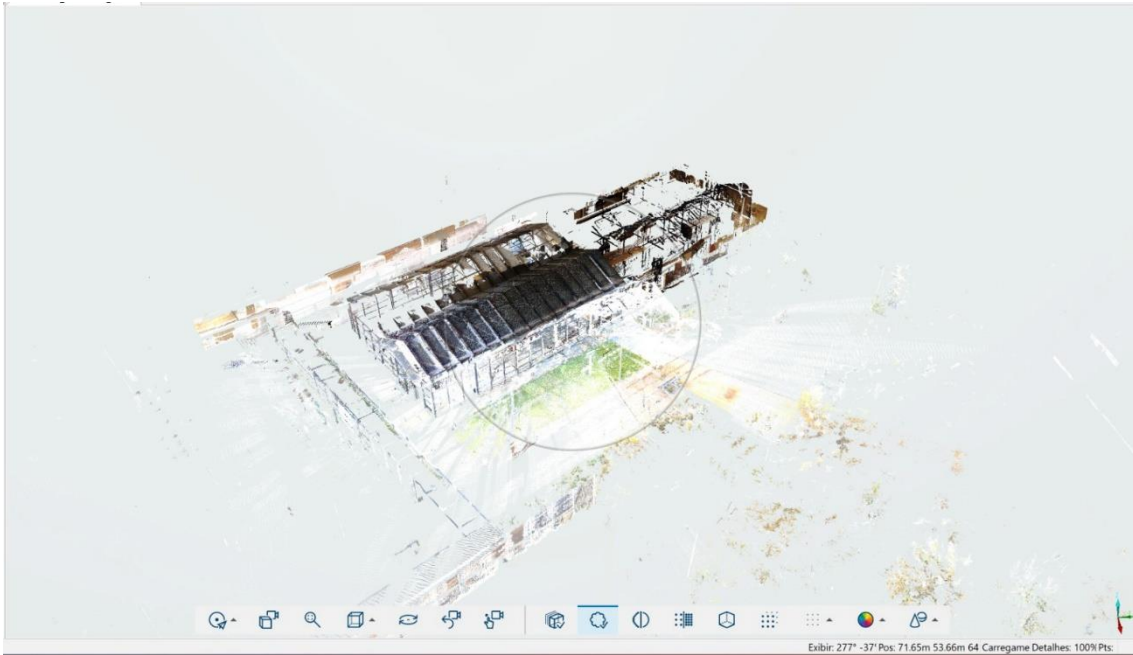


Figura 24. Nuvem de pontos criada pelo SCENE.



Figura 25. Objeto de estudo na nuvem de pontos criada pelo SCENE.

Como o equipamento utilizado possui alto alcance, muitas informações adjacentes são captadas junto ao objeto, aumentando significativamente o tamanho de arquivo e custo de processamento dos computadores. A limpeza inicial da nuvem deve ser feita com foco nos itens irrelevantes e posteriormente para a locomotiva. Felizmente o *software* possui ferramentas que facilitam esse processo, a exemplo do FARO SCENE, pode-se criar uma *Clipping Box*, que funciona como um volume de controle, isolando as informações desejadas e possibilitando a remoção de todos os pontos externos a essa seleção (Figura 26).

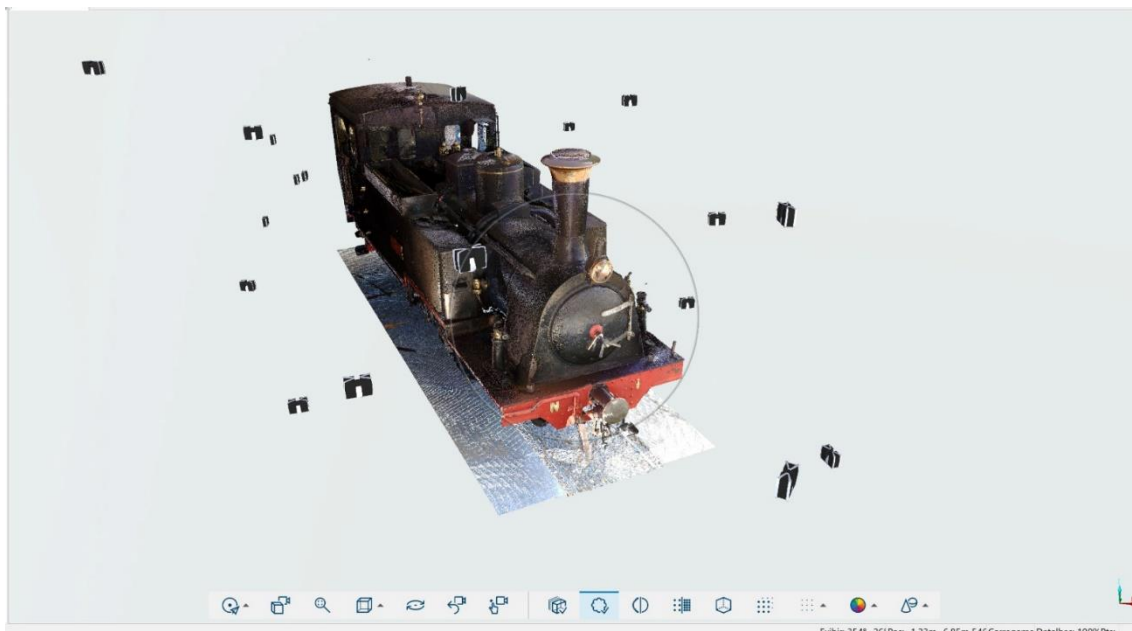


Figura 26. Limpeza de pontos externos na nuvem de pontos.

A partir desta etapa deve-se verificar a integridade do arquivo e já se observa algumas regiões ruidosas e outras com boa definição. Pode-se observar, também, se há a falta de informações de alguma região, o que permite uma pausa para novas varreduras que cubram as áreas mal digitalizadas e junção ao conjunto já existente. Para o trabalho em questão, da Locomotiva CN1, muitos pontos da cabine do maquinista tiveram que ser removidos. A ideia inicial era na utilização das digitalizações internas a cabine para que

houvesse a possibilidade de os cegos explorarem também a parte interna do comboio, o que não foi possível devido ao grande número de ruídos internas a cabine.

Existem algumas ferramentas encontradas nos *softwares*, que trabalhem com nuvem de pontos, que permite uma limpeza de forma automática, com base em um algoritmo do próprio programa, e pode reduzir algumas horas de trabalho. Para nosso caso, não foi possível atingir bons resultados com estas ferramentas, principalmente pela falta de conhecimento e prática na utilização destas. Seu cálculo matemático é complexo e levaria tempo até aprender a utilizá-la com perfeição em tempo hábil. Desta forma, toda a limpeza e otimização foi realizada manualmente. Também vale ressaltar que os *softwares* explorados deveriam ser gratuitos ou conter licença estudantis.

3.4.Malha stl

Para com que haja a possibilidade de modelagem sobre a nuvem de pontos, deve-se criar um arquivo em formato “.stl” (Figura 27), que permite certa edição da digitalização feita. O *software* utilizado “FARO SCENE” (Figura 28) possui sua ferramenta própria de geração deste tipo de arquivo e este foi a maneira utilizada para o projeto. Algumas importantes observações que devem ser feitas são nas configurações que são disponibilizadas para o usuário, sendo estas, a quantidade máxima de triângulos a criar e nível de estanqueidade.

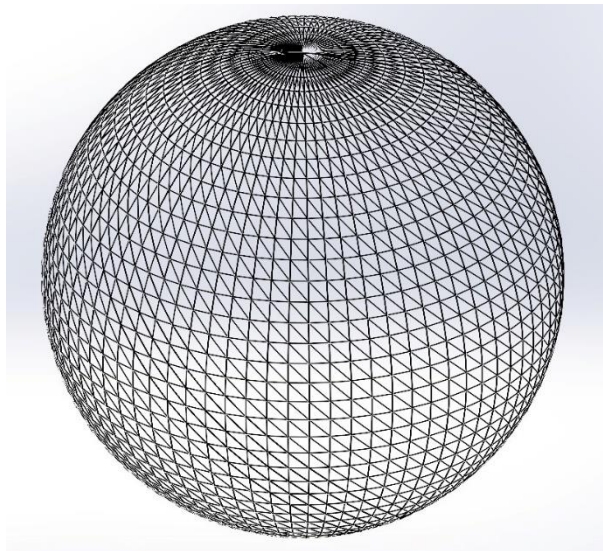


Figura 27. Exemplo de malha triangular (stl).

Quando se trata de números máximos de triângulos criados, este parâmetro é diretamente proporcional a resolução atingida. Objetos de geometria complexas são dificilmente representados em alta resolução por um número pequeno de triângulos. A ideia é similar a resolução de televisores e monitores, onde, quanto mais pixels possuírem, melhor o nível de acabamento de bordas e representação de detalhes. No que diz respeito ao nível de estanqueidade, esta é uma ferramenta do próprio *software* que permite com que o algoritmo complete locais dos quais não possui informações com uma aproximação do que poderia estar ali. Esta ferramenta é extremamente importante pois possui em sua capacidade máxima a configuração que permite, a geração da malha triangular está teoricamente pronta para a impressão 3D.

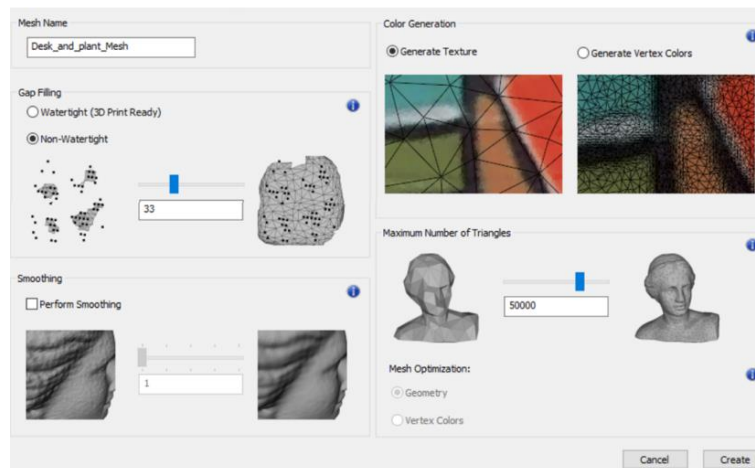


Figura 28. Aba de criação de malha pelo *software* SCENE [61].

