

CONCEITOS E APLICAÇÕES METROLÓGICAS DO ESCANEAMENTO ÓPTICO 3D

Data de aceite: 02/05/2024

Douglas Mamoru Yamanaka

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do
Estado de São Paulo S.A.
São Paulo - SP

Manuel António Pires Castanho

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do
Estado de São Paulo S.A.
São Paulo - SP

Olga Satomi Yoshida

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do
Estado de São Paulo S.A
São Paulo - SP

RESUMO: O presente texto apresenta um pouco do estado da arte e aspectos técnicos e metrológicos de escaneadores ópticos 3D (também comumente chamados de digitalizadores). Digitalizadores ópticos criam nuvens de pontos a partir dos dados da superfície de um objeto, que são utilizados para construir modelos tridimensionais digitais. Tem se tornando um equipamento essencial para análise dimensional, engenharia reversa, avaliação de superfícies de forma livre, controle de qualidade, prototipagem, etc. São apresentados alguns princípios físicos dos tipos de escaneadores ópticos, e aspectos

importantes na calibração de um sistema de escaneamento óptico 3D. Comentários acerca de textura superficial e cor são tecidos, assim como são apresentadas as dificuldades inerentes ao escaneamento de superfícies reflexivas e objetos translúcidos. Ao final, exemplos de escaneamentos com aplicações metrológicas são apresentados.

PALAVRAS-CHAVE: escaneamento 3D; digitalizadores ópticos 3D; metrologia.

CONCEPTS AND METROLOGICAL APPLICATIONS OF 3D OPTICAL SCANNING

ABSTRACT: This text presents some of the state of the art and technical and metrological aspects of 3D optical scanners (commonly called digitizers). Optical scanners create point clouds from an object's surface data, which are used to build digital three-dimensional models. It has become essential equipment for dimensional analysis, reverse engineering, free-form surface evaluation, quality control, prototyping, etc. Some physical principles of the types of optical scanners are presented, as well as important aspects in the calibration of a 3D optical scanning system. Comments on surface texture and color are made, as

are the difficulties inherent in scanning reflective surfaces and translucent objects. Finally, examples of scans with metrological applications are presented.

KEYWORDS: 3D scanning; 3D optical scanners; metrology.

INTRODUÇÃO

Os digitalizadores ópticos 3D (figura 1) tornaram-se uma das grandes novidades do setor industrial com crescente aplicação especialmente nesta última década.

Do ponto de vista metrológico, a tecnologia de medição em 3D apresentou diversas evoluções ao longo do tempo que representaram soluções substanciais para o desenvolvimento da indústria: em meados do século passado (~1960) com o surgimento das primeiras máquinas de medição por coordenadas, em fins do século passado (~1990), com a introdução no mercado dos braços articulados de medição, no começo deste século (~2005), através da incorporação de técnica tomográfica no sistema pórtico de uma máquina de medição por coordenadas, e por fim, com a popularização dos digitalizadores ópticos 3D, por volta de 2010.

O aumento no uso destes digitalizadores deve-se a diversos fatores relevantes, em particular quando da comparação com sistemas metrológicos equivalentes. Com massiva aplicação na área industrial (HALEEM *et al.*, 2022), tornou-se também amplamente utilizado em diversos outros setores, tais como nas áreas médica e odontológica, em museus (esculturas, relíquias culturais, objetos arqueológicos), em aplicações forenses, etc (JAVAID *et al.*, 2021).



Figura 1: Digitalizadores ópticos

Fonte: elaborado pelos autores

Particularmente no setor industrial, na atualidade o digitalizador óptico tem duas aplicações amplamente difundidas. A primeira seria na digitalização e obtenção de nuvem de pontos da superfície de um artefato para fins de engenharia reversa. Um exemplo

recorrente é a da manufatura aditiva, que tem se amparado dos recursos que a digitalização oferece em termos de obtenção de dados de superfícies geométricas. A segunda consiste na utilização do equipamento no escaneamento de um artefato para fins metrológicos, ou seja, para medição dimensional e análise dos resultados para inspeção e controle de qualidade.

Apesar de ainda não oferecer equivalentes níveis de acurácia, o digitalizador óptico vem substituindo as tradicionais máquinas de medição por coordenadas cartesianas uma vez que realiza aquisição de dados de um volume no formato de nuvem de pontos de forma extremamente rápida, apresenta portabilidade, podendo ser armazenado em um *case*, ou seja, é extremamente prático no transporte para realização de atividades em campo ou em instalações industriais, além de ser relativamente fácil quando da medição de superfícies de forma livre (DURY, 2016).

