

ESTUDO EXPERIMENTAL DO EFEITO DA REDUÇÃO DE PONTOS NA ANÁLISE DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS POR TOMOGRAFIA

Christian Raffaello Baldo

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas - CECS, Universidade Federal do ABC, Santo André - SP, Brasil
christian.baldo@ufabc.edu.br

Thiago Linhares Fernandes

Gustavo Daniel Donatelli

Centro de Metrologia e Instrumentação - CMI, Fundação CERTI, Florianópolis - SC, Brasil
thf@certi.org.br, gd@certi.org.br

Resumo. O emprego da tomografia computadorizada como ferramenta da metrologia dimensional tem se evidenciado nos últimos anos. Para tornar a análise dimensional e geométrica consistente, programas de avaliação específicos têm sido aplicados. Eles fazