

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DANIEL DE MORAES COELHO

AVALIAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS DE ESCANEAMENTO 3D DE BAIXO
CUSTO PARA INSPEÇÃO DE COMPONENTES FABRICADOS POR MANUFATURA
ADITIVA

Uberlândia

2023

DANIEL DE MORAES COELHO

AVALIAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS DE ESCANEAMENTO 3D DE BAIXO
CUSTO PARA INSPEÇÃO DE COMPONENTES FABRICADOS POR MANUFATURA
ADITIVA

Projeto de Fim de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Luiz Eduardo dos Santos Paes

Coorientador: Alexandre Zuquete Guarato

Uberlândia

2023

DANIEL DE MORAES COELHO

AVALIAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS DE ESCANEAMENTO 3D DE BAIXO
CUSTO PARA INSPEÇÃO DE COMPONENTES FABRICADOS POR MANUFATURA
ADITIVA

Projeto de Fim de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica.

Uberlândia, 25 de Julho de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Américo Scotti

Profª. Dra. Rosenda Valdes Arencibia

Prof. Dr. Luiz Eduardo dos Santos Paes

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me salvado e conduzido meus passos até aqui.

Agradeço aos meus pais, que me educaram nos caminhos do Senhor e sempre me amaram.

Agradeço a minha irmã por sempre me apoiar e me incentivar, à minha avó por sempre vibrar com minhas vitórias, e à minha namorada por me inspirar e apoiar na finalização deste projeto. Agradeço também a todos os amigos que me acompanharam no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao professor e amigo Luiz Paes pelo incentivo, motivação e orientação nesta caminhada acadêmica, por ter me oferecido uma Iniciação Científica em um assunto que eu não conhecia e ter me acompanhado e incentivado a compartilhar do trabalho desenvolvido em plataformas internacionais.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida durante os anos do curso.

Agradeço também, à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), ao Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (Laprosolda), como também à Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

“Tudo o que fizerem, façam de todo o coração, como para o Senhor, e não para os homens, sabendo que receberão do Senhor a recompensa da herança. É a Cristo, o Senhor, que vocês estão servindo.”

Colossenses 3:23-24

RESUMO

A Manufatura Aditiva (MA) tem ganhado espaço na Indústria devido às suas diversas vantagens, em destaque a produção de peças sobressalentes. Entretanto, o controle de qualidade ainda é um desafio que dificulta a difusão da MA. A inspeção visual deve ser efetuada por profissionais certificados, incorre em despesas de diversas naturezas, possui precisão reduzida e não permite o registro digital para avaliações futuras. Sendo assim, este estudo propõe avaliar diferentes sistemas de escaneamento 3D de baixo custo para a inspeção de componentes fabricados por MADA (Manufatura Aditiva por Deposição em Arco), sendo estes: LiDAR utilizando celular; e fotogrametria utilizando celular e câmera fotográfica. Foi gerado um modelo 3D, de uma peça fabricada por MADA, com cada um dos sistemas, assim como com um escâner a laser comercial, que serviu de referência para o estudo. As nuvens de pontos geradas pelo celular, utilizando LiDAR, pela câmera fotográfica, utilizando o processo de fotogrametria, e pelo celular, utilizando fotogrametria, apresentaram uma distância média do modelo de referência de 0,212 mm, 0,104 mm e 0,125 mm, respectivamente. Por mais que o maior desvio apresentado tenha sido obtido com o LiDAR, este sistema foi o mais rápido e se destacou dos modelos de fotogrametria por apresentar escala embutida. Por conseguinte, foi concluído que os sistemas de inspeção remota propostos são aptos para realizarem inspeção das dimensões de componentes metálicos processados por MADA, sendo assim viáveis e fáceis de implementar e replicar.

Palavras-chave: Escaneamento 3D, Fotogrametria, LiDAR.

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) has gained space in the industry due to its advantages, especially for the manufacture of spare parts. However, quality control still presents a challenge hindering greater diffusion of AM. Visual inspection has to be done by accredited professionals, incurring several expenses; also, it presents limited precision and does not provide a digital record for future evaluations. Thus, this study evaluated different low-cost 3D scanning systems for the inspection of components manufactured by WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing): LIDAR, using a mobile phone, and photogrammetry, using both the mobile phone and a digital camera. A 3D model of a component manufactured by WAAM was generated with each one of the systems, as well as by a commercial laser scanner, which was used as a reference model for the study. The cloud points generated by the mobile phone, used LiDAR, by the digital camera, applying the photogrammetry process, and the mobile phone, using photogrammetry, presented an average deviation from the reference model of 0.212 mm, 0.104 mm, and 0.125 mm, respectively. Even though the greatest deviation was presented by the LiDAR, this system was the fastest and had the advantage over the photogrammetry models for presenting its own scale. Therefore, it can be concluded that the remote inspection systems analyzed here are suitable for the inspection of the dimensions of components produced with MADA and can be easily implemented and replicated.

Keywords: 3D scanning, Photogrammetry, LiDAR.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Primeira peça fabricada por Manufatura Aditiva (MADA) aplicada em uma instalação de petróleo e gás no Brasil.....	13
Figura 2: Peça fabricada por MADA selecionada para inspeção, com dimensões nominais de 35 mm (altura), 115 mm (diâmetro externo) e 5 mm (diâmetro interno).....	18
Figura 3: Bancada experimental para escaneamento da peça utilizando o escâner a laser, com a mesa rotativa e os alvos dispostos sobre esta.	19
Figura 4: Interface do software VX Elements com os dois modelos gerados com o escâner 3D já fundidos.	20
Figura 5: iPhone 14 Pro, celular utilizado para realizar o escaneamento (A). Ícone do aplicativo utilizado para realizar o escaneamento (B).....	20
Figura 6: Montagem experimental para realização do escaneamento da peça fabricada por manufatura aditiva.	21
Figura 7: Aplicativo Scaniverse com a visualização do objeto de estudo e <i>Range</i> selecionado para o menor valor.	22
Figura 8: Interface do aplicativo Scaniverse, pré (A) e pós processamento de dados (B).	23
Figura 9: Interface do aplicativo Scaniverse com a ferramenta de corte selecionada.	24
Figura 10: Modelo final produzido utilizando o LiDAR e o aplicativo Scaniverse.....	24
Figura 11: Vista frontal da bancada para o registro das fotografias utilizadas na confecção do modelo 3D a partir do processo de Fotogrametria.	25
Figura 12: Vista lateral da bancada para o registro das fotografias utilizadas na confecção do modelo 3D a partir do processo de Fotogrametria. Parâmetro ‘b’ referente à distância horizontal entre a base da camera e o centro do objeto; ‘h’ referente à altura da base.	26
Figura 13: Regiões da peça (A) exterior frontal; (B) interior distal.	27
Figura 14: Caracteres aleatórios dispostos no plano da plataforma rotativa, ao redor e no interior do objeto de estudo.	27
Figura 15: Interface do software open source Meshroom (A) com o modelo gerado através da Fotogrametria (B).	28
Figura 16: Interface do aplicativo KiriEngine após aquisição de imagens.	29
Figura 17: Ilustração da vista frontal do posicionamento do celular em relação ao objeto de estudo na primeira (A), segunda (B) e terceira (C) rotações para aquisição das imagens. Com foco na superfície exterior frontal nas duas primeiras e interior distal na terceira.....	29
Figura 18: Interface do aplicativo KiriEngine com a ferramenta de corte selecionada.	30

Figura 19: Modelo final produzido utilizando Fotogrametria e o aplicativo KiriEngine.....	31
Figura 20: Distância entre as nuvens de pontos dos modelos propostos comparados à obtida pelo escâner a laser comercial. Sendo estes, LiDAR utilizando o celular (A), Fotogrametria utilizando câmera fotográfica (B) e Fotogrametria utilizando celular (C).....	33
Figura 21: Histogramas da distância entre nuvens de pontos dos modelos propostos comparados à obtida pelo escâner a laser comercial. LiDAR utilizando o celular (A), fotogrametria utilizando câmera fotográfica (B) e Fotogrametria utilizando celular (C).....	33
Figura 22: Comparação do modelo virtual obtido com LiDAR (a esquerda) com o objeto real (a direita) utilizando Realidade Aumentada no aplicativo Scaniverse	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Altura da câmera e foco das imagens a cada volta na peça.	26
Tabela 2: Comparação entre os sistemas propostos	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4	METODOLOGIA.....	18
4.1	Criação do modelo de referência com escâner 3D comercial	18
4.2	Criação do modelo com o celular utilizando o LiDAR	20
4.3	Criação do modelo com câmera fotográfica utilizando Fotogrametria	24
4.4	Criação do modelo com celular utilizando Fotogrametria	28
4.5	Comparação dos modelos de Fotogrametria e LiDAR com o modelo de referência	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
6	CONCLUSÕES.....	38
7	TÓPICOS DE TRABALHOS FUTUROS.....	38
	REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

A presença de componentes metálicos fabricados por manufatura aditiva (MA) tem aumentado em diferentes setores industriais. A liberdade de *design* visando otimizar a resistência do material para um peso mínimo (Hodonu et al., 2019), a fabricação de materiais com gradação funcional (Li et al., 2020) e a personalização de próteses (Sohaib et al., 2018, dos Santos et al., 2019) podem ser citados entre seus benefícios. Além disso, trata-se de uma abordagem sustentável, uma vez que a perda de material é muito menor do que a observada em outros processos, como a usinagem.

