

GUILHERME ANDRIANI LEANDRO

**AVALIAÇÃO DE PEÇAS EM UM VEÍCULO DE
FORMULA SAE ATRAVÉS DE ESCANEAMENTO
3D DE BAIXO CUSTO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2023

GUILHERME ANDRIANI LEANDRO

**AVALIAÇÃO DE PEÇAS EM UM VEÍCULO DE
FORMULA SAE ATRAVÉS DE ESCANEAMENTO
3D DE BAIXO CUSTO**

Projeto de fim de Curso
apresentado ao Curso de graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
**BACHAREL em ENGENHARIA
MECÂNICA.**

Área de concentração: Projeto e
fabricação mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre
Zuquete Guarato.

Prof. Dr. Luiz Eduardo dos
Santos Paes.

Prof. Dr. Pedro Augusto Queiroz
de Assis.

UBERLÂNDIA – MG

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família, principalmente meus pais por me auxiliarem ao longo desse caminho de graduação. Aos meus colegas e amigos na universidade.

Ao professor Dr. Alexandre Zuquete Guarato, orientador deste trabalho, também à professora Dr. Núbia dos Santos Saad, coordenadora do Curso de graduação em Engenharia Mecânica.

Por fim, para a Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), vinculada a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), que me proporcionou condições de estudo ao longo dos anos.

RESUMO

O escaneamento 3D é um método moderno que pode ser utilizado para auxiliar na avaliação de projetos por engenheiros, como complementação de engenharia reversa de projetos terceiros construídos ou para medir diferenças nas dimensões entre o componente projetado e o fabricado posteriormente. Entretanto, dispositivos comerciais possuem custo financeiro elevado para a realidade da maioria dos estudantes universitários brasileiros (tanto pelo *hardware* quanto pelo *software*), restringindo seu uso para setores profissionais fora da alçada de projetos universitários de orçamento restrito como no caso de projetos SAE (do tipo *Formula*, *Baja* ou *Aerodesign*), que acabam não se beneficiando da utilização do escaneamento tridimensional para avaliar seus projetos ou montagens. Para elaborar uma possível solução, este trabalho propõe o uso do Kinect como uma opção de baixo custo. Para isso, foi realizada uma comparação entre as dimensões obtidas de duas peças fabricadas pela equipe, e seus valores correspondentes em um desenho digitalizado pelo Kinect do mesmo item. Os resultados obtidos mostraram uma média de erro porcentual em torno de 2,55% a 4,36%, nos componentes analisados, mas tendo pontos onde o erro chegou a 19,94% (entre medida real e sua imagem escaneada), mostrando que o equipamento não pode ser considerado preciso o suficiente para se obter um resultado satisfatório (na margem de 0,1 mm) para finalidades mais importantes. Como conclusão, o scanner 3D utilizado se mostrou inadequado às exigências deste projeto e é preciso testar outros sensores para encontrar um ponto de equilíbrio entre custo e benefício em função de cada aplicação, como por exemplo, programas para smartphones, que podem fornecer uma proposta de baixo custo e resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Escaneamento 3D; Kinect; Formula SAE; Baixo Custo;

ABSTRACT

3D scanning is a modern method that can be used to assist in the evaluation of projects by engineers, as a complement of reverse engineering of third-party built projects or to measure differences in dimensions between the designed and the manufactured component. However, commercial devices have high financial cost for the reality of most Brazilian university students (both hardware and software), restricting its use for professional sectors outside the scope of university projects with restricted budget as in the case of SAE projects (Formula, Baja or Aerodesign type), which end up not benefiting from the use of 3D scanning to evaluate their projects or assemblies. To elaborate a possible solution, this work proposes the use of Kinect as a low-cost option. For this, a comparison was made between the dimensions obtained from two parts manufactured by the team, and their corresponding values in a drawing scanned by Kinect of the same item. The results obtained showed an average percentage error around 2.55% to 4.36%, in the analyzed components, but having points where the error reached 19.94% (between the real measure and its scanned image), showing that the equipment cannot be considered accurate enough to obtain a satisfactory result (in the margin of 0.1 mm) for more important purposes. As a conclusion, the 3D scanner used proved inadequate to the requirements of this project and it is necessary to test other sensors to find a balance point between cost and benefit in function of each application, as for example, programs for smartphones, which can provide a low-cost proposal and satisfactory answers.

Keywords: 3D scanning; Kinect; Formula SAE; Low cost;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Carro da equipe austríaca Tu Graz Racing Team, (Álbum FSAE Michigan, 2019).....	10
Figura 1.2 – Equipe UFU Racing em sua primeira competição disputada, (BARBOSA, 2018).....	12
Figura 2.1 – Etapa de “Tilt Test” realizada durante a inspeção na competição, (Álbum FSAE Lincoln, 2018).	17
Figura 2.2 – Digitalização 3D de um motor Suzuki GSX-R600, (LORINCZ, 2018).....	18
Figura 2.3 – Vista esquematizada das partes internas do Kinect, (adaptado de SOUSA, 2015).....	20
Figura 2.4 – Comparação dos tipos analisados: com a relação do laser de ponto fixo para o laser móvel (a) e a do laser de ponto fixo para a fotogrametria (b), (SILVA; SALVALAIO; KINDLEIN, 2011).....	23
Figura 2.5 – Imagem infravermelha projetada (a) com os dados obtidos de profundidade, (KHOSHELHAM; ELBERINK, 2012).	24
Figura 2.6 – Relação gráfica entre a disparidade obtida, com a profundidade relativa, (KHOSHELHAM; ELBERINK, 2012).....	24
Figura 2.7 - Fatores determinantes na seleção de um scanner móvel, (adaptado de CUYPERS et al., 2009).	26
Figura 2.8 – Foto do pistão a ser escaneado, (GUARATO et al., 2016).	27
Figura 2.9 – Escaneamento grosseiro do pistão, (GUARATO et al., 2016).	27
Figura 2.10 – Reconstrução da superfície do pistão, por engenharia reversa, (GUARATO et al., 2016).	28
Figura 2.11 – Visão do processo adotado, desde a captura do objeto físico até a reconstrução do modelo 3D, (BORGES, 2013).....	30
Figura 3.1 – Base giratória utilizada para o escaneamento, (LEANDRO, 2023).	31
Figura 4.1 – Coletor de admissão usado no formula, (LEANDRO, 2023)..	33
Figura 4.2 – Tanque de combustível utilizado, (LEANDRO, 2023).	34
Figura 4.3 – Paquímetro utilizado, (LEANDRO, 2023).	35
Figura 4.4 – Tela inicial do Skanect, (LEANDRO, 2023)	36

Figura 4.5 – Etapa de escaneamento no Skanect., (LEANDRO, 2023)	37
Figura 4.6 – Telas de processos e compartilhamento do Skanect., (LEANDRO, 2023)	37
Figura 4.7 – Configuração de posições para o ReconstructMe, (LEANDRO, 2023)	39
Figura 4.8 – Temporizador do ReconstructMe, (LEANDRO, 2023).....	40
Figura 4.9 – Configurações de dispositivo e superfície do ReconstructMe, (LEANDRO, 2023).....	41
Figura 4.10 – Medidas estudadas no coletor de admissão, (LEANDRO, 2023).	42
Figura 4.11 – Medidas estudadas no tanque de combustível, (LEANDRO, 2023).	42
Figura 5.1 – Reconstrução de imagem pelo Skanect, (LEANDRO, 2023).	43
Figura 5.2 – Imagem scaneada sem a reconstrução da malha, (LEANDRO, 2023).	43
Figura 5.3 – Tanque de combustível, usando o Skanect e exportado para o Autodesk Inventor, (LEANDRO, 2023).	44
Figura 5.4 – Pontos de erro no tanque de combustível, usando o Skanect, (LEANDRO, 2023).	45
Figura 5.5 – Objeto 3D reconstruído e visualizado no Skanect, (LEANDRO, 2023).	45
Figura 5.6 – Comparação das fixações por parafuso, entre a peça real e a malha digitalizada, (LEANDRO, 2023).	46
Figura 5.7 – Planificação da malha em faces no Autodesk Inventor, (LEANDRO, 2023).	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Seção F.3.4.1 do regulamento sobre diâmetro mínimo dos tubos permitidos no chassi, (Formula SAE Rules, 2020).	14
Tabela 2.2 – Pontuação dos eventos estáticos da competição, (Formula SAE Rules, 2020).	15
Tabela 2.3 – Pontuação dos eventos dinâmicos da competição, (Formula SAE Rules, 2020).	16
Tabela 2.4 – Características técnicas de operação da versão inicial do Kinect, (SOUSA, 2015).	21
Tabela 2.5 – Resultados obtido, comparando a fotogrametria com a digitalização a laser, (SILVA; SALVALAIO; KINDLEIN, 2011).	22
Tabela 3.1 - Orçamento criado para o o uso do scanner e itens diversos, (LEANDRO, 2023).	32
Tabela 3.2 - Hardware utilizado no estudo, (LEANDRO, 2023).	32
Tabela 5.1 – Tabela referente ao tempo de escaneamento para os dois programas, (LEANDRO, 2023).	47
Tabela 5.2 – Tabela referente ao tempo médio de escaneamento e a diferença percentual entre cada programa, (LEANDRO, 2023).	48
Tabela 5.3 – Tabela referente ao coletor de admissão, em milímetros (mm), (LEANDRO, 2023).	50
Tabela 5.4 – Tabela referente ao tanque de combustível, em milímetros (mm), (LEANDRO, 2023).	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 A Formula SAE	13
2.2 Kinect	18
2.3 Processos de escaneamento 3D	21
2.4 A engenharia reversa	26
3. ORÇAMENTO E EQUIPAMENTOS	30
4. METODOLOGIA	33
5. RESULTADOS	43
6. CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

A Formula SAE é uma competição estudantil realizada desde 1981 nos Estados Unidos da América com seis equipes, originalmente, e organizada pela *Society of Automobile Engineers (SAE)*. A competição teve sua primeira edição brasileira em 2004, com o evento crescendo de maneira rápida nos últimos anos, adicionando uma categoria elétrica em 2016 no Brasil; com 19 equipes inscritas em 2010 na categoria geral de combustão, enquanto em 2019, 44 equipes se inscreveram na categoria combustão e 20 na categoria elétrica. Já em 2021, houveram 64 equipes inscritas (SAE Brasil, 2021). A Figura 1.1 mostra um carro de uma equipe europeia, competindo na América do Norte, no último ano em que teve etapa presencial do evento.

Figura 1.1 - Carro da equipe austríaca *Tu Graz Racing Team*



Fonte: Álbum FSAE Michigan (2019).

A finalidade do evento envolve a preparação de alunos de graduação para o cenário da vida profissional, como um engenheiro capacitado em diversos

aspectos que são abordados durante a competição, desde o desenvolvimento do trabalho em equipe entre os membros a até aspectos técnicos.

A competição atua baseada em metodologias definidas, seguindo o seu regulamento, que leva as equipes a buscarem ideias inovadoras na fabricação de diversos componentes, como:

- Impressão 3D de peças em polímeros para aliviar sua massa e formar uma geometria complexa que seria de difícil produção por meios de fabricação convencionais;
- A equipe se adequa a certas restrições que afetam o desempenho do veículo, como o restritor do coletor de admissão, que limita potência final dos motores a combustão (Formula SAE Rules, 2020);
- Respeito com as normas de segurança mínimas e tendência a seguir boas práticas de engenharia em fixadores e outros componentes diversos.

Esses são alguns dos exemplos que mostram a grande importância de uma análise bem feita de cada peça através de simulações e otimizações que vão desde a fase de esboço em CAD e também o estudo dos componentes após sua etapa de manufatura e operação.

A Universidade Federal de Uberlândia é representada na competição pela equipe UFU Racing, que competiu pela primeira vez na Formula SAE Brasil em 2018 na cidade de Piracicaba – SP. Após três anos da sua formação em 2015 e que contava com 35 membros da universidade (BARBOSA, 2018).

A equipe, demonstrada na Figura 1.2, mesmo com suas dificuldades, conseguiu competir com um carro pela primeira vez, trazendo experiências envolvendo o projeto e fabricação, possibilitando o aprendizado com os erros e buscar melhorias para os próximos anos consecutivos.

Figura 1.2 - Equipe UFU Racing em sua primeira competição disputada em 2018



Fonte: Barbosa (2018).

1.1 Objetivos

Este trabalho consiste na utilização de um método de digitalização 3D de baixo custo para analisar a fabricação de diversos componentes utilizados no carro de Formula SAE construído, a fim de ajudar a equipe a encontrar onde existe variações consideráveis da peça final fabricada em relação ao projeto CAD original.

A partir dos resultados deste trabalho, espera-se utilizar o escaneamento 3D para apontar melhorias que podem ajudar a equipe nos anos seguintes, preparando o caminho para que os próximos carros não apresentem os mesmos erros encontrados durante a montagem final do veículo ou, ao menos, para reduzir a margem de erro nos processos de fabricação adotados pela equipe,

para dimensões de até 5% ou até 10mm em componentes de grande porte, como o coletor de admissão ou tanque de combustível, analisados nesse trabalho.