Para a verificação da integridade do arquivo em requisitos de impressão 3D, utilizou-se o *Meshmixer*, que possui ferramentas próprias para se trabalhar com este tipo de arquivo e ainda permite a edição parcial do projeto. O primeiro ponto a se observar foi a questão da continuidade, isto é, garantir que o arquivo em stl não possui espaços sem informações que comprometeriam uma impressão 3D. Em teoria este requisito deveria ter sido cumprido pela configuração de estanqueidade do SCENE na criação do arquivo, o que vimos que não foi atingido, face sua complexidade. Portanto, fez-se utilização do *Meshmixer* para atingir esta condição. As configurações corretas são extremamente importantes para atingir boa definição e um alto processamento computacional é requerido nesta etapa.

Visando reduzir o tamanho do arquivo, buscou-se alternativas que possibilitavam, com o stl já criado, reduzir o número de triângulos de forma a não diminuir significativamente a qualidade de acabamento. A utilização do *ReCap Photo* se mostrou muito útil, pois possibilitou realizar o processo desejado e o resultado também se mostrou satisfatório. Vale ressaltar que durante o desenvolvimento do projeto, o que se esperava era encontrar os *softwares* corretos e entender como utilizar as ferramentas de maneira adequada obter o melhor resultado. A Figura 29 exemplifica o resultado obtido com essa ferramenta.

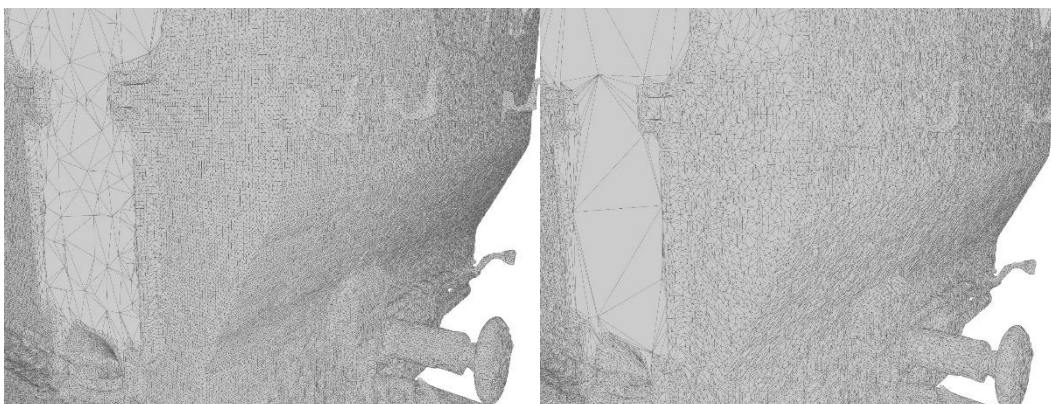


Figura 29. a. Malha original, b. Malha com 50% de redução.

Com o arquivo mais leve e possuindo menos custo de processamento, utilizou-se o *Solid Works* para a modelagem de algumas regiões ou partes do comboio que possuíam menor definição. Isso se deu da necessidade de substituir algumas das partes devido a perda de qualidade ao decorrer das inúmeras conversões de formato, e modificações no arquivo. Tendo como objetivo final uma maquete que possibilitasse aos cegos uma percepção sensorial adequada das dimensões e características da locomotiva, fez-se a modelagem, separadamente, de partes que não estavam bem representados e posteriormente a adição através do *Meshmixer*.

3.5. Fatiamento e impressão

Uma etapa necessária de se realizar antes da impressão, é passar por um *software* que faça o fatiamento do objeto. Desta maneira, configura-se alguns parâmetros de impressão que são cruciais para a qualidade de acabamento e resistência. Para este caso, fez-se utilização do *software* Cura (Figura 30) com as seguintes configurações:

- Layer: 0,2 mm
- Espessura da parede: 1,8 mm

- Camadas superiores e inferiores: 1 mm
- Preenchimento: 20% adaptativo

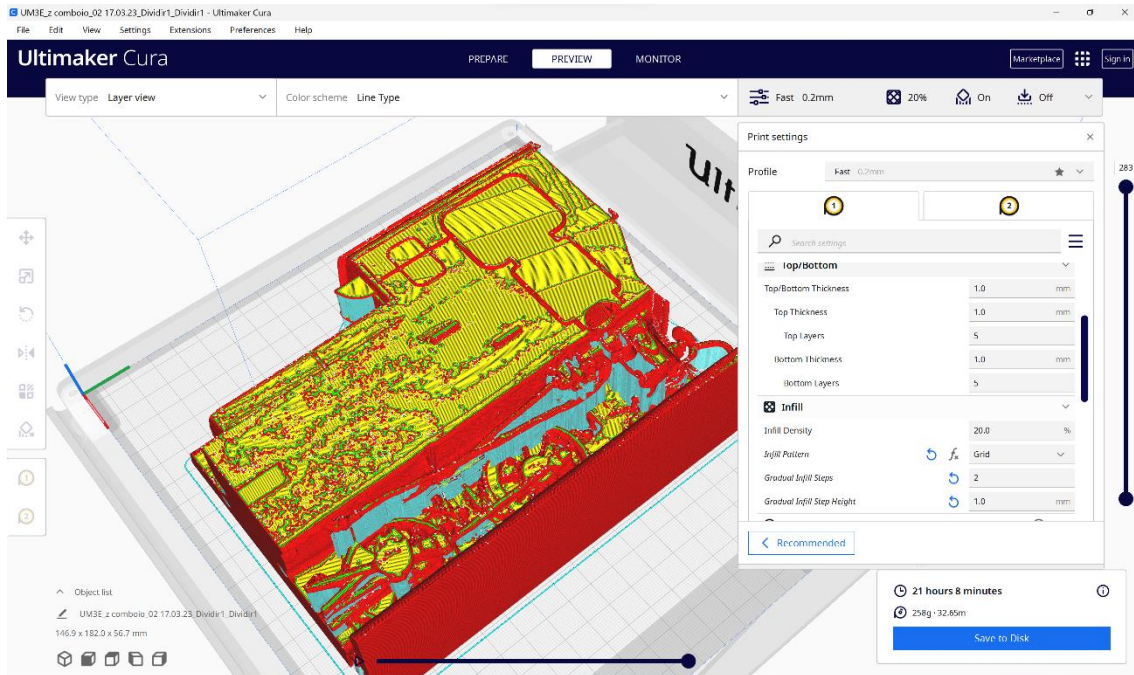


Figura 30. Fatiamento do comboio pelo *software* Cura.

Duas impressões foram realizadas durante o processo de desenvolvimento, para analisar parcialmente os resultados e visualizar melhor os pontos positivos e negativos. A primeira tentativa foi executada na *BigBuilder 3D Dual* (Figura 31 a). Este equipamento possui grande volume de impressão, sendo seu eixo “z”, vertical, a maior dimensão. As unidades exatas de volume são 220 x 210 x 664 mm, tendo capacidade de realizar trabalhos com maiores alturas, sem necessidade de partição da peça. O segundo protótipo de impressão foi executado na *Anycubic Mega* (Figura 31 b), possuindo um volume de 210 x 210 x 205 mm e atingindo temperaturas de 260°C e cama aquecida até 110°C. É importante ressaltar que ambas foram impressões com PLA da *Devil Design* (Figura 31 c) com 1,75mm de diâmetro e peso de 1 kg.

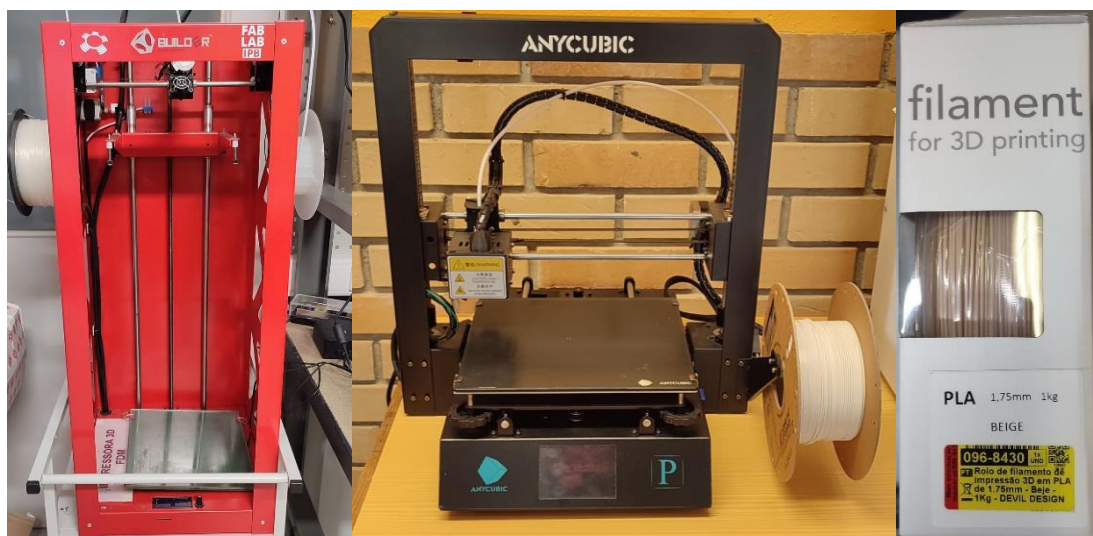


Figura 31. a. Impressora *BigBuilder*, b. Impressora *Anycubi Mega*, c. Filamento *Devil Design*.

Em termo de equipamentos para a impressão final, utilizou-se a *Ultimaker 3* em sua versão *Extended*. Algumas características que podem ser destacadas são: 2 extrusoras, volume de impressão, temperatura de trabalho e dimensões. O par de injetores permite a utilização de 2 filamentos para uma impressão com mais cores, mas principalmente, a utilização de filamentos diferentes para estrutura e para suporte. Tendo esta possibilidade, pode-se utilizar um filamento específico para suporte, que seja solúvel em água, facilitando a remoção posterior à impressão.

Em termos de volume, a *Ultimaker 3 Extended* (Figura 32) possui capacidade de 215 x 215 x 300 mm. Isto possibilita impressões com um bom volume, e, ao comparar com sua versão normal, o ganho de espaço se dá de 100mm a mais de volume no eixo z, vertical. Apesar de possibilitar grandes impressões, a impressora não ocupa muito espaço na bancada, sendo as dimensões do equipamento de 342 x 505 x 688 mm [62].

Sua temperatura de trabalho chega aos 280°C, permitindo a utilização de uma maior variedade de filamentos. Para auxiliar nesta tarefa, sua cama é aquecida a temperaturas que podem chegar a 100°C. Este requisito de cama aquecida é necessário

para trabalhar com alguns tipos específicos de materiais, o que acrescenta uma maior possibilidade de filamentos a utilizar [63].