Neste contexto, o presente texto traz um pouco do estado da arte de digitalizadores ópticos 3D. Escaneamentos com algumas aplicações metrológicas são apresentados, assim como outros tópicos (calibração, textura, superfícies reflexivas, etc.) relevantes e intrínsecos a esta tecnologia também são apresentados e discutidos.

TECNOLOGIAS DE ESCANEAMENTO

Fotogrametria

Na fotogrametria diversas fotografias são tiradas de diferentes ângulos de um artefato, e através da detecção dos pixels correspondentes à mesma informação bidimensional das várias fotos, determina-se a forma e a localização dos pontos e reconstrói-se o objeto tridimensionalmente, estabelecendo a exata posição dos pontos na superfície.

Triangulação a laser

Três elementos são fundamentais nesta tecnologia: o laser emissor, o ponto incidente na superfície, originário do laser emissor e uma câmera. Esta técnica é chamada de triangulação porque estes três elementos formam um triângulo. A princípio, a luz incide sobre o objeto, e a luz refletida é direcionada para uma câmera CCD, que localiza a posição da luz incidente na superfície. O laser aparece em diferentes posições do campo de visão da câmera, de acordo com a distância com que a luz atinge a superfície. A distância entre a câmera e o laser emissor é conhecida, sendo o comprimento de um lado do triângulo. O ângulo da posição do laser emissor também é conhecido. O ângulo da posição da câmera é determinado pela localização do ponto do laser no campo de visão da câmera. Estas três informações determinam a forma e o tamanho do triângulo, fornecendo a localização do ponto do laser no triângulo (adaptado de EBRAHIM, 2015).

Luz estruturada

Digitalizadores ópticos 3D de luz estruturada projetam uma série de padrões lineares ou contínuos de luz ou laser sobre o objeto. Uma câmera analisa as deformações de cada padrão de linha no objeto e o cálculo da distância entre o digitalizador 3D e a superfície do objeto utiliza uma técnica semelhante à triangulação para calcular a distância de cada ponto da linha. Com os valores das distâncias reconstrói-se o objeto do artefato em 3D (adaptado de EBRAHIM, 2015).

Existem ainda outras tecnologias de escaneamento, tais como *time-of-flight*, *phase shift*, ou mesmo híbridas, que são combinações de outras tecnologias de escaneamento 3D.

CALIBRAÇÃO DE DIGITALIZADORES ÓPTICOS

A calibração de digitalizadores é descrita nas normas VDI/VDE 2634-2 (VDI 2012) e VDI/VDE 2634-3 (VDI 2008), que estabelecem diretrizes para os testes de aceitação e reavaliação do desempenho de um sistema de medição óptico 3D, baseados no escaneamento de superfície. O padrão de verificação sugerido (figura 2) tem o formato de halteres (tecnicamente conhecido na indústria como *ballbar*, ou barra de esferas, em tradução livre), cujos diâmetros e erros de forma das esferas esquerda e direita, a distância entre centros das esferas e o comprimento total do artefato constituem os parâmetros metrológicos importantes de análise.

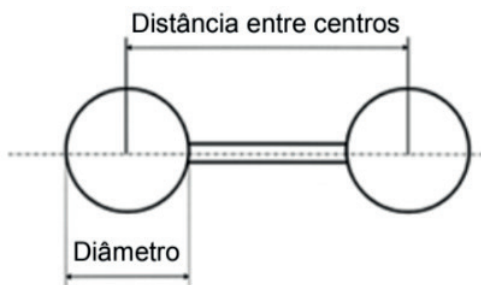


Figura 2: Padrão para calibração de digitalizadores

Fonte: adaptado de VDI/VDE 2634-2 (2012)

Abaixo, seguem as fórmulas para o cálculo dos parâmetros:

Erro de forma (PF):

$$PF = R_{max} - R_{min}$$

onde R_{max} = Desvio máximo de forma, e

R_{min} = Desvio mínimo de forma.

Erro na calibração do diâmetro (PS):

$$PS = D_a - D_r$$

onde D_a = Diâmetro medido com o digitalizador, e

D_r = Diâmetro de referência.