O uso do escaneamento 3D permite não só a análise das peças individualmente, mas também como elas se encontram posicionadas no protótipo físico montado, dando a possibilidade de análise de melhorias utilizando o espaço disponível no veículo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção aborda a revisão bibliográfica utilizada no trabalho, evidenciando alguns aspectos técnicos da competição de Formula SAE, o scanner Kinect adotado, algumas tecnologias comuns de digitalização sem contato comumente utilizados e também conceitos teóricos sobre o uso de engenharia reversa.

2.1 A Formula SAE

A competição de Formula SAE é subdividida em fases durante o evento, sendo a inspeção inicial uma das etapas mais importantes. Nela, todas as equipes devem passar para poderem competir nas outras categorias. Esta fase não representa alterações em pontuações diretamente, mas pode levar à reprovação da equipe em competir nas próximas etapas dinâmicas, obrigando a correção dos erros atuais em uma nova inspeção futura, para passar para as fases seguintes no evento.

A inspeção atua de maneira bem restritiva em relação às liberdades adotadas na apresentação dos carros, a fim de evitar quaisquer desvios e fugas (intencionais ou não) contra o regulamento. Sendo a segurança dos pilotos como objetivo para inspecionar e coibir o uso de abraçadeiras não permitidas, tubos estruturais abaixo do diâmetro mínimo permitidos e até equipamentos de proteção antichamas (Formula SAE Rules, 2020). Um exemplo, das regras de segurança, pode ser visto na Tabela 2.1, com dimensões mínimas para tubos estruturais do carro.

Tabela 2.1 – Seção F.3.4.1 do regulamento sobre diâmetro mínimo dos tubos permitidos no chassi.

	Tubo tamanho A	Tubo tamanho B	Tubo tamanho C	Tubo tamanho D
Área mínima do momento de inércia	11320 mm ⁴	8509 mm ⁴	6695 mm ⁴	18015 mm ⁴
Área mínima da seção transversal	173 mm ²	114 mm ²	91 mm ²	126 mm ²
Mínimo diâmetro externo ou largura quadrada	25 mm	25 mm	25 mm	35 mm
Espessura mínima de parede	2 mm	1,2 mm	1,2 mm	1,2 mm
Exemplos de tubos redondos	25 x 2,5 mm	25,4 x 1,6 mm	25,4 x 1,2 mm	35 x 1,2 mm

Fonte: adaptado de Formula SAE Rules (2020).

Em termos de atividades avaliativas, as provas são divididas em duas categorias (Formula SAE Rules, 2020):

- Eventos estáticos: onde temos métodos de avaliação que vão desde qualidade do projeto até organização da equipe em apresentar seu trabalho e levantamento de custos de todos os componentes utilizados no carro. Representado na Tabela 2.2.
- Eventos Dinâmicos: provas que são desempenhadas diretamente pelo carro durante a competição, com provas que vão direcionadas

aos resultados práticos em pista no autódromo. A Tabela 2.3 mostra as atividades desta etapa.

Tabela 2.2 – Pontuação dos eventos estáticos da competição

Provas	Pontuações
<i>Presentation</i> (Apresentação)	75 pontos
<i>Cost</i> (Custos)	100 pontos
<i>Design</i> (Projeto)	150 pontos
Total	325 pontos

Fonte: Formula SAE Rules (2020).

As etapas estáticas são subdivididas em:

- *Presentation*: Etapa de apresentação do projeto pela equipe, com avaliação determinada pela qualidade em que a equipe apresenta seu trabalho e com um problema hipotético, dado previamente pela organizadora do evento, no qual a equipe deve encontrar uma solução que possa ser atendida pelo projeto;
- *Cost*: Elaboração da planilha de gastos, utilizados para a construção do veículo, considerando eficiência de produção e seguindo tabelas pré-determinadas para cada componente em uma conta de materiais (fornecida pela SAE);
- *Design*: Representada pela nota geral dos projetos desenvolvidos pela equipe. Os juízes avaliam cada área desde relatórios com simulações a até aplicabilidade do projeto feito, também considerando o esforço de engenharia desempenhado no veículo, a relação de custo por eficiência e como a equipe compreendeu o trabalho todo.

Tabela 2.3 – Pontuação dos eventos dinâmicos da competição

Provas	Pontuações
<i>Acceleration (Aceleração)</i>	100 pontos
<i>Skid Pad</i>	75 pontos
<i>Autocross</i>	125 pontos
<i>Efficiency (Eficiência)</i>	100 pontos
<i>Endurance (Resistência)</i>	275 pontos
Total	675 pontos

Fonte: Formula SAE Rules (2020).

As fases dinâmicas são subdivididas, por sua vez, em:

- *Acceleration (Aceleração)*: Avalia a aceleração do veículo em uma linha reta de 75m, com quatro rodadas com dois pilotos (sendo cada piloto permitido duas tentativas cada);
- *Skid Pad*: Mede a capacidade do veículo em realizar curvas, durante alta velocidade, sob uma superfície plana que forma uma figura de 8;
- *Autocross*: Nesta etapa, é avaliado a manobrabilidade do carro em sua qualidade de dirigibilidade em um circuito apertado com velocidades reguladas entre 40 km/h a 48 km/h;
- *Efficiency (Eficiência)*: Registra a relação de combustível utilizado para completar o evento de resistência, pontuando as equipes de acordo de quanto combustível utilizaram (quanto menos combustível gasto, maior a pontuação será para a equipe);
- *Endurance (Resistência)*: Avalia a performance geral do veículo, sua durabilidade e confiabilidade em um trajeto de aproximadamente 22 km com velocidades médias entre 48 km/h a 57 km/h alcançado velocidade máxima em torno de 105 km/h.

Um dos pontos analisados no regulamento é o teste de inclinação (seção IN.9 no regulamento), com o carro em uma inclinação a 60°, (Formula SAE Rules, 2020). Nele, o carro não pode apresentar uma queda nessa posição ou vazamento de fluidos.

Um erro de manufatura pode alterar o centro de gravidade e causar a falha dessa etapa, mostrando outra razão para a necessidade do controle de qualidade da fabricação em diversos componentes do carro, a fim de que uma simulação prévia, do centro de gravidade do carro, esteja correta para que o carro possa passar dessa etapa sem grandes problemas inesperados.

Pode-se ver, na Figura 2.1, uma representação do teste de inclinação na competição, na cidade norte americana de Lincoln, em 2018:

Figura 2.1 – Teste de inclinação realizada durante a competição



Fonte: Álbum FSAE Lincoln (2018).

Para a Formula SAE, pode-se identificar diversos possíveis usos para o escaneamento 3D. Por exemplo:

- Fazer palmas personalizadas, do volante, fabricadas de termoplástico e com dados obtidos pela digitalização 3D das mãos dos pilotos (moldadas em argilas), permitindo cada conjunto ser otimizado para cada piloto competindo com o carro.
- O uso de um Scanner 3D para um motor, e utilizar o processo de engenharia reversa e transformando em um CAD, que possa ser usado como referência para projetos futuros, como os pontos de fixação na estrutura, coletor de admissão e escapamento, (LORINCZ, 2018). Podemos ver um exemplo desse caso aplicado a um motor na Figura 2.2 a seguir.

Figura 2.2 – Digitalização 3D de um motor Suzuki GSX-R600



Fonte: Lorincz (2018).

2.2 Kinect

O Kinect foi originalmente desenvolvido pela Microsoft como um scanner dos movimentos do corpo humano, a fim de passar informações do usuário para o console (Xbox 360 ou Xbox One, dependendo da versão adotada). O scanner se encontra em larga escala ao redor do mundo, devido à quantidade elevada

de unidades vendidas ao longo do tempo, tendo chegado a 8 milhões de vendas nos 60 primeiros dias desde que foi lançado (OLIVEIRA, 2011).

Segundo Tong et al. (2012), o Kinect pode ser utilizado como uma opção de scanner de baixo custo, apresentando uma opção interessante comparado a outros scanners 3D convencionais. Mesmo em uma configuração montada com 3 Kinects em pilares, o custo total projetado, pelos autores, chegou a somente 600 dólares americanos na época.

Foi comparado o uso do Kinect em relação ao Artec EVA, com os autores concluindo que ambos os scanners se encontram na mesma faixa de precisão (1 mm a 5 mm) adequada para digitalizar membros do corpo humano que exigem baixa precisão (como braços e pernas), enquanto partes mais complexas que exigem maior precisão (como a face ou até dentes), só tiveram resultados satisfatórios para os autores (BRENDLER et al., 2016).

O Kinect do Xbox 360 pode ser classificado como um scanner por luz estruturada de infravermelho, com câmeras distintas ligadas a uma unidade de processamento interna da *PrimeSense* (criadora do aparelho), que irá interpretar os dados de cada um dos sensores para a obtenção de dados (SOUSA, 2015).

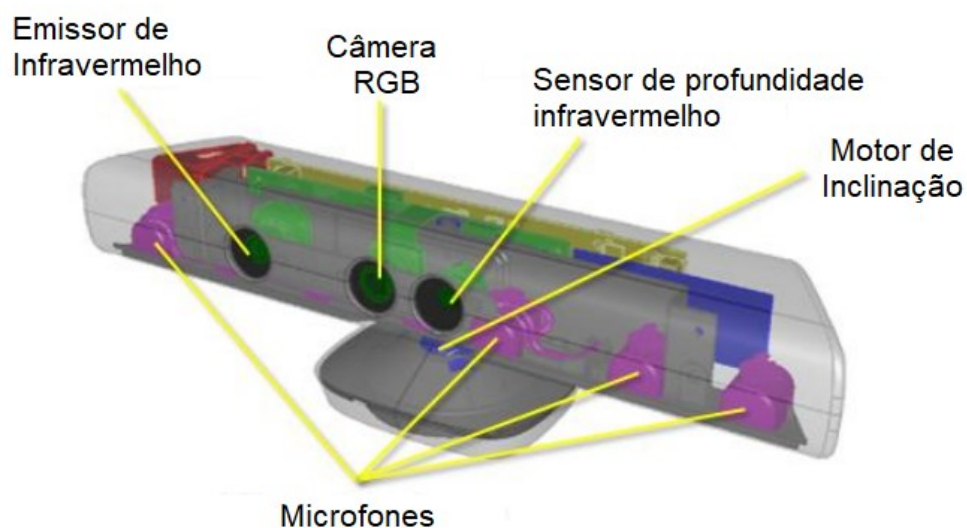
Também de acordo com Sousa (2015), os componentes responsáveis pela obtenção de dados visuais do Kinect, podem ser divididos como:

- Sensor de luz infravermelha, para obter dimensão de profundidade a ser estudada;
- Fonte emissora de luz infravermelha;
- Câmera de cor RGB.

Além dessas três unidades principais, também temos a presença de diversos microfones instalados em diferentes posições no aparelho (mas que não irão influenciar neste trabalho), um motor de inclinação da unidade (para pegar diferentes pontos de vistas, deslocando o Kinect no plano vertical) que será importante na obtenção de dados e calibração do aparelho (SOUSA, 2015).

Todos os componentes mencionados anteriormente podem ser observados na Figura 2.3, juntamente com seu posicionamento respectivo.

Figura 2.3 – Vista esquematizada das partes internas do Kinect



Fonte: adaptado de Souza (2015).

Na utilização do Kinect e sua a calibração devidamente feita, com análises de erro, Khoshelham e Elberink (2012) concluíram que:

- Obtenção de dados devem ocorrer em objetos entre 1 a 3 m de distância do sensor, já que a qualidade se degrada devido ao barulho e baixa resolução da profundidade do aparelho, com erros randômicos de profundidade alcançando até 4 cm a uma distância máxima de 5m.
- É recomendável uma calibração das câmeras, RGB e infravermelha, para eliminar distorções na nuvem de pontos e no não alinhamento dos dados de cor e profundidade.

Alguns outros dados técnicos do Kinect podem ser vistas na Tabela 2.4, com informações referentes a operação do aparelho e limitações de resolução do scanner.

Tabela 2.4 – Características técnicas de operação da versão inicial do Kinect

Provas	Kinect (Xbox 360)
Resolução – Câmera RGB	640 x 480 pixels
Resolução – Câmera de profundidade	640 x 480 pixels
Gama de operação	0,8 m a 3,5 m
Campos de visão	58° Horizontal / 45° Vertical
Ângulo de inclinação vertical	Aproximadamente em 27°
Taxa de aquisição de imagens	30 FPS (<i>frames per second</i> ou quadros por segundo)
Entradas de áudio	4 de 16kHz
Conexão	USB 2.0

Fonte: Sousa (2015).

2.3 Processos de escaneamento 3D

Boa parte dos erros podem ser identificados utilizando equipamentos de metrologia convencionais como trena, paquímetro ou micrômetro (SILVA NETO, 2012); mas alguns componentes podem ser melhor analisados através de um scanner 3D, até em componentes grandes como caixas de transmissão de uma turbina eólica ou até mesmo um vagão de trem (CUYPERS et al., 2009).