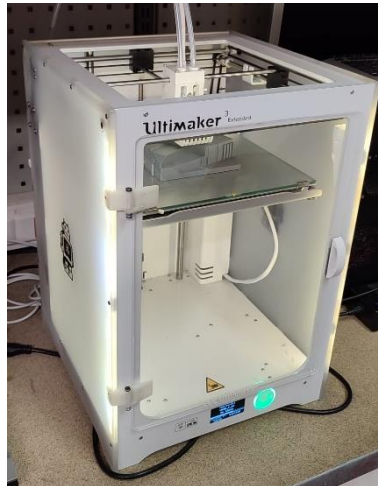


Figura 32. *Ultimaker 3 Extended*.

Comercializado pela *Ultimaker*, o filamento utilizado foi o *Ultimaker Material PLA* (Figura 33). Sua especificação técnica é de diâmetro equivalente a 2.85 ± 0.10 mm, 750g e 95 m de comprimento. Suas recomendações de temperatura são de 200 a 210°C e 60°C para a cama. Outras informações específicas são encontradas no “*data sheet*” disponibilizado pela empresa, como tensões de corte, cisalhamento e entre outros [64].



Figura 33. Filamento *Ultimaker Material PLA*.

4. Resultados e análise

Ao longo do processo percorrido, alguns resultados parciais podem ser observados. Tendo em mente a importância destes parâmetros, estes e os resultados finais serão apresentados a seguir.

4.1.Registro

Na etapa de registro, foram executados duas tentativas de alinhamento, a primeira manual e a segunda automática. O relatório gerado pelo *software* SCENE (Anexo I) mostrou que a metodologia automática teve melhor desempenho. Alterações nas configurações padrões de registro automático podem ser exploradas, o que não foi necessário para o modelo proposto devido ao resultado satisfatório. Algumas imagens a seguir (Figura 34, 35, 36 e 37) mostram os gráficos e resultados gerais deste processo.

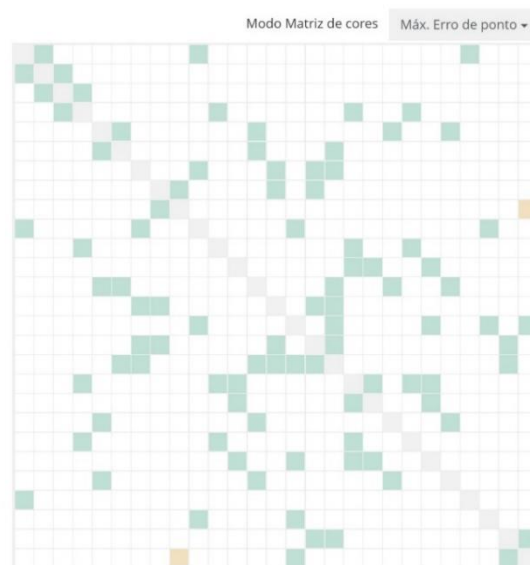


Figura 34. Relatório de erro máximo pelo SCENE (8,3 mm).

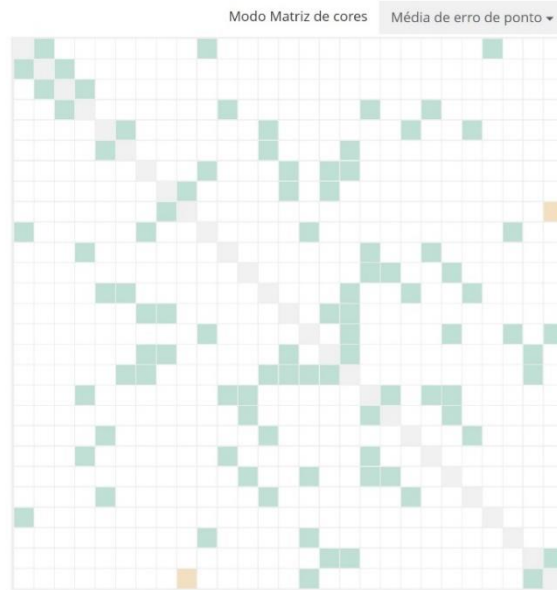


Figura 35. Relatório de erro médio pelo SCENE (2,6 mm).

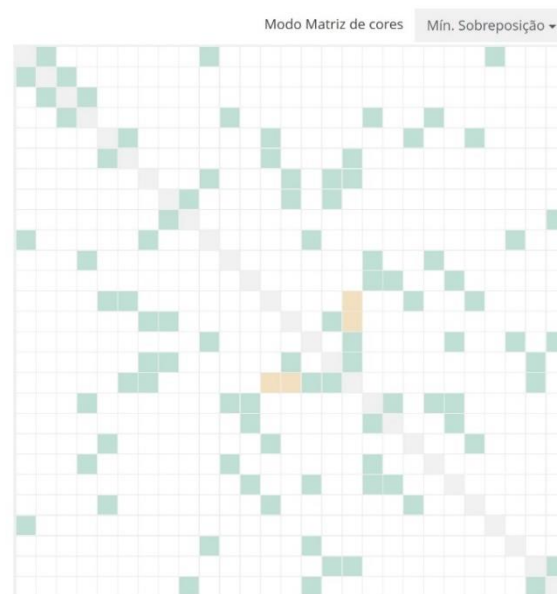


Figura 36. Mínima sobreposição pelo SCENE (19,6%).

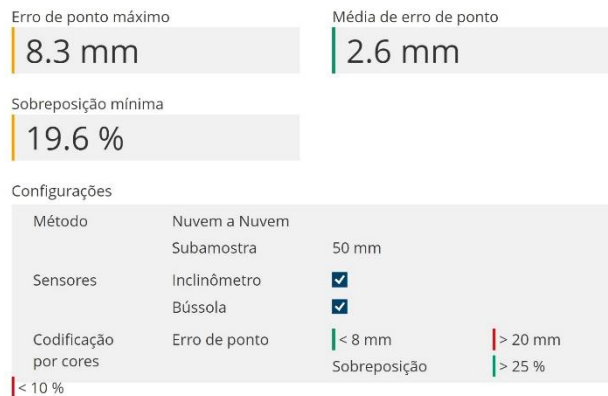


Figura 37. Relatório geral gerado pelo SCENE.

Pode-se observar pelas imagens dispostas acima, valores razoáveis e bons parâmetros. Apesar do alto valor disposto no campo de maior erro, e o baixo valor disposto no campo de sobreposição mínima, os números são agradáveis. Isto se dá principalmente pelo fato de que na grande maioria das uniões, obtivemos excelentes compatibilidades, e, mesmo não sendo valores ótimos, ainda se enquadram a faixa aceitável pelo parâmetro que o *software* nos fornece (erro de ponto até 20mm e sobreposição superior a 25%). Outra forma de se observar este parâmetro de maneira mais sistemática, é fazendo a análise para cada uma das varreduras de forma individual (Tabela 1). Um relatório fornecido pelo *software* contém parâmetros de número de conexões e seus respectivos erros máximos, médios e sobreposição, para cada uma das varreduras.

Tabela 1. Relatório específico de erros obtida pelo SCENE.

Número da Varredura	Conexões	Máx. Erro de ponto [mm]	Média de erro de ponto [mm]	Min. Sobreposição %
1	3	2.6	1.4	41.3
2	2	2.6	1.8	44.9
3	2	3.3	2.1	64.9
4	4	3.3	2.2	64.9
5	4	6.7	3.1	52.6
6	3	6.7	4.6	27.1
7	4	2.1	1.6	34.1
8	3	7.3	6.9	43.4
9	2	<u>8.3</u>	7.4	47.4
10	4	2.5	1.2	39.8
11	3	3.0	1.9	48.0
12	3	1.1	1.1	28.6
13	5	4.5	3.6	<u>24.9</u>
14	4	6.8	3.2	<u>19.6</u>
15	5	3.0	2.2	35.4
16	5	7.3	3.0	39.3
17	7	3.2	2.5	<u>19.6</u>
18	6	3.4	1.8	31.2
19	3	1.3	1.1	34.8
20	3	3.2	2.0	64.1
21	3	3.4	3.0	49.2
22	4	1.7	1.3	28.6
23	3	4.3	2.8	61.5
24	1	0.8	0.8	45.3
25	2	2.5	2.4	35.4
26	3	2.8	2.3	39.9
27	3	<u>8.3</u>	4.4	50.5

Note que a primeira coluna representa a varredura, sendo a captura propriamente dita. A segunda representa a quantidade de ligações que foram feitas com essa varredura, ou seja, com quantas outras varreduras esta foi relacionada na etapa de registro. As outras 3 representam o máximo erro de ponto média de erro de ponto e mínima sobreposição, respectivamente. Os valores indicados sublinhados são os que possuem um pior parâmetro, ou seja, não ótimos. Entretanto, nenhum dos valores apresentados se

enquadrava como ruim, somente como intermediário. Ainda por possuir uma quantidade muito maior de pontos ótimos, se considerou como satisfatório esta etapa e então deu-se seguimento do desenvolvimento do projeto.

4.2.Nuvem de pontos e malha

A etapa de criação da malha se dá após a limpeza da nuvem de pontos. Ambos serão apresentados juntos devido à alta correlação de qualidade entre os formatos. Buscando apresentar a curva de evolução ao longo do projeto, nesta seção serão apresentados resultados dos testes iniciais e intermediários e finais, além de discussões sobre as parciais. Desta maneira é possível analisar algumas decisões intermediárias que foram relevantes para o atual resultado.

4.2.1. Fase 1

Estas foram as primeiras amostras do que foram retirados das digitalizações, sem limpezas de ruídos e entre outros. Deste modo, o que foi efetivamente realizado foi a junção das capturas pelo *software* da FARO, SCENE, e posteriormente convertido para STL, pelo próprio *software*, e ainda exportado para o *Meshmixer*. Este *software* da *Autodesk* possui uma ferramenta automática que busca defeitos na malha e as corrige para garantir que não haja falhas na impressão. As figuras a seguir (Figura 38 e 39) representam estes resultados, parciais.

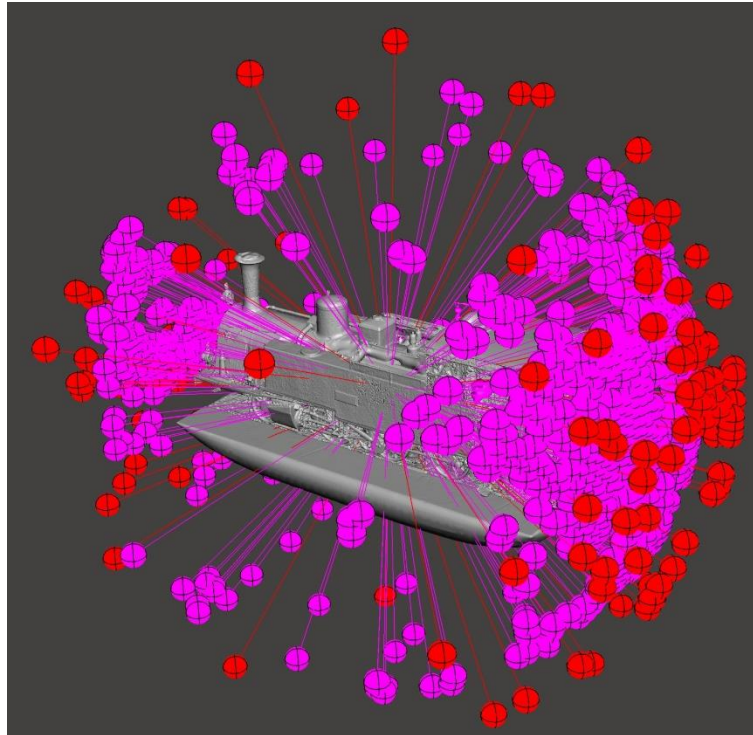


Figura 38. Erros apontados pelo *software meshmixer*.

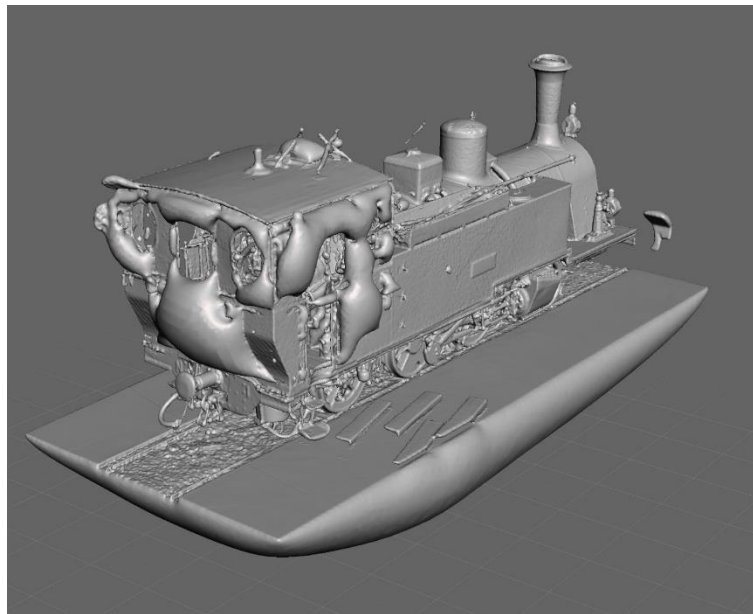


Figura 39. Malha em STL do lado direito do Comboio em sua primeira versão.

É possível observar pela Figura 38 e 38, o que já foi mencionado anteriormente sobre a geração ruidosa da malha quando não tratada em uma versão de nuvem de pontos (Figura 40). Muitos dos locais onde havia uma quantidade de pontos errôneos, ou seja, locais onde existiam pontos que não pertenciam ao objeto, o algoritmo tendeu a englobá-los por uma bolha, para garantir a utilização de “todos” os pontos na geração do STL.



Figura 40. Ruído na nuvem de pontos.

A Figura 40 ilustra bem estes pontos desconexos com o objeto de estudo e possibilitam um melhor entendimento sobre a origem das bolhas geradas na malha. Entretanto, este arquivo ainda não garantia a continuidade necessária para que houvesse uma impressão 3d. Sendo necessária passar pela ferramenta do *Meshmixer* já mencionada anteriormente, “*Make Solid*”. A Figura 41, a seguir, representa o resultado desta ação e torna evidente a perda de qualidade conforme se utiliza uma série de ferramentas em sequência.

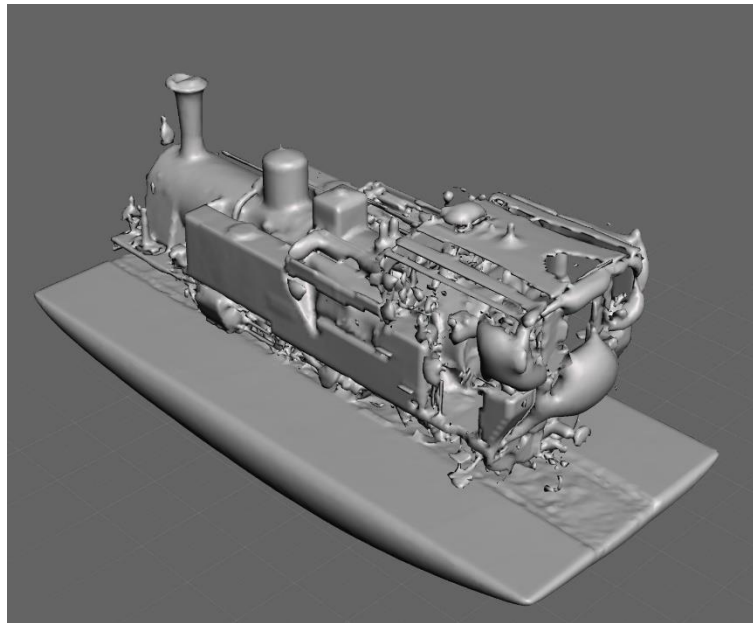


Figura 41. Malha após a utilização do "Make Solid" no Meshmixer.

Dados estes primeiros resultados, ficou claro a necessidade de um trabalho mais elaborado em cada uma das etapas, além de entender melhor como funcionavam as ferramentas utilizadas nos *softwares* e ainda os parâmetros que gerassem um melhor acabamento e resultado final.

4.2.2. Fase 2

Nesta etapa, o primeiro grande passo foi a limpeza cuidadosa da nuvem de pontos (Figura 42). Esta era uma das etapas fundamentais, principalmente devido ao carregamento do erro que acontece com os pontos incoerentes, já demonstrados e explicados anteriormente. Em seguida, houve a criação da malha (Figura 43) e exportação para o *Meshmixer*, lembrando que as duas primeiras etapas são realizadas pelo *software* FARO SCENE. A visualização do arquivo em STL era melhor, portanto, a utilização deste *software* na análise deste resultado parcial.



Figura 42. Nuvem de pontos limpa.

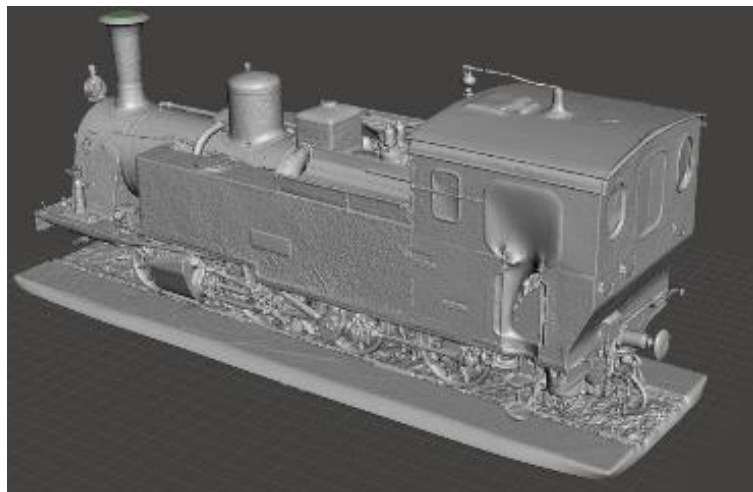


Figura 43. Visualização da malha intermediária no *Meshmixer*.

Pode-se observar, pela Figura 43, a melhora de aspecto da malha triangular. Esta se dá principalmente pelo maior cuidado com a nuvem de pontos e com a realização da exportação de arquivos em partes. Observou-se que a criação da malha em partes permitia um melhor detalhamento, além de possibilitar o trabalho de forma mais fluida. Isso também abriu caminho para a utilização deste arquivo em *softwares* de modelagem 3D, que será explicado mais adiante, uma vez que se pode exportar uma única região da locomotiva e fazer as alterações desejadas sem precisar do processamento do objeto por completo. Outro grande fator que corroborou com esta estratégia foi a utilização do *Recap*

Photo para a suavização de quantidade de triângulos encontrados no modelo. O *software* permite a redução de intercessões sem perda drástica de qualidade, suavizando a carga de processamento do computador.

4.2.3. Fase 3

A partir deste ponto optou-se por utilizar novas estratégias para chegar a uma conclusão do projeto. A principal alteração foi a modelagem externa de algumas das partes da locomotiva, sendo estas: porta, janelas, gradeamento, caixas, apoios de pés e lanternas (Figura 44). Uma abordagem que proporcionasse um melhor entendimento ao tato, do que a vista, foi adotada como estilo de design. Outras mudanças de projeto foram a utilização de diferentes estilos de *setups* para os algoritmos dos *softwares* já discutidos.

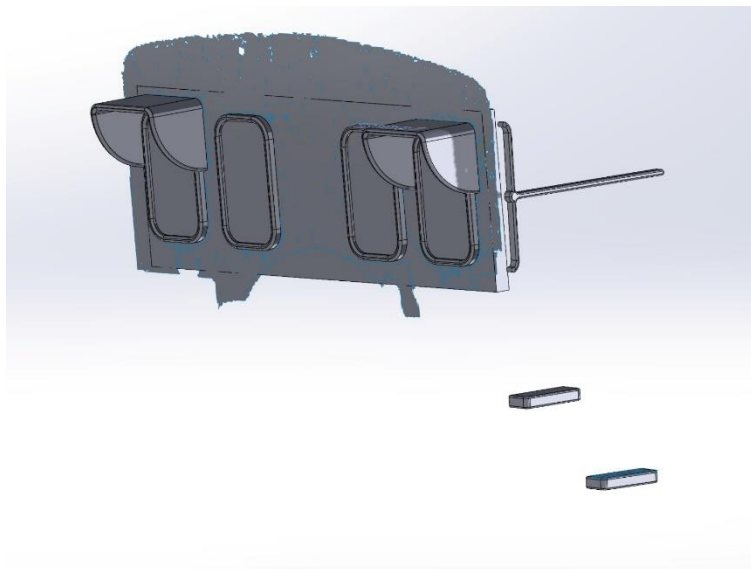


Figura 44. Modelagem externa de elementos da locomotiva.