Erro na calibração da distância entre centro das esferas (SD):

$$SD = I_a - I_r$$

onde I_a = Distância medida entre centros das esferas com o digitalizador, e

I_r = Distância de referência entre centros das esferas.

TEXTURA E COR

Um recurso interessante incorporado ao sistema de aquisição de dados dos digitalizadores ópticos é a possibilidade de se obter a textura e a cor da superfície escaneada, ou seja, o resultado do escaneamento pode apresentar somente a geometria do artefato de interesse ou a geometria com a textura e a cor natural do objeto. Abaixo (figura 3), é apresentado um exemplo do escaneamento de uma peça prismática, sendo que à esquerda é apresentada a foto do prisma de aço, ao centro o escaneamento resultante, somente com a geometria da peça e à direita o mesmo escaneamento apresentado anteriormente ao centro, com adição de textura e cor.

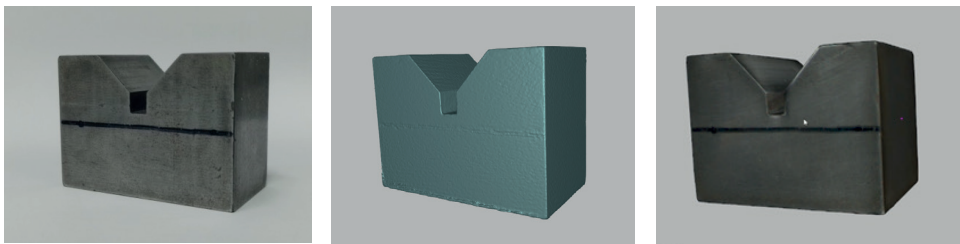


Figura 3: Prisma (esquerda), escaneamento (centro) e com textura e cor (direita)

Fonte: elaborado pelos autores

SUPERFÍCIES REFLEXIVAS E OBJETOS TRANSLÚCIDOS

Ainda no tópico sobre superfície, porém tratando-se de um panorama totalmente distinto, um expediente comum no escaneamento de artefatos com superfícies reflexivas é o emprego de revestimento antirreflexo a fim de se diminuir o brilho ou até mesmo de se eliminar o reflexo da luz incidente sobre a peça.

Um exemplo de aplicação de revestimento antirreflexo é apresentado na figura 4. Trata-se de um padrão de contornos, fabricado de aço com superfície reflexiva. Na figura à direita é apresentado o escaneamento realizado neste artefato com a aplicação de tal revestimento.

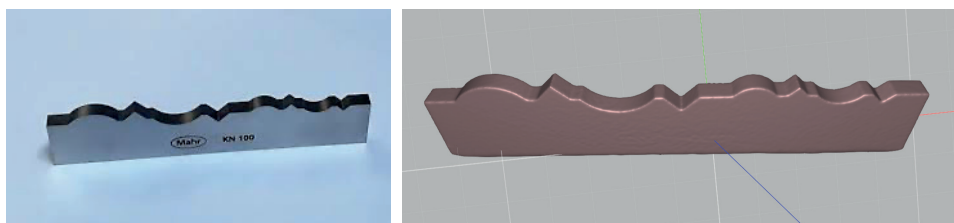


Figura 4: Padrão de contornos (esquerda) e digitalização (direita)

Fonte: elaborado pelos autores

Em um trabalho recente, após investigar revestimentos antirreflexo de diferentes fabricantes, Mendřický concluiu que a adição de tais revestimentos produz variações significativas (da ordem de alguns poucos micrometros até alguns centésimos de micrometros) em sistemas ópticos de medição, depois de mensurar a variação incremental das medidas dimensionais em função dos revestimentos analisados. Complementa reiterando que o uso de agentes de foscagem tem influência significativa na acurácia do digitalizador (MENDŘICKÝ, 2018).

Um exemplo de material translúcido, um padrão de circularidade fabricado de cristal é apresentado na figura 5, e também foi escaneado com aplicação do mesmo revestimento utilizado anteriormente.

