



## Avaliação qualitativa de estratégias de medição 3D de uma maquete arquitetônica por meio de escaneamento óptico

### Qualitative evaluation of 3D measurement strategies of an architectural model through optical scanning

D M Yamanaka<sup>1</sup>, D N R Paula<sup>1</sup>, M A P Castanho<sup>1</sup>, W O Chaves<sup>2</sup> e O S Yoshida<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Metrologia Mecânica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo/SP, 05508-901, BR

<sup>2</sup> Laboratório de Vazão, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo/SP, 05508-901, BR

E-mail: douglasy@ipt.br

**Resumo:** Os *scanners* ópticos 3D têm sido amplamente utilizados na metrologia dimensional, e este aparato apresenta inovações frente às várias alternativas clássicas estabelecidas há décadas em ambientes fabris, laboratorial e pesquisa. Estes *scanners* oferecem aquisição instantânea de dados sem a necessidade de avaliar a melhor estratégia de medição normalmente envolvida em medições 3D. Ao otimizar o tempo e eliminar a necessidade de dois ou mais equipamentos, as varreduras ópticas agilizam as tarefas metrológicas. Este trabalho apresenta algumas rotinas de medição 3D, avaliando e comparando qualitativamente a utilização dos recursos de um *scanner* óptico com máquinas e equipamentos clássicos da metrologia dimensional. O estudo de caso emprega uma maquete arquitetônica, e a adoção de um único dispositivo, no caso o *scanner* óptico, foi capaz de atingir resultados metrológicos interessantes eliminando o esforço de várias tarefas metrológicas.

**Abstract:** Optical 3D scanners have been widely used in dimensional metrology, and this apparatus presents innovations compared to several classic alternatives established decades ago in manufacturing, laboratory and research environments. These scanners offer instantaneous data acquisition without the need to evaluate the best measurement strategy normally involved in 3D measurements. By optimizing time and eliminating the need for two or more devices, optical scans streamline metrological tasks. This work presents some 3D measurement routines, evaluating and qualitatively comparing the use of the resources of an optical scanner with classical machines and equipment of dimensional metrology. The case study uses an architectural model, and the adoption of a single device, in this case the optical scanner, was able to achieve interesting metrological results by eliminating the effort of several metrological tasks.

## 1. Introdução

A crescente adoção de *scanners* ópticos em vários campos, incluindo engenharia, arquitetura [1], artes e afins, tem demonstrado a notável versatilidade desses dispositivos. Seja na engenharia reversa, em aplicações médicas [2],[3], odontológicas ou na metrologia [4], a geração de modelos digitais 3D possibilitou o avanço de estudos e análises muito mais detalhadas em comparação com as disponíveis anteriormente. Na metrologia em particular, o *scanner* representa evolução significativa em função da praticidade e riqueza das informações geométricas coletadas em um curto espaço de tempo.

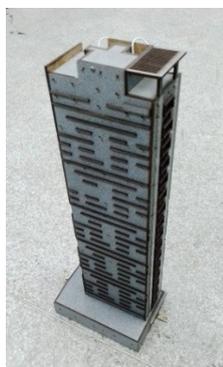
Tradicionalmente, em laboratórios focados em análises geométricas e dimensionais, vários equipamentos são frequentemente utilizados para o cumprimento das atividades corriqueiras de medição tridimensional. Essas atividades vão desde medições lineares simples até a obtenção de características geométricas e de toleranciamento (gd&t). Exemplos de tais instrumentais incluem máquinas de medição por coordenadas (MMC) e braços articulados de medição. Por vezes recorre-se a MMC's óptica ou por sensoriamento tátil, no primeiro exemplo. Em casos de necessidade de investigações aprofundadas, principalmente para avaliar características internas, utiliza-se o metrotomógrafo, porém com maior custo operacional [5].

