

ESCANEAMENTO 3D COM KINECT COMPARADO A MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS NA AVALIAÇÃO DE DESVIO DE FORMA EM PEÇAS PRODUZIDAS POR ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Felipe dos Anjos Rodrigues Campos

Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Univ. Federal de Uberlândia, Lab. de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 1O, Uberlândia/MG.
filipin_anjos@hotmail.com
leo.rrs@gmail.com

Lohanna Ferreira Paiva

Univ. Federal de Uberlândia, Centro de Pesquisa em Aerodinâmica Experimental, Rodovia BR 050, Km 78, Uberlândia/MG.
lohanna.ufu@gmail.com

Álisson Rocha Machado

Pontifícia Universidade Católica - PUC-PR, Av. Imaculada Conceição, 1155, Curitiba/PR.
alissonr.machado@gmail.com

Sergio Henrique de Moura Assis

Univ. Federal de Uberlândia, Lab. de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 1O, Uberlândia/MG.
sergiomouraassis@gmail.com

Resumo. *Importantes avanços tecnológicos na engenharia têm facilitado a produção de peças para a indústria médica, tendo como exemplo o processo de estampagem incremental de ponto simples (SPIF) para a conformação de peças personalizadas e em tempo reduzido. Nesta técnica, o desvio geométrico da superfície e o sistema para sua medição são fatores importantes, dadas as dificuldades de se atingir tolerâncias estreitas e de se obter medições precisas de forma rápida e barata. Nesse sentido, foi avaliado neste trabalho a conformidade geométrica para aplicações médicas de cones de titânio puro conformados por SPIF, além de se comparar as metodologias de medição por escaneamento 3D com Kinect e por contato através de máquina de medir em 3 coordenadas (MM3C). A partir da comparação dos desvios de forma com relação ao cone teórico e das superfícies medidas pelos dois métodos, os erros médios e desvios padrão médios puderam ser calculados, e gráficos 4D evidenciaram as regiões mais deformadas dos cones, que foram a base e o topo. Os desvios observados revelaram-se aceitáveis para várias peças médicas, enquanto o uso do Kinect apresentou viabilidade para verificação rápida, versátil e mais econômica do que na MM3C de tolerâncias mais abertas em superfícies produzidas por SPIF.*

Palavras-chave: *escaneamento 3D, máquina de medir por coordenadas, desvios geométricos, estampagem incremental, próteses*

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, importantes avanços na engenharia têm beneficiado a área biomédica, com novas tecnologias para produção de implantes e próteses. A aplicação de métodos de prototipagem rápida baseados em sistemas CAD/CAM tem permitido a manufatura de peças personalizadas aos pacientes com *lead time* extremamente baixo, já que nesses métodos de fabricação a peça pode ser fabricada a partir de um modelo computacional 3D, de maneira quase imediata e com baixo custo. Embora os processos de manufatura aditiva sejam os mais pesquisados atualmente dada sua versatilidade, poucos são capazes de fabricar peças metálicas de baixa espessura e boa tolerância geométrica a partir de equipamentos financeiramente acessíveis. Neste tipo de aplicação uma alternativa interessante é a estampagem incremental de ponto simples (mundialmente conhecido como *single point incremental forming* ou SPIF). Neste processo, uma chapa é fixa a mesa de uma máquina CNC e uma ferramenta de ponta esférica é movimentada contra a chapa a fim de deformá-la progressivamente, tal como exemplificado na Fig. 1. Isso faz com que o sistema seja facilmente adaptável a centros de usinagem universal, muito comuns em empresas e laboratórios de engenharia mecânica (Souza et. al., 2020). Diversos materiais podem ser estampados sem a necessidade de fabricação de matrizes, barateando o produto na produção de pequenos lotes e prototipagem rápida (Campos et. al., 2020). Esta metodologia foi utilizada com sucesso na confecção de próteses bucais, além de implantes ósseos para face, ombro e joelho (Cheng et. al., 2020).

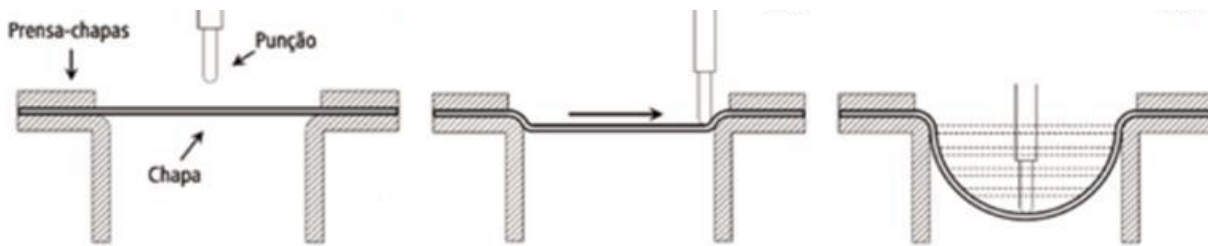


Figura 1. Esquema representativo do processo SPIF. Adaptado de Pereira et. al. (2018).