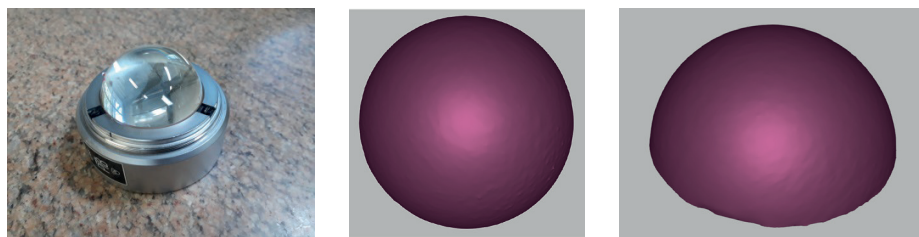


Figura 5: Padrão de circularidade (esquerda) e respectivas digitalizações (figuras à direita)

Fonte: elaborado pelos autores

APLICAÇÕES

São apresentados 4 (quatro) exemplos de escaneamentos realizados com o digitalizador óptico modelo Space Spider, que consiste de um sistema de luz estruturada com três câmeras para captura do padrão da luz projetada, além de uma câmera RGB para captura da textura superficial, com resolução de 0,1 mm e acurácia de 0,05 mm. Com taxa de reconstrução 3D de 7,5 quadros por segundo, possui velocidade de aquisição de dados de 1 milhão de pontos por segundo (ARTEC 3D, 2023).

Artefato 1

No primeiro exemplo foi escaneado um artefato com forma cilíndrica com diâmetro de 8 mm, cuja região de interesse foi a extremidade com formato semiesférico. A figura 6 apresenta as respectivas fotos do artefato cilíndrico e da imagem do escaneamento realizado.

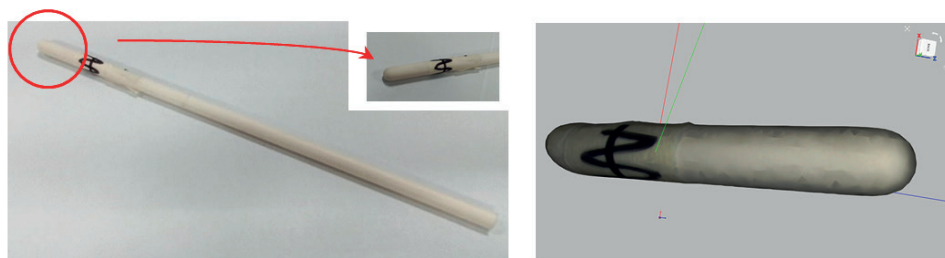


Figura 6: Artefato (esquerda) e digitalização (direita)

Fonte: elaborado pelos autores

Foi escaneada somente a extremidade de interesse, do lado da marcação indicada na foto da figura 6 à esquerda, razão pela qual o comprimento total do escaneamento apresentado na figura 6 à direita aparentar ser menor em relação ao comprimento total da peça escaneada.

Para avaliação metrológica foram construídas diversas circunferências a partir da extremidade (figura 7), com passos (distância entre circunferências, considerando-se o eixo do cilindro) iguais a 0,25 mm. A partir destas circunferências, informações a respeito do diâmetro numa determinada distância em relação à extremidade, assim como a determinação do erro de circularidade para cada circunferência podem ser obtidos.

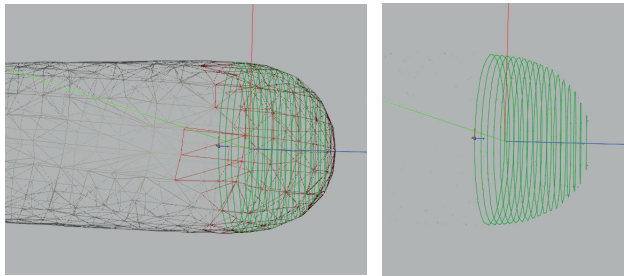


Figura 7: Região analisada (esquerda) e circunferências com passos de 0,25 mm (direita)

Fonte: elaborado pelos autores

Artefato 2

No segundo exemplo o artefato se consistiu também de formato cilíndrico com diâmetro externo de 19 mm e comprimento de 23 mm, porém com um furo passante no eixo do cilindro. A figura 8 apresenta a foto deste artefato e a imagem do escaneamento realizado.