Este trabalho apresenta uma avaliação metrológica realizada com um *scanner* óptico. Utilizou-se como artefato para avaliação uma maquete arquitetônica, comumente utilizada em ensaios em túnel de vento. O desenvolvimento da avaliação incorporou os desafios de medição rotineiros em qualquer avaliação metrológica 3D, e a estratégia de medição com o emprego do *scanner* óptico foi comparada qualitativamente com os aparatos metrológicos correspondentes citados anteriormente (MMC óptica ou tátil, braço articulado de medição ou metrotomógrafo). O amplo espectro de recursos do *scanner* óptico foi constatado, e algumas de suas limitações são apontadas ao longo do trabalho.

## 2. Metodologia

O *scanner* utilizado neste estudo foi o modelo Space Spider, que incorpora um sistema de luz estruturada com três câmeras para captura do padrão da luz projetada, mais uma câmera RGB para captura da textura superficial. Este *scanner* opera com tecnologia de medição que não requer alvos colados à superfície e oferece uma resolução de 0,1 mm e acurácia de 0,05 mm. A taxa de reconstrução 3D é de até 7,5 quadros por segundo, com velocidade de aquisição de dados de até 1 milhão de pontos por segundo [6].

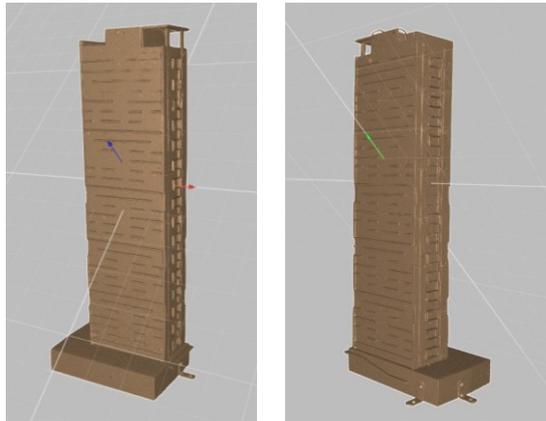
Para avaliação das estratégias de medição com o *scanner* óptico, foi selecionada uma maquete arquitetônica (figura 1) utilizada em ensaios de túnel de vento, com dimensões aproximadas de (523 x 195 x 128) mm. Esses modelos físicos, fabricados em escala reduzida em relação ao tamanho natural, são essenciais em estudos de engenharia do vento.



**Figura 1.** Foto da maquete.

O escaneamento completo da maquete arquitetônica foi realizado meticulosamente com o *scanner* óptico, abrangendo todos os lados possíveis do artefato (nas quatro faces do edifício, no topo e na

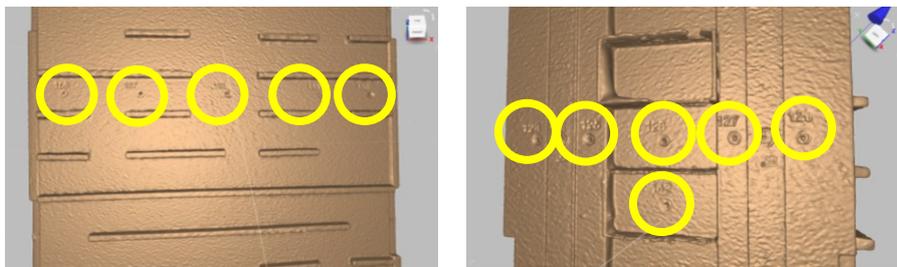
base). Aspectos importantes de operação recomendados pelo fabricante, tais como aquecimento mínimo do equipamento (5 minutos) e distâncias mínima e máxima do equipamento em relação ao artefato foram seguidos rigorosamente de maneira a se obter as condições ideais de escaneamento. A figura 2 ilustra os resultados do escaneamento em duas diagonais.



**Figura 2.** Imagens dos escaneamentos da maquete em duas perspectivas.

Para avaliação dimensional, foram considerados pontos de interesse previamente determinados na maquete, além de algumas estratégias de medição comumente encontradas no cotidiano de um laboratório de medidas dimensional.

Em uma maquete de prédio utilizada em simulações de túnel de vento, uma série de pontos denominados pontos de pressão são numerados e distribuídos ao longo do artefato. A figura 3 destaca alguns destes pontos em círculos amarelos em duas vistas da representação gráfica do escaneamento. Os dados de natureza dimensional são extraídos destes pontos de pressão e os valores de coordenadas são incorporados aos cálculos pertinentes para o ensaio.



**Figura 3.** Pontos de pressão (pontos de interesse) destacados em amarelo.

É importante ressaltar que foi criado o sistema de coordenadas no artefato escaneado opticamente, e ao contrário do que ocorre em uma MMC ou em um braço articulado de medição, a determinação do sistema XYZ é feita após o escaneamento óptico (semelhante ao escaneamento tomográfico), e antes de realizar as medições dimensionais (via *software*) propriamente ditas. Usualmente, em máquinas tridimensionais e braços articulados de medição, primeiramente são obtidas as geometrias básicas necessárias para a criação do sistema de coordenadas, a partir destas geometrias determina-se o sistema XYZ. Somente após esta etapa inicial é realizada a tomada dos dados ou extração das geometrias de interesse.

### 3. Resultados e discussões

A figura 4a mostra um exemplo de medida linear simples e direta, onde os pontos 164 e 165 (destacados em amarelo) são avaliados. Conforme ressaltado na metodologia, após a criação do sistema de coordenadas, os pontos de interesse foram determinados na figura do escaneamento e o

valor da distância destes dois pontos adjacentes foi obtido (sendo que a linha que une os dois pontos está alinhada com a coordenada Y).

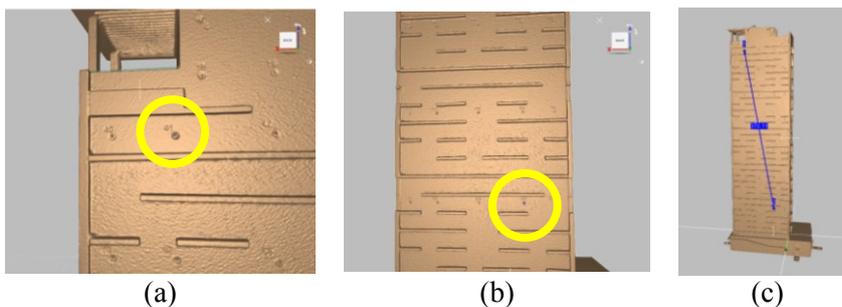
O valor ponto a ponto para este exemplo de medição linear através do escaneamento óptico é igual a  $(15,97 \pm 0,06)$  mm. A figura 4b apresenta a linha em azul resultante representando essa distância ponto-ponto.



**Figura 4.** (a) Pontos 164 e 165 (pontos de interesse); (b) Distância ponto a ponto (em azul).

Para este tipo de medição linear direta, a MMC óptica é comumente empregada entre as alternativas de medição existentes devido ao seu menor tempo de ajuste das configurações iniciais e por apresentar resultados mais rápidos. Por se tratar de uma medição direta em um plano, um sistema de coordenadas local é estabelecido neste plano possibilitando a medição direta da distância entre estes pontos.

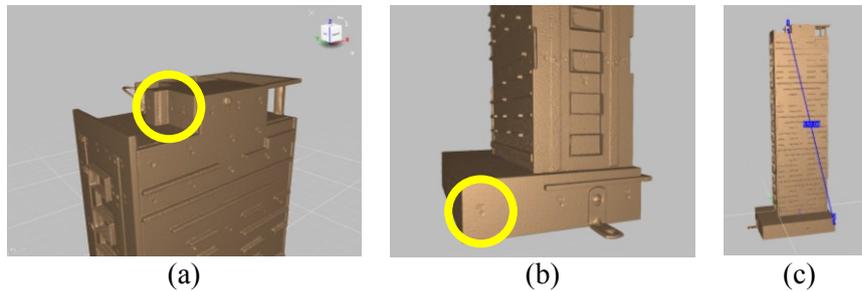
Outro exemplo de medição, localizado no plano frontal, envolve a distância diagonal ponto a ponto entre o ponto 41, próximo ao topo (figura 5a) e o ponto 199, localizado mais próximo à base (figura 5b), ambos destacados em amarelo, diretamente no plano frontal. Esta medição também poderia ser realizada usando uma MMC óptica. Os pontos de interesse localizados nas extremidades do artefato foram determinados e a distância obtida após o escaneamento óptico (representada pela linha em azul na figura 5c) foi igual a  $(370,11 \pm 0,09)$  mm.