Entre as aplicações em que a manufatura aditiva se destaca, está a produção de peças sobressalentes. Muitas empresas precisam de manter estoques, aumentando significativamente os custos (Bacciaglia et al., 2020). Essa tecnologia permite construir bibliotecas virtuais e fabricar peças sob demanda. No entanto, alguns setores, como o petróleo e o gás, exigem processos de certificação rigorosos, o que pode implicar em atrasos na reposição. Chua et al. (2017) afirmam que uma das principais barreiras para a adoção da manufatura aditiva está relacionada à qualificação. O controle de qualidade ainda é um desafio e dificulta a difusão da MA.

O processo de deposição direta de energia (DED) com arco voltaico e alimentação de arame, conhecido como Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), é preferido para componentes de médias a grandes dimensões. É possível atingir taxas de deposição elevadas com uma tocha MIG/MAG, o que contribui para a redução do tempo de fabricação. Outros processos de arco, como o TIG, também podem ser utilizados para materiais mais nobres (Bai et al., 2016); A DED com laser é outra tendência, focada em componentes de dimensões reduzidas (Paes et al., 2021). A concentração de energia do laser permite atingir alta resolução, embora deva ser controlada para evitar possíveis defeitos (Paes et al., 2019a, Paes et al., 2019b, Cavilha Neto et al., 2021). A Figura 1 mostra a primeira peça de manufatura aditiva aplicada numa instalação de petróleo e gás no Brasil (Petrobras, 2019).

Essa peça é uma transição de tubo (luva) em aço-carbono, inicialmente produzida em ferro fundido através de processos de fabricação convencionais. Os ensaios mecânicos e não destrutivos demonstraram a sua integridade. A primeira fase da qualificação diz respeito à inspeção visual. A superfície do componente apresenta uma ondulação característica, que tem de ser homogênea para permitir a usinagem posterior. Problemas de instabilidade do arco podem levar à falta de homogeneidade na deposição (Silva et al., 2018, Truppel et al., 2019, Sartori et al., 2017). O teste mencionado também é utilizado para detectar defeitos externos.

Figura 1: Primeira peça fabricada por Manufatura Aditiva (MADA) aplicada em uma instalação de petróleo e gás no Brasil.



Fonte: Coelho et al. 2022.

A inspeção visual deve ser efetuada por profissionais certificados. Em particular, no caso da MADA, são necessários profissionais com experiência em soldagem MIG/MAG. Uma limitação fundamental é a inspeção *in situ* (o inspetor tem de se deslocar à fábrica), incorrendo em despesas de deslocamento. Além disso, os inspetores utilizam normalmente *kits* de calibração de soldagem com precisão reduzida e que não permitem o registo digital para avaliações futuras. Outra dificuldade está relacionada com a formação dos inspetores. Neste caso, os defeitos devem ser induzidos propositalmente nos componentes. De acordo com Martín e Gonzalvez (2018), para a inspeção de soldagem, cada peça custa entre US\$ 200 e US\$ 3.000. Os custos são ainda maiores para peças fabricadas por manufatura aditiva. Além disso, a construção de um laboratório de aprendizagem completo é trabalhosa e cara. Assim, uma solução viável seria a utilização de laboratórios baseados em realidade virtual (RV) e a utilização de técnicas de digitalização 3D de baixo custo para fazer a inspeção virtual dos componentes.

Assim, as seguintes questões são levantadas: é possível inspecionar componentes metálicos fabricados por MA utilizando técnicas de digitalização 3D de baixo custo? Sistemas não comerciais terão precisão suficiente para aplicações em MADA? Em caso afirmativo, a inspeção remota torna-se viável e será de fácil difusão. Isso trará não só benefícios em termos de redução de custos, mas também na melhoria da precisão relativamente aos tradicionais *kits* de calibração, registo digital, em que os dados podem ser utilizados tendo em conta o conceito

de Indústria 4.0 e, finalmente, permitirá o desenvolvimento de plataformas de aprendizagem virtuais.

Portanto, este trabalho comparou a utilização de três sistemas de escaneamento 3D de baixo custo para a inspeção de componentes produzidos por MADA.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos de escaneamento 3D podem ser utilizados para reconstruir peças visando diferentes fins industriais, desde a engenharia reversa (Guarato et al., 2016, Olejnik et al., 2018) até a inspeção dimensional de uma turbina a gás (Bösemann, 2016). Existe uma variedade de escâneres disponíveis, classificados como sensores ativos ou passivos. Nos sensores ativos, como na digitalização a laser, a energia é transmitida para a cena e a energia refletida é recuperada. Um exemplo desse tipo é o LiDAR. Em contrapartida, os sensores passivos não transmitem energia, mas utilizam a luz natural disponível para adquirir informações (Bhatla et al., 2020). Um exemplo de uma técnica que utiliza esse último tipo de sensor é a Fotogrametria. Guerra et al. (2018) afirmam que as vantagens dos sistemas passivos em relação aos ativos são os custos geralmente mais baixos, menor tamanho (são compactos) e maior facilidade de utilização. Em contrapartida, um obstáculo é o fato de, geralmente, serem mais lentos e menos precisos.

Os escâneres a laser convencionais funcionam com base no princípio de *structure light scanning* (SLS), que aplica linhas de luz no objeto e usa uma câmera para adquirir padrões de deformação. Em seguida, as coordenadas x, y e z são calculadas por meio de triangulação ativa (Keaveney et al., 2016, Rodríguez et al., 2017, Singhatam et al., 2019). O LiDAR (*Light Detection and Ranging*), por sua vez, é um tipo de escâner a laser, que utiliza o princípio ToF (*Time of flight*) "tempo de voo" para realizar medições de distância. Esse princípio consiste na emissão de pulsos de laser e no cálculo do tempo de retorno desses pulsos para determinar a distância entre o sensor e um objeto (Li et al., 2020).

O LiDAR possui uma vasta cobertura e elevada taxa de amostragem, permitindo a geração rápida e eficiente de dados em áreas extensas, enquanto os escâneres a laser padrão são mais recomendados para aplicações específicas de menor escala (Raj et al., 2020). O LiDAR é amplamente utilizado em navegação, sistemas aéreos, veículos autônomos e outras áreas, enquanto os escâneres a laser padrão são comumente usados em engenharia e digitalização de objetos em menor escala (Raj et al., 2020).

Por definição, a fotogrametria é uma técnica de medição ótica usada para obter a geometria, o deslocamento e a deformação de uma estrutura usando fotografias ou imagens digitais de diferentes ângulos de visão (Taqraban et al., 2019, Gonçalves Júnior et al., 2009). Foi inicialmente desenvolvido para aplicações militares aéreas e terrestres (Taqraban et al., 2019), mas posteriormente foi adaptado para o setor industrial no modo Close Range (Martín, Gonzalez, 2018). Esta técnica usa o alinhamento de pontos de referência de um grande número

de imagens 2D para triangular a nuvem de pontos e formar um modelo 3D (Bhatla et al., 2020, Keaveney et al., 2016, Waterhouse et al., 2017, James et al., 2017). Esse procedimento também é conhecido como *Structure from Motion* (SfM) (Kovynev e Zaslavsky, 2021).

Deve-se dar atenção especial durante a aquisição das imagens em termos de iluminação, foco e profundidade de campo (Adami et al., 2015). O componente deve ter uma textura (padrão visual, cor) para que o *software* encontre os pontos de correspondência (Waterhouse et al., 2017). Além da inspeção geral (Maccormick et al., 2011), a fotogrametria tem sido usada na medicina (Taqriban et al., 2019, Odeh et al., 2019, Palousek et al., 2014), nas ciências biológicas (Keaveney et al., 2016), na construção civil (Kovynev, Zaslavsky, 2021) e na arqueologia (Gaboutchian et al., 2020), sendo a última aplicação a mais comumente encontrada na literatura. Vale a pena mencionar a importância desse conhecimento para a reconstrução do monumento Notre Dame Paris após o incêndio de 2019. A reconstrução só foi possível porque uma empresa especializada em digitalização 3D havia escaneado todo o edifício entre 2014 e 2016, usando fotogrametria (Bock, 2019).

Embora os sistemas comerciais de escaneamento a laser sejam geralmente mais precisos, eles exigem um investimento maior, muitas vezes não são portáteis, requerem treinamento específico (Bahtla et al., 2020) e não incluem textura (cor) no modelo (Adami et al., 2015). Um sistema comercial de escâner a laser pode custar até US\$ 40.000; entretanto, existem sistemas alternativos que utilizam LiDAR que são de baixo custo e portáteis, estando na mesma faixa de preço de um sistema de fotogrametria composto por uma câmera DSLR ou um celular (ambos em torno de US\$1.000).

O baixo custo e a simplicidade de operação são essenciais para a difusão de sistemas de escaneamento 3D na Indústria. A presença de textura (cor) no modelo é obrigatória para a identificação de algumas discontinuidades. Os modelos de fotogrametria são denominados modelos globais, pois apresentam geometria e textura (cor) (Martín, Gonzalez, 2019), isso também é válido para os modelos obtidos com LiDAR, uma vez que apresentam as mesmas características.

No entanto, existem alguns desafios inerentes à MA que não foram investigados antes. A maioria dos estudos se concentra na inspeção de características geométricas e de soldagem (Evans et al., 2018). Waterhouse et al. (2017) afirmaram que algumas peças de MA não apresentam textura suficiente para aplicar a técnica de fotogrametria. Para resolver esse problema, eles propuseram um sistema de projeção de speckle a laser. A refletividade também é um aspecto dificultador (Guerra et al., 2018). Apesar da falta de informações sobre o assunto, publicações recentes demonstram que tanto os escâneres a laser (Xiong et al., 2020) quanto a

fotogrametria (Evans et al., 2018, Bahnini et al., 2020) já estão sendo usados para inspecionar componentes de MA. Porém, em nenhum dos casos, um componente fabricado por MADA foi analisado.

4 METODOLOGIA

Para confirmar que os sistemas de fotogrametria e LiDAR são adequados para escanear e medir peças produzidas por MADA, o objeto selecionado para inspeção (Figura 2), foi fabricado por meio da MADA utilizando o processo MIG/MAG e arame de aço carbono (AWS ER70S-6). Suas dimensões nominais de altura, diâmetro exterior e diâmetro interior são apresentadas na Figura 2. Essa amostra foi selecionada por apresentar dimensões típicas de um componente fabricado por MADA e os principais desafios são a reflexão da luz (metal) para aquisição de imagens no processo de fotogrametria e o escaneamento da superfície interna para o LiDAR.

Figura 2: Peça fabricada por MADA selecionada para inspeção, com dimensões nominais de 35 mm (altura), 115 mm (diâmetro externo) e 75 mm (diâmetro interno).



Fonte: Coelho et al. (2022)

4.1 Criação do modelo de referência com escâner 3D comercial

O método de validação dos sistemas propostos, prevê a utilização de um modelo 3D de referência. Para isso, de forma análoga ao trabalho desenvolvido por Vacca (2019), foi proposto escanear o objeto de estudo com um escâner 3D para comparação. O escâner utilizado para a confecção do modelo de referência foi o escâner a laser CREAFORM HandySCAN 307.

Esse escâner utiliza triangulação para determinar a posição relativa do objeto escaneado em tempo real e precisa estar conectado a um computador com o *software* VX Elements, no qual o modelo vai sendo construído enquanto o objeto é escaneado. O HandySCAN é um sistema de aquisição de dados que independe de escalas externas, pois este conta com um

sistema de posicionamento interno e conta também com 2 câmeras, 7 lasers cruzados, uma área de escaneamento de 275 x 250 mm² e tem precisão de até 0,040 mm (CREAFORM).

Previamente ao escaneamento da peça, foi necessário calibrar o escâner com o gabarito fornecido pela empresa e ajustar seu obturador para a luz ambiente. Uma plataforma rotativa foi utilizada como base tanto para o objeto de estudo como para os alvos de referência do escâner, que devem estar estáticos em relação à peça e com um distanciamento de 50 – 100 mm uns dos outros (Figura 3).

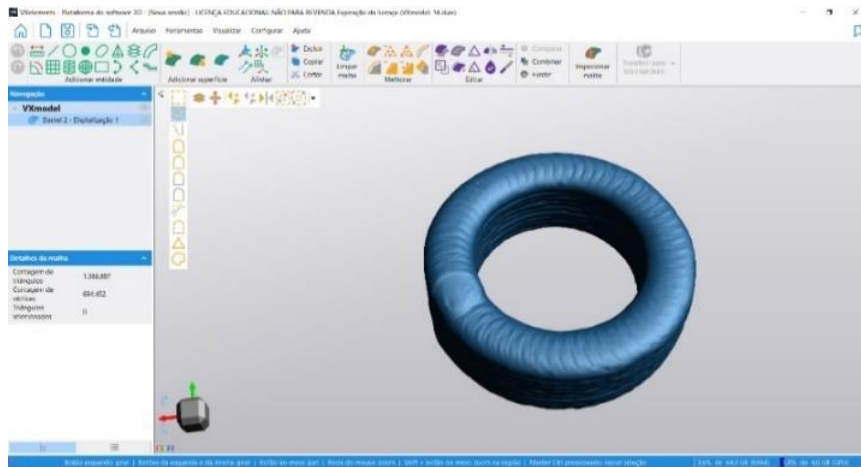
Figura 3: Bancada experimental para escaneamento da peça utilizando o escâner a laser, com a mesa rotativa e os alvos dispostos sobre esta.



Fonte: Coelho et al. (2022)

Foi realizado um escaneamento com a peça em sua orientação normal, e outro com a mesma invertida. Após os dois escaneamentos serem realizados, eles foram unidos formando um modelo único (o *software* conta com uma ferramenta própria para isso). Isso foi feito pois a superfície interna localizada na parte inferior da peça é de difícil visualização para o escâner. O modelo final pode ser observado na Figura 4.

Figura 4: Interface do *software* VX Elements com os dois modelos gerados com o escâner 3D já fundidos.



Fonte: Coelho et al. (2022)

4.2 Criação do modelo com o celular utilizando o LiDAR

Para gerar o modelo 3D com o celular, foi utilizado o aparelho iPhone 14 Pro (Figura 5.A), com câmera de 48 mega pixels, 24 mm e abertura máxima de $f/1.78$, e também ToF 3D LiDAR. O preço do aparelho em 2023 foi US\$999. O aplicativo *open-source* utilizado para fazer o escaneamento foi o *Scaniverse* (Figura 5.B), atualmente exclusivo para o sistema IOS. Esse aplicativo utiliza o LiDAR embutido no aparelho, associado com a câmera principal para gerar um modelo com escala e com representação de cor coincidente ao objeto real a ser escaneado. É válido pontuar que nos dispositivos que não contam com LiDAR, o aplicativo realiza o escaneamento somente com base na fotogrametria; já nos dispositivos com LiDAR ele faz uso do sensor aliado com a fotogrametria.

Figura 5: iPhone 14 Pro, celular utilizado para realizar o escaneamento (A). Ícone do aplicativo utilizado para realizar o escaneamento (B).



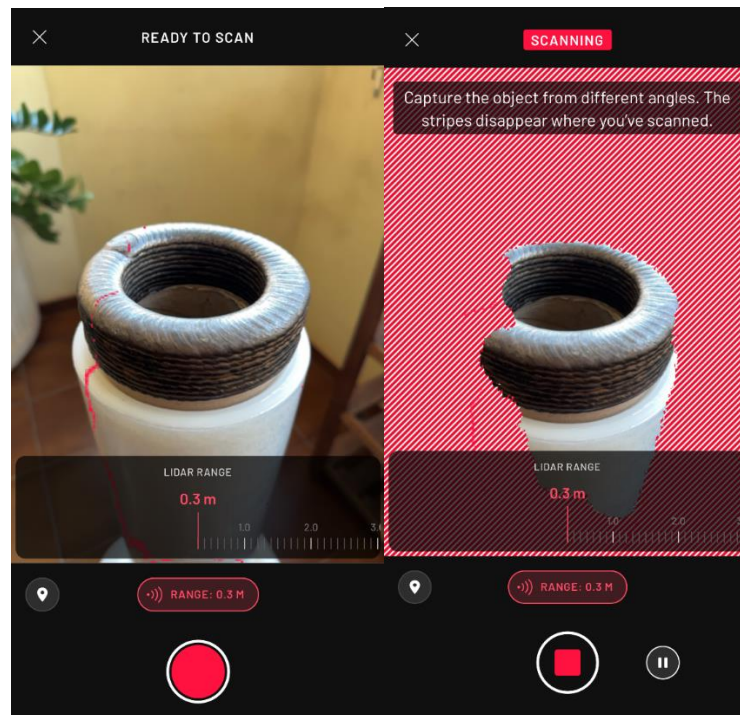
O escaneamento foi realizado em um ambiente semiaberto com iluminação natural e um suporte para elevar a peça do chão (opcional para facilitar o processo de escaneamento) (Figura 6). Essas condições foram escolhidas com o intuito de se assemelharem a uma indústria, na qual não necessariamente existem luzes LED corretamente posicionadas para evitar sombras na peça, ou iluminação uniforme em todos os lados da peça como em um ambiente externo. Também não houve auxílio de nenhuma mesa rotativa para a peça ou tripé para o aparelho celular.

Figura 6: Montagem experimental para realização do escaneamento da peça fabricada por manufatura aditiva.



Na interface do aplicativo, o primeiro parâmetro a ser definido é o *Range* (Faixa Nominal). Este parâmetro se refere à distância máxima captada pelo sensor. Ou seja, qualquer informação que esteja mais longe que a distância definida não será processada. Para a aplicação neste trabalho, o menor valor de *range* foi escolhido (0,3 m), porém este pode ser de até 5 m. Esse parâmetro foi escolhido de tal forma a limitar o alcance do escaner ao objeto de estudo, e evitar que elementos indesejáveis do fundo fossem escaneados (Figura 7).

Figura 7: Aplicativo Scaniverse com a visualização do objeto de estudo e *Range* selecionado para o menor valor.

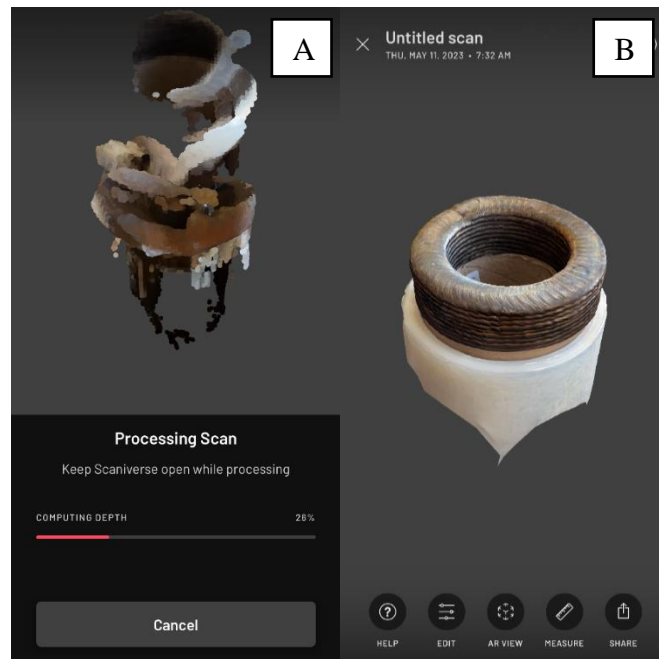


Uma vez que foi dado início ao processo de escaneamento, a peça foi circulada com movimentos lentos, variando na rotação em torno do centro da peça, aproximação e afastamento desta e mudança da angulação do aparelho de forma a escanear a superfície externa e interna da peça. Os movimentos foram repetidos de forma aleatória até que a hachura não estava mais presente na peça.