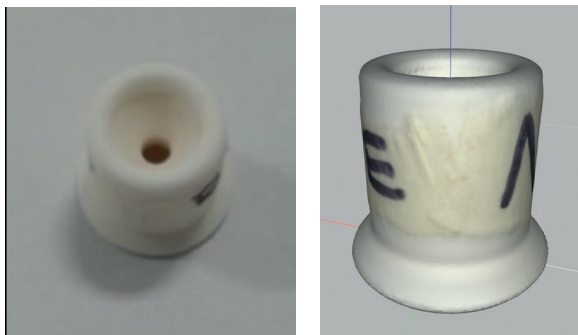


Figura 8: Artefato (esquerda) e digitalização (direita)

Fonte: elaborado pelos autores

Na imagem deste escaneamento é possível detectar uma falha intrínseca existente ao uso deste tipo de equipamento (figura 9). Por vezes, quando o diâmetro de um furo a ser escaneado possui um diâmetro em que a luz não consegue alcançar a superfície a ser digitalizada e coletar informações para a reconstrução da imagem, o escaneamento da superfície final torna-se incompleta, apresentando falhas no modelo final. Nestas situações, a fim de se obter uma digitalização com malha fechada, o *software* de reconstrução corrige os defeitos superficiais por meio de inteligência artificial. Na figura, é possível de se visualizar o diâmetro reconstruído, porém a imperfeição na cilíndricidade do furo é evidente e pronunciado, quando comparado com o artefato. Para fins metrológicos, evidentemente

quaisquer informações extraídas deste furo cilíndrico na região artificialmente reconstruída apresentarão altíssimo grau de incerteza, sendo desta forma recomendado, se possível, o uso de outro equipamento para o mapeamento de furos com diâmetros em que a luz do digitalizador não consegue incidir de maneira satisfatória.

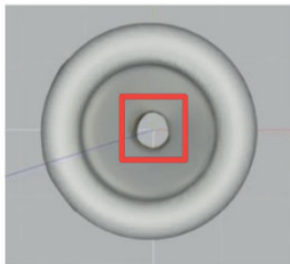


Figura 9: Região da falha no escaneamento (no destaque em vermelho)

Fonte: elaborado pelos autores

Assim como no exemplo anterior, foram construídas diversas circunferências a partir da extremidade (figura 10), com passos iguais a 0,25 mm e também com passos iguais a 0,1 mm, porém em um comprimento amostral igual a 75 mm.

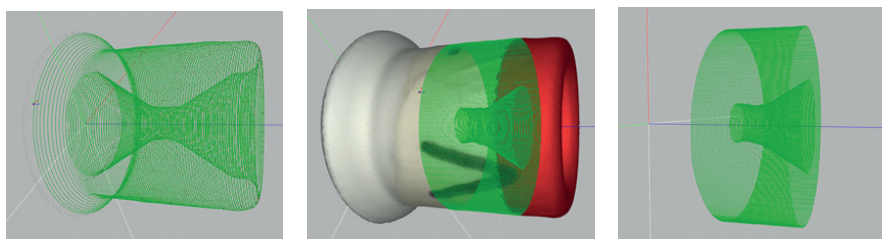


Figura 10: Circunferências com passos de 0,25 mm (esquerda) e de 0,1 mm em um comprimento de 75 mm (centro e direita)

Fonte: elaborado pelos autores

Um expediente existente no *software* de tratamento de dados é o recurso que simula efeitos de raios-x na amostra, interessante para fins de inspeção visual em sólidos de revolução. A figura 11 apresenta dois exemplos deste mecanismo de análise de imagens.

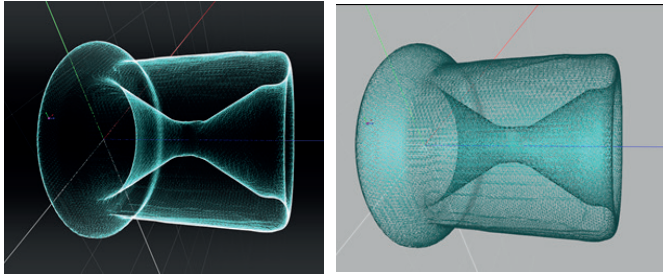


Figura 11: Duas imagens que simulam efeitos de raios-x

Fonte: elaborado pelos autores

Artefato 3

O artefato analisado consistiu numa maquete arquitetônica, com dimensões aproximadas de (523 x 195 x 128) mm. A figura 12 apresenta a respectiva foto deste artefato e as imagens do escaneamento realizado. À esquerda é apresentado o artefato e ao meio é apresentado o escaneamento.