Segundo Thiago (2017), existem diversos métodos de digitalização 3D, sem contato físico, como a Fotogrametria, a triangulação a laser ou até sistemas com emissão de luz infravermelha ou luz estruturada.

Baseando nos resultados obtidos por Silva, Salvalaio e Kindlein (2011), a fotogrametria se apresenta como uma opção de baixo custo que pode ser utilizada como escaneamento 3D, entretanto possui uma grande necessidade de manuseio manual em sua operação e do uso de softwares específicos para ser utilizada, além de erros grandes: chegando com variações desde 5 mm a até 10 mm, em alguns casos, enquanto métodos de Laser conseguiram obter erros máximos em torno de 1 mm; quando utilizados para digitalizar um molde em gesso que, por sua vez, representa uma parte humana.

Tabela 2.5 – Resultados obtidos, comparando a fotogrametria com a digitalização a laser

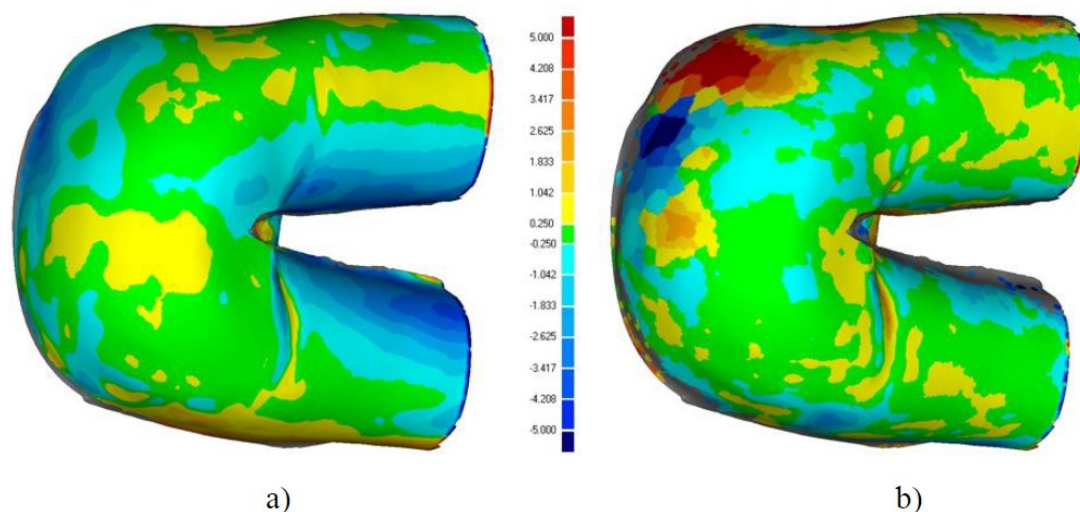
	Scanner (Ponto fixo)	Scanner (Linha móvel)	Digitalização por fotogrametria
Pontos adquiridos	726.755	537.309	8.414
Resolução de aquisição	0,50 mm	0,97 mm	3,83 mm
Pontos obtidos após filtragem	145.420	118.526	8.229
Resolução após filtragem	1,12 mm	1,05 mm	3,76 mm
Triângulos na malha final	289.726	236.227	16.243

Fonte: adaptado de Silva, Salvalaio e Kindlein (2011).

Os dados da Tabela 2.5 acima mostram a lacuna existente entre a fotogrametria e os métodos a laser, adotados por Silva, Salvalaio e Kindlein (2011) em seus ensaios realizados.

Ainda segundo Silva, Salvalaio e Kindlein (2011), os três métodos (laser móvel de linha, laser de ponto fixo e fotogrametria) apresentam resultados que condizem com as necessidades em seu uso (escaneamento de moldes). Também se nota os locais onde ocorre uma variação considerável no modelo estudado, com o laser móvel sendo fiel aos dados obtidos pelo método do laser de ponto fixo, mas já tendo uma diferença grande quando comparado com a fotogrametria, onde podemos notar nos pontos vermelhos e alaranjados na Figura 2.4, que mostra como a fotogrametria se distancia dos modelos por laser, tendo uma margem de erro maior em certos pontos da peça estudada.

Figura 2.4 – Comparação dos tipos analisados: com a relação do laser de ponto fixo para o laser móvel (a) e a do laser de ponto fixo para a fotogrametria (b)



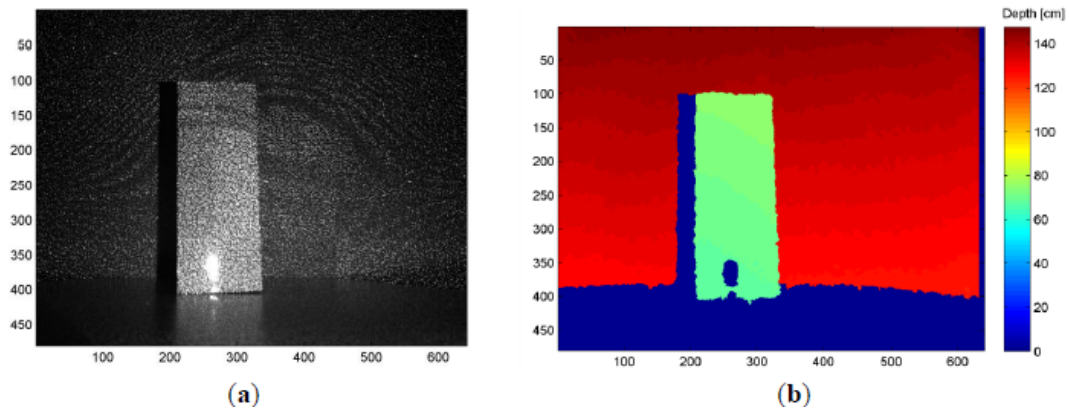
Fonte: adaptado de Silva, Salvalaio e Kindlein (2011).

Baseando em Kokubum (2004), o princípio de funcionamento por luz estruturada ocorre na combinação de um projetor, atuando sobre o objeto a ser digitalizado, com uma câmera capturando a imagem na forma que ocorre uma distorção na região superficial a ser escaneada; permitindo a reconstrução parcial da imagem, com cada ponto de vista obtido com a rotação do objeto em um dado plano, resultando em um menor custo total, maior praticidade no processo e menor tempo para obter fotos, quando comparado com a fotogrametria.

De acordo com os trabalhos de Costa et al. (2015) e Thiago (2017), o funcionamento do scanner de infravermelho origina-se pelo uso de uma câmera atuando como sensor de temperatura em titulação termométrica, onde um objeto aquecido emite ondas eletromagnéticas dependendo da temperatura em que ele se encontra, com imagens convertidas a uma faixa em que se tornam visíveis ao olho humano.

Como exemplo de representação de profundidade, com uma câmera de infravermelho, temos a Figura 2.5 que mostra esta anotação por cores de forma clara:

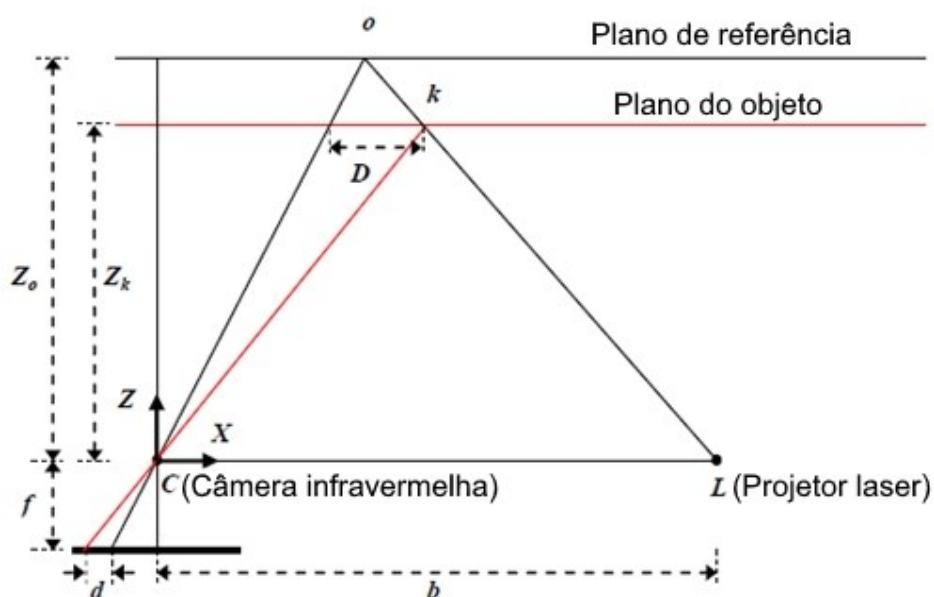
Figura 2.5 – Imagem infravermelha projetada (a) com os dados obtidos de profundidade



Fonte: Khoshelham e Elberink (2012).

Também existem modelos matemáticos, representados por Khoshelham e Elberink (2012), que ilustram a relação entre a distância relativa de um objeto. Em um ponto “k”, para o sensor, com uma disparidade “d”; sendo o eixo “z”, ortogonal ao plano da imagem para o objeto, e “x” perpendicular a “z” na direção da linha de base “b” entre o centro da câmera de infravermelho e o projetor laser. A figura 2.6 mostra essa representação:

Figura 2.6 – Relação gráfica entre a disparidade obtida, com a profundidade

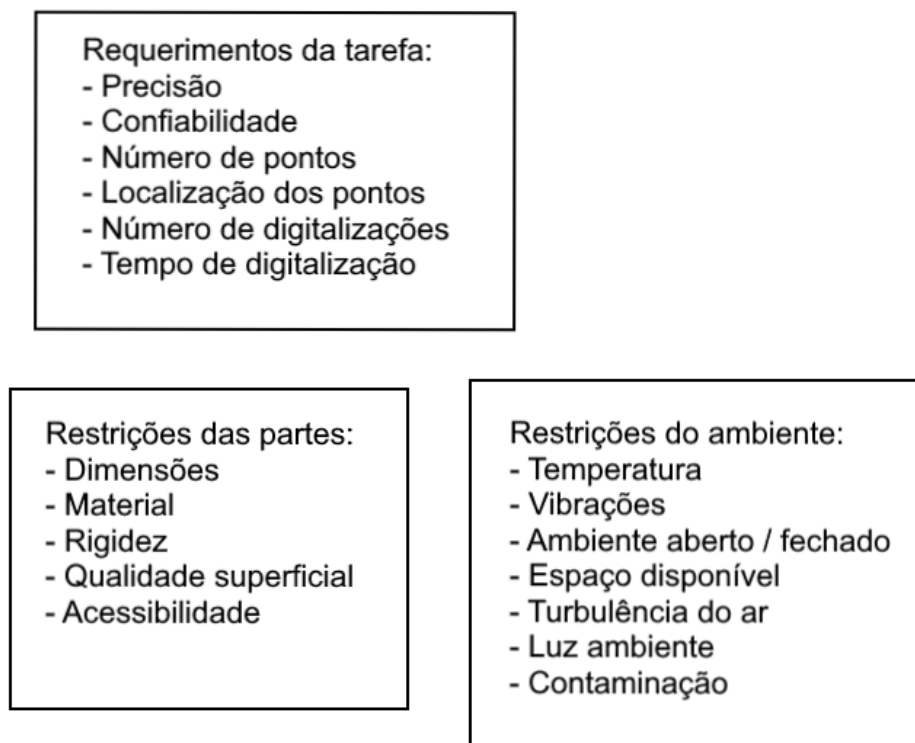


Fonte: adaptado de Khoshelham e Elberink (2012).

Em relação à portabilidade, Cuypers et al. (2009) realizaram diversas comparações entre tipos diferentes de escaneamentos, como fatores determinantes para a seleção de uma dada máquina de medição por coordenadas (MMCs) portátil, como é visível na figura 2.7, sendo:

- **Requerimentos da tarefa:** Definida como as necessidades para uma dada tarefa, podendo variar em termos de precisão do processo, a confiabilidade dos resultados, a quantidade e localização dos pontos gerados, quantas digitalizações foram feitas e seu tempo gasto.
- **Restrições das partes:** as posições de dimensões físicas da peça, a ser escaneada, podem dificultar o processo de medição dependendo do método utilizado, como ocorre em algumas câmeras baseadas em técnicas de triangulação. Também vale notar as condições do material da peça, como a influência magnética podendo atrapalhar na coleta de dados, ou rigidez limitada e qualidade superficial que envolve superfícies refletoras de luz.
- **Restrições do ambiente:** Influência do ambiente na qual a peça escaneada se encontra, como por exemplo o papel da Temperatura no local, a vibração em onde o objeto ou scanner estão localizados, influência da luz ambiente, contaminação da lente ótica do equipamento ou até variações pequenas como a turbulência no ar, podem alterar resultados finais do processo de medição.

Figura 2.7 – Fatores determinantes na seleção de um scanner móvel



Fonte: adaptado de Cuypers et al. (2009).