Uma das principais dificuldades associadas a essa técnica é o controle do desvio geométrico, devido às altas deformações e tensões atuantes na peça durante a conformação. Segundo Hussain e Alkahtani (2021), as consequentes ondulações são fatores intrínsecos ao processamento e dependentes de parâmetros tais como a velocidade de rotação, deslocamento e diâmetro da ferramenta, além da espessura e propriedades mecânicas do material da chapa, tornando o processo complexo e difícil de modelar (Mateus et. al., 2019; Oliveira et. al., 2019). De acordo com Wei et. al., (2019), outro ponto de destaque é a recuperação elástica após remoção da pressão da ferramenta, já que o processo combina o estiramento e dobramento da chapa de forma a gerar tensões dentro do limite elástico em algumas regiões da peça. Assim, apesar das suas vantagens logística para manufatura de componentes na área médica, a verificação e correção dos desvios de forma são alguns dos principais desafios nesse campo atualmente.

A avaliação das macroimperfeições geométricas pode ser feita por diferentes métodos, que podem ser classificados em medição com contato e sem contato. Os primeiros são representados principalmente pelas máquinas de medir em 3 coordenadas (MM3C), no qual uma ponta de medição anexada a um braço robótico ou mecânico é deslocada de forma automática ou manual sobre uma peça, registrando as coordenadas X, Y e Z dos pontos apalpados da peça. O resultado é uma nuvem de pontos que pode ser usada para reconstruir o objeto em 3D e calcular os desvios segundo um software apropriado. Embora esses equipamentos tenham ótima resolução, da ordem de micrometros, sua operação pode ser bastante demorada, limitando a quantidade de pontos amostrados (Ebrahim, 2015). Por outro lado, as medições sem contato são geralmente muito mais rápidas e capazes de extrair milhares de pontos em poucos milissegundos. Essas técnicas se baseiam em sensores que detectam luz ou radiação refletida de forma diferente pela peça em análise, utilizando então algoritmos complexos para distinguir a profundidade e contornos do objeto. Algumas das técnicas, conhecidas popularmente como escaneamento 3D, tem ganhado espaço na análise metrológica e inspeção de produtos para a indústria médica (Haleem e Javaid, 2019), ou ainda como ferramenta para reconhecimento de imagens em sistemas de inteligência artificial para manufatura com robôs (Caruso et. al., 2017). Outras aplicações incluem o planejamento de cirurgias estéticas (Pöhlmann et. al., 2017), digitalização de ambientes industriais para otimizar espaços e evitar colisões (Nielsen et. al., 2019).

Neste trabalho foi realizada a avaliação do desvio de forma de peças cônicas de titânio puro estampadas pelo processo SPIF, utilizando duas diferentes metodologias para amostragem dos pontos: máquina de medir em 3 coordenadas e sensor 3D Kinect, que é um dispositivo comercial baseado na análise de luz estruturada por algoritmos de aprendizado de máquina (*machine learning*). O objetivo foi avaliar se seria possível obter precisão aceitável na medição da peça ao usar a segunda metodologia. Os pontos medidos foram usados para reconstrução da superfície 3D através do software Matlab, e um código em linguagem C++ foi desenvolvido para comparação da exatidão e precisão de peças estampadas em três diferentes condições em relação ao cone teórico desejado. Gráficos do tipo 4D foram plotados mostrando a reconstrução 3D da peça estampada com o uso da coloração da superfície para indicar o desvio geométrico. As peças apresentaram desvio de forma mais pronunciado nas bordas da chapa, devido a recuperação elástica, e no topo do cone, onde a tensão de estiramento da chapa é menor. As nuvens de pontos obtidas pelas duas diferentes técnicas de aquisição mostraram precisões semelhantes em comparação ao cone teórico, indicando o uso do Kinect como uma ferramenta válida para análises dimensionais com tolerâncias mais largas.

2. METODOLOGIA

Os ensaios de estampagem incremental de ponto simples foram realizados com chapas de titânio puro de 1 mm de espessura, variando a velocidade de rotação e de avanço da ferramenta, o passo vertical e a condição lubri-refrigerante. O material estampado tem boa biocompatibilidade, mas sua baixa plasticidade dificulta o processo de estampagem (Ambrogio et. al., 2017). Foram utilizadas ferramentas de ponta semi-esférica com raio 5 mm, torneadas a partir de barras cilíndricas de aço SAE 52100. Os ensaios foram feitos num centro de usinagem universal ROMI Bridgeport 760 com 9 kW de potência máxima, e um suporte em ferro fundido foi usado para fixação das chapas. O equipamento foi ajustado para produção de cones retos com ângulo de parede de 45° e diâmetro da base de 80 mm, com altura ligeiramente inferior a 40 mm devido ao raio da ferramenta. A Figura 2(a) e Fig. 2(b) mostram, respectivamente, o cone teórico e um dos cones produzidos, ambos invertidos verticalmente em relação a posição de estampagem.