Quando a peça não continha mais hachuras e o escaneamento foi encerrado, o aplicativo gerou um modelo rudimentar com a informação coletada (Figura 8.A), previamente ao processamento dos dados. Assim que o processamento se inicia, uma série de etapas é seguida pelo aplicativo, sendo estas: *Aligning frames*, *computing depth*, *processing points*, *building mesh*, *texturing*. O modelo final pode ser observado na Figura 8.B.

O aplicativo tem por sensor principal o LiDAR, porém utiliza da fotogrametria para dar suporte ao escaneamento. Sendo assim, o primeiro passo do processamento de dados (*Aligning frames*) é referente aos frames registrados automaticamente pelo aplicativo conforme o escaneamento é feito. Já o segundo (*computing depth*) diz respeito ao LiDAR, no qual este fornece informações métricas sobre distância obtidas através do sensor. Os demais passos são referentes à formação do modelo em si, uma vez que as informações coletadas tanto pela câmera, quanto pelo sensor já foram processadas.

Figura 8: Interface do aplicativo Scaniverse, pré (A) e pós processamento de dados (B).



O tempo total de escaneamento foi de 5:34 minutos e o de processamento dos dados e geração do modelo foi 1:04 minutos. Após a geração do modelo, o *software* ofereceu a opção de realizar cortes da peça (Figura 9), caso a base da peça seja indesejável, como no caso deste trabalho. Os devidos cortes podem ser realizados dentro do aplicativo para que somente o modelo da peça de interesse seja exportado no formato ‘.obj’.

O modelo final obtido pelo LiDAR utilizando somente o celular pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 9: Interface do aplicativo Scaniverse com a ferramenta de corte selecionada.

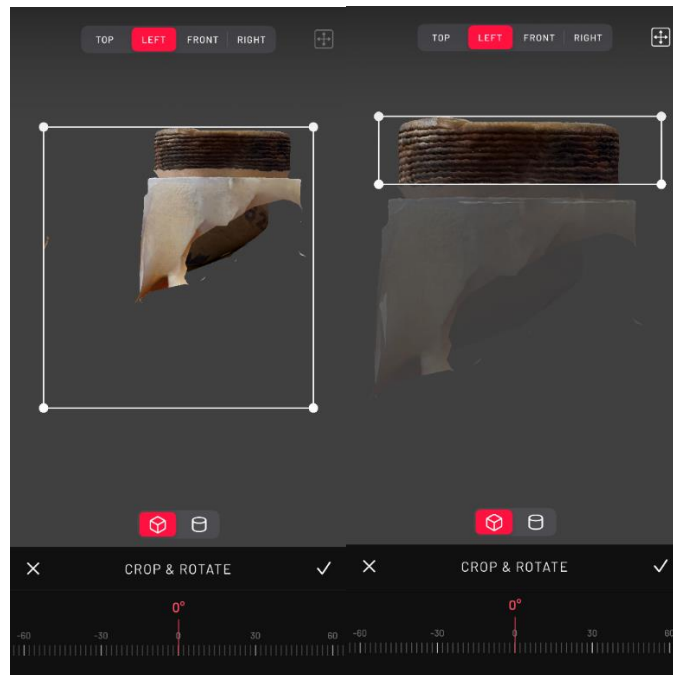


Figura 10: Modelo final produzido utilizando o LiDAR e o aplicativo Scaniverse.



4.3 Criação do modelo com câmera fotográfica utilizando Fotogrametria

Para fins comparativos, a mesma peça foi escaneada utilizando o processo de Fotogrametria. Foi utilizada uma câmera fotográfica DSLR, Nikon D5300, com lente NIKKOR 18-55 mm em um tripé, com os seguintes parâmetros fixos para registrar as fotografias: distância focal de 29 mm, abertura f/25, ISO-2500 e tempo de exposição 1/30 segundo. A iluminação utilizada foi advinda de duas lâmpadas LED de 1,4 W de potência, posicionadas de acordo com a Figura 11, de forma que houvesse o mínimo de sombra na superfície da peça nas

fotografias. Além disso, foi utilizada uma plataforma rotativa, na qual a peça estava centralizada. Este recurso possibilitou uma maior eficiência no processo de adquirir as imagens, pois a câmera fica estacionária enquanto a peça é rotacionada.

Figura 11: Vista frontal da bancada para o registro das fotografias utilizadas na confecção do modelo 3D a partir do processo de Fotogrametria.

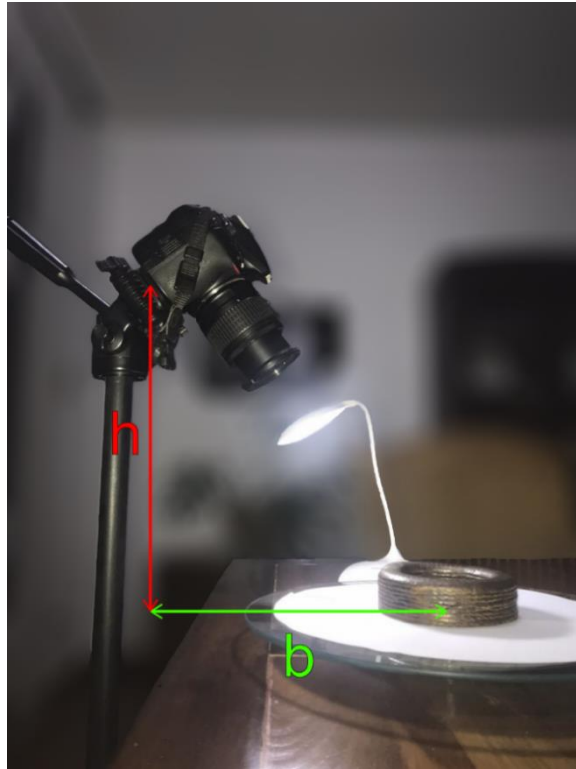


Fonte: Coelho et al. (2022)

Para a confecção dos modelos, foi mantida a distribuição de fotografias definidas previamente de 24 fotografias a cada 360° (intervalo de 15° entre cada foto) e 7 voltas na peça, totalizando 168 fotografias; variando-se o parâmetro “h” (altura) indicado na Figura 12 e o foco entre a parte externa e interna (sempre com a câmera direcionada para o centro da peça). Isto foi feito visando elevada sobreposição das imagens, uma vez que a peça apresenta um padrão de textura que se mantém semelhante na maior parte da superfície desta e pode ser facilmente confundido pelo software utilizado para realizar o alinhamento das imagens.

O parâmetro “b” representa a distância horizontal entre o centro da peça e o centro da base da câmera fotográfica; este foi mantido constante com o valor de 250 mm. O parâmetro “h” representa a distância vertical entre o plano da plataforma rotativa e o centro da base da câmera fotográfica. A Tabela 1 apresenta a variação de “h” juntamente com a variação do foco das imagens nas 7 voltas.

Figura 12: Vista lateral da bancada para o registro das fotografias utilizadas na confecção do modelo 3D a partir do processo de Fotogrametria. Parâmetro ‘b’ referente à distância horizontal entre a base da camera e o centro do objeto; ‘h’ referente à altura da base.



Fonte: Coelho et al. (2022)

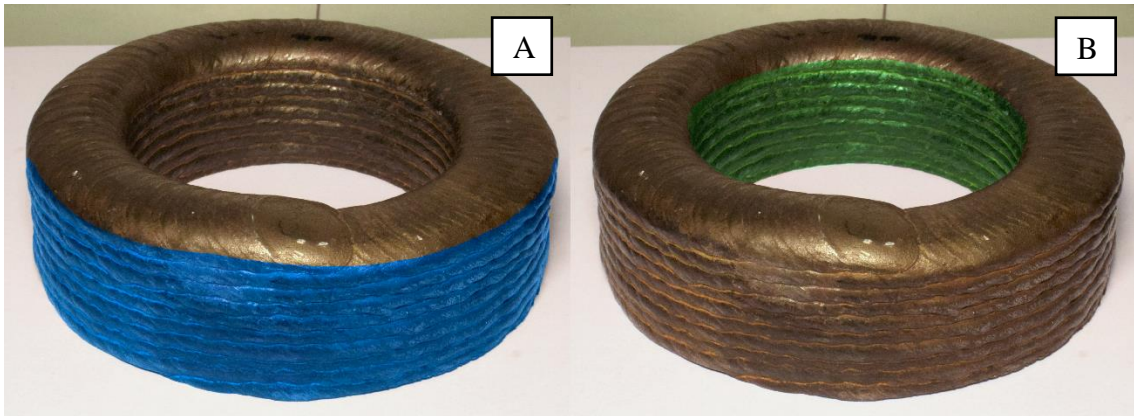
Tabela 1: Altura da câmera e foco das imagens a cada volta na peça.

Volta	Altura “h” [cm]	Foco
1	27	Interior distal
2	24	Interior distal
3	21	Interior distal
4	18	Interior distal
5	18	Exterior frontal
6	15	Exterior frontal
7	12	Exterior frontal

Fonte: Coelho et al. (2022)

As voltas 4 e 5 (Tabela 1). apresentam mesma altura, porém focos diferentes (Figura 13). Isto foi feito para auxiliar no alinhamento das fotografias pois, mesmo com a abertura da lente em $f/25$, não foi possível manter a peça inteira em foco em uma única imagem.

Figura 13: Regiões da peça (A) exterior frontal; (B) interior distal.



Fonte: Coelho et al. (2022).

Foi também utilizada a estratégia de realizar inscrições de caracteres aleatórios na plataforma rotativa (Figura 14), de forma que estes estivessem estáticos em relação ao objeto de estudo. Como estes contrastam com a superfície branca e lisa na qual a peça se encontra, eles se destacam e são facilmente alinhados e detectados pelo software, auxiliando na geração do modelo 3D.

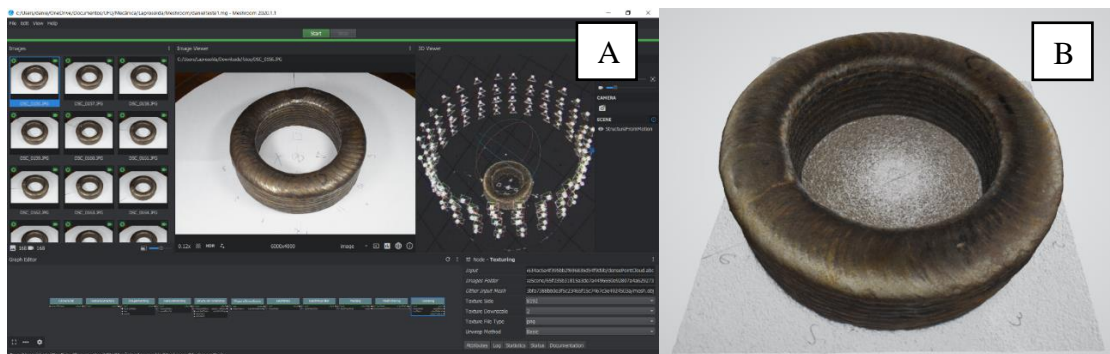
Figura 14: Caracteres aleatórios dispostos no plano da plataforma rotativa, ao redor e no interior do objeto de estudo.



Fonte: Coelho et al. (2022).

Após a aquisição de todas as 168 fotografias, estas foram importadas para o *software open source* Meshroom, no qual foi realizado o processamento e a geração do modelo 3D da peça. Pode-se observar a interface do *software* com o projeto em questão na Figura 15.A e o modelo 3D gerado por este na Figura 15.B.

Figura 15: Interface do *software* open source Meshroom (A) com o modelo gerado através da Fotogrametria (B).



Fonte: Coelho et al. (2022).

4.4 Criação do modelo com celular utilizando Fotogrametria

Também foi realizado o escaneamento da peça pela técnica de Fotogrametria com o celular. O aparelho utilizado foi o mesmo com o qual foi realizado o escaneamento com o LiDAR assim como a montagem experimental (Figura 6). O aplicativo utilizado foi o *KiriEngine*, que é pago, porém com certa usabilidade gratuita.

As fotos foram registradas dentro do aplicativo (Figura 16), seguindo o princípio exposto para a confecção do modelo anterior. Entretanto, como a versão gratuita do aplicativo limita a quantidade de fotos a 70, foram dadas 3 voltas no objeto (uma com 24 fotos, e outras duas com 23) conforme exposto na Figura 17. A primeira foi com o foco na parte exterior frontal, com o celular sem nenhuma inclinação em relação ao objeto. A segunda, ainda com o foco na superfície exterior frontal, porém com o celular mais elevado, voltado para o centro da peça. Na última, o celular permaneceu na mesma inclinação, porém mais perto da peça, de forma a focar na superfície interior distal.

Figura 16: Interface do aplicativo KiriEngine após aquisição de imagens.

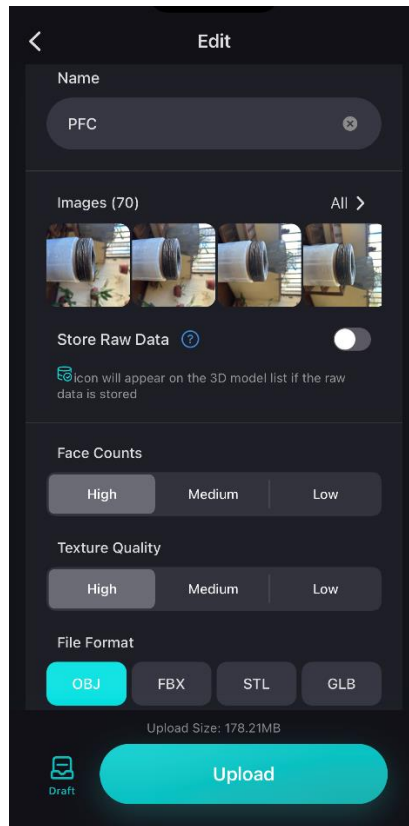
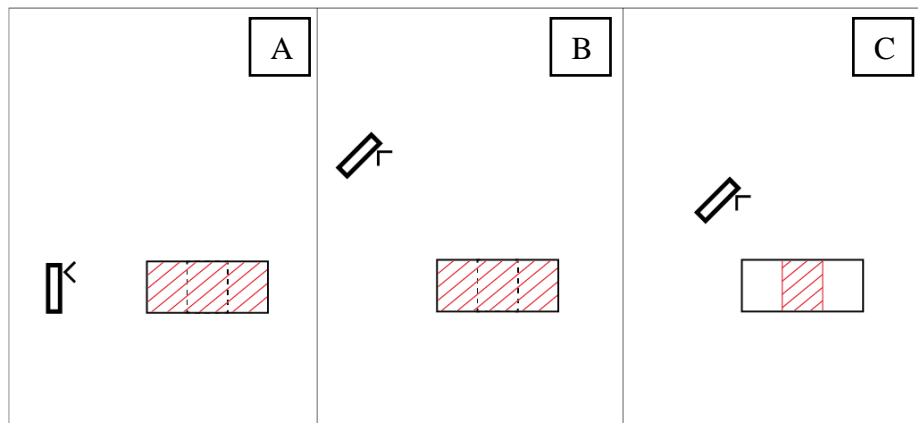


Figura 17: Ilustração da vista frontal do posicionamento do celular em relação ao objeto de estudo na primeira (A), segunda (B) e terceira (C) rotações para aquisição das imagens. Com foco na superfície exterior frontal nas duas primeiras e interior distal na terceira.



Diferentemente do modelo anterior gerado a partir da câmera fotográfica, neste não houve auxílio de tripé, luzes LED ou plataforma rotativa. Isto foi feito para buscar a semelhança ao ambiente de indústria e utilizar a portabilidade do sistema, assim como no LiDAR. Neste caso, não utilizar uma mesa rotativa também auxilia o software a realizar a triangulação dos pontos e gerar o modelo, pois são utilizados pontos em comum do fundo das fotos para alinhar as imagens na etapa de processamento.

A captura das imagens levou 2:02 minutos e o processamento dos dados e geração do modelo 10:34 minutos. É importante destacar que o processamento das imagens foi feito no próprio aplicativo, sem nenhum auxílio externo. Similarmente ao *Scaniverse*, o *KiriEngine* também conta com uma ferramenta para realizar cortes no modelo, caso seja necessário. O corte da base foi realizado para este estudo, conforme a Figura 18.

O modelo final obtido pelo processo de Fotogrametria utilizando somente o celular pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 18: Interface do aplicativo KiriEngine com a ferramenta de corte selecionada.

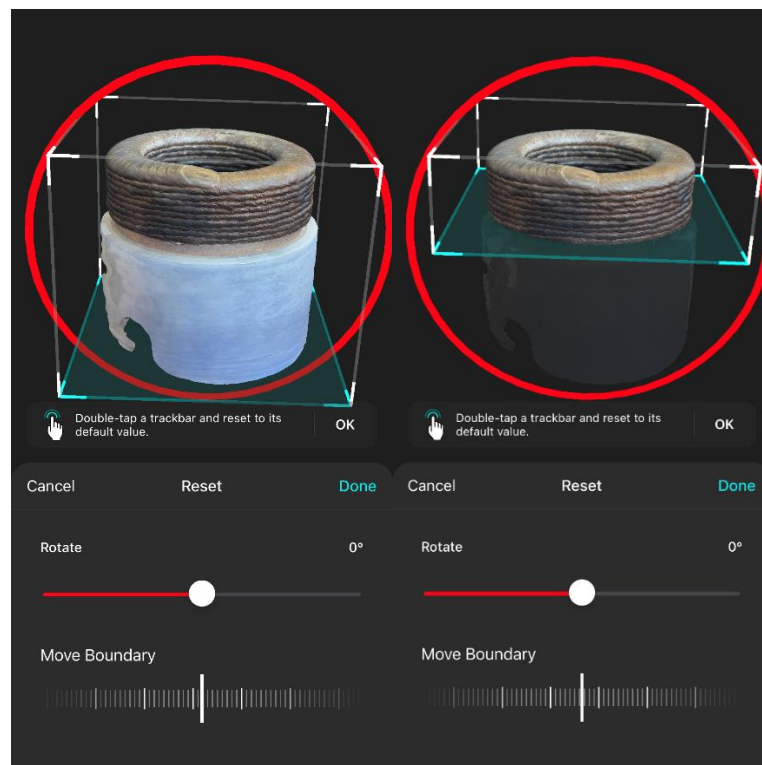


Figura 19: Modelo final produzido utilizando Fotogrametria e o aplicativo KiriEngine.



4.5 Comparação dos modelos de Fotogrametria e LiDAR com o modelo de referência

Para realizar a comparação dos modelos obtidos através dos sistemas de baixo custo com o modelo de referência obtidos pelo escâner a laser comercial, foi utilizado o programa *open-source Cloud Compare*. As malhas de cada modelo foram importadas ao programa e o primeiro passo realizado foi criar uma nuvem de pontos com base na malha dos modelos, e após isso ajustaram-se o posicionamento e escala das nuvens de pontos, para depois calcular a distância entre as nuvens.

O modelo realizado com o LiDAR foi importado com a escala em metros, enquanto o do escâner comercial em milímetros. Sendo assim, foi necessário multiplicar aquele por 1000 em todas as direções para que ficassem na mesma escala. Após isso, a ferramenta de rotação e translação foi utilizada de forma que os dois modelos ficassem aproximadamente sobrepostos. Uma vez sobrepostos, a ferramenta *Finely registers already (roughly) aligned entities* foi utilizada para fazer o alinhamento fino entre as nuvens de pontos e ajustar a escala caso necessário. A escala geral do modelo obtido pelo LiDAR foi multiplicada em 1,00017 e o alinhamento foi realizado.

A última ferramenta utilizada para efetuar a comparação foi a *Compute cloud/cloud distance*. Com essa ferramenta o programa aplica o algoritmo do vizinho mais próximo para calcular a distância de cada ponto de uma nuvem, ao ponto mais próximo da nuvem de referência. Essa ferramenta gera um histograma com as distâncias dos pontos entre as nuvens e calcula a média e o desvio padrão da distância.

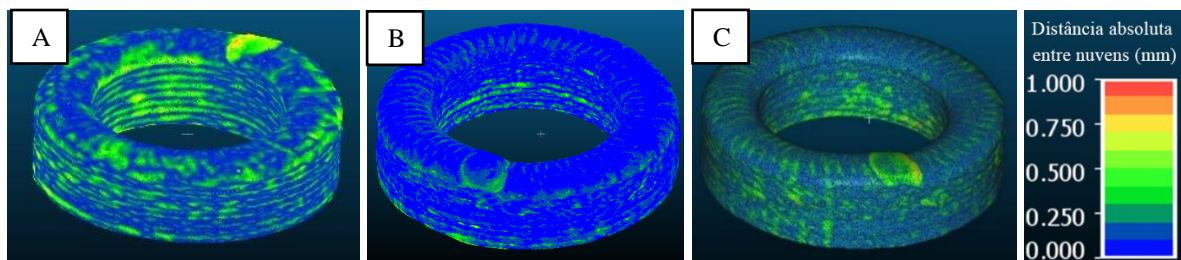
O mesmo procedimento foi realizado para fazer a comparação dos modelos obtidos por Fotogrametria com o obtido pelo escâner a laser comercial. A maior diferença é que, o processo de fotogrametria por si só, sem a utilização de pontos de referência, gera modelos sem escala

global de medida. Sendo assim, a escala global do modelo de fotogrametria não pode ser analisada, mas sim, suas proporções e forma uma vez que o modelo é trazido para a escala global compatível com o de referência dentro do programa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adequação da fotogrametria para a inspeção do componente fabricado por MA foi avaliada com o *software open source CloudCompare*. A Figura 20 apresenta os resultados da sobreposição de nuvens de pontos considerando os métodos de LiDAR, fotogrametria com celular e câmera, e de escaneamento a laser. As cores representam o nível de divergência entre as nuvens. Uma vez que a maioria das regiões é azul em todas as nuvens, os modelos coincidem.

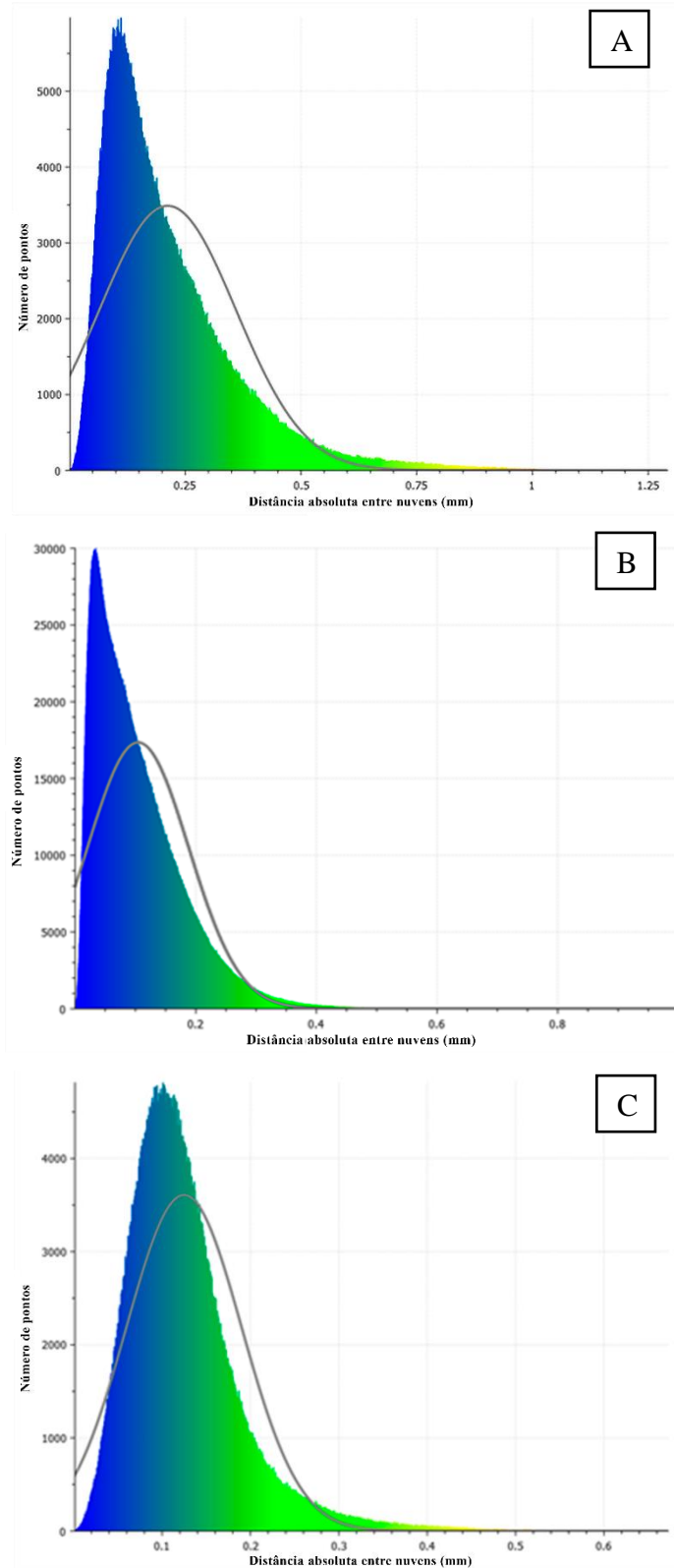
Figura 20: Distância entre as nuvens de pontos dos modelos propostos comparados à obtida pelo escâner a laser comercial. Sendo estes, LiDAR utilizando o celular (A), Fotogrametria utilizando câmera fotográfica (B) e Fotogrametria utilizando celular (C).



Uma análise mais detalhada foi efetuada com o histograma da distância absoluta nuvem a nuvem (Figura 21).

A nuvem de pontos geradas pelo celular utilizando LiDAR, pela câmera fotográfica utilizando o processo de Fotogrametria e pelo celular utilizando Fotogrametria apresentaram um desvio médio do modelo de referência de respectivamente 0,212 mm, 0,104 mm e 0,125 mm. Uma vez que o modelo feito com o LiDAR apresenta escala embutida, é válido pontuar que foi necessário aumentar a escala do modelo em 0,017 %, porém esta razão não alterou a precisão do sistema devido à ordem de grandeza das medidas em questão.

Figura 21: Histogramas da distância entre nuvens de pontos dos modelos propostos comparados à obtida pelo escâner a laser comercial. LiDAR utilizando o celular (A), fotogrametria utilizando câmera fotográfica (B) e Fotogrametria utilizando celular (C).



O resultado obtidos por Fotogrametria utilizando a câmera foi melhor que outros encontrados na literatura, como os de Vacca (2019), que analisou uma estrutura de 28 m de diâmetro e obteve uma discrepância média de 0,03 m entre as técnicas de fotogrametria e varredura a laser, ou seja, houve uma proporção de $1,07 \times 10^{-3}$, calculada entre o erro e a

dimensão analisada. No presente estudo, o diâmetro exterior do objeto tem aproximadamente 115 mm, e a distância média entre o modelo feito por Fotogrametria quando comparado ao obtido com o escâner a laser foi de 0,104 mm, ou seja, uma proporção de $0,90 \times 10^{-3}$, o que representa um melhor resultado.

Entretanto, quando comparados os modelos obtidos utilizando o celular, tanto com o processo de Fotogrametria como o LiDAR, as razões entre a distância das nuvens com a do modelo de referência, e o diâmetro externo da peça são maiores que as encontradas por Vacca (2019), sendo estas $1,08 \times 10^{-3}$ (Fotogrametria) e $1,84 \times 10^{-3}$ (LiDAR). De acordo com Coelho et al. (2022), nenhum dos sistemas propostos neste estudo estão qualificados para medir características tais como a ondulação da superfície da peça pois as dimensões são menores que as tolerâncias dos sistemas.

Sendo assim, considerando a inspeção das dimensões de diâmetro, altura e largura do componente selecionado, os sistemas propostos neste trabalho são adequados. A ausência de representação da cor da textura não é um problema para nenhum dos sistemas, diferentemente do trabalho de Waterhouse et al. (2017). Além disso, a refletividade também não é um problema, embora mencionada por Guerra et al. (2018). Uma comparação entre os três sistemas analisados é apresentada na Tabela 2.

Os sistemas apresentados neste trabalho apresentam certa divergência em relação ao modelo de referência obtido pelo escâner a laser. No entanto, para efeitos de inspeção de peças processadas por MADA, o desempenho dos sistemas é suficiente para medição de dimensão, como o diâmetro do componente. A representação de cores é fundamental para a inspeção e não está presente no modelo obtido pelo escâner a laser comercial, uma vez que alguns defeitos podem ser facilmente detectados na superfície, mesmo que não apresentem grandes variações geométricas. Outra característica importante é o padrão de cores obtido pelo sistema de fotogrametria.

Tabela 2: Comparação entre os sistemas propostos

Celular - LiDAR		Câmera - Fotogrametria		Celular - Fotogrametria		Escaner a laser comercial	
Tempo de calibração	-	Tempo de montagem da camera	5 min	Tempo de calibração	-	Tempo de calibração	10 min
Tempo de escaneamento	5:34 min	Tempo de aquisição das imagens	15 min	Tempo de escaneamento	2:02 min	Tempo de escaneamento	15 min
Tempo de processamento (celular)	1:04 min	Tempo de processamento (computador)	320 min	Tempo de processamento (celular)	10:34 min	Tempo de processamento (computador)	5 min

Tempo total	6:38 min	Tempo total	340 min	Tempo total	12:36 min	Tempo total	30 min
Distância média do modelo de referência	0,212 mm	Distância média do modelo de referência	0,104 mm	Distância média do modelo de referência	0,125 mm	Distância média do modelo de referência	-
Representação de cor	Sim	Representação de cor	Sim	Representação de cor	Sim	Representação de cor	Não
Medição de dimensões	Sim	Medição de dimensões	Sim	Medição de dimensões	Sim	Medição de dimensões	Sim
Escala embarcada	Sim	Escala embarcada	Não	Escala embarcada	Não	Escala embarcada	Sim
Portabilidade	Alta	Portabilidade	Baixa	Portabilidade	Alta	Portabilidade	Média
Preço do sistema	US\$ 999	Preço do sistema	US\$ 988	Preço do sistema	US\$ 999	Preço do sistema	US\$ 40.328

O tempo de escaneamento é um fator relevante a ser comparado entre os sistemas. O sistema comercial de escaneamento a laser apresentou um tempo de escaneamento intermediário quando comparado aos outros sistemas. Já a fotogrametria utilizando a câmera fotográfica requer horas para o processamento dos dados, podendo inviabilizar sua aplicação na Indústria. Em contrapartida, ambos modelos obtidos com o celular apresentaram o menor tempo de escaneamento, reforçando assim a praticidade destes sistemas.

Um ponto de destaque para o modelo obtido através do escaneamento realizado com celular utilizando o LiDAR, é que além de ter a representação de cor, conta também com a escala embarcada no sistema. Para aplicações em engenharia é essencial a presença de escala, pois para realizar controle de qualidade, além de ser necessária a representabilidade da superfície da peça com cores para a análise qualitativa, é necessário também a análise quantitativa das medidas do objeto escaneado. Os modelos gerados por Fotogrametria apresentados neste trabalho necessitam de um modelo de referência para que sua precisão seja analisada e as medidas sejam tomadas; entretanto, o escaneamento utilizando o LiDAR independe de referências externas.

Por fim, a principal vantagem dos sistemas propostos é o seu custo reduzido, que correspondem a aproximadamente 2,5 % do escâner a laser comercial e, apesar de terem maior divergência do modelo de referência, a elevada portabilidade e o baixo tempo de processamento dos dois sistemas obtidos com o celular são pontos relevantes que aumentam a aplicabilidade dos sistemas na Indústria. Além disso, para o modelo gerado com a câmera fotográfica, as imagens podem ser adquiridas in loco por uma pessoa e os pós-tratamentos podem ser feitos por outra pessoa que não esteja necessariamente perto da peça inspecionada, o que é outra grande vantagem deste método de inspeção. Essa vantagem se torna ainda mais evidente quando

os modelos produzidos somente utilizando o celular são considerados, pois tanto o escaneamento quanto o processamento dos dados são feitos *in loco*.

Uma vez que os sistemas apresentaram um desempenho suficiente para a MADA, a inspeção remota torna-se viável. Isso trará benefícios para a indústria em termos de custos, redução da imprecisão em relação aos métodos tradicionais de inspeção, em que os dados podem ser utilizados considerando o conceito de Indústria 4.0 e, por fim, permitirá o desenvolvimento de plataformas virtuais de aprendizagem. A Figura 22 apresenta uma forma prática de realizar a inspeção remota. Trata-se de uma ferramenta do aplicativo Scaniverse que permite a visualização do modelo utilizando Realidade Aumentada.

Figura 22: Comparação do modelo virtual obtido com LiDAR (a esquerda) com o objeto real (a direita) utilizando Realidade Aumentada no aplicativo Scaniverse



6 CONCLUSÕES

A técnica de escaneamento 3D tanto utilizando o celular com LiDAR ou Fotogrametria, quanto utilizando a Fotogrametria com uma câmera fotográfica são viáveis para a inspeção das dimensões de componentes metálicos processados por MADA. Embora os sistemas propostos neste trabalho tenham apresentado certa divergência do modelo de referência obtido pelo escaneamento a laser, estes sistemas são adequados para a inspeção das principais características geométricas, como o diâmetro da peça. Em contrapartida, o sistema de escaneamento a laser é necessário quando forem realizadas medidas submilimétricas.

Apesar disso, a análise qualitativa pode ser efetuada com todos os sistemas, incluindo a representação de cor, o que não é possível no escâner a laser comercial. A cor é fundamental para a inspeção visual, pois descontinuidades que não apresentem grandes variações geométricas podem ser identificadas na superfície. O custo reduzido dos sistemas deve-se à simplicidade destes, que consistem em um celular ou em uma câmera DSLR e *software* de código aberto. Vale ressaltar que quando o celular é utilizado não há necessidade de nenhum computador para realizar o pós-processamento dos dados, diminuindo ainda mais os custos do sistema.

Outra vantagem observada na utilização do celular é o tempo de escaneamento reduzido. Enquanto o escaneamento com o sistema comercial a laser foi feito em meia hora, os escaneamentos com o celular foram feitos em 12 e 6 minutos (fotogrametria e LiDAR respectivamente). Em contrapartida para obter o modelo utilizando a câmera fotográfica foram necessárias mais de 5 horas, o que pode inviabilizar a disseminação deste sistema na Indústria.

Por conseguinte, os sistemas de inspeção remota propostos são viáveis e fáceis de implementar e replicar. Este fato traz vantagens em termos de redução de custos, maior praticidade em comparação com os kits de medição tradicionais, proporcionando o registro digital dos resultados e o uso destes, tendo em conta o conceito de Indústria 4.0 bem como permitindo o desenvolvimento de plataformas virtuais de aprendizagem.

7 TÓPICOS DE TRABALHOS FUTUROS

Para uma aplicação prática dos sistemas propostos na Indústria, ainda é necessário realizar a validação metrológica destes. Sendo assim, recomenda-se para trabalhos futuros a determinação de parâmetros metrológicos como resolução, precisão e erro atrelado a cada um dos sistemas.

REFERÊNCIAS

- Adami, A., Balletti, C., Fassi, F., Fregonese, L., Guerra, F., Taffurelli, L., Vernier, P., 2015. The bust of Francesco II Gonzaga: from digital documentation to 3D printing. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. doi: 10.5194/isprsannals-II-5-W3-9-2015.
- Bacciaglia A., Ceruti A., Liverani A., 2020. Photogrammetry and additive manufacturing based methodology for decentralized spare part production in automotive industry. **Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Human Systems Integration (IHSI)**. doi: 10.1007/978-3-030-39512-4_121.
- Bahnini I., Zaman U.K., Rivette M., Bonnet N., Siadat A., 2020. Computer-aided design (CAD) compensation through modeling of shrinkage in additively manufactured parts. **Int J Adv Manuf Technol** 106:3999–4009. doi: 10.1007/s00170-020-04924-8.
- Bai J.Y., Yang C.L., Lin S.B., Dong B.L., Fan C.L., 2016. Mechanical properties of 2219-Al components produced by additive manufacturing with TIG. **Int J Adv Manuf Technol** 86:479–485. doi: 10.1007/s00170-015-8168-x.
- Bhatla A., Choe S.Y., Fierro O., Leite F., 2020. Evaluation of accuracy of as-built 3D modeling from photos taken by handheld digital cameras. **Autom Constr** 28:116–127. doi: 10.1016/j.autcon.2012.06.003.
- Bock P., 2019. **How Notre Dame is being rebuilt from 50 billion scraps of data**. <https://www.wired.co.uk/article/notre-dame>. Accessed 30 June 2021.
- Bösemann W., 2016. Industrial photogrammetry - accepted metrology tool or exotic niche. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** XLI-B5:15-24. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-15-2016.
- Cavilha Neto F., Pereira M., Paes L.E.S., Fredel M.C., Bossa L.F., 2021. Effect of power modulation frequency on porosity formation in laser welding of SAE 1020 steels. **Int J Adv Manuf Technol** 112:2509-2517.
- Chua Z.Y., Ahn I.H., Moon S.K., 2017. Process Monitoring and Inspection Systems in Metal Additive Manufacturing : Status and Applications. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology** 4:235–245. doi: 10.1007/s40684-017-0029-7.
- de Moraes Coelho, D., dos Santos Paes, L. E., Guarato, A. Z., de Araújo, D. B., Scotti, F. M., e Vilarinho, L. O. 2022. A low-cost methodology for quality inspection of metal additive manufactured parts. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 44(7), 293. doi: 10.1007/s40430-022-03580-1
- Dos Santos L.C.P., Malheiros F.C., Guarato A.Z., 2019. Surface parameters of as-built additive manufactured metal for intraosseous dental implants. **J Prosthet Dent** 124 (2): 217-222. doi:10.1016/j.prosdent.2019.09.010

Evans S., Jones E., Fox P., Sutcliffe C. 2018. Photogrammetric analysis of additive manufactured metallic open cell porous structures. **Rapid Prototyping Journal** 8:1380–1391. doi: 10.1108/RPJ-05-2017-0082.