2.4 A engenharia reversa

Segundo Puntambekar, Jablokow e Sommer (1994), o conceito de engenharia reversa se origina pela construção de um modelo em CAD, baseado na digitalização de um componente, já construído.

Partindo da conclusão de Guarato et al. (2016), é observado que tanto o processo de escaneamento 3D quanto o ajuste da superfície, na nuvem de pontos gerada, refletem na qualidade do processo de engenharia reversa como um todo. Sendo com que ocorra uma dependência pela habilidade do usuário, no uso do programa de engenharia reversa em relação ao ajuste do processo.

Um exemplo prático pode ser visto na Figura 2.8, em um pistão de motor rotativo. O pistão foi digitalizado a uma distância relativa de 430 mm com ângulo de incidência em 75°, obtendo uma reconstrução grosseira na Figura 2.9. A figura 2.10, por sua vez, mostra a superfície reconstruída depois do processo de

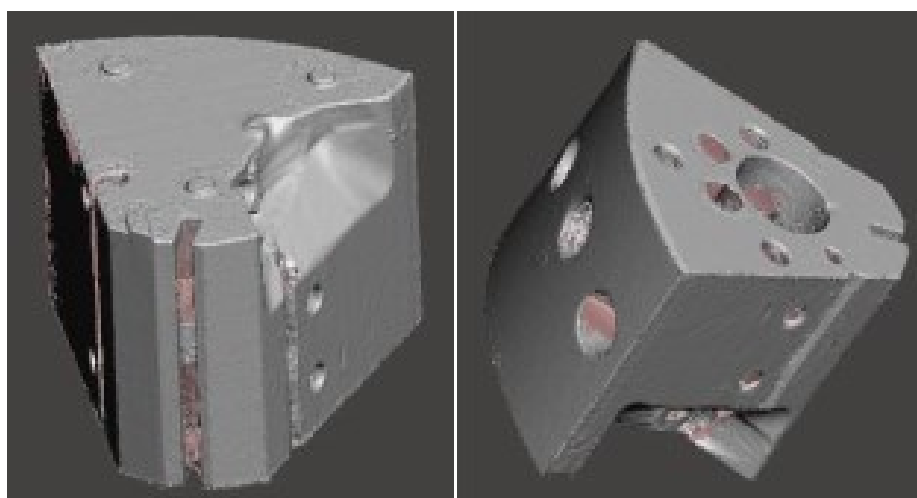
engenharia reversa, sendo o resultado mais bem suave quando comparado com sua nuvem de pontos original, na figura anterior (GUARATO et al., 2016).

Figura 2.8 – Foto do pistão a ser escaneado



Fonte: Guarato et al. (2016).

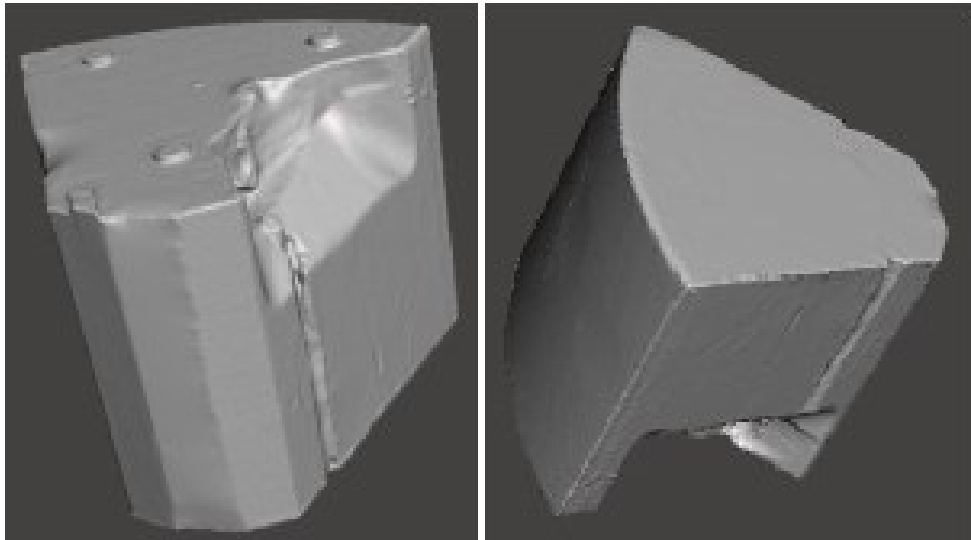
Figura 2.9 – Escaneamento grosseiro do pistão



Fonte: Guarato et al. (2016).

Uma consideração, na figura 2.10, pode ser notada pela remoção dos furos originais do pistão, que não puderam ser reconstruídos pelo programa de engenharia reversa utilizado (Rhinoceros), mas esse problema não atrapalhou a coerência do resultado final, em relação aos dados digitalizados (GUARATO et al., 2016).

Figura 2.10 – Reconstrução da superfície do pistão, por engenharia reversa



Fonte: Guarato et al. (2016).

De acordo com Puntambekar, Jablokow e Sommer (1994), mesmo a engenharia reversa parecendo ser um método totalmente oposto a processos convencionais de fabricação, ambos seguem ideias similares, sendo que se distanciam no quesito em que a engenharia reversa adota as especificações, ou dimensões, de um protótipo processado por manufatura convencional, podendo vir a ser utilizada em diversas ocasiões, como:

- *New Design* : Análise aprofundada em um modelo de estudo; como na aerodinâmica de um veículo, por exemplo.
- *Old Parts Redesign*: Redesenhar peças onde o CAD/projeto escrito não se encontra disponível a acesso e sua única maneira de o obter é através da engenharia reversa, como em algumas partes automotivas de veículos fabricados décadas passadas.
- *Worn or Damaged Parts*: Manutenção para fabricação de novos componentes de reposição em uma máquina, e há necessidade de se criar um CAD dela com urgência ao invés de se esperar por uma peça de reposição que possa levar tempo prolongado até chegar para ser instalada, como em uma linha de produção que fica parada por conta de uma quebra.
- *Inspection Samples*: Inspeção de amostras em uma linha de produção, para ser comparado o produto final fabricado com seu

projeto CAD original, checando as dimensões e analisando se a variação está dentro das tolerâncias necessárias.

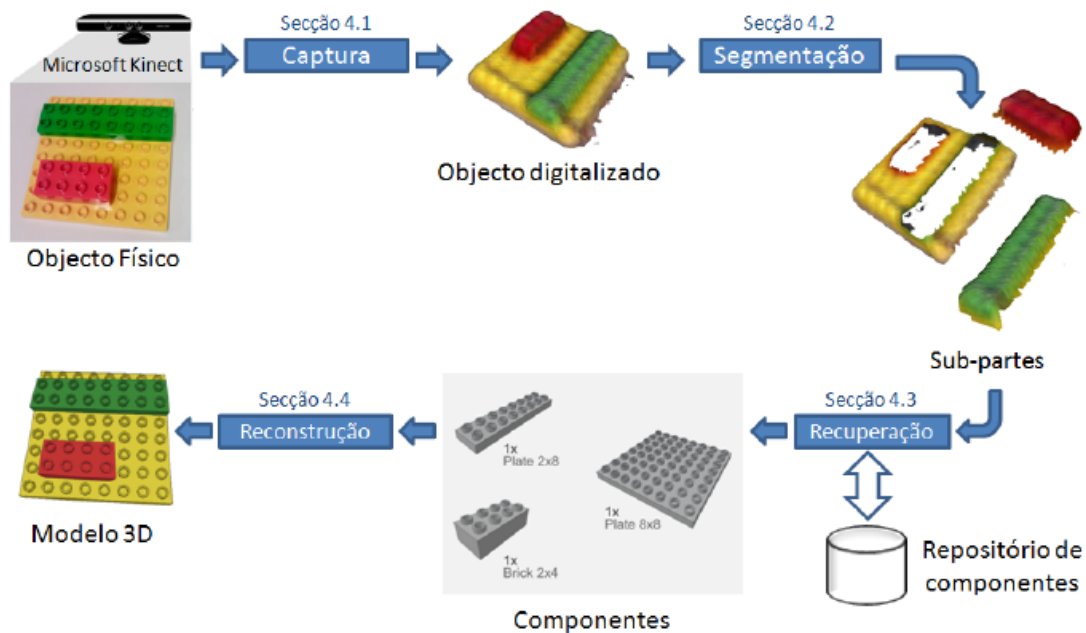
- *Replicating Components Acquired in War*: Em caso de guerra (ou outra situação), pode-se não ter acesso a peças de componentes, de máquinas capturadas, que precisam ser fabricados se necessário.

Uma metodologia prática para digitalização 3D, nos conceitos de engenharia reversa, pode ser feita partindo de uma peça física e passando pelas seguintes etapas (BORGES, 2013):

- Captura: a digitalização da peça original, sendo feita neste caso pelo Kinect;
- Segmentação: passando pelo processo de conversão em nuvem de pontos até a construção de sua forma de cada componente da peça estudada;
- Recuperação: Trabalha no realinhamento e correção, levando para a recuperação das partes com um repositório de componentes salvos;
- Reconstrução: Nesta etapa, é realizada a reconstrução do objeto a partir de um modelo 3D digitalizado com os resultados vindos da recuperação prévia.

Na Figura 2.11, podemos ver essas etapas onde aplicamos os conceitos de engenharia reversa de Borges (2013), em uma digitalização 3D, com o autor utilizando o Kinect como scanner.

Figura 2.11 – Visão do processo adotado, desde a captura do objeto físico até a reconstrução do modelo 3D.



Fonte: Borges (2013).

O uso de ferramentas envolvendo escaneamento 3D no automobilismo também não é algo ignorado, sendo empregado por diversas equipes nas categorias profissionais, como para validar projetos automotivos de componentes aerodinâmicos com scanners comerciais (REICHARD, 2020).

A importância de escaneamento 3D também é importante para engenharia reversa de equipes rivais, levando possibilidade de uma equipe analisar os dados de projeto de outra através do processo, até acarretar com que o regulamento da Formula 1 proibindo o uso de escaneamento 3D para essas finalidades (Formula 1 Technical Regulations, 2021).

3. ORÇAMENTO E EQUIPAMENTOS

Por se tratar de um projeto universitário com orçamento limitado e custeado pelos estudantes participantes da equipe, é de grande importância a redução de custos operacionais da equipe em diversas áreas. Conclui-se que a adoção de um sistema de digitalização de baixo custo agregado para a equipe é

interessante, caso a mesma não consiga um patrocínio que forneça os serviços de digitalização ou equipamento para o uso.

O Scanner adotado, Kinect vindo de um Xbox 360, pertencido pelo autor, é uma opção adotada por conta do seu baixo custo agregado, tanto na compra do mesmo, quanto na sua adaptação a softwares terceiros disponíveis, sem custo e a conectores para ser ligado ao computador. O autor do trabalho já possuía o scanner, o que ajudou nos custos finais para o projeto, só necessitando da compra da fonte com o adaptador USB para ser ligado ao computador.

Além do aparelho, foi utilizado uma base rotativa, com a função de girar o perfil da peça estudada em 360° e assim permitir que o scanner fique parado coletando os dados enquanto a geometria da peça se altere de acordo com a rotação da mesma em sua base. Para o cálculo do orçamento, a base rotativa foi desconsiderada por se tratar de um item reaproveitado de uma antiga cadeira.

Figura 3.1 – Base giratória utilizada para o escaneamento



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

Usando conversão pelo Dólar turismo, adotado pelo Aliexpress em sua conversão cambial, do dia 18/11/2020 na conversão do adaptador de 5.5532 da moeda estrangeira para o Real brasileiro (Cotação do Dólar para Real, 2020); e com um estudo dos valores do scanner no Brasil, foi montado a tabela 3.1 para averiguar os gastos necessários para a realização do trabalho:

Tabela 3.1 – Orçamento criado para o uso do scanner e itens diversos

Componente	Custo
Scanner Kinect (Xbox 360)	R\$: 250,00 (preço médio, com frete, no Mercado Livre, no dia 23/02/2021)
Adaptador e fonte para PC	R\$: 47,09 (Comprado pelo Aliexpress, no dia 18/11/2020 a U\$:8.48)
Paquímetro Kingtools 150 mm (modelo KINGTOOLS – 501150)	R\$: 87,72 (Comprado pela loja do mecânico, no dia 13/12/2022)
Trena 5mx19mm	R\$ 12,90 (Comprado em uma loja física para materiais de construção, no dia 19/12/2022)
Total do orçamento estipulado	R\$: 397,71

Fonte: autoria própria (2023).

Tabela 3.2 – Hardware utilizado no estudo

Componente	Hardware
CPU	Amd Ryzen 5 5600X
GPU	Asus RTX 3060 Ti 8GB
RAM	2X8GB Crucial 3200MHZ CL16
Motherboard	Asus B450m
Armazenamento	SSD 500GB Netac N950E

Fonte: autoria própria (2023).