**Figura 5.** (a) Ponto 41 (ponto de interesse); (b) Ponto 99 (ponto de interesse); (c) Distância ponto a ponto (em azul).

O terceiro exemplo apresentado na figura 6 corresponde a uma medição ponto a ponto particularmente interessante e com maior grau de dificuldade. Trata-se da determinação de distâncias tendo como referências planos diferentes, opostos de  $180^\circ$ . Em função da localização dos pontos, o possível uso de uma MMC óptica torna-se inviável, uma vez que a aplicação de tal recurso pressupõe medições lineares diretas em um mesmo plano. Portanto, seria necessário alterar-se o tipo de sensoriamento da máquina, da detecção óptica para a tátil.

Nesta medição, foram considerados os pontos 13 (figura 6a), localizado lateralmente no topo, e o ponto 227 (figura 6b), localizado na base em uma orientação oposta de  $180^\circ$  em relação ao ponto 13 (destacados em amarelo). A distância ponto a ponto, determinada por varredura óptica é igual a  $(510,08 \pm 0,12)$  mm (figura 6c, linha azul).

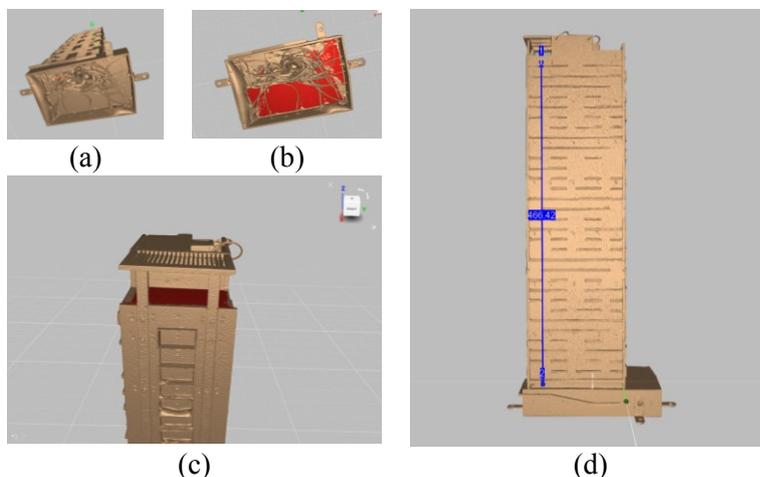


**Figura 6.** (a) Ponto 13 (ponto de interesse); (b) Ponto 227 (ponto de interesse); (c) Distância ponto a ponto (em azul).

A figura 7 mostra um caso de avaliação dimensional com grau de dificuldade considerável para uma MMC tátil. Neste exemplo, o objetivo é medir a distância do plano inferior (figura 7a e figura 7b, marcado em vermelho) da base em relação ao topo (figura 7c, marcado em vermelho). Nesta situação, a rotina de medição de uma máquina de medição tridimensional envolveria avaliação da melhor estratégia de posicionamento da maquete no desempenho da máquina, necessidade de indexação do apalpador em pelo menos 2 (dois) ângulos, qualificação destes ângulos com a esfera de calibração e avaliação do número mínimo de pontos para escaneamento, além de um apalpador com uma haste com comprimento suficiente para adentrar na região localizada no topo e obter os pontos posicionados mais ao centro da superfície de interesse. Ademais, no caso particular desta maquete, com comprimento total aproximado de 500 mm, existe a possibilidade de se empregar a máquina tridimensional para esta tarefa. No entanto, no caso de maquetes com comprimentos aproximados de 1000 mm a 1500 mm, dependendo das dimensões da máquina tridimensional disponível, torna-se impossível o uso deste recurso, sendo necessário utilizar-se de outro equipamento, por exemplo, o braço articulado de medição.