A figura acima exemplifica alguns dos itens remodelados em *SolidWorks* com base na malha em stl. Para a execução deste passo foram utilizados planos de referência,

retirados da malha, visando proporcionar uma maior precisão nas dimensões. A união de todos as partes foi realizada pelo *software Meshmixer* e posteriormente utilizado a ferramenta “*Make Solid*” (Figura 45).

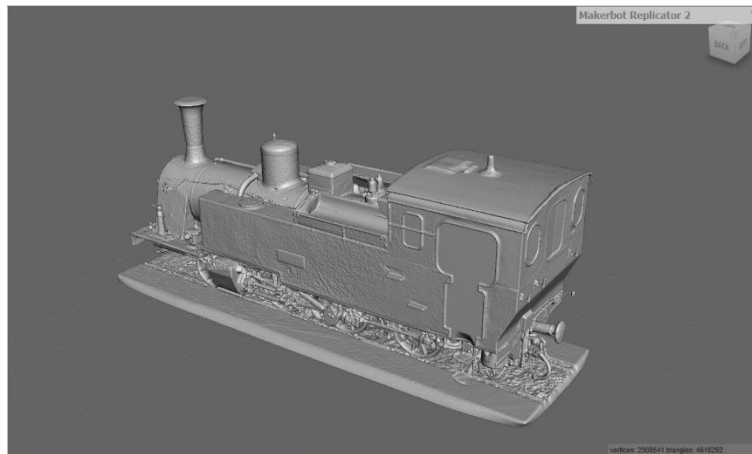


Figura 45. Locomotiva CN1 finalizada.

Nota-se a melhora de aspecto na porta da cabine do maquinista e uma forte melhora nas janelas laterais e traseiras. Tratando-se das janelas laterais, uma grande problemática consistia na dificuldade de interpretação do *software* quanto a barra existente na lateral externa a janela. Os algoritmos de estanqueidade geravam uma forte deformação no local. Posteriormente a união das partes, os parâmetros para utilização da ferramenta “*make solid*” foram as mais precisas possíveis. Essas configurações trouxeram um resultado com grande custo de processamento, mas quem também originou um arquivo muito similar as modelagens e ao stl propriamente dito.

4.2.4. Impressão

Durante o desenvolvimento, duas impressões foram testadas para ter um melhor entendimento de como os parâmetros observados pelos *softwares*, ficariam dispostos em uma impressão propriamente dita. Uma primeira tentativa de impressão foi executada

com um arquivo similar ao visto na Figura 43, porém tentando manter as informações internas a cabine do maquinista. Devido a ideia iniciais do projeto de manter e tentar reconstruir aspectos daquele local, a estratégia adotada inicial foi de manter o espaço interno. Visando analisar a possibilidade de adição de partes representativas do maquinário interno (Figura 46). Outra importante especificação de impressão foi quanto ao sentido, optando por dispor o locomotiva “em pé” para a impressão.

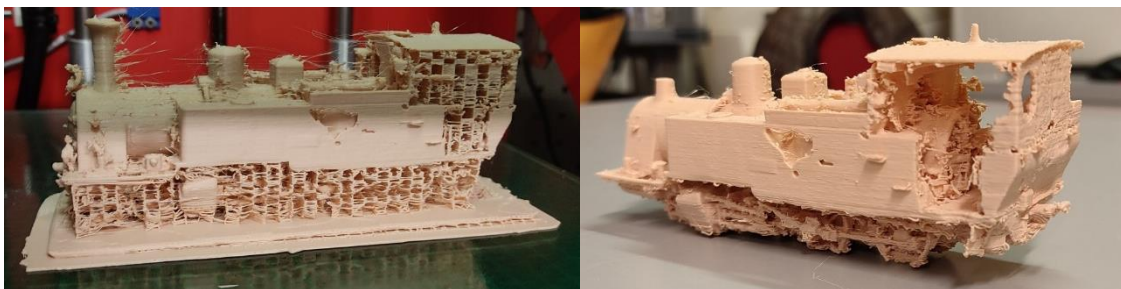


Figura 46. Primeira impressão de teste da locomotiva.

Se tratando de uma primeira abordagem e tentativa de impressão, não esperava ótimas definições e alta qualidade. Analisando a Figura 46, várias observações podem ser feitas e algumas conclusões levadas em considerações. Um primeiro ponto de atenção foi a quantidade de suporte criado.

Devido a opção de se manter um espaço interno na cabine do maquinista, muito suporte foi gerando nesta região e muitos outros detalhes foram afetados ao tentar remover todo ele.

Outra região com problemas similares é identificada na região das rodas e maquinário inferior. O problema de definição se deu tanto pela quantidade de suporte, quanto pela falta de informação desta região no stl.

Algumas alterações de conceito de projeto foram retiradas a partir desta primeira versão da impressão. A principal mudança se deu na decisão de fechar a parte interna a cabine, devido à complexidade e dificuldade de representar os componentes internos com

definições aceitáveis. Observou-se também a fragilidade de alguns detalhes externos. Sendo um projeto que será constantemente tateado, o reforço de algumas partes se mostrou necessária.

Uma segunda tentativa de impressão (Figura 47) sofreu grandes mudanças dois aspectos principais. O primeiro em relação à parte interna, onde fechou-se com uma estrutura simples, evitando os problemas já mencionados e melhorando a percepção tátil dos cegos. O segundo ponto principal se deu na orientação da impressão. Buscando evitar os suportes na região inferior do comboio, decidiu-se fazer a divisão longitudinal da locomotiva e realizar a impressão com este corte deitado. Desta forma, o *software* de fatiamento não necessitou alocar tanto suporte naquela região. De forma geral, quase não houve necessidade de suporte nesta nova configuração.

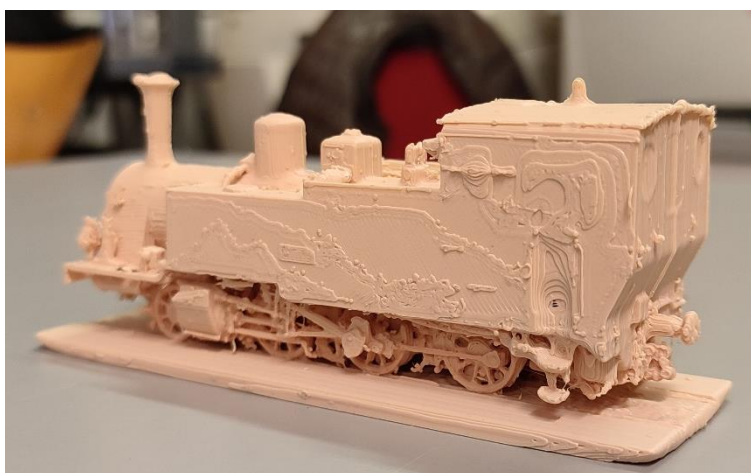


Figura 47. Segunda impressão de teste da locomotiva.

Muitas melhorias são observadas ao analisar a Figura 47. As mudanças mencionadas anteriormente geram bons resultados quanto a acabamento e aspecto. Uma nova observação que pode ser feita é em questão a plataforma abaixo da locomotiva, que supre a problemática da falta de informações do maquinário e auxilia no equilíbrio da estrutura. Vale ressaltar que as impressões, até o momento, não foram realizadas com as melhores configurações de impressão, por serem fase de teste. Seus objetivos são para

auxiliar no entendimento do resultado que as melhorias nos *softwares* impactariam na impressão.

Em uma terceira e última versão de impressão, utilizando o arquivo representado na Figura 45. Buscando aumentar a escala da impressão, para enaltecer os detalhes, uma nova divisão foi realizada, a mesma mostrada na Figura 30. O corte longitudinal se manteve e um novo adicionado, dividindo o comboio em 4 partes (Figura 48). Nesta versão, utilizando a *Ultimaker 3 Extended* e um melhor acabamento superficial foi atingido.

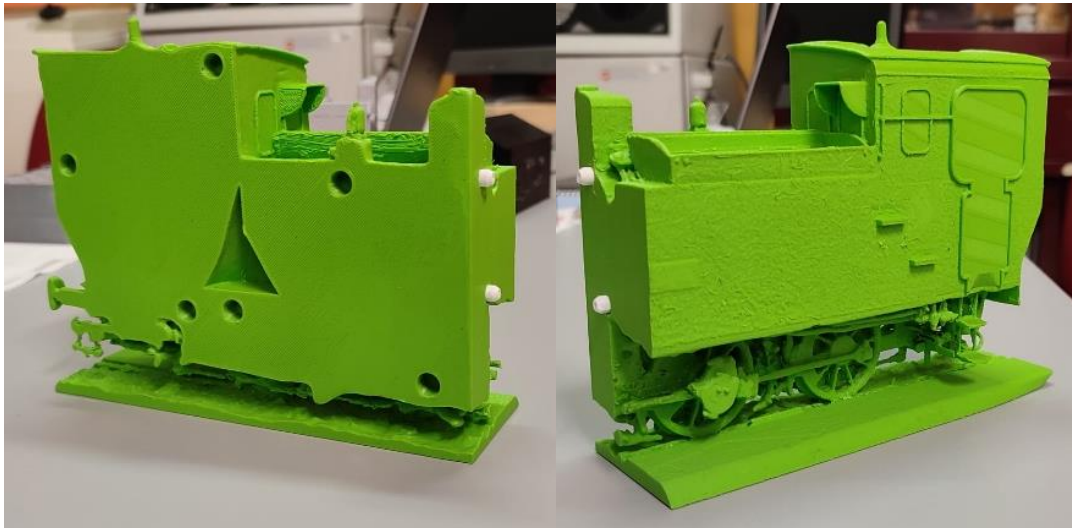


Figura 48. Impressão em partes do comboio.

Nota-se uma melhoria de aspecto grande no acabamento superficial do comboio e o aumento significativo da escala com a estratégia adotada de impressão em 4 partes. Fez-se também a adição de furações que permitissem um encaixe mais preciso no momento de união de todas as partes (Figura 49 e 50).