Vale também apontar que a base giratória foi reaproveitada de uma cadeira antiga, com a remoção de partes que bloqueiam a visão do scanner em diversos pontos. O computador utilizado pelo autor também foi utilizado para o trabalho, representado na tabela 3.2.

4. METODOLOGIA

Fora escolhido para o trabalho duas peças do conjunto motor do veículo: o coletor de admissão, feito em aço 1020, e o tanque de combustível, feito em aço inoxidável, como podemos ver nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente. Ambas as peças foram fabricadas pela equipe com auxílio de patrocinadores e empresas terceiras em 2018, para o primeiro carro da equipe.

Figura 4.1 – Coletor de admissão usado no formula



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

Para a análise, foi também utilizado um paquímetro da marca Kingtools de 150mm, aproximadamente 6", com resolução de 0,02mm. Com as medições dele, pode-se comparar com os valores escaneados e utilizar conceitos baseados na NBR NM 216. Em posições onde o paquímetro não teve comprimento suficiente, foi utilizado régua e trena métrica para comparar (mesmo sendo menos preciso que o paquímetro), devido ao limite do paquímetro de 150 mm.

Com o paquímetro e trena, foram feitas 5 medições para cada segmento analisado, calculando a média entre eles, que foi utilizada como referência para como medida real dos itens.

Figura 4.2 – Tanque de combustível utilizado



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

As medições foram colocadas em uma tabela para comparar estatisticamente os valores medidos das peças físicas com os modelos obtidos pela reconstrução 3D no software Autodesk Inventor. Como podemos ver nas

figuras 4.10 e 4.11, foi focado a medição de superfícies externas planas, suportes de fixação na estrutura e também no comprimento de dutos para os bocais de mangueiras, devido a esses pontos influenciarem diretamente no posicionamento dos componentes estudados, além de terceiros itens interligados ao tanque de combustível (como mangueiras) ou coletor de admissão (como suporte de fixação dele).

Figura 4.3 – Paquímetro utilizado



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

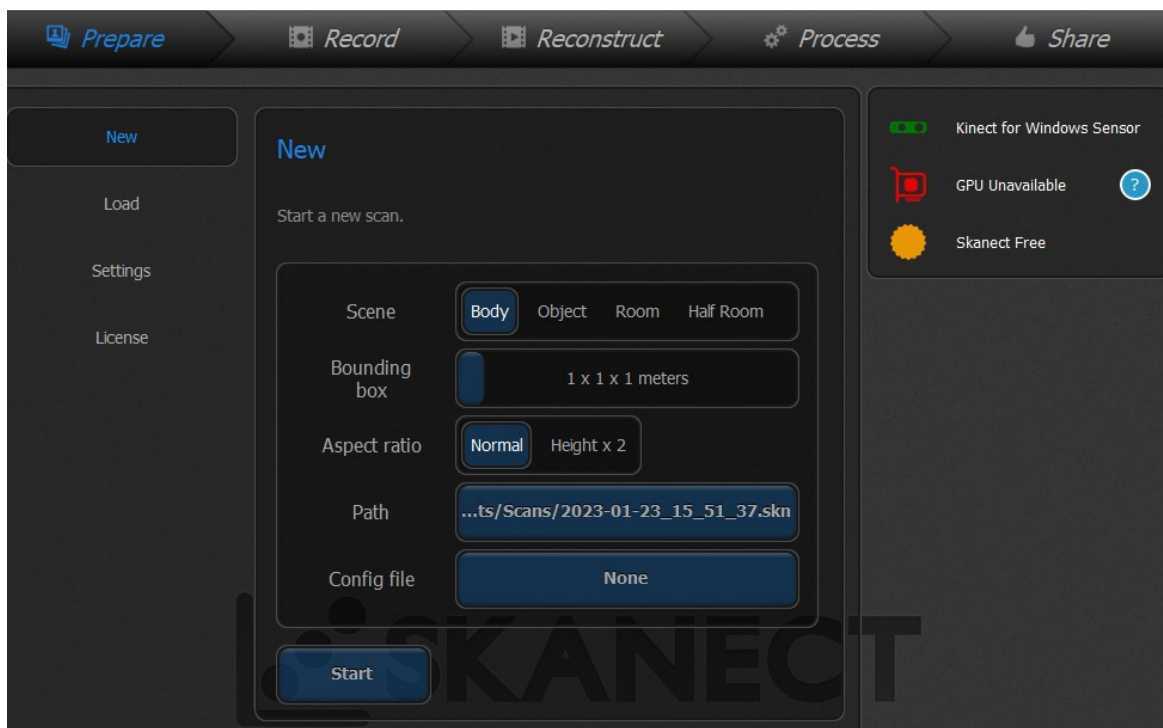
Inicialmente se fez a instalação do SDK para Kinect no Windows 10 na versão 1.8, que é compatível com o Kinect do Xbox 360, seguido pelo toolkit para desenvolvedores compatível com a versão do SDK anterior. Ambos os programas vão ser importantes para o reconhecimento do Kinect pelo sistema operacional do computador.

O processo através do Skanect pode ser dado nas seguintes etapas (também representadas nas figuras a seguir):

- Preparação, colocando o aspecto das dimensões tridimensionais de largura, altura e profundidade (como pode ser visto na figura 4.4);

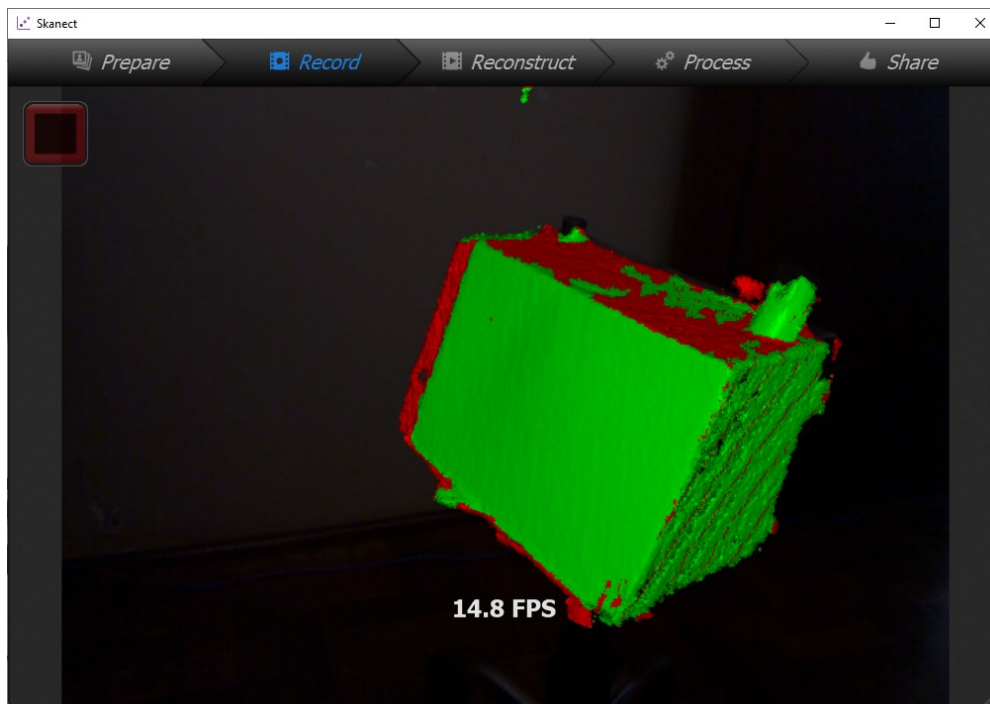
- Gravação da peça, representada nas cores verde e vermelho da figura 4.5, que mostram o foco na peça analisada usando os critérios dimensionais da etapa anterior;
- Reconstrução da nuvem de pontos em um processo de malha, após um processo (entretanto, é um processo opcional para possível melhora do escaneamento realizado);
- Processamento de refinamento da malha, geometrias e até recriar as cores obtidas, sendo algumas delas: preenchimento de vazios, simplificação da estrutura e mudança nas inclinações da peça;
- Método para salvar o resultado como arquivos de imagem ou exportação da malha em diversas extensões diferentes disponíveis. Pode-se notar (na imagem 4.6) as limitações da versão grátis do programa, limitando ao tamanho e texturas que podem ser armazenados.

Figura 4.4 – Tela inicial do Skanect



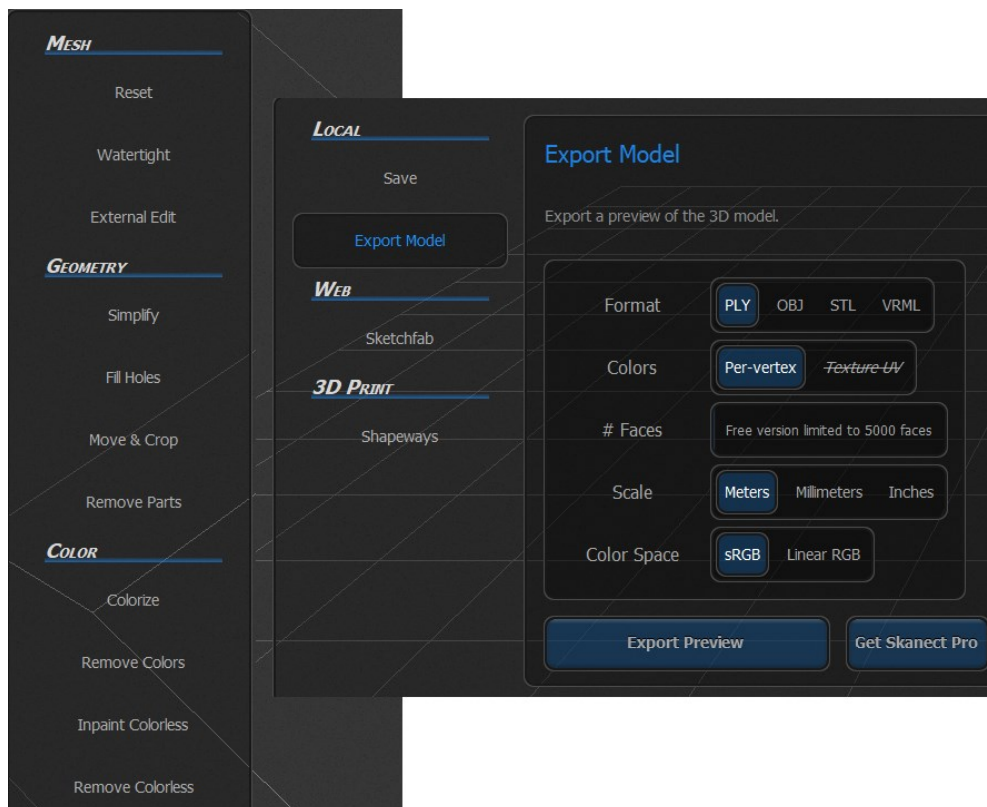
Fonte: imagem de autoria própria (2023).

Figura 4.5 – Etapa de escaneamento no Skanect



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

Figura 4.6 – Telas de processos e compartilhamento do Skanect



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

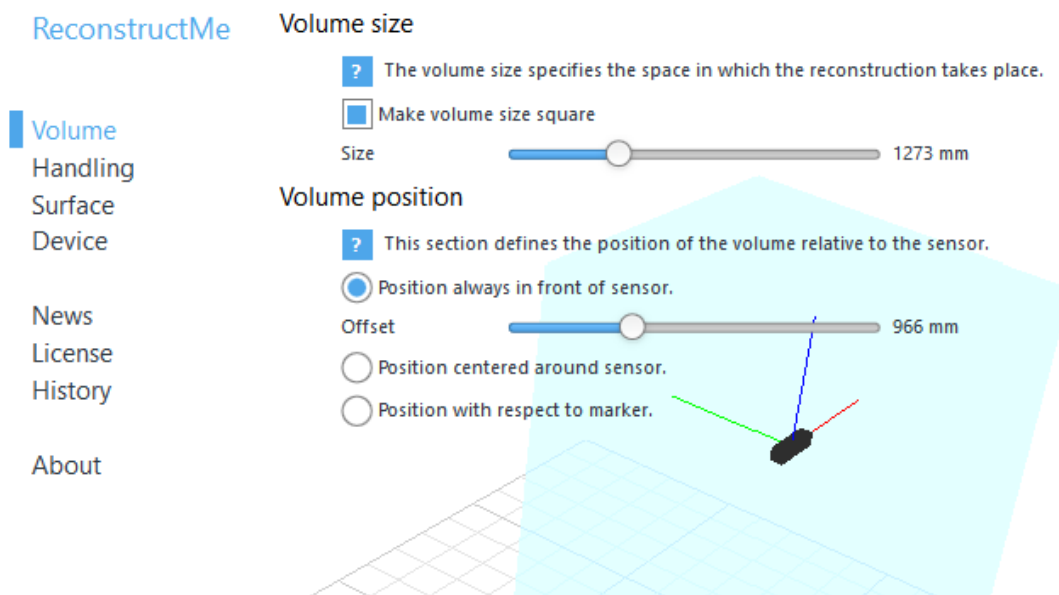
Para comparação dos resultados, também foi utilizado o software ReconstructMe, também disponibilizado gratuitamente. O programa possui diversas funções, além de algumas possibilidades não disponíveis anteriormente no Skanect, como por exemplo possuindo diversas possibilidades de ponto de origem e posicionamento do scanner.