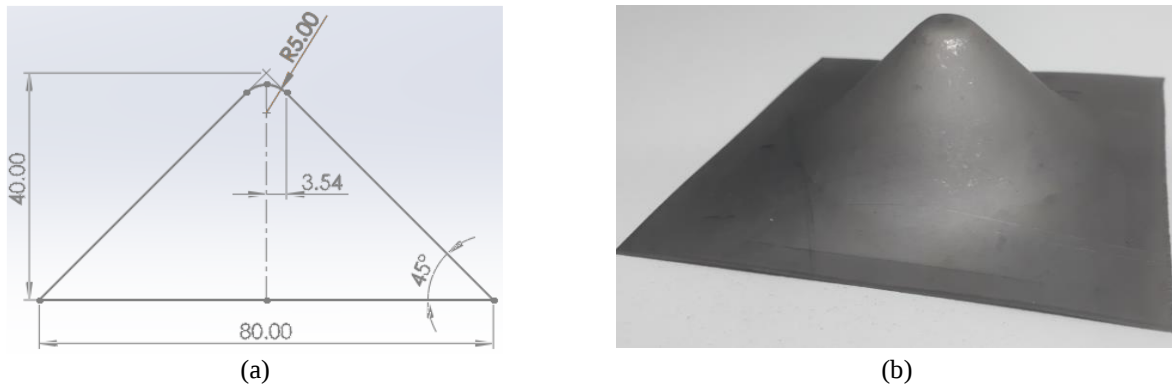


Figura 2. (a) Dimensões do cone teórico. (b) Exemplo de peça produzida nos ensaios SPIF.

A amostragem da superfície externa dos cones foi feita primeiramente numa máquina de medir em 3 coordenadas Mitutoyo modelo BR-M443, do tipo ponte móvel, manual, com resolução de 1 μm . De acordo com o certificado de calibração e com o trabalho de Rosa (2016), ao realizar-se as medições com a peça centralizada na mesa de desempenho, a incerteza expandida com 95 % de confiabilidade nos três eixos varia entre 1,6 μm e 1,9 μm , com erro de apalpação de 1,9 $\pm$ 1,2 μm ao utilizar-se esfera de rubi de diâmetro 2 mm. Esses valores são bem mais baixos do que os erros admissíveis com relação às peças teóricas normalmente fabricadas por SPIF, logo, as medidas da superfície 3D reconstruída podem ser admitidas como os valores convencionais da peça, com os quais serão calculados os erros do sistema de escaneamento 3D com Kinect. Foram adquiridos um total de 56 pontos em cada peça, divididos em 7 planos de medição ao longo da altura do cone, sendo 3 na parte reta, 2 na parte abaulada do topo e 2 na parte abaulada da base. Em cada plano foram apalpados 8 pontos aproximadamente equidistantes, seguindo os eixos de simetria da base quadrada da chapa. O tempo de *setup* da MM3C é em torno de 20 minutos e cada medição requer aproximadamente 10 minutos.

O Kinect foi fixado num suporte com distância horizontal e vertical de aproximadamente 30 cm e 28 cm, respectivamente, apontado diretamente para as peças, as quais foram colocadas no centro de uma mesa giratória para amostragem da superfície. O tempo de *setup* é aproximadamente 10 minutos e cada medição requer em torno de 3 minutos. Esse procedimento garantiu as mesmas condições de amostragem para cada objeto, um fator importante já que Corti et. al. (2016) e Gonzalez-Jorge et. al. (2013) mostraram que as características metrológicas dos sistemas baseados no Kinect podem variar com o ângulo de incidência da radiação emitida, com a posição do objeto nos *frames* capturados, distância do alvo ao sensor, e com o aspecto superficial e cor do objeto estudado.

O *software* Skanect versão 1.10.2 foi utilizado para aquisição da nuvem com 500 pontos, os quais foram exportados em formato STL. Nesse tipo de arquivo é formada uma casca 3D do objeto a partir de elementos triangulares unindo os pontos adjacentes, para os quais são armazenadas as coordenadas cartesianas e os vetores representativos dos triângulos que formam a superfície escaneada. Posteriormente, o *software* Blender versão 2.82 foi empregado para centralização dos pontos em relação a origem do sistema de coordenadas, para facilitar a comparação com o cone reconstruído a partir da MM3C. As novas coordenadas dos pontos foram então exportadas em tabelas no formato TXT.

Estes dados alimentam o algoritmo desenvolvido em Matlab que faz a reconstrução das superfícies através das funções *meshgrid* e *griddata*, as quais geram uma nova nuvem de pontos pré-determinados no plano XY com a coordenada Z interpolada a partir dos pontos originais. Essa estratégia permite a comparação entre pontos equivalentes das nuvens capturadas pelo sistema de escaneamento e pela MM3C. A reconstrução com essas funções foi feita a partir de uma malha de 2601 pontos (51 x 51) igualmente espaçados no plano XY, nos limites de -40 a 40 mm em cada coordenada. Assim, em acordo com a metodologia adotada por Gonzalez-Jorge et. al. (2015), assumindo a superfície gerada pela MM3C como valor de referência, pode-se calcular o erro médio e desvio padrão médio dos resíduos ou diferenças d_i para o total de N pontos associados à medição com o Kinect, partir das Eq. (1) e Eq. (2), respectivamente. Os desvios em relação ao cone teórico foram calculados comparando altura de cada ponto da nuvem original em relação a coordenada Z teórica do cone reto da Figura 2(a), para os quais pode-se calcular o erro médio e desvio padrão médio de maneira análoga as Eq. (1) e Eq. (2). O valor teórico de Z pode ser expresso analiticamente segundo as Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5), deduzidas das relações geométricas do cone, onde o raio da base (RB) é 40 mm, o raio da ferramenta (RF) é 5 mm, e o raio de referência (Rref) é 3,54 mm, conforme indicado na Fig. 2(a).

$$e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (1)$$

$$s = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i)^2 \quad (2)$$

$$\text{Base da chapa (Z corresponde a espessura): se } \sqrt{X^2 + Y^2} \geq RB, \text{ então } Z = 1 \text{ [mm]} \quad (3)$$

$$\text{Cone reto: se } RB \geq \sqrt{X^2 + Y^2} \geq Rref, \text{ então } Z = RB - \sqrt{X^2 + Y^2} \text{ [mm]} \quad (4)$$

$$\text{Topo abaulado: se } \sqrt{X^2 + Y^2} \geq Rref, \text{ então } Z = RB - 2 \cdot Rref + RF \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{RF}\right)\right) \text{ [mm]} \quad (5)$$

3. RESULTADOS

As reconstruções do cone 1 podem ser vistas na Fig. 3, em que são feitas três comparações distintas: desvio geométrico em relação ao cone teórico medido na MM3C; desvio em relação ao cone teórico medido pelo Kinect; desvio entre a medição do Kinect e da MM3C. As reconstruções dos cones 2 e 3 revelaram padrões recorrentes, como as bordas da base mais altas e o topo mais baixo. O primeiro fator se deve ao dobramento da borda devido a tensão de flexão nessa região, já que o processo normalmente ocorre sob elevadas forças na direção Z, sobretudo no início da estampagem. Embora a correção desse tipo de imperfeição exija variações que deixam o processo mais complexo, tal como a utilização de uma matriz sob a chapa, em muitas peças da indústria médica essa base da chapa é recortada (Milutinović et. al., 2021), restando apenas a parte estampada.

Já o topo mais baixo corresponde a posição final da ferramenta, numa configuração em que a força vertical aplicada no cone provoca uma distribuição desigual das tensões nessa direção. Dessa maneira, a deformação elástica do restante do cone diminui a tensão de estiramento no ponto central do topo, dificultando a deformação plástica necessária a estampagem da chapa. Pode-se perceber que as superfícies medidas pelos dois métodos revelam esses mesmos tipos de desvio geométrico, conforme pode ser visto na Fig. 3(a) e Fig. 3(b), indicando a sensibilidade do escaneamento 3D com Kinect para detectar essas características.

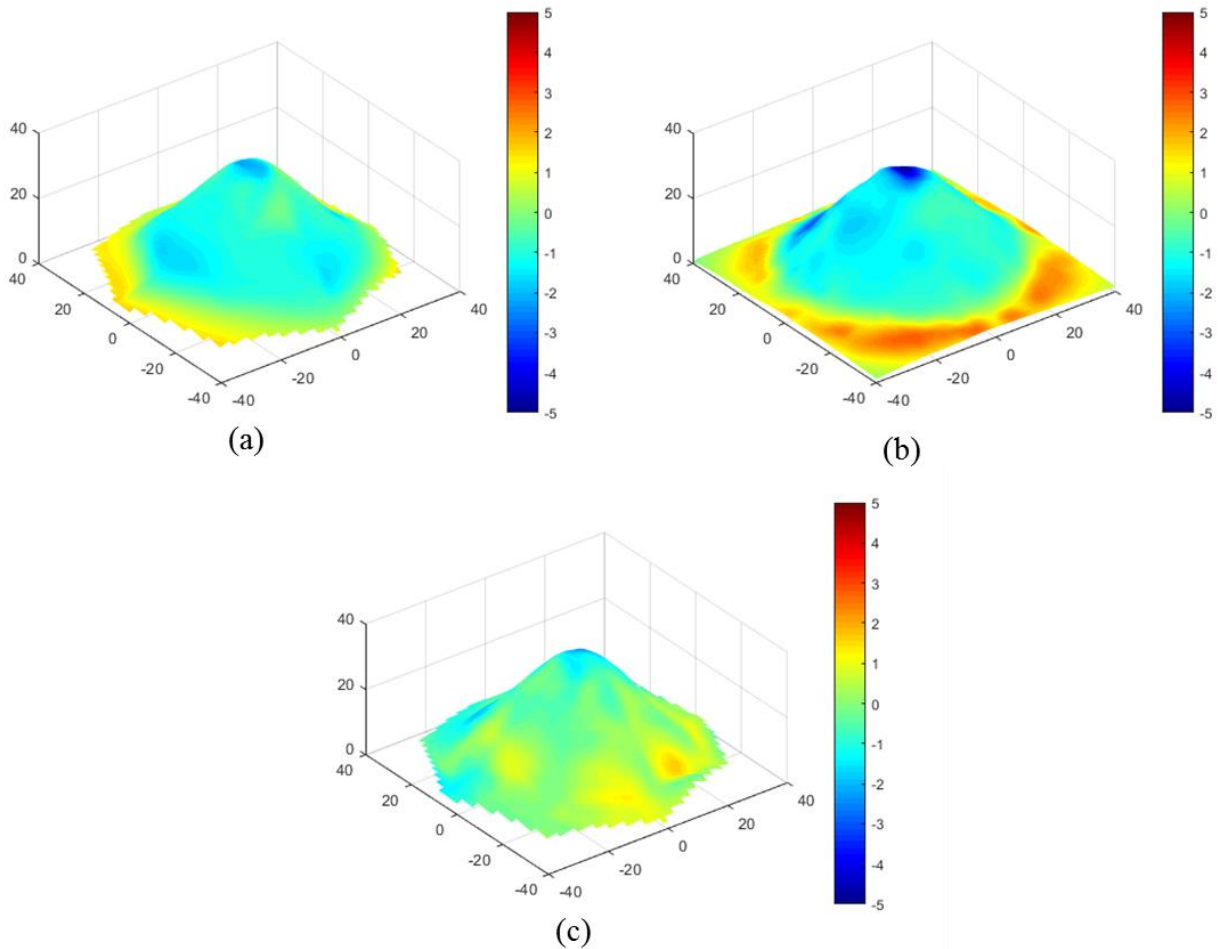


Figura 3. (a) desvio geométrico do cone medido pela MM3C em relação ao teórico, (b) da medição com Kinect em relação ao teórico, (c) e do Kinect em relação a MM3C. Todas dimensões estão em mm.

Segundo os princípios da metrologia, o mensurando verdadeiro não pode ser perfeitamente medido, já que todo sistema de medição contém uma incerteza. Assim, deve-se obter o valor convencional para fins de verificação das tolerâncias da peça, utilizando um sistema de medição com resolução 10 vezes mais fina em relação ao sistema de medição tradicionalmente utilizado (Vuolo, 1996). Dessa forma, a superfície convencional reconstruída a partir da nuvem de pontos apalpado na MM3C pode ser comparada à superfície gerada pelo escaneamento 3D, tal como no cone 1 da Fig. 3(c). Percebe-se a coloração predominantemente verde, o que indica que os desvios comparados ponto a ponto são próximos de 0 e estão majoritariamente contidos no intervalo de -1 a 1 mm.

Esses desvios das superfícies escaneadas e das medidas na MM3C são ainda menores nos outros dois cones, como mostram os erros e desvios padrão médios para cada cone estampado, calculados segundo as Eq. (1) e Eq. (2), e dispostos na Fig. (4) para as três comparações distintas das superfícies. Esses valores são semelhantes aos obtidos por Bueno et. al. (2015) na avaliação da precisão de diferentes sensores do tipo Kinect. Segundo os autores, nas melhores configurações de posicionamento da peça e do sensor durante a medição, pode-se obter uma precisão entre 0,5 e 1,0 mm, o que indica a vantagem desse sistema de medição para peças com tolerâncias maiores, dado a alta versatilidade, praticidade e rapidez, além do baixo custo do Kinect.

Os desvios padrão médios com relação ao cone teórico são bastante próximos nos dois métodos de medição, como indicado pelas barras verdes e laranjas da Fig. 4 para os três cones estampados. A princípio, este resultado contrasta com os erros médios significativamente mais elevados do escaneamento indicados pela linha laranja em comparação com os da MM3C representados na linha verde. No entanto, essa diferença se justifica pela região dos cones avaliada em cada método. Enquanto no escaneamento obteve-se pontos do cone e da base da chapa (região não estampada), na MM3C foram apalpados apenas pontos do cone. Dessa maneira, neste último caso o erro e desvio médio não contabilizam as regiões deformadas da base, nas quais ocorrem os maiores desvios geométricos, tal como exemplificado na Fig. 3(b). Isso significa que numa comparação com a MM3C considerando a mesma região de avaliação, o erro e desvio médio com relação ao cone teórico obtidos pelos dois métodos seriam ainda mais semelhantes. De fato, esse fator foi contemplado ao confrontar a superfície escaneada com a convencional, cujos erros e desvios são apresentados pelas linhas e colunas azuis, respectivamente, que indicam os valores mais baixos registrados. O erro médio abaixo de 0,4 mm e desvio médio abaixo de 0,8 mm reforçam novamente a viabilidade do Kinect como sistema de medição de desvios de forma em peças estampadas.