Nesta perspectiva, o *scanner* óptico apresenta vantagens do ponto de vista operacional, uma vez que as várias etapas cruciais necessárias para uma boa prática de medição em máquinas de coordenadas são completamente eliminadas, permitindo um único escaneamento sobre a peça para obtenção de todos os pontos e geometrias de interesse. Outro aspecto notável deste exemplo é o recurso de obtenção do plano de interesse. A superfície pintada de vermelho foi a superfície gerada pelo algoritmo do *software* de medição, que no primeiro caso (na base), desconsiderou o plano abaixo dos fios condutores e eliminou pontos espúrios no cálculo para determinação do plano. Como resultado, obteve-se um plano representativo com número significativo de pontos, superando quaisquer outras técnicas em termos de densidade de pontos.

Finalizando, o valor de plano a plano (da base ao topo) calculado pelo *software* de medição foi igual a  $(466,42 \pm 0,15)$  mm. A figura 7d apresenta na linha em azul esta distância plano-plano.



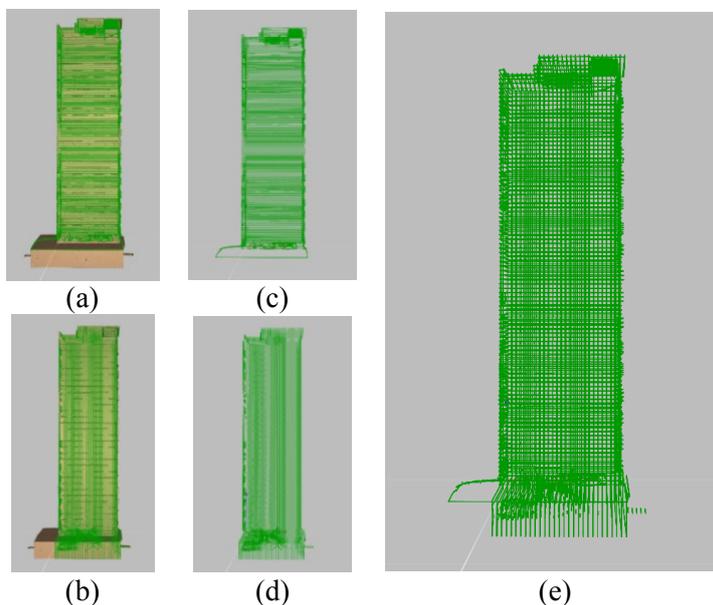
**Figura 7.** (a) Plano inferior; (b) Plano inferior determinado pelo *software*; (c) Plano superior (em vermelho); (d) Distância ponto a ponto (em azul).

Seria possível considerar o uso do braço articulado de medição (do tipo tátil, com esfera) nos quatro exemplos de medição demonstrados. No entanto, assim como na MMC, seria necessário um tempo adicional de qualificação da esfera e de determinação do sistema de coordenadas em comparação a uma MMC óptica. Outro ponto positivo da MMC óptica é a sua maior resolução, uma vez que braços articulados de medição, por sua característica construtiva, costumam ter acurácias de medição menos favoráveis, que são comparáveis aos próprios *scanners* ópticos.

A utilização do metrotomógrafo (no caso, considerando-se o equipamento instalado no IPT) como solução de medição só seria possível para o primeiro exemplo de medição apresentado. Para os demais casos, não seria possível medir as distâncias de interesses, pois as três medidas ultrapassam o limite de escaneamento possível estabelecido pelo fabricante (igual a 350 mm, levando-se em conta medições efetuadas em duas ou mais etapas).

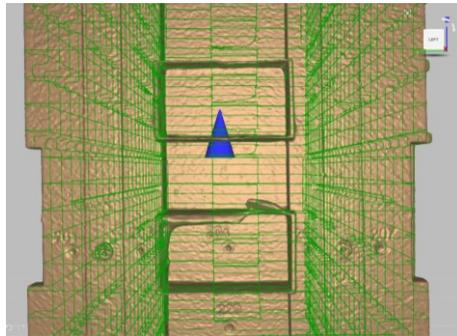
Uma prática comum para usuários de máquinas de medição, sejam elas de coordenadas, de coordenadas ópticas, de medição de perfil ou de forma, é a construção de uma (ou várias) linha(s) de interesse sobre a superfície para verificação de conformidade metrológica. Às vezes uma única linha de interesse é suficiente, enquanto outras vezes várias linhas são necessárias para uma análise mais robusta.