O tamanho do volume no campo de visão que o dispositivo irá operar, podendo variar entre 200 mm^3 a 4000 mm^3 ou oferecendo valores diferentes de altura, profundidade e comprimento para o usuário escolher. Em posicionamento, temos a possibilidade de selecionar uma distância mínima (ou *offset*, como chamado pelo programa) entre a lente do Kinect até o posicionamento onde o campo de visão irá trabalhar, podendo variar de 1 mm a 3000 mm em frente do sensor. Outras opções de posicionamento também estão disponíveis, como:

- o dispositivo posicionado no centro de um eixo e rotacionando ao longo dele, pegando o campo ao redor do Kinect.
- Usar um referencial fixo em relação ao scanner, possuindo tamanho e distância variáveis em relação ao aparelho.

Com base nessas informações, e em testes realizados, foi escolhido um volume com dimensões de *offset* em torno de 800mm a 1000 mm, e volume em torno de 1200 mm^3 a 1500 mm^3 para as duas peças, com algumas medições utilizando outros valores, dependendo das condições presentes. Podemos ver uma das configurações utilizadas na Figura 4.7. Com distâncias menores em torno de 300 mm, entre o sensor e o objeto, foi observado falha em identificar todos os pontos.

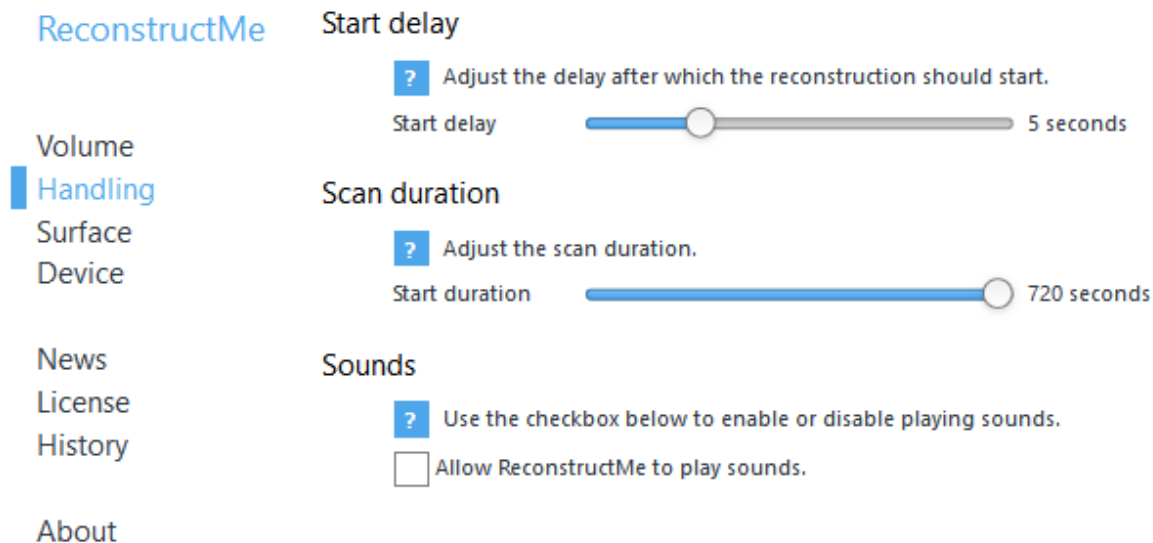
Figura 4.7 – Configuração de posições para o ReconstructMe



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

Na Figura 4.8 vemos configurações de manuseio e tempo total de operação do escaneamento, com o processo podendo variar de 10 a 720 segundos, além de *delay*, ou adiamento, para iniciar o processo após o início da operação (em até 20 segundos). Também temos opções de captura de áudio (utilizando o microfone do Kinect), mas essa função não se aplica nos objetivos do projeto. Foi escolhido, pelo usuário, um *delay* de 5 segundos e com duração máxima possível de 720 segundos escaneamento, para ter o máximo de detalhes possíveis obtidos no processo (o processo pode também ser interrompido pelo operador, antes da duração máxima).

Figura 4.8 – Temporizador do ReconstructMe



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

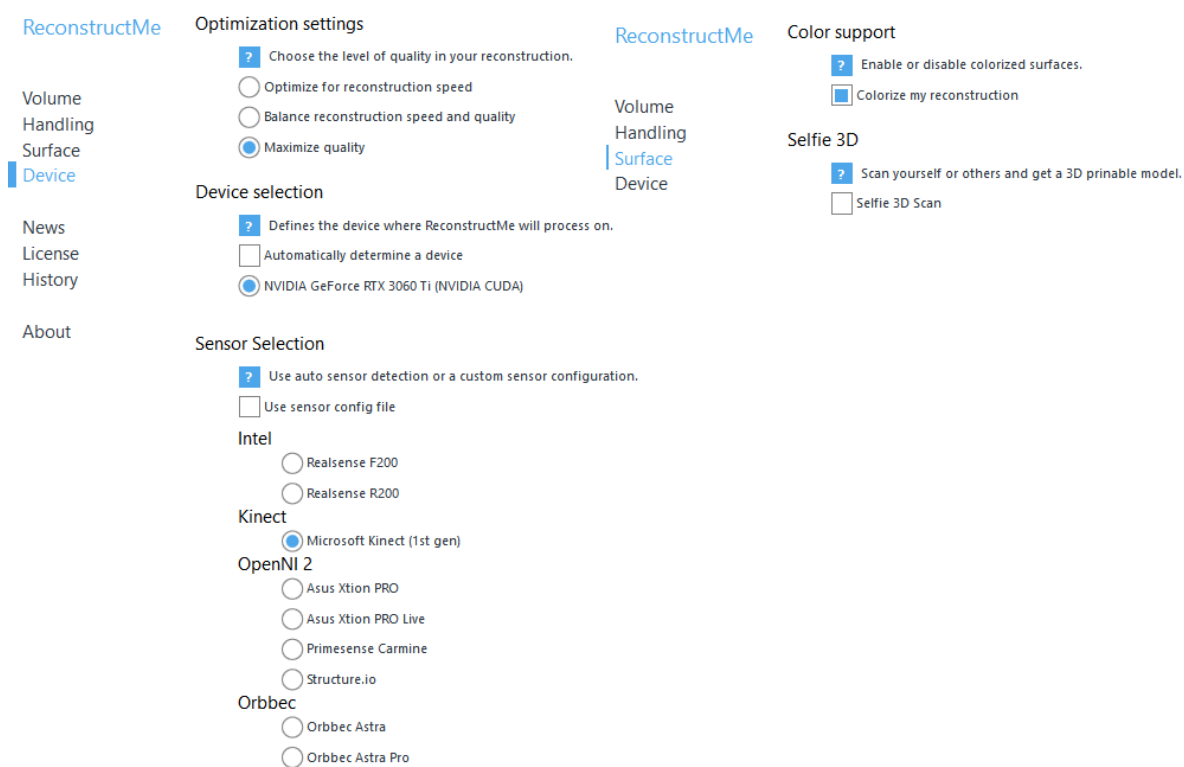
Outras opções, presentes na Figura 4.9, são vistas na forma como a superfície é retratada em opções de colorização da peça e uma função adicional de autorretratos, favorecendo o caso onde o usuário rotaciona em uma base enquanto o Kinect permanece fixo para obter um perfil de uma pessoa. Entretanto, foi encontrado problemas durante a função de autorretrato em uso por isso foi desconsiderada dos resultados finais. A reconstrução de cores presentes também foi descartada por não trazer vantagens na análise e não possuindo uma textura fiel a real, com a qualidade de cores escaneadas alternando de acordo com a luz ambiente no processo. Podemos ver diversas opções ligadas aos dispositivos físicos, envolvendo:

- Otimização na reconstrução da malha. Para melhores resultados, foi escolhido a qualidade máxima disponível pelo programa, devido ao computador permitir a reconstrução em um período de tempo aceitável, sem precisar comprometer em um balanceamento entre qualidade e velocidade do processo.
- Seleção da unidade responsável pelo processamento gráfico de toda etapa de execução do programa, no caso, foi utilizada a placa gráfica (ou GPU) Nvidia RTX 3060 Ti. A seleção pode ser

automática ou manual do dispositivo, já que alguns computadores possuem placas gráficas integradas à unidade central de processamento (também conhecido como CPU ou *Central Processing Unit*), além de uma unidade dedicada (que foi utilizada no trabalho).

- Escolha do sensor utilizado, o programa possui compatibilidade com diversos scanners diferentes, com a lista de dispositivos presentes para o usuário selecionar o que ele irá usar.

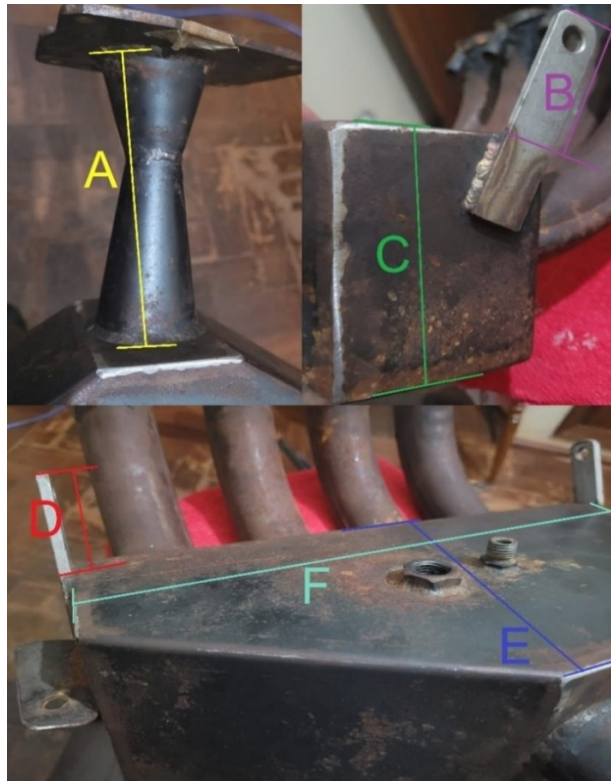
Figura 4.9 – Configurações de dispositivo e superfície do ReconstructMe



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

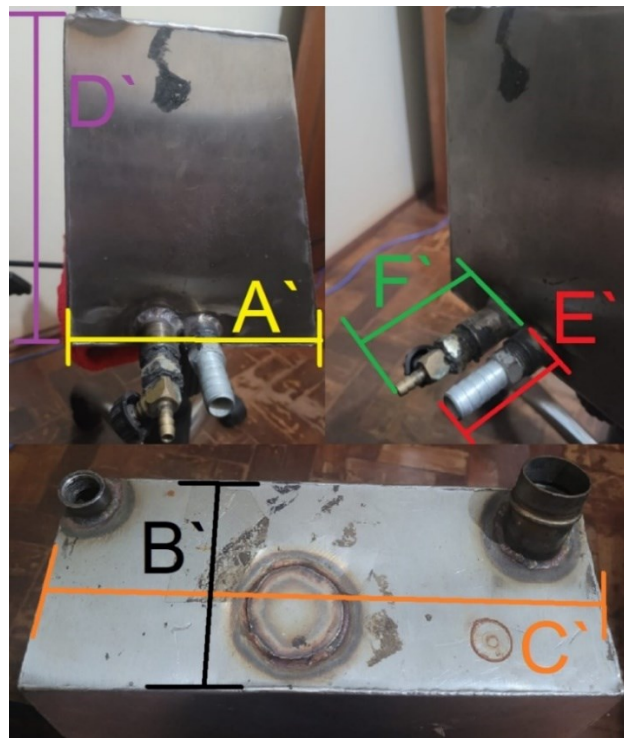
Nas Figuras 4.10 e 4.11, foram demarcadas as posições de distâncias analisadas. Como alguns pontos dos escaneamentos não puderam ser considerados, devido a erros em recriar furos e outros detalhes menores, então o foco se manteve em comparar pontos menos detalhados, como faces maiores sem considerar certos detalhes.

Figura 4.10 – Vistas referentes às medidas da Tabela 5.1



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 4.11 – Vistas referentes às medidas da Tabela 5.2.