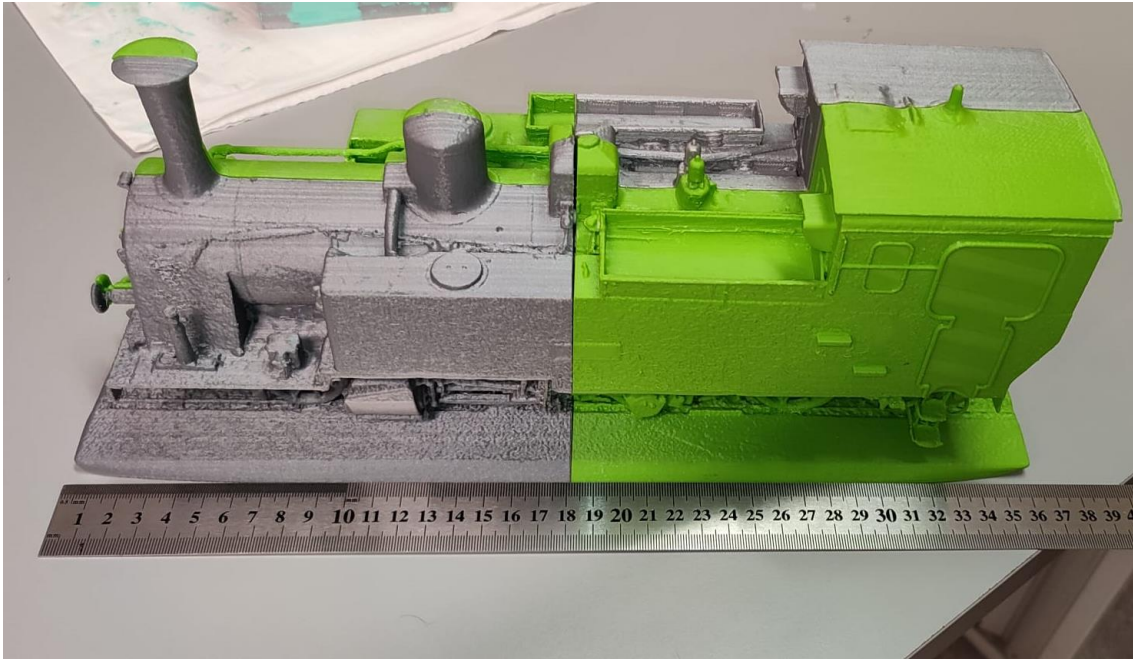


Figura 49. Impressão completa do comboio com medidas de comprimento.

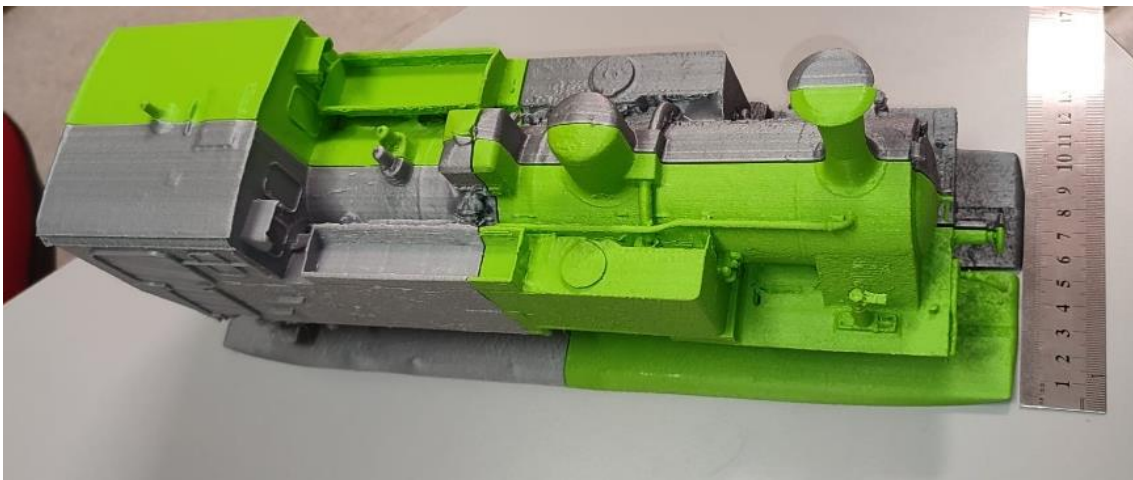


Figura 50. Impressão completa do comboio com medidas de largura.

A utilização de cores diferentes de filamento não impacta no resultado final, uma vez que para a entrega do projeto, tudo estará devidamente colado, corrigido e pintado. Desta maneira, busca-se minimizar defeitos e reduzir o espaçamento entre as partes. Devido a dilatação do material após o resfriamento das peças e margem de erro da

impressão nas dimensões finais, as partes precisam ser trabalhadas para possuir um encaixe mais adequado. Alguns itens menores e mais frágeis acabaram por partir ao longo do processo de limpeza, o que é perfeitamente normal e esperado. Nota-se que as lanternas frontais não estão presentes na impressão. Isto se dá devido a preferência pela modelagem e impressão a parte (Figura 51) para adição na maquete montada.



Figura 51. Lanternas impressas separadamente.

As lanternas foram remodeladas totalmente, considerando as dimensões retiradas pela nuvem de pontos, o que resulta em uma boa semelhança, porém não contém a mesma exatidão que a estrutura completa do comboio. Existem ainda dois modelos, o da esquerda é destinado a parte inferior da região frontal da locomotiva. Já a direita, se encontra sobre o cilindro central, próximo a chaminé.

4.2.5. Custos

Tendo em mento que a produção de grandes objetos por impressão 3D não é tão acessível, buscou-se gerar uma estimativa de valor em termos de uso de maquinário e filamento gasto.

Tabela 2. Relação de peça por fabrico.

Peça	Tempo de impressão (h)	Filamento (g)	Impressora (€/peça)	Filamento (€/peça)
1	21:08	258	211,33	12,27
2	14:30	174	145,00	8,28
3	17:34	227	175,67	10,80
4	14:33	174	145,50	8,28
5	1:04	14	10,67	0,67
6	0:29	6	4,83	0,29
Total	69:18	867	693,00	40,57

As peças estão divididas no seguinte formato:

- Peça 1: Lateral esquerda, parte traseira
- Peça 2: Lateral esquerda, parte frontal
- Peça 3: Lateral direita, parte traseira
- Peça 4: Lateral direita, parte frontal
- Peça 5: Lanterna inferior
- Peça 6: Lanterna superior

Para valores finais de tempo de impressão e material gasto, foram considerados 1 unidade das peças 1, 2, 3, 4 e 6, e 2 unidades da peça 5. Desta maneira, estimamos um total de 69 horas e 18 minutos de impressão e um gasto de 867 gramas de filamento. Vale ressaltar que este seria um gasto mínimo, visto que impressões 3D constantemente falham por vários motivos e sendo necessário repetir, por vez, a mesma impressão.

O custo de trabalho das máquinas de 10 euros por hora para impressões em FDM no FabLab, e técnico de 36,58€/h. O tempo será aproximado para 70h de projeto, devido a precificação ser por hora e, portanto, arredondar para cima o tempo gasto. Desta maneira, chegamos a um valor de 700 euros de tempo de utilização da impressora 3D. O gasto de filamento será estimado. Em quesitos de material, o valor encontrado mais barato para o *Ultimaker Material* PLA foi de 35.67 euros, sem impostos. Por possuir um peso de 750g, necessita-se a contabilização de 2 rolos. Desta maneira, a estimativa de custo de material para o projeto é de 71,34 euros. Na totalidade, temos os custos de impressão e material estimado em 771,34 euros, sem impostos.

Vale ressaltar que este cálculo se enquadra como gasto mínimo necessário. Existem empresas que comercializam a impressão já pronta, entretanto o valor é muito superior. Devido à instabilidade de impressão, ou seja, erros que ocorrem com uma frequência considerável, o valor de venda destas empresas leva em consideração estes contratempos. Sendo assim, o valor de compra é superior a duas vezes o gasto esperado.

Importante lembrar que para a estimativa de custo do projeto, não foi considerada o tempo de mão de obra, custo dos equipamentos, problemas com impressões e entre outros. Desta forma, o valor de 771,34 euros representa somente o gasto de tempo de equipamento e filamento, não sendo considerado o tempo de desenvolvimento do projeto.

5. Conclusão

O presente trabalho apresentou uma das possíveis soluções para o problema, que consistia no desenvolvimento de um caminho para se utilizar as digitalizações 3D na construção de maquetes táteis para cegos. O objetivo foi atingido, uma vez que a maquete foi testada e validada por um grupo de indivíduos cegos, que colaboraram com o projeto.

As limitações de *software* e tempo foram impactantes no resultado. Devido a necessidade de manter o desenvolvimento restrito a *softwares* gratuitos ou com licenças estudantis, não foi possível explorar e experimentar algumas possibilidades. Apesar disto, obteve-se um resultado positivo em termos de resolução final do projeto. A remodelagem de algumas das partes foi de grande importância para os aspectos finais.

Verificou-se que para manter detalhes importantes, era necessário a divisão em partes da impressão, o que gerou uma maquete de proporção 1 para 25 (1:25). Sendo os erros médios das digitalizações observadas no relatório gerado pelo *software* SCENE de 2,6mm, conclui-se que as dimensões do comboio estão bem representadas pela impressão 3D.

Dada a escala e dimensões da impressão, o valor de custo do projeto, de impressora e filamento, de 771,34€ está bem abaixo do valor de mercado. A estimativa conta com o custo de uma impressora 3D em FDM e filamento PLA, porém, não enquadra o tempo de mão de obra do desenvolvimento, manutenção de equipamento, colagem e pintura.

Outras ferramentas e alguns *softwares* gratuitos poderosos não foram explorados como deveriam. Ainda há uma boa margem para entender melhor o funcionamento deles e buscar uma maestria quanto a maneiras de repassar as características físicas do objeto para a maquete. Os softwares SCENE, *solidworks*, *meshmixer* e *recap photo* formaram uma boa combinação em termos de curva de aprendizagem e qualidade de projeto.

Pelo fato de a impressão ter a finalidade de ser tocada e manuseada constantemente, foram tomadas decisões de reforçar partes mais sensíveis. Partes pequenas ou finas serão rompidas rapidamente se não adaptadas.

Muitos outros objetos podem passar pelo mesmo desenvolvimento que o comboio e os outros itens do projeto estão passando. A possibilidade de registrar de forma tridimensional e digital um objeto, mantendo suas características, possui inúmeras utilidades. A realidade virtual é uma das grandes promessas para um futuro próximo e estas técnicas de digitalização tendem a crescer cada vez mais com estes avanços tecnológicos.

A utilização destes arquivos para a criação de uma miniatura 3D é extremamente útil em termos de possibilitar o acesso de pessoas a outras culturas. Miniaturas artesanais de monumentos históricos sempre foram vendidas como souvenirs, entretanto, a miniatura de uma digitalização 3D repassa muito do histórico que o monumento carrega, como esta maquete.