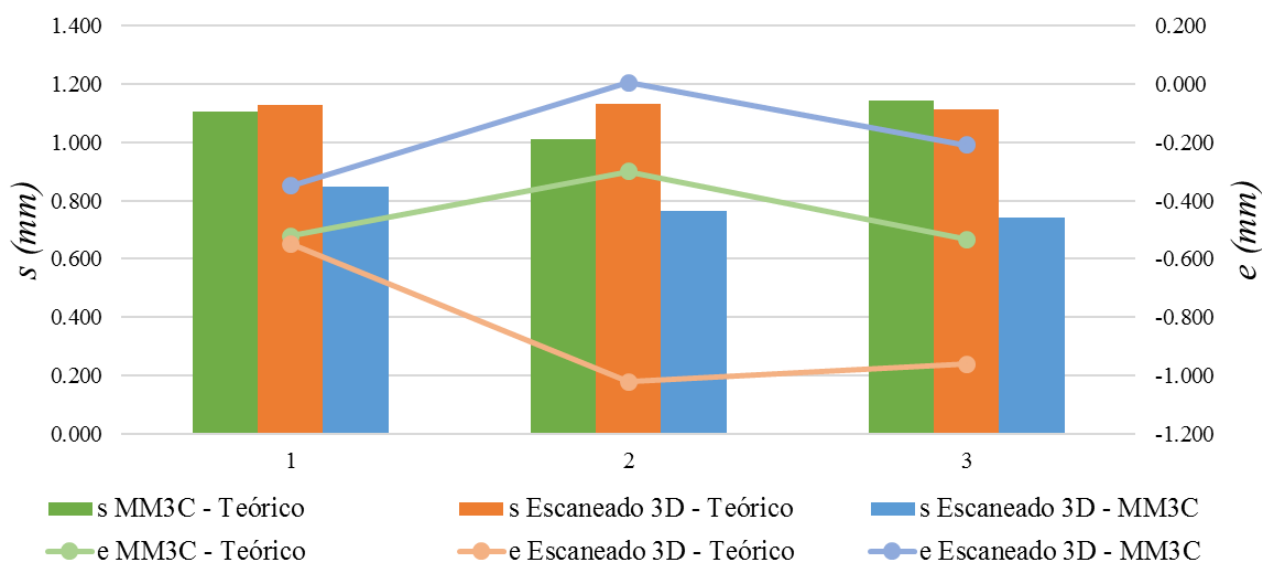


Figura 4. Erros médios (e) e desvio padrão médio (s) calculado pelos desvios entre as superfícies MM3C - teórico, Escaneado 3D - teórico, Escaneado 3D - MM3C.

Considerando-se o processo de estampagem incremental, os desvios geométricos em relação ao cone teórico também são aceitáveis em muitas peças médicas. Milutinović et. al. (2021), por exemplo, produziram próteses bucais de aço inoxidável com desvios máximos em torno de 0,815 mm, presentes nas bordas da peça. Neste caso, o uso de resina na região era uma etapa inerente ao processo que seria suficiente para corrigir as distorções geométricas de até 1,5 mm. Em outros trabalhos (Cheng et. al., 2020) foram utilizados processos mais complexos, como a estampagem incremental de ponto duplo (popularmente conhecida como *two point incremental forming* ou TPIF), para produzir implantes cranianos em polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) com desvios de até 0,5 mm, embora as bordas tenham apresentado desvios de 4 a 5 mm. Assim, dada a baixa estampabilidade a frio do titânio (Ambrogio et. al., 2013), pode-se considerar satisfatórios os valores obtidos para os erros médios, menores do que 0,4 mm para os três cones.

Embora os parâmetros de estampagem tenham influência determinante na qualidade superficial, tensões residuais e forma final da peça estampada, as diferenças observadas para os três cones foram pequenas, com desvio padrão médio variando de 1,010 a 1,144 mm. Seriam necessárias a comparação de outras peças e a seleção de outros parâmetros para evidenciar a melhor condição de estampagem. Cabe ressaltar que os desvios máximos em cada cone também foram avaliados neste trabalho, mas não foram considerados como métricas adequadas porque sempre ocorriam na região não estampada. Além disso, destaca-se a complexidade em comparar desvios geométricos entre superfícies por meio de escaneamento 3D. O método adotado neste trabalho se baseia na norma ISO 1101 (2017), segundo a qual a tolerância t para o desvio de uma superfície qualquer é dada pelo espaço delimitado por duas superfícies consecutivas espaçadas de uma distância t . No entanto, alguns autores adotam a comparação de determinados pontos e medidas da forma geométrica, tais como o centro e o raio de uma esfera (Gonzalez-Jorge et. al., 2013; Gonzalez-Jorge et. al., 2015) ou a altura, diâmetro e inclinação de um cone (Rosa, 2016). Ademais, alguns *softwares* indicam apenas o desvio máximo, calculado pela distância entre dois pontos a partir das coordenadas (X, Y, Z).