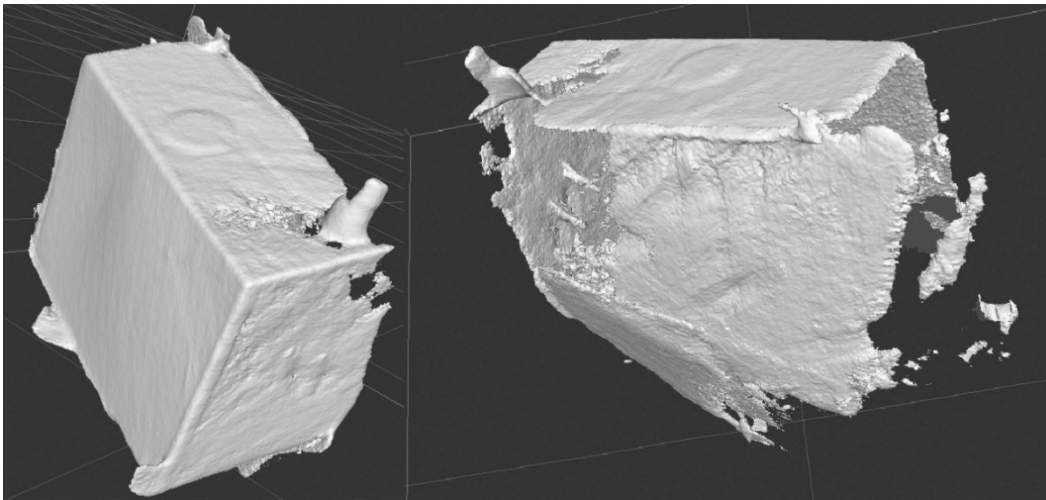


Fonte: autoria própria (2023).

5. RESULTADOS

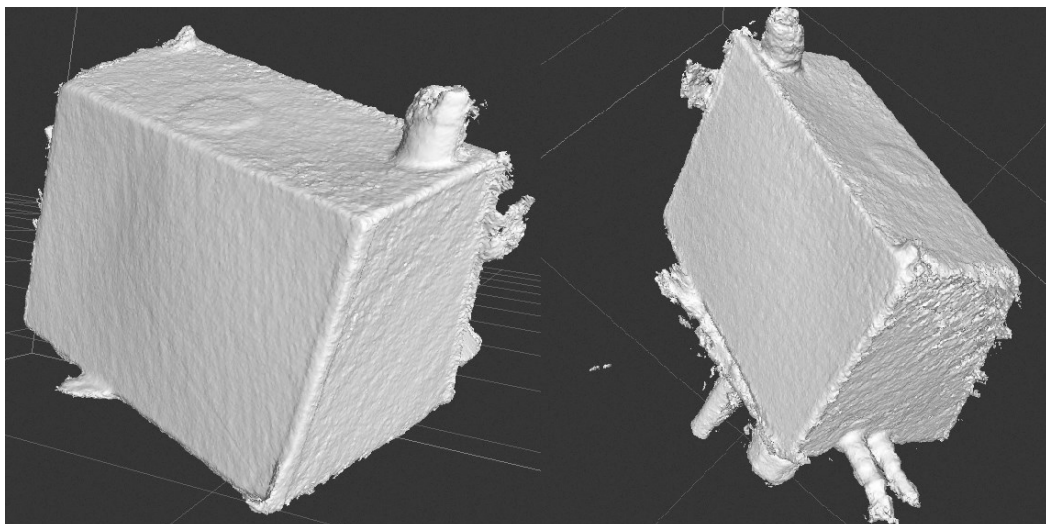
Os arquivos foram exportados então ao *software* Autodesk Inventor 2022 (do formato com extensão .stl e convertido posteriormente para .ipt), onde foi possível melhor comparar os diferentes processos nos diferentes softwares utilizando o mesmo hardware.

Figura 5.1 – Reconstrução de imagem pelo Skanect



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

Figura 5.2 – Imagem scaneada sem a reconstrução da malha

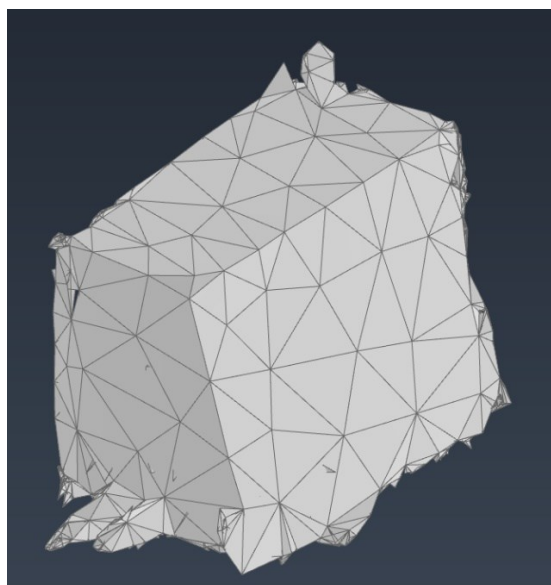


Fonte: imagem de autoria própria (2023).

Durante a formação da malha do tanque, foram adotadas algumas considerações para o Skanect (durante o processo de obtenção da malha), como a escolha de não utilizar a reconstrução da imagem pelo software, pois ela acabou produzindo resultados piores em testes realizados, criando lacunas sem preenchimento (como pode ser visto na figura 5.1) e remoção de faces antes presentes, que estavam presentes na figura 5.2. A peça processada apresentou um melhor acabamento em superfícies planas maiores com o processo de reconstrução. No entanto, houve perda de detalhes e de pontos, com a formação de espaços vazios, o que afetou muito o aspecto para ser justificável sua escolha e uso no trabalho final.

Uma possibilidade para esse efeito poderia ser dada através da limitação do programa, por se tratar de uma versão com dispositivo (Kinect) antigo sem atualizações recentes.

Figura 5.3 – Tanque de combustível, usando o Skanect e exportado para o Autodesk Inventor



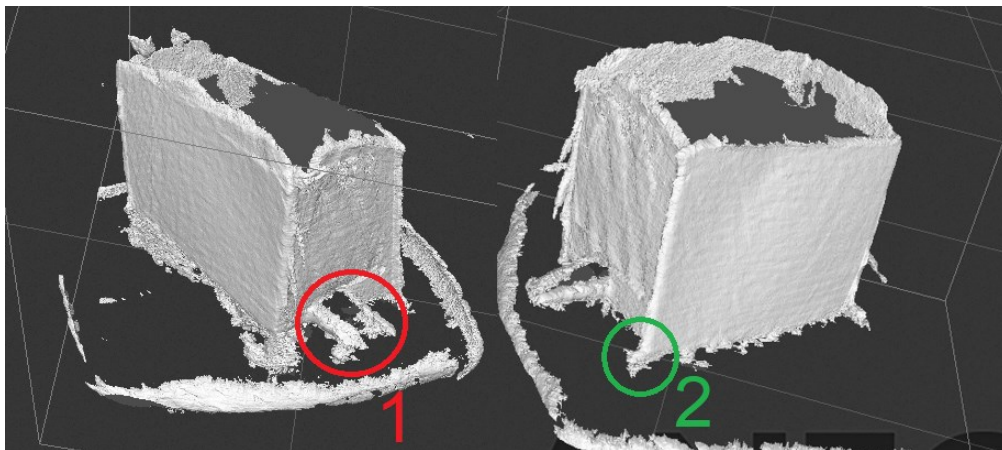
Fonte: imagem de autoria própria (2023).

Quando convertido para o Autodesk Inventor, foram obtidos resultados pouco promissores com o Skanect, com uma malha grosseira devido à limitação da versão grátis que reduz ao processo a 5000 polígonos. Também pode-se

notar que obteve problemas em obter precisão em alguns pontos importantes como:

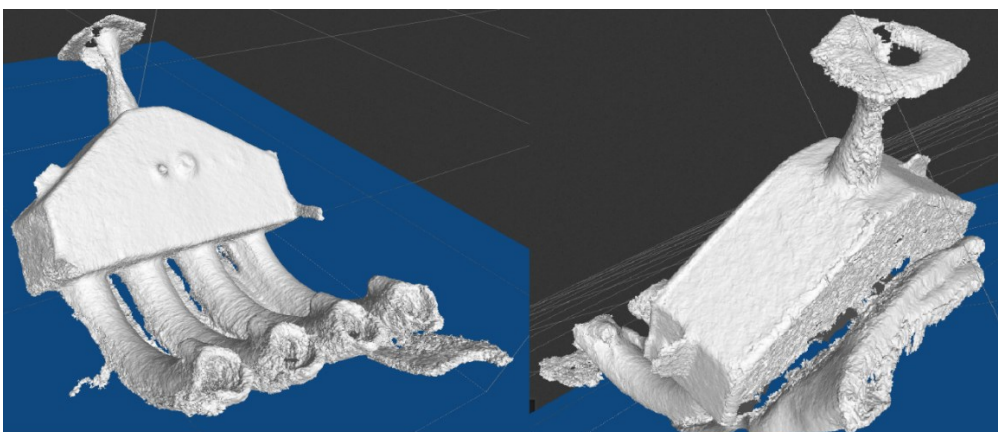
- Com o diâmetro, formato e comprimento dos bocais de entrada de combustível pelo bocal de abastecimento, retorno (localizados na parte de cima do tanque) e, na saída, para a bomba externa e de drenagem (presentes na lateral do tanque), visto no item 1 da imagem 5.4;
- Nas arestas do tanque de combustível, faltando precisão nas mudanças de faces de cada superfície do tanque, visto no item 2 da imagem 5.4;

Figura 5.4 – Pontos de erro no tanque de combustível, usando o Skanect



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

Figura 5.5 – Coletor de admissão reconstruído e visualizado no Skanect

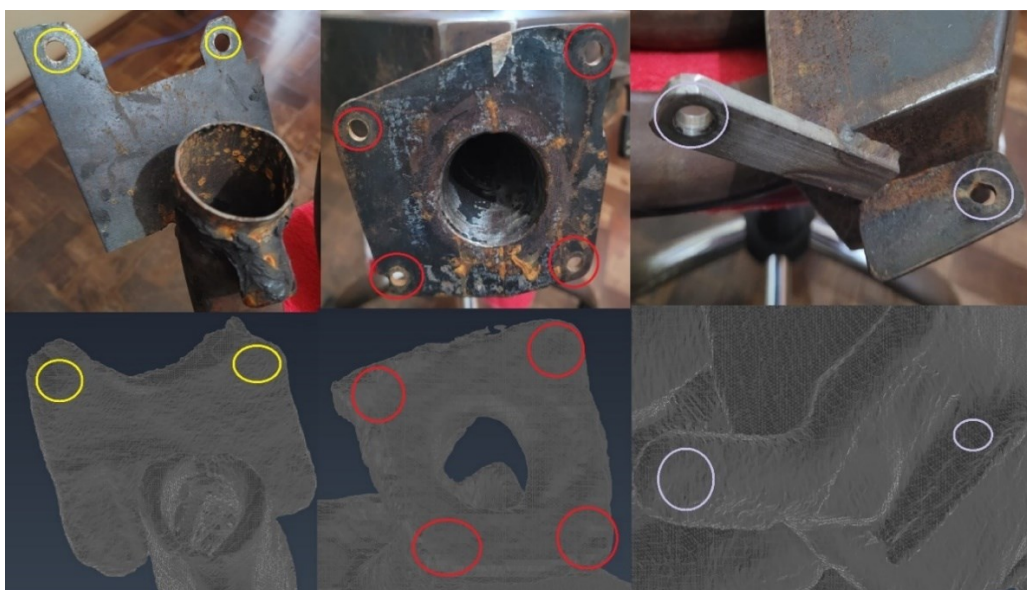


Fonte: imagem de autoria própria (2023).

Em seguida realizamos o processo para o coletor de admissão, utilizando o mesmo software. Os resultados dele se saíram consideravelmente próximos à qualidade do tanque de combustível, com o Kinect identificando bem as curvas dos dutos de admissão, entretanto, ele também possuiu pontos com falhas, visíveis na Figura 5.5.

Foi notado falha em obter detalhes internos dos furos (algo que também ocorreu na outra peça analisada), possivelmente por conta de o scanner não conseguir diferenciar devido à oclusão do campo de visão da câmera de profundidade. Pode-se notar que os diâmetros maiores foram identificados enquanto furos menores, como nos suportes de fixação nos parafusos não foram identificados, como pode ser visto exemplificado na figura 5.6.

Figura 5.6 – Comparação das fixações por parafuso, entre a peça real e a malha digitalizada



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

Outra consideração importante a se notar, foi que o processo de reconstrução do Skanect não identificou a placa de vídeo e realizou o processo através do CPU, que seria mais lento. Uma possível explicação para isso seria o software não suportar a versão atual do Nvidia CUDA, que permite o

processamento de funções para auxiliar e aumentar velocidade de alguns elementos gráficos utilizando o processador da placa de vídeo.

No ReconstructMe, foi possível fazer a recriação com maior velocidade mantendo um bom detalhamento graças renderização pela GPU. Nas Tabelas 5.1 e 5.2, a seguir, vemos o tempo obtido por cada escaneamento em 5 e a média calculada, com 5 ensaios por peça (tanque de combustível e o coletor de admissão) e cada programa (Skanect e ReconstructMe), com média de tempo calculado. A comparação porcentual da tabela 5.2 relaciona o quanto o ReconstructMe levou em relação ao Skanect, enquanto o formato da tabela 5.1 possui os resultados analisados no formato de horas, minutos e segundos necessários.