Fregonese L., Giordani N., Adami A., Bachinsky G., Taffurelli, Rosignoli O., Helder J. 2019. Physical and virtual reconstruction for an intergrated archaeological model: 3D print and maquete. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** XLII-2/W15: 481-487. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-481-2019.

Gaboutchian A.V., Knyaz V.A., Leybova N.A., Simonyan H.Y., Novikov M.M. Apresyan S.V., Cherebylo S.A., Petrosyan G.R., 2020. 3D Reconstruction and image processing of anthropological archaeological findings. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** XLIII-B2:845–850. doi: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-845-2020>.

Gonçalves Júnior A.A., Hofmann A.C., Fantin A.V., Santos J.M.C. 2009. Development and application of a pipelines. **SPIE Europe Optical Metrology** 7389:1-12 doi: 10.1117/12.827544.

Griwodz C., Gasparini S., Calvet L., Gurdjos P., Castan F., Maujean B., Lanthony Y., 2021. AliceVision Meshroom: An open-source 3D reconstruction pipeline. **Proceedings of the 12th ACM Multimedia Systems Conference** (pp. 241-247). <https://doi.org/10.1145/3458305.3478443>

Guarato A.Z., Loja A.C., Pereira L.P., Braga S.L., Trevilato T.R.B. 2016. Qualification of a 3D structured light sensor for a reverse engineering application. **Optics and Measurement International Conference** 10151:1–9. doi: 10.1117/12.2257601.

Guerra M.G., Volpone C., Galantucci L.M., Percoco G. 2018. Photogrammetric measurements of 3D printed micro fluidic devices. **Additive Manufacturing** 21:53–62. doi: 10.1016/j.addma.2018.02.013.

Hodonou C, Balazinski M, Brochu M, Mascle C. 2019. Material-design-process selection methodology for aircraft structural components : application to additive vs subtractive. **Int J Adv Manuf Technol** 103:1509–1517. doi:10.1007/s00170-019-03613-5.

James D.W., Belblidia F., Eckermann J.E., Sienz J., 2017. An innovative photogrammetry color segmentation based technique as an alternative approach to 3D scanning for reverse engineering design. **Computer Aided Design & Applications** 14:1–16. doi: 10.1080/16864360.2016.1199751.

Keaveney S., Gutierrez-heredia L., Keogh C., Reynaud E.G., 2016. Applications for advanced 3D imaging , modelling , and printing techniques for the biological sciences. **22nd Int Conf Virtual Syst Multimed** 1–8. doi: 10.1109/VSM.2016.7863157.

Kovynev M., Zaslavsky M., 2021. Review of photogrammetry techniques for 3D scanning tasks of buildings. **Proceedings of the 28th Conference of Fruct Association**. <https://fruct.org/publications/acm28/files/Kov.pdf>. Accessed 30 June 2021.

- Li L., Zhang X., Cui W., Liou F., Deng W., Li W. 2020. Temperature and residual stress distribution of FGM parts by DED process : modeling and experimental validation. **Int J Adv Manuf Technol** 109:451–462. doi: 10.1007/s00170-020-05673-4.
- Li Y., Duthon P., Colomb M., Ibanez-Guzman J., 2020. What happens for a ToF LiDAR in fog? **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 22(11), 6670-6681.
- Maccormick M., Hall A., Trower A., 2011. Component inspection and repair using 3D modelling photogrammetry technology. **SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition**. doi: 10.2118/145513-MS.
- Martín MR, Gonzalvez PR. 2018. Learning based on 3D photogrammetry models to evaluate the competences in visual testing of welds. **IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)** 1576–1581. doi: 10.1109/EDUCON.2018.8363422.
- Martín M.R., González P.R., 2019. Learning methodology based on weld virtual models in the mechanical engineering classroom. **Comp. Appl. Eng. Edu.** 27:1113-1125. doi: 10.1002/cae.22140.
- Odeh M., Levin D., Inziello J., Fenoglietto F.L., Mathur M., Hermsen J., Stubbs J., Ripley B., 2019. Methods for verification of 3D printed anatomic model accuracy using cardiac models as an example. **Printing in medicine** 5:1-12. doi:10.1186/s41205-019-0043-1.
- Olejniak A., Kiskowskiak L., Dziubinski A., 2018. Aerodynamic modeling process using reverse engineering and computational fluid dynamics. **Earth and Space** 944-956.
- Paes L.E.S., Ferreira H.S., Pereira M., Xavier F.A., Weingaertner W.L., Vilarinho L., 2021. Modeling layer geometry in directed energy deposition with laser for additive manufacturing. **Surface & Coatings Technology** 409:1-9 doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.126897.
- Paes L.E.S., Pereira M., Pereira A.S.P., Bórhoquez C.E.N., Weingaertner W.L., 2019. Power and welding speed influence on bead quality for overlapped joint laser welding. **J Laser Appl** 31: 022403-1-5 doi: 10.2351/1.5096110.
- Paes L.E.S., Pereira M, Weingaertner WL, Scotti A, Souza T (2019) Comparison of methods to correlate input parameters with depth of penetration in LASER welding. **Int J Adv Manuf Technol** 101:1157–1169. doi: 10.1007/s00170-018-3018-2.
- Palousek D., Rosicky F., Koutny D., Stoklásek, Navrat .T., 2014. Pilot study of the wrist orthosis design process. **Rapid Prototyping Journal** 20:27–32. doi: 10.1108/RPJ-03-2012-0027.
- Petrobras, 2019. **Instalamos primeira peça de aço impressa em 3D em área operacional**. <https://nossaenergia.petrobras.com.br/pt/energia/instalamos-primeira-peca-de-aco-imprensa-em-3d-em-area-operacional/#:~:text=Pesquisadores%20do%20Cenpes%2C%20Centro%20de,do%20original%20em%20ferro%20fundido>. Accessed 30 June 2021.
- Porter S.T., Roussel M., Soressi M., 2015. A simple photogrammetry rig for the reliable creation of 3D artifact models in the field lithic examples from the early upper paleolithic. **Advances in Archaeological Practice** 4:71–86. doi: 10.7183/2326-3768.4.1.71.

Raj T., Hanim Hashim F., Baseri Huddin A., Ibrahim M. F., Hussain A., 2020. A survey on LiDAR scanning mechanisms. **Electronics**, 9(5), 741.

Riggio M., Sandak J., Franke S., 2015. Application of imaging techniques for detection of defects, damage and decay in timber structures on-site. **Constr Build Mater** 101:1241–1252. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.065.

Rodríguez M.M., González P.R., Aguilera D.G., 2017. Feasibility study of a structured light system applied to welding inspection based on machine data. *IEEE Sensors Journal* 17:4217–4224.

Sartori F., Silva R.H.G., Dutra J.C., Paes L.E.S., Schwedersky M.B., Marques C., 2017. A comparative analysis of different versions of the MIG/MAG process modern variants for the root pass in orbital welding. **Soldag e Insp** 22:442–452. doi: 10.1590/0104-9224/SI2204.04.

Silva R.H.G., Paes L.E.S., Barbosa R.C., Sartori F., Schwedersky M.B., 2018. Assessing the effects of solid wire electrode extension (Stick out) increase in MIG/MAG welding. **J Brazilian Soc Mech Sci Eng**. 40:1-7 doi: 10.1007/s40430-017-0948-9.

Silva R.H.G., Paes L.E.S., Marques C., Riffel K.C., Schwedersky M.B., 2019. Performing higher speeds with dynamic feeding gas tungsten arc welding (GTAW) for pipeline applications. **J Brazilian Soc Mech Sci Eng**. 41:1-6 doi: 10.1007/s40430-018-1529-2.

Silva R.H.G., Paes L.E.S., Sousa G.L., Marques C., Viviani A.B., Schwedersky M.B., Pinto T.H.F.C., 2019. Design of a wire measurement system for dynamic feeding TIG welding using instantaneous angular speed. **Int J Adv Manuf Technol** 101:1651–1660. doi: 10.1007/s00170-018-3026-2.

Singhatham P., Srigate S., Tanachutiwat S., 2019. Designing of welding defect samples for data mining in defect detection and classification using 3D geometric scanners. **Research Invention and Innovation Congress** 1-6. doi: 10.1109/RI2C48728.2019.8999939.

Sohaib A., Amano K., Xiao K., Yates J.M., Whitfor C., Wuerger S., 2018. Colour quality of facial prostheses in additive manufacturing. **Int J Adv Manuf Technol** 96:881–894. doi: 10.1007/s00170-017-1480-x.

Taqriban R.B., Ariyanto M., Putra A.F.Y.S., Ismail R., 2019. 3D model of photogrammetry technique for transtibial prosthetic socket design development. **International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)**. doi: 10.1109/ISRITI48646.2019.9034670.

Truppel G.H., Angerhausen M., Pipinikas A., Paes L.E.S., 2019. Stability analysis of the Cold Metal Transfer (CMT) brazing process for galvanized steel plates with ZnAl4 filler metal. **Int J Adv Manuf Technol** 103:2485–2494. doi: 10.1007/s00170-019-03702-5.

Vacca G., 2019. Overview of open software for close range photogrammetry. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** XLII-4/W14:26–30. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W14-239-2019.

Waterhouse D.S., Bointon P., Piano S., Leach R.K., 2017. Experimental comparison of photogrammetry for additive manufactured parts with and without laser speckle projection. **Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X**. doi: 10.1117/12.2269507.

Xiong Y., Dharmawan A.G., Tang Y., Foong S., Soh G.S., Rosen D.W., 2020. A knowledge-based process planning framework for wire arc additive manufacturing. **Adv Eng Informatics** 45:101135. doi: 10.1016/j.aei.2020.101135.