6. Referências

- [1] Agência Europeia para o Desenvolvimento da Educação Especial, *Tecnologias de Informações e Comunicação para a Inclusão*. 2013. [Online]. Available: <http://www.european-agency.org/country-information>
- [2] Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, “NORTE2020,” 2020.
- [3] Diário da República Eletrônica, “Anúncio de procedimento n.º 8739/2021, de 6 de julho,” *Diário da República Eletrônica*, Jul. 2021. <https://dre.pt/dre/detalhe/anuncio-procedimento/8739-2021-166488565> (accessed Apr. 18, 2023).
- [4] K. Y. Piacentini, H. C. L. Carvalho, J. Santos, and J. Rocha, “Digitalização e impressão 3D da locomotiva CN1 do Museu Nacional Ferroviário de Bragança desenvolvido com base na metodologia STEAM,” 2023.
- [5] H. Carvalho, K. Piacentini, J. Santos, and J. Rocha, “Metodologia STEAM aplicada à digitalização de edifícios históricos em Bragança: uma nova abordagem,” 2023.
- [6] Q. Wang and M. K. Kim, “Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteen-year review from 2004 to 2018,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 39. Elsevier Ltd, pp. 306–319, Jan. 01, 2019. doi: 10.1016/j.aei.2019.02.007.
- [7] L. Barazzetti, “Parametric as-built model generation of complex shapes from point clouds,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 30, no. 3, pp. 298–311, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.aei.2016.03.005.
- [8] M. F. Falah, S. Sukaridhoto, M. U. H. Al Rasyid, and H. Wicaksono, “Design of virtual engineering and digital twin platform as implementation of cyber-physical

- systems,” in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2020, pp. 331–336. doi: 10.1016/j.promfg.2020.11.055.
- [9] E. H. P. Utama, D. K. Basuki, and S. Sukaridhoto, “3D Asset for Web-based Virtual Engineering Platform as Implementation of Industry 4.0,” in *3rd International Conference on Applied Science and Technology, iCAST 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020, pp. 640–645. doi: 10.1109/iCAST51016.2020.9557636.
- [10] C. Thomson, G. Apostolopoulos, D. Backes, and J. Boehm, “Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling,” in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Copernicus GmbH, Oct. 2013, pp. 289–293. doi: 10.5194/isprsannals-II-5-W2-289-2013.
- [11] A. Bolaños-Mora, M. C. Fillmann, and F. Pinto da Silva, “Tecnologia 3D para ações de salvaguarda do patrimônio cultural: estudo de caso, reprodução das calçadas em mosaico à portuguesa de Porto Alegre (Brasil) em chocolate,” *Apuntes. Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, vol. 33, Apr. 2021, doi: 10.11144/Javeriana.apu33.tasp.
- [12] Y. Praticò, J. Ochsendorf, S. Holzer, and R. J. Flatt, “Post-fire restoration of historic buildings and implications for Notre-Dame de Paris,” *Nat Mater*, vol. 19, no. 8, pp. 817–820, Aug. 2020, doi: 10.1038/s41563-020-0748-y.
- [13] I. Špelić and S. Petrak, “Complexity of 3D human body scan data modelling,” *TEKSTILEC*, vol. 61, no. 4, pp. 235–244, Dec. 2018, doi: 10.14502/Tekstilec2018.61.235-244.
- [14] A. Garcia, C. Mineiro, and J. Neves, *Guia de Boas Práticas de Acessibilidade Comunicação Inclusiva em Monumentos, Palácios e Museus*. 2017.
- [15] H. Fischer, “Só é Acessível Se der Para Entender,” *Acessibilidade cultural : atravessando fronteiras*, 2020.

- [16] Touch Graphics INC, “T3 Tactile Tablet.” <https://www.touchgraphics.com/education/t3> (accessed Jul. 02, 2023).
- [17] “hi-Storia.” <https://www.hi-storia.it> (accessed Jun. 06, 2023).
- [18] “3D Photo Works.” <https://3dphotoworks.com> (accessed Jun. 06, 2023).
- [19] V. Rossetti, F. Furfari, B. Leporini, S. Pelagatti, and A. Quarta, “Enabling Access to Cultural Heritage for the visually impaired: An Interactive 3D model of a Cultural Site,” in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2018, pp. 383–391. doi: 10.1016/j.procs.2018.04.057.
- [20] G. De Bem and R. Trevisan Pupo, “Parâmetros de Fabricação de Símbolos para Mapas Táteis,” *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 71, no. 4, pp. 983–1013, Dec. 2019, doi: 10.14393/rbcv71n4-50377.
- [21] W. Boehler and A. Marbs, “3D Scanning Instruments,” 2003.
- [22] G. Taubin, D. Moreno, and D. Lanman, “The Laser Slit 3D Scanner,” 2014. <http://mesh.brown.edu/desktop3dscan/ch4-slit.html> (accessed Jun. 15, 2023).
- [23] R. Rodríguez Elizalde, “Aplicación de Drones Para Control de Ejecución de Obras Civiles,” 2021. https://www.mapa.gob.es/images/es/ponencia11_tcm30-563595.pdf (accessed Jul. 02, 2023).
- [24] V. Carlota, “Laser Scanner vs Structured Light Scanner: which should you choose?,” 2019. <https://www.3dnatives.com/en/laser-3d-scanner-vs-structured-light-3d-scanner-080820194/#!> (accessed Jun. 19, 2023).
- [25] FARO, “FARO® Quantum Max ScanArms.” <https://www.faro.com/en/Products/Hardware/ScanArms> (accessed Jun. 16, 2023).
- [26] P. R. Wolf, B. A. Dewitt, and B. E. Wilkinson, *Elements of photogrammetry with application in GIS*, McGraw-Hill. 2014.

- [27] F. N. Sekarsih, A. Mustopa, and Kusnawi, “Nglanggeran 3D Modelling for Virtual Reality Asset with Oblique Close Range Photogrammetry,” in *ICOIACT 2022 - 5th International Conference on Information and Communications Technology: A New Way to Make AI Useful for Everyone in the New Normal Era, Proceeding*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 232–237. doi: 10.1109/ICOIACT55506.2022.9972014.
- [28] S. Jiang, W. Wang, and W. Qin, “Application of Digital Close-range Photogrammetry Based on Hydrodynamic Model in Deformation Measurement of Model Test,” in *2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*, 2020, pp. 1038–1040. doi: 10.1109/ICPICS50287.2020.9202291.
- [29] M. Daneshmand *et al.*, “3D Scanning: A Comprehensive Survey,” Jan. 2018, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1801.08863>
- [30] S. G. Afrouz, M. R. Razavi, A. Pourkand, and C. M. DiasWilson, “Dynamic displacement of an aluminum frame using close range photogrammetry,” *Buildings*, vol. 9, no. 8, Aug. 2019, doi: 10.3390/buildings9080176.
- [31] V. Triantafyllou, K. I. Kotsopoulos, D. Tsolis, and D. Tsoukalos, “Practical Techniques for Aerial Photogrammetry, Polygon Reduction and Aerial 360 Photography for Cultural Heritage Preservation in AR and VR Applications,” in *13th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications, IISA 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/IISA56318.2022.9904357.
- [32] R. Roncella, G. Forlani, M. Fornari, and F. Diotri, “Landslide monitoring by fixed-base terrestrial stereo-photogrammetry,” in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Copernicus GmbH, May 2014, pp. 297–304. doi: 10.5194/isprsannals-II-5-297-2014.

- [33] P. Corradeghini, “Diy Outdoor Terrestrial Photogrammetry,” 2020. <https://metricaltalks.com/diy-outdoor-photogrammetry/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [34] S. Takao, T. Kita, and T. Hirabayashi, “Towards Reconstruction of 3D Geometry of Underwater Rubble Mounds via Structure from Motion,” in *2023 IEEE International Symposium on Underwater Technology, UT 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/UT49729.2023.10103396.
- [35] E. Nissen, “Structure-from-Motion.” 2010.
- [36] FARO, “Focus Premium Laser Scanner User Manual,” *FARO*, 2022.
- [37] J. Assumpção and A. Cuperschmid, “O Uso de 3D Laser Scanner Como Método de Documentação do Patrimônio Cultural Construído Para Sua Salvaguarda,” 2019.
- [38] T. Raj, F. H. Hashim, A. B. Huddin, M. F. Ibrahim, and A. Hussain, “A survey on LiDAR scanning mechanisms,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 5. MDPI AG, May 01, 2020. doi: 10.3390/electronics9050741.
- [39] Z. Wang, “Review of real-time three-dimensional shape measurement techniques,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 156. Elsevier B.V., May 01, 2020. doi: 10.1016/j.measurement.2020.107624.
- [40] Z. Wang, “Review of real-time three-dimensional shape measurement techniques,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 156. Elsevier B.V., May 01, 2020. doi: 10.1016/j.measurement.2020.107624.
- [41] D. Rodrigues De Moraes, “Simultaneous Localization and Mapping for Mobile Wheeled Robotic Vehicles,” Faculdade de Engenharia universidade do Porto, Porto, 2021.
- [42] GeoSLAM, “The ultimate mobile mapping solution.” <https://geoslam.com/solutions/zeb-horizon/> (accessed Jun. 16, 2023).

- [43] Z. Zhang, J. Li, Y. Guo, C. Yang, and C. Wang, “3D Highway Curve Reconstruction from Mobile Laser Scanning Point Clouds,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 11, pp. 4762–4772, Nov. 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2946259.
- [44] H. Wang *et al.*, “Automatic road extraction from mobile laser scanning data,” in *Proceedings of International Conference on Computer Vision in Remote Sensing, CVRS 2012*, 2012, pp. 136–139. doi: 10.1109/CVRS.2012.6421248.
- [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. IEEE Computer Society, pp. 4338–4364, Dec. 01, 2021. doi: 10.1109/TPAMI.2020.3005434.
- [46] S. A. Bello, S. Yu, C. Wang, J. M. Adam, and J. Li, “Review: Deep learning on 3D point clouds,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 11. MDPI AG, Jun. 01, 2020. doi: 10.3390/rs12111729.
- [47] W. E. Lorensen and H. E. Cline, “Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm,” in *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, USA: ACM, Aug. 1987, pp. 163–169. doi: 10.1145/37401.37422.
- [48] D. F. Watson, “Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes,” *Comput J*, vol. 24, no. 2, pp. 167–172, Feb. 1981, doi: 10.1093/comjnl/24.2.167.
- [49] M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe, “Poisson Surface Reconstruction,” in *Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing*, in SGP '06. Goslar, DEU: Eurographics Association, 2006, pp. 61–70.
- [50] N. Volpato, *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. Editora Blucher, 2021.