4. CONCLUSÕES

O processo de estampagem incremental de ponto simples foi utilizado para conformação de cones a partir de chapas de titânio puro a fim de avaliar a conformidade geométrica para aplicações médicas, além de comparar as metodologias de medição por escaneamento 3D com Kinect e por contato com máquina de medir em 3 coordenadas. A partir da comparação dos desvios de forma com relação ao cone teórico e das superfícies medidas pelos dois métodos, os erros médios e desvios padrão médios puderam ser calculados, e gráficos 4D evidenciaram as regiões mais deformadas dos cones. A partir dessas informações, as seguintes conclusões podem ser enumeradas:

- Os topos dos cones apresentaram altura menor do que a peça planejada devido a essa região ser gerada no fim do processo, quando o estiramento da chapa é menor;
- As bases dos cones tiveram abaulamento e altura maior do que o cone teórico devido ao efeito de flexão e dobramento nessa região, causado pelas altas forças verticais da ferramenta no início do processo de estampagem;
- O erro médio e desvio padrão da superfície gerada por escaneamento em comparação com a convencional são baixos e indicam a viabilidade de utilização do Kinect como ferramenta de verificação das tolerâncias geométricas de peças estampadas por SPIF;
- Os desvios geométricos das peças estampadas são semelhantes ao observado em outros trabalhos na manufatura de próteses, o que atesta a efetividade desse método como ferramenta para facilitar a personalização de peças biomédicas de acordo com o paciente, com *lead time* reduzido;
- Não foram constatadas diferenças significativas nos desvios de forma segundo os parâmetros de estampagem, questão que requer avaliação conjunta de mais peças e com o auxílio de outros parâmetros para quantificar os desvios;
- A avaliação dos desvios de forma por escaneamento 3D e a escolha dos parâmetros para comparação dependem do operador, o que dificulta a ocorrência de uma metodologia padronizada para todos os trabalhos e sistemas de medição;

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FAPEMIG e CAPES (Código de Financiamento 01) pelo fomento às bolsas de pós-graduação, e ao Laboratório de Ensino em Metrologia e Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio na realização dos testes.

6. REFERÊNCIAS

- Ambrogio, G., Gagliardi, F., Bruschi, S. e Filice, L., 2013. "On the high-speed Single Point Incremental Forming of titanium alloys". *CIRP Annals*, Vol. 62, No. 1, p. 243-246.
- Ambrogio, G., Sgambitterra, E., De Napoli, L., Gagliardi, F., Fragomeni, G., Piccininni, A., Guglielmi, P., Palumbo, G., Sorgente, D., Barbera, L., Villa, T. M., 2017. "Performances analysis of titanium prostheses manufactured by superplastic forming and incremental forming". *Procedia Engineering*, Vol. 183, p. 168-173.
- Bueno, M., Díaz-Vilariño, L., Martínez-Sánchez, J., González-Jorge, H., Lorenzo, H. e Arias, P., 2015. "Metrological evaluation of KinectFusion and its comparison with Microsoft Kinect sensor". *Measurement*, Vol. 73, p. 137-145.
- Campos, F. A. R., Souza, F. C. R., Silva, L. R. R. e França, P. H. P., 2020. "Study of different lubri-coolant conditions for incremental sheet forming of thin zinc sheets". *A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Mecânica*, Vol. 1, p. 21-34.
- Caruso, L., Russo, R. e Savino, S., 2017. "Microsoft Kinect V2 vision system in a manufacturing application". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 48, p. 174-181.
- Cheng, Z., Li, Y., Xu, C., Liu, Y., Ghafoor, S. e Li, F., 2020. "Incremental sheet forming towards biomedical implants: a review". *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, No. 4, p. 7225-7251.