Tabela 5.1 – Tabela referente ao tempo de escaneamento para os dois programas

Nº do ensaio	Skanect (tanque de combustível)	ReconstructMe (tanque de combustível)	Skanect (Coletor de admissão)	ReconstructMe (Coletor de admissão)
1	0:05:20	0:00:50	0:08:45	0:00:20
2	0:06:45	0:01:20	0:06:50	0:00:40
3	0:07:50	0:00:55	0:07:55	0:00:30
4	0:05:25	0:00:30	0:10:15	0:00:35
5	0:09:30	0:00:40	0:07:15	0:00:20

Fonte: autoria própria (2023).

Vale também notar que mesmo com o processamento realizado pela GPU sendo constantemente mais rápido, possuindo uma duração de, em média, 8,77% do tempo necessário para a CPU, o prazo longo do Skanect também pode ser influenciado por conta de compatibilidade do programa com o sistema operacional ou fatores externos de *hardware*.

Tabela 5.2 – Tabela referente ao tempo médio de escaneamento e a diferença percentual entre cada programa

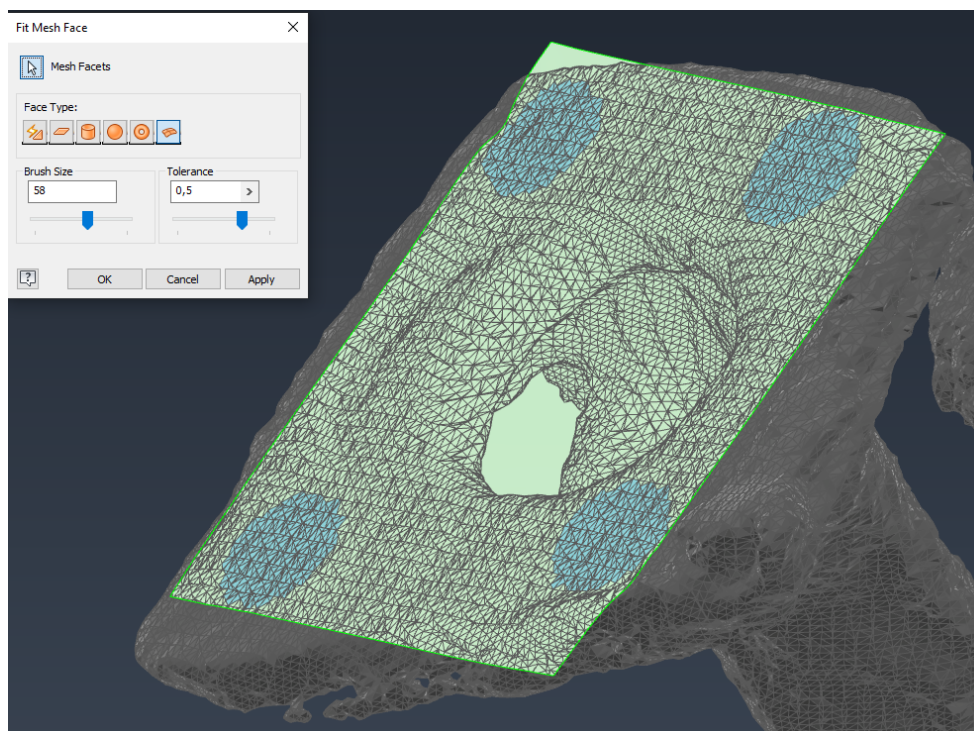
Peça	Skanect	ReconstructMe	Diferença percentual (ReconstructMe/Skanect)
Tanque de combustível (Média)	0:06:45	0:00:50	12,35%
Coletor de admissão (Média)	0:07:55	0:00:30	6,32%
Média por programa	0:07:02	0:00:37	8,77%

Fonte: autoria própria (2023).

Com o arquivo reconstruído e exportado para o Autodesk Inventor 2022, foi utilizada a ferramenta de reconstrução facial da malha para se obter uma face comum dos pontos para obtermos uma média das dimensões da modelagem, como pode ser visto na imagem a seguir.

Para o estudo, foi realizado a escolha de superfícies onde-se pode obter uma área considerável com uma tolerância de 0,5 mm, devido à exigência de processamento do hardware. Quando se utilizou tolerâncias melhores, como por exemplo, 0,2 mm a 0,4 mm, houve falha para gerar o plano e, por consequência, o fechamento abrupto do programa.

Figura 5.7 – Planificação da malha em faces no Autodesk Inventor



Fonte: imagem de autoria própria (2023).

A seguir temos as tabelas referentes as diferenças entre as medidas realizadas da peça real e as do objeto, reconstruído pelo ReconstructMe, escolhido por conta da sua qualidade maior de detalhamento quando exportada, já que os resultados do Skanect na versão gratuita se mostraram inadequados.

Foram analisados 6 pontos distintos em cada peça, adicionado com a média da diferença relativa entre cada parte real e escaneada, além do desvio padrão entre as diferenças obtidas.

Tabela 5.3 – Tabela referente ao coletor de admissão, em milímetros (mm).

Segmento analisado	Media (medida física)	Medida escaneada	Diferença absoluta	Erro porcentual
A	108,26	107,37	-0,89	0,82 %
B	49,72	54,03	+4,31	8,67 %
C	92,08	93,75	+1,67	1,81 %
D	48,38	51,42	+3,04	6,28 %
E	152	147,05	-4,95	3,26 %
F	301	295,47	-5,53	1,84 %
Média	-	-	0,39	2,55 %

Fonte: autoria própria (2023).

Tabela 5.4 – Tabela referente ao tanque de combustível, em milímetros (mm).

Segmento analisado	Media (medida física)	Medida escaneada	Diferença absoluta	Erro porcentual
A'	180	175,94	-4,06	2,26 %
B'	120,8	114,22	-6,58	5,45 %
C'	301	285,69	-15,31	5,09 %
D'	202	203,98	1,98	0,98 %
E'	65,42	63,04	-2,38	3,64 %
F'	84,16	67,38	-16,78	19,94 %
Média	-	-	-5,3200	4,36 %

Fonte: autoria própria (2023).

Por conta dos resultados negativos com a qualidade da peça exportada para o Autodesk inventor, foi desconsiderado a reconstrução no Inventor com o Skanect, com o foco do estudo se dirigindo para o ReconstructMe, que foi

utilizado nas comparações anteriores. As diferenças entre os dois programas se devem principalmente à baixa a qualidade da malha exportada na versão gratuita do Skanect.

Uma possibilidade seria o uso da versão paga do Skanect, para a realização de uma comparação mais detalhada entre as duas ferramentas distintas, entretanto, não foi possível a compra da licença durante a realização do trabalho apresentado.

6. CONCLUSÃO

Pode-se afirmar que o Kinect, quando lançado em 2010, foi um scanner de baixo custo pelo hardware que entregava (quando comparado a scanners profissionais), além da possibilidade para funções fora dos jogos no Xbox, como um scanner aceitável para usuário comum que não necessita um dispositivo mais caro.

Mas com o tempo, se nota que hoje temos opções melhores, desde aplicativos de fotogrametria para smartphones, como Kiri Engine e Polycam, ou até dispositivos modernos, como o Azure Kinect fornecido pela Microsoft ou aparelhos chineses de baixo custo, que podem ser interessantes com uma análise mais profunda e utilizando softwares atuais.

Um dos problemas identificados com o Kinect foi a limitação e falta de suporte para os diversos softwares que podem utilizar o dispositivo, como o Skanect apresentando limitações da versão gratuita e falta de atualizações para hardwares atuais, ou o Shapify que não conseguiu nem reconhecer o aparelho e foi desconsiderado durante o trabalho.

Por fim, conclua-se que o Kinect possui muitos erros durante o escaneamento para poder ser utilizável como uma análise séria de projetos, já que foram necessárias várias repetições do processo até se obter um resultado minimamente aceitável para o estudo, com erros chegando a 15 ou até 16mm em alguns casos ou detalhes perdidos durante a reconstrução. Pode-se sugerir um estudo mais aprofundado em scanners por fotogrametria em smartphones ou outros scanners disponíveis no mercado e com próprio suporte de softwares que podem ajudar no aprimoramento da malha final.

REFERÊNCIAS

2021 Formula 1 Technical Regulations, disponível em <https://www.fia.com/sites/default/files/2021_formula_1_technical_regulations_-_iss_7_-_2020-12-16.pdf>, acessado em 30/05/2021.

Álbum FSAE Lincoln 2018, disponível em <<https://photos.app.goo.gl/yKdKhAozYq1Q3EZx7>>, acessado em 26/05/2021.

Álbum FSAE Michigan 2019, disponível em <<https://photos.app.goo.gl/2mBM2qHitEFvgsbt6>>, acessado em 25/05/2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 216: Paquímetros e paquímetros de profundidade – Características construtivas e requisitos metrológicos**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

BARBOSA, Lucas. M. Q., **Influência da aerodinâmica em um carro de fórmula SAE**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

BORGES, Daniela A. E. G.; **Reconstrução de objectos 3D usando Kinect**. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, 2013.

BRENDLER, C. F.; Müller, M. S.; DA SILVA, F. P.; TEIXEIRA, F. G. Uso da digitalização 3D do corpo humano para desenvolvimento de produtos personalizados: Análise comparativa entre os scanners Artec EVA e o Kinect **Estudos em Design**. v.24, n.2, p. 24–43, 2016. DOI:10.35522/EED.V24I2.356.

Concepção e fabricação de um volante de Fórmula SAE, disponível em <<https://www.creaform3d.com/pt/aplicacoes/concepcao-e-fabricacao-de-um-volante-para-um-carro-de-formula-sae>>, acessado em 10/06/2021.

COSTA, A. B.; CRUZ, D. R. N.; ALESSIO, K. O.; GARCIA, A. D.; ROTHMUND, K.; CARVALHO, F. S.; BARIN, J. S.; TADESCO, L. P. Aplicação da termografia por infravermelho para titulações termométricas. **Orbital: The Electronic Journal of Chemistry**, v.7, n.2, 2015. DOI: 10.17807/orbital.v7i2.682.

Cotação do Dólar para Real, disponível em <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2020/11/18/dolar.html>>, acessado em 26/05/2021.

CUYPERS, W.; VAN GESTEL, N.; VOET, A.; KRUTH, J. P.; MINGNEAU, J.; BLEYS, P. Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 47, n. 3–4, p. 292–300, 2009. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2008.03.013.

DA SILVA NETO, João Cirilo, **Metrologia e controle dimensional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

Formula SAE Rules 2020, disponível em <<https://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=1b6bda52-48d0-4286-931d-c9418165fd3e>>, acessado em 22/05/2022.

GUARATO, A. Z.; LOJA, A. C.; PEREIRA, L. P.; BRAGA, S. L., TREVILATO, T. R. B. Qualification of a 3D structured light sensor for a reverse engineering application. **Proceedings of SPIE - International Society for Optical Engineering**, 2016. DOI:10.1117/12.2257601.

KHOSHELHAM, Kourosh; ELBERINK, Sander O. Accuracy and resolution of kinect depth data for indoor mapping applications. **Sensors**, v. 12, n. 2, p. 1437–1454, 2012. DOI: 10.3390/s120201437.

KOKUBUM, Christiane N. de C.; **Estudo de métodos para classificação e localização precisa de padrões usando um sistema de luz estruturada**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2004.

LORINCZ, Jim. Advanced 3D Scanning Meets Rigid FSAE University Student Competition. **SME**. 31 maio 2018. disponível em <<https://www.sme.org/advanced-3d-scanning-meets-rigid-fsae-university-student-competition>>, acessado em 11/06/2021.

OLIVEIRA, Allan C. M., **Criação e visualização de interfaces do usuário cientes de contexto para realidade aumentada**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2011.

PUNTAMBEKAR, Nirant V.; JABLOKOW, Andrei G.; SOMMER, H. Joseph. Unified review of 3D model generation for reverse engineering. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v. 7, n. 4, p. 259–268, 1994. DOI: 10.1016/0951-5240(94)90015-9.

REICHARD, CHELSEA A.; Test and Evaluation of an Artec Leo 3D Scanner. **College of Engineering and Science of Florida Institute of Technology**. Dissertação de Mestrado, Florida Institute of Technology, 2020.

SAE Brasil, resultados disponíveis em <<https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil/resultados/>>, acessado em: 22/05/2021.

SILVA, Fábio P. da; SALVALAIO, Cláudio L.; KINDLEIN JUNIOR, Wilson., Análise comparativa de processos de digitalização 3D para modelos de partes humanas. **9º Congresso brasileiro de pesquisa e desenvolvimento em design**. 2010.

SOUSA, João F. C., **Scanner a 3D**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2015.

THIAGO, Bianca B., **Análise de sistemas de digitalização de baixo de baixo custo para utilização no desenvolvimento de órteses de membros superiores para crianças com deficiência sensório motora**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

TONG, J; ZHOU, J; LIU, L; PAN, Z; YAN, H. Scanning 3d full human bodies using kinects. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**. v.18, n.4, p. 643-650, 2012. DOI: 10.1109/TVCG.2012.56.