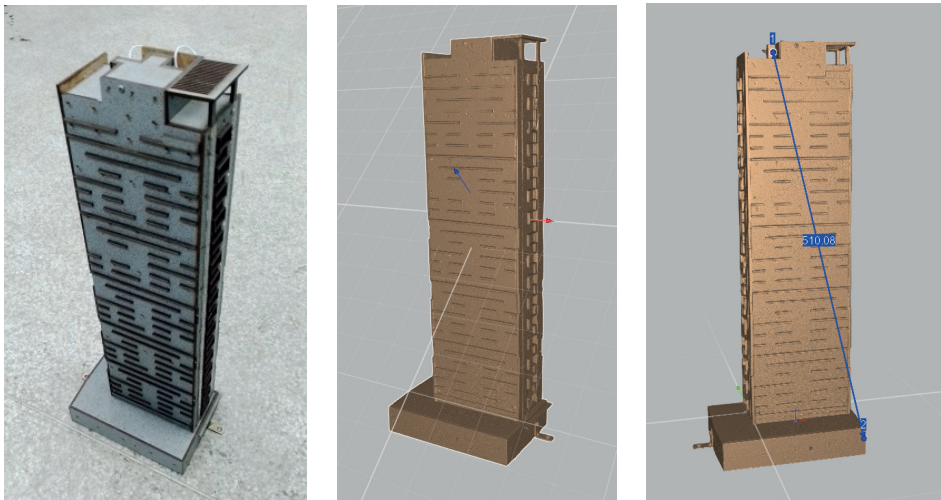


Figura 12: Maquete (esquerda), digitalização (centro) e medição dimensional (direita)

Fonte: adaptado de Yamanaka (2023)

Na terceira figura é apresentada na linha azul uma medição linear entre planos opostos. Valores dos resultados com respectivas incertezas são apresentados em YAMANAKA *et al.*, 2023.

Artefato 4

Um recurso para análise de geometrias em 3D que apresenta resultados interessantes para inspeções rápidas e bastante detalhadas consiste na junção de dados escaneados com o desenho gerador do artefato manufaturado. Conhecido como *best-fit* (melhor ajuste, em tradução livre), trata-se de ajuste matemático entre dados de medição em relação ao modelo CAD, utilizando-se de estratégias diversas para determinação da condição ótima de alinhamento (pelo sistema de coordenadas, por entidades geométricas). Na figura 13 temos um exemplo do modelo CAD de uma peça (primeira figura à esquerda) que foi usinada (segunda figura) e digitalizada (terceira figura).

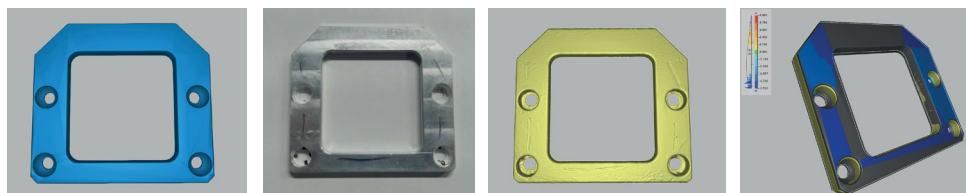


Figura 13: Da esquerda para a direita: desenho CAD, peça fabricada, escaneamento e *best-fit*

Fonte: elaborado pelos autores

Na quarta figura é apresentado o *best-fit* entre o modelo CAD e a nuvem de pontos do escaneamento realizado. A legenda em cores no canto superior esquerdo indica a falta ou excesso de material, sendo que cores quentes representam excesso de material e cores frias representam falta de material. Neste exemplo, a cor azul predominante indica falta de material em relação ao desenho gerador.

CONCLUSÃO

Escaneamentos ópticos para fins diversos tais como engenharia reversa e *best-fit* representam uma nova tendência para o começo deste século, especialmente em se tratando de metrologia para o controle dimensional. Vantagens e desvantagens podem ser apontadas neste último quesito. Com relação a vantagens, podemos apontar em primeiro lugar a questão do tempo, pois a aquisição dos pontos independe de preparação, criação de sistema de coordenadas, programação da movimentação de sensor, etc., inerentes ao processo de utilização de uma máquina de medição por coordenadas. O simples posicionamento do digitalizador (respeitando-se a distância de trabalho recomendada pelo fabricante) já possibilita a instantânea coleta de pontos da superfície a ser escaneada. Outro ponto positivo é a aquisição de um grande volume de pontos da superfície e a distribuição e representatividade dos mesmos após o processamento. Comparativamente, o