A digitalização óptica 3D permite a geração de inúmeras linhas conforme necessário para uma determinada análise, aproveitando o modelo obtido. No exemplo da figura 8, a primeira coluna à esquerda demonstra várias linhas horizontais (em verde) criadas pelo *software* de medição sobrepostas na nuvem de pontos, equidistantes em intervalos de 5 mm, (figura 8a), assim como várias linhas verticais equidistantes de 5 mm (figura 8b). As linhas aparecem na cor verde. Na segunda coluna, são retiradas as nuvens de pontos (figura 8c e figura 8d), restando-se somente as linhas criadas (horizontal na figura acima e vertical na figura abaixo). Por fim, à direita (figura 8e), as linhas de interesse horizontal e vertical, agrupadas em uma mesma figura.



**Figura 8.** (a) Linhas horizontais virtuais (em verde); (b) Linhas verticais virtuais (em verde); (c) Linhas horizontais sem a nuvem de pontos; (d) Linhas verticais sem a nuvem de pontos; (e) Imagem resultante das linhas virtuais sobrepostas.

O potencial de lidar com alto grau de detalhamento da superfície escaneada por meio do zoom em uma área de interesse é demonstrado na figura 9, que mostra uma ampliação de parte da superfície lateral.



**Figura 9.** Ampliação de uma superfície de interesse.

#### 4. Conclusão

Este estudo teve como objetivo avaliar estratégias de medição associadas ao *scanner* óptico para medições dimensionais de uma maquete arquitetônica utilizada em ensaios de túnel de vento. Por meio da digitalização tridimensional e posterior avaliação das representações geométricas gráficas, demonstrou-se o potencial metrológico da tecnologia de luz estruturada do *scanner* óptico na avaliação da maquete do edifício.

Foram apresentadas diversas estratégias rotineiras e cotidianas empregadas por metrologistas 3D, assim como exemplos com maior grau de dificuldade, considerando a possibilidade de obter resultados semelhantes com a utilização de instrumentos de medição comparáveis existentes no mercado (MMC óptica ou tátil, braço articulado de medição etc.).

Embora os resultados apresentem incertezas que variam de 0,05 mm a 0,15 mm (valores de incerteza maiores em comparação as incertezas possíveis de serem obtidas com máquinas de medição por coordenadas), várias vantagens da tecnologia de escaneamento óptico podem ser destacadas. Isso inclui a velocidade e a quantidade de pontos na obtenção de dados para análise, bem como a facilidade no manuseio e portabilidade.

#### 5. 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

- [1] Muniz G R, Silva F P e Kindlein Junior W 2018 Design, tecnologia e patrimônio: digitalização tridimensional como ferramenta de preservação de elementos de prédios históricos *Gestão e Tecnologia de Projetos* vol 13, n 2 (São Carlos) pp 53-66. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v13i2.138358>
- [2] Munhoz R, Moraes C A C, Kunke M E e Tanaka H 2014 Modelamento tridimensional de órtese para displasia do desenvolvimento do quadril por fotogrametria *XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica* (CBEB 2014) pp 1601-1604
- [3] Dessery Y and Pallari 2018 Measurements agreement between low-cost and high-level handheld 3D scanners to scan the knee for designing a 3D printed knee brace *PLoS ONE* 13(1): e0190585. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190585>
- [4] Marić I Šiljeg A and Domazetović F Precision Assessment of Artec Space Spider 3D Handheld Scanner for Quantifying Tufa Formation Dynamics on Small Limestone Plates (PLs) 2022 *Proc. of the 8th Int. Conf. on Geographical Information Systems Theory, Applications and*



- Management* (GISTAM 2022) pp 67-74
- [5] Baldo C R and Fernandes T L 2023 CT-based dimensional metrology developments in Brazil: Current status and outlook *12th Conference on Industrial Computed Tomography* (iCT 2023), Fürth, Germany *e-Journal of Nondestruct. Test.* vol. 28(3). <https://www.ndt.net/?id=27725>
- [6] Artec 3D, 2023. Specification of 3D Scanners. <https://www.artec3d.com> (June 2023)