- Corti, A., Giancola, S., Mainetti, G. e Sala, R., 2016. "A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera". *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 75, p. 584-594.
- Ebrahim, M. A. B., 2015. "3D laser scanners' techniques overview". *International Journal of Science and Research*, Vol. 4, No. 10, p. 323-331.
- Gonzalez-Jorge, H., Riveiro, B., Vazquez-Fernandez, E., Martínez-Sánchez, J. e Arias, P., 2013. "Metrological evaluation of Microsoft Kinect and Asus Xtion sensors". *Measurement*, Vol. 46, No. 6, p. 1800-1806.
- Gonzalez-Jorge, H., Rodríguez-Gonzálvez, P., Martínez-Sánchez, J., González-Aguilera, D., Arias, P., Gesto, M. e Díaz-Vilariño, L., 2015. "Metrological comparison between Kinect I and Kinect II sensors". *Measurement*, Vol. 70, p. 21-26.
- Haleem, A. e Javaid, M., 2019. "3D scanning applications in medical field: a literature-based review". *Clinical Epidemiology and Global Health*, Vol. 7, No. 2, p. 199-210.
- Hussain, G. e Alkahtani, M., 2021. "Analysis of wall curling in incremental forming of a sheet metal: Role of residual stresses, stretching force and process conditions". *Journal of Materials Research and Technology*.
- ISO 1101, 2017. "Geometrical product specifications (GPS) - geometrical tolerancing - tolerances of form, orientation, location and run-out". *International Organization for Standardization*.
- Mateus, V. V. G., Silva, L. R. R., Campos, F. A. R., França, P. H. P., Barreto, J. C. N. e Sales, W. F., 2019. "Efeito da rotação na estampagem incremental de chapas de aço AISI 304". *Revista Sciencomm*, Vol. 8, p. 37-43.
- Milutinović, M., Lendjel, R., Baloš, S., Zlatanović, D. L., Sevshek, L. e Pepelnjak, T., 2021. "Characterisation of geometrical and physical properties of a stainless steel denture framework manufactured by single-point incremental forming". *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 10, p. 605-623.
- Nielsen, C. P., Malik, A. A., Hansen, D. G. e Bilberg, A., 2019. "Low-Cost 3D Scanning in a Smart Learning Factory". *Procedia Manufacturing*, Vol. 38, p. 824-831.
- Oliveira, B. J., Silva, L. R. R., Campos, F. A. R., França, P. H. P., Mateus, V. V. G., Barreto, J. C. N. e Sales, W. F., 2019. "Análise da velocidade de avanço na estampagem incremental do aço AISI 304". *Revista Sciencomm*, Vol. 8, p. 14-22.
- Pereira, L. C., de Paula Santos, G. H., da Silva, M. L. N. e Goulart, P. R., 2018. "Determinação da estampabilidade do latão 70/30 pelo processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples". *Anais do X Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - CONEM-2018*, Salvador, BA.
- Pöhlmann, S. T., Harkness, E., Taylor, C. J., Gandhi, A. e Astley, S. M., 2017. "Preoperative implant selection for unilateral breast reconstruction using 3D imaging with the Microsoft Kinect sensor". *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, Vol. 70, No. 8, p. 1059-1067.
- Rosa, V. A. D. O., 2016. *Avaliação do desempenho metrológico dos métodos de ajuste utilizados nas máquinas de medir por coordenadas*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Souza, F. C. R., Silva, L. R. R., Campos, F. A. R. e Peixoto, A. C. S., 2020. "Manufacture of complex parts in thin sheets of commercially pure aluminum using incremental sheet forming method". *A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Mecânica*, Vol. 1, p. 11-20.
- Vuolo, J. H., 1996. *Fundamentos da teoria de erros*. Editora Blucher, São Paulo, 2ª ed.
- Wei, H., Zhou, L., Heidarsheenas, B., Ashraf, I. K. e Han, C., 2019. "Investigation on the influence of springback on precision of symmetric-cone-like parts in sheet metal incremental forming process". *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 2, No. 2, p. 140-145.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

3D SCAN VIA KINECT COMPARED TO COORDINATE MEASURING MACHINE IN EVALUATION OF GEOMETRIC DEVIATIONS IN PARTS PRODUCED BY INCREMENTAL SHEET FORMING

Felipe dos Anjos Rodrigues Campos

Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Federal University of Uberlândia, Laboratory for Teaching and Research of Machining, 2121, João Naves de Ávila av., block 10, Uberlândia/MG.

filipin_anjos@hotmail.com

leo.rrs@gmail.com

Lohanna Ferreira Paiva

Federal University of Uberlândia, Experimental Aerodynamic Research Center, BR 050 highway, Km 78, Uberlândia/MG.

lohanna.ufu@gmail.com

Álison Rocha Machado

Pontifical Catholic University - PUC-PR, 1155, Imaculada Conceição av., Curitiba/PR.

alissonr.machado@gmail.com

Sergio Henrique de Moura Assis

Federal University of Uberlândia, Lab. for Teaching and Research of Machining, 2121, João Naves de Ávila av., block 10, Uberlândia/MG.

sergiomouraassis@gmail.com

Abstract. Important technological advances in engineering have favored the production of products for medical industry, whereas single point incremental sheet forming (SPIF) is an example for conformation of custom parts in reduced time. In this technique, the geometric deviations and its measuring are important factors, given the difficulties of achieving close tolerances and obtaining fast measurements in a reliable and inexpensive manner. Thus, this work aimed to evaluate the geometrical conformity of cones produced by SPIF from pure titanium sheets concerning biomedical applications, while also comparing measuring methodologies by 3D scanning with Kinect sensor and by coordinate measuring machine. Through the comparison of deviations against the theoretical cone of the surfaces measured by the two methods, mean errors and mean standard deviations were calculated, and 4D graphs showed the most irregular regions of the cones, which were the base and the top. The observed deflections were considered acceptable for many biomedical parts, and the use of Kinect showed good feasibility for versatile, cost effective and fast verification of wider tolerances in the geometric deviations of parts manufactured by SPIF.

Keywords: 3D scan, coordinate measuring machine, geometric deviations, incremental sheet forming, prosthesis

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.