- [51] San Davies, “Invention, optimism & realism: The back story of SLS 3D printing with Dr Joe Beaman,” *3D Printing & Additive Manufacturing Intelligence*, Feb. 17, 2020. <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/back-story-sls-3d-printing-dr-joe-beaman/> (accessed Jul. 02, 2023).
- [52] K. V. Wong and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, pp. 1–10, Aug. 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [53] Marfin, “Conheça 8 tipos de impressão 3D e suas aplicações,” *Produteca LAB*, Mar. 02, 2022. <https://produtecalab.com.br/tipos-de-impressao-3d/> (accessed Jul. 02, 2023).
- [54] RICOH, “Fused Deposition Modelling.” <https://rapidfab.ricoh-europe.com/technologies/fused-deposition-modelling/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [55] 3DLAB, “PLA: tudo o que você precisa saber sobre o filamento PLA.” <https://3dlab.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamento-pla/> (accessed Jun. 09, 2023).
- [56] UNSW Making, “3D Printing with SLA Resin Printers.” <https://www.making.unsw.edu.au/learn/3d-printing-with-sla-resin-printers/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [57] HUBS, “What is SLS 3D printing?” <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [58] B. Palumbo, F. Del Re, M. Martorelli, A. Lanzotti, and P. Corrado, “Tensile Properties Characterization of AlSi10Mg Parts Produced by Direct Metal Laser Sintering via Nested Effects Modeling,” *Materials*, vol. 10, no. 2, p. 144, Feb. 2017, doi: 10.3390/ma10020144.

- [59] AdditiveManufacturing, “AM_EBDM_Illustration.”
https://additivemanufacturing.com/wp-content/uploads/2015/08/AM_EBDM_Illustration.jpg (accessed Jun. 16, 2023).
- [60] P. Patpatiya, A. Shastri, S. Sharma, K. Chaudhary, and V. Bhatnagar, “ANN-predictive modeling and GA-optimization for minimizing dimensional tolerance in Polyjet Additive Manufacturing,” *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 38, pp. 320–339, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.cirpj.2022.05.004.
- [61] FARO, “SCENE User Manual,” 2020.
- [62] DEVELOP 3D, “Review: Ultimaker 3 Extended.”
<https://develop3d.com/reviews/review-ultimaker-3-extended-3d-printing/#:~:text=The%20Ultimaker%203%20is%20a,and%20the%20wider%20filament%20market.> (accessed Jun. 11, 2023).
- [63] Ultimaker, “Ultimaker 3 safety and compliance.”
<https://support.makerbot.com/s/article/1667337600353> (accessed Jun. 11, 2023).
- [64] Ultimaker, “Technical data sheet PLA,” 2018.

Anexo I – Relatório de registros do *software* SCENE

Relatório de registro

Projeto	Comboio
Grupo	Scans
Período de gravação	21/10/2022 10:53:47 - 11/01/2023 12:57:45
Localização	
Data do relatório	19/06/2023 17:10:11

Codificação por cores

Erro de ponto	< 8 mm	> 20 mm
Sobreposição	> 25.0 %	< 10.0 %

Visão geral

Estatísticas do ponto de varredura

Erro de ponto máximo	8.3 mm
Média de erro de ponto	2.6 mm
Sobreposição mínima	19.6 %

Erros da varredura

Estatísticas do ponto de varredura

Cluster/Varredura	Conexões	Máx. Erro de ponto [mm]	Média de erro de ponto [mm]	Mín. Sobreposição
FARO_Scan_063	1	0.8	0.8	45.3 %
FARO_Scan_064	2	2.5	2.4	35.4 %
FARO_Scan_065	3	2.8	2.3	39.9 %
FARO_Scan_066	3	8.3	4.4	50.5 %
FARO_Scan_015	3	2.6	1.4	41.3 %
FARO_Scan_016	2	2.6	1.8	44.9 %
FARO_Scan_017	2	3.3	2.1	64.9 %
FARO_Scan_018	4	3.3	2.2	64.9 %
FARO_Scan_019	4	6.7	3.1	52.6 %
FARO_Scan_020	3	6.7	4.6	27.1 %
FARO_Scan_021	4	2.1	1.6	34.1 %
FARO_Scan_022	3	7.3	6.9	43.4 %
FARO_Scan_023	2	8.3	7.4	47.4 %
FARO_Scan_024	4	2.5	1.2	39.8 %
FARO_Scan_025	3	3.0	1.9	48.0 %
FARO_Scan_026	3	1.1	1.1	28.6 %
FARO_Scan_027	5	4.5	3.6	24.9 %
FARO_Scan_029	4	6.8	3.2	19.6 %
FARO_Scan_032	5	3.0	2.2	35.4 %
FARO_Scan_035	5	7.3	3.0	39.3 %
FARO_Scan_036	7	3.2	2.5	19.6 %
FARO_Scan_038	6	3.4	1.8	31.2 %
FARO_Scan_039	3	1.3	1.1	34.8 %
FARO_Scan_040	3	3.2	2.0	64.1 %
FARO_Scan_041	3	3.4	3.0	49.2 %
FARO_Scan_042	4	1.7	1.3	28.6 %
FARO_Scan_043	3	4.3	2.8	61.5 %

Erros detalhados

Estatísticas do ponto de varredura

Cluster/Varredura 1	Cluster/Varredura 2	Erro de ponto [mm]	Sobreposição
FARO_Scan_064	FARO_Scan_032	2.4	35.4 %
FARO_Scan_064	FARO_Scan_024	2.5	59.2 %
FARO_Scan_066	FARO_Scan_065	1.9	58.8 %
FARO_Scan_015	FARO_Scan_063	0.8	45.3 %
FARO_Scan_015	FARO_Scan_024	0.7	41.3 %
FARO_Scan_016	FARO_Scan_015	2.6	44.9 %
FARO_Scan_016	FARO_Scan_017	0.9	72.1 %
FARO_Scan_018	FARO_Scan_017	3.3	64.9 %
FARO_Scan_018	FARO_Scan_038	2.1	80.9 %
FARO_Scan_018	FARO_Scan_025	0.8	66.6 %
FARO_Scan_018	FARO_Scan_041	2.7	81.6 %
FARO_Scan_019	FARO_Scan_043	2.1	61.5 %
FARO_Scan_019	FARO_Scan_020	6.7	52.6 %
FARO_Scan_019	FARO_Scan_040	0.9	64.1 %
FARO_Scan_019	FARO_Scan_027	2.7	58.2 %
FARO_Scan_020	FARO_Scan_027	4.5	57.0 %
FARO_Scan_021	FARO_Scan_029	2.1	44.2 %
FARO_Scan_021	FARO_Scan_024	0.8	39.8 %
FARO_Scan_021	FARO_Scan_035	1.3	39.3 %
FARO_Scan_022	FARO_Scan_035	7.3	43.4 %
FARO_Scan_023	FARO_Scan_066	8.3	50.5 %
FARO_Scan_023	FARO_Scan_022	6.6	47.4 %
FARO_Scan_025	FARO_Scan_041	3.0	49.2 %
FARO_Scan_026	FARO_Scan_038	1.0	56.6 %
FARO_Scan_026	FARO_Scan_039	1.1	34.8 %
FARO_Scan_026	FARO_Scan_042	1.0	28.6 %
FARO_Scan_029	FARO_Scan_022	6.8	66.3 %
FARO_Scan_029	FARO_Scan_035	1.4	45.7 %
FARO_Scan_032	FARO_Scan_066	3.0	68.4 %
FARO_Scan_032	FARO_Scan_024	1.0	59.7 %
FARO_Scan_032	FARO_Scan_036	3.0	61.4 %
FARO_Scan_032	FARO_Scan_042	1.7	57.6 %
FARO_Scan_035	FARO_Scan_065	2.8	56.7 %
FARO_Scan_036	FARO_Scan_065	2.1	39.9 %
FARO_Scan_036	FARO_Scan_020	2.6	27.1 %
FARO_Scan_036	FARO_Scan_021	2.1	34.1 %
FARO_Scan_036	FARO_Scan_027	3.2	24.9 %
FARO_Scan_036	FARO_Scan_029	2.6	19.6 %
FARO_Scan_036	FARO_Scan_035	2.3	44.0 %

FARO_Scan_038	FARO_Scan_025	1.8	48.0 %
FARO_Scan_038	FARO_Scan_041	3.4	81.1 %
FARO_Scan_038	FARO_Scan_039	1.3	44.8 %
FARO_Scan_038	FARO_Scan_042	1.4	31.2 %
FARO_Scan_040	FARO_Scan_027	3.2	65.2 %
FARO_Scan_040	FARO_Scan_043	2.0	83.4 %
FARO_Scan_042	FARO_Scan_039	0.9	83.9 %
FARO_Scan_043	FARO_Scan_027	4.3	73.5 %

Incompatibilidades de inclinômetro

Cluster/Varredura	Varredura	Incompatibilidade [deg]
FARO_Scan_064	FARO_Scan_064	0.0412
FARO_Scan_018	FARO_Scan_018	0.0713
FARO_Scan_026	FARO_Scan_026	0.0136
FARO_Scan_038	FARO_Scan_038	0.0131
FARO_Scan_016	FARO_Scan_016	0.0055
FARO_Scan_019	FARO_Scan_019	0.0626
FARO_Scan_032	FARO_Scan_032	0.0217
FARO_Scan_036	FARO_Scan_036	0.0403
FARO_Scan_020	FARO_Scan_020	0.0641
FARO_Scan_021	FARO_Scan_021	0.0293
FARO_Scan_023	FARO_Scan_023	0.2516
FARO_Scan_042	FARO_Scan_042	0.0091
FARO_Scan_017	FARO_Scan_017	0.0055
FARO_Scan_029	FARO_Scan_029	0.0108
FARO_Scan_025	FARO_Scan_025	0.0699
FARO_Scan_040	FARO_Scan_040	0.0686
FARO_Scan_022	FARO_Scan_022	0.1460
FARO_Scan_066	FARO_Scan_066	0.0592
FARO_Scan_039	FARO_Scan_039	0.0074
FARO_Scan_035	FARO_Scan_035	0.0271
FARO_Scan_043	FARO_Scan_043	0.0914
FARO_Scan_015	FARO_Scan_015	0.0125
FARO_Scan_024	FARO_Scan_024	0.0157
FARO_Scan_027	FARO_Scan_027	0.0180
FARO_Scan_041	FARO_Scan_041	0.1355
FARO_Scan_063	FARO_Scan_063	0.0057
FARO_Scan_065	FARO_Scan_065	0.0379