escaneamento de uma peça em sua totalidade, considerando-se todas as suas geometrias e detalhamentos inclusive internos, só é possível com o recurso da metrotomografia. Qualquer outro método, tal como por máquina de medição por coordenadas por contato com escaneamento contínuo, máquina de medição por coordenadas óptica ou por braço de medição por contato, não teremos obtido uma nuvem de pontos tão completa quanto teríamos no escaneamento óptico. Além disso, toda tecnologia para análise em 2D e 3D (*best-fit*, GD&T, técnicas estatísticas, ajustes matemáticos, etc.) desenvolvida ao longo do tempo foram incorporadas aos processos metrológicos pós-processamento do escaneamento, e justificam e robustecem a utilização do digitalizador óptico para fins laboratoriais, para pesquisa e em ambientes industriais.

No entanto, existem desvantagens que são intrínsecas a este equipamento. A principal reside no fato de não conseguir adentrar em furos, dependendo do diâmetro e da profundidade do mesmo. Outro ponto negativo é a resolução de escaneamento, uma vez que os melhores escaneadores do mercado tem resolução de alguns poucos micrometros, enquanto que máquinas de medição por coordenadas (tátil e óptico) tem resolução de décimo de micrometros. No entanto, nesta questão verificamos o crescente avanço das pesquisas relacionadas ao escaneamento óptico e incorporação de novas tecnologias ópticas e de processamento de imagens nos sistemas de aquisição de dados pelos fabricantes, e a tendência mais provável será o escaneador ao menos igualar-se à resolução das tradicionais máquinas de medição por coordenadas. Ainda, comparando-se a metrotomografia com o escaneador óptico, pelo fato de o escaneador obter somente dados superficiais, não é possível visualizar-se o interior de uma peça, técnicas de análises tais como detecção de defeitos internos (trincas, descontinuidades, etc.), e análise de porosidade, não são atividades possíveis de se realizar com um escaneamento óptico, ficando-se restritas tais técnicas à metrotomografia. Para finalizar, um grande volume de dados também não é uma condição favorável operacionalmente do ponto de vista de pós-processamento, pois os *softwares* de tratamento de dados demandam uma quantidade considerável de memória, exigindo máquinas robustas para trabalho em conjunto com o escaneador.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) no âmbito do Projeto Fapesp (Processo Fapesp: 2017/50343-2): “Plano de Desenvolvimento Institucional na Área de Transformação Digital – Manufatura Avançada e Cidades Inteligentes e Sustentáveis - PDip”.

REFERÊNCIAS

ARTEC 3D. **Specification of 3D Scanners**. <https://www.artec3d.com> , junho 2023.

DURY, M.R.; Woodward, S.; Brown, S.B.; McCarthy, M.B. **Characterising 3D optical scanner measurement performance for precision engineering**. In: Proceedings of the 31st Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, Portland, OR, USA, 23 October 2016.

EBRAHIM, M. A.-B. **3D Laser Scanners' Techniques Overview**. International Journal of Science Research., vol. 4, Issue 10, 2015.

HALEEM A., Javaid, M., Singh, R. P., Rab, S., Suman, R., Kumar, L., Khan, I. H. **Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview**. International Journal of Cognitive Computing in Engineering, 3, 161-171, 2022.

JAVAID, M.; Haleem, A.; Singh, R. P. & Suman, R. **Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and it's analytical applications**. Sensors International, 2: 100114, 2021.

MENDŘICKÝ, R. **Impact of Applied Anti-Reflective Material on Accuracy of Optical 3D Digitisation**. Materials Science Forum, 919, 335–344, 2018.

THE ASSOCIATION OF GERMAN ENGINEERS. **VDI/VDE 2634-2: Optical 3-D measuring systems - Optical systems based on area scanning**. Beuth Verlag, 2012. 16p.

THE ASSOCIATION OF GERMAN ENGINEERS. **VDI/VDE 2634-3: Optical 3-D measuring systems – Multiple view systems based on area scanning**. Beuth Verlag, 2008, 20p.

YAMANAKA, D. M., Paula, D. N. R., Castanho, M. A. P., Chaves & W. O., Yoshida, O. S. **Avaliação qualitativa de estratégias de medição 3D de uma maquete arquitetônica por meio de escaneamento óptico**. In: VII CIMMEC – Congresso Internacional de Metrologia Mecânica, Itaipava, RJ, BRASIL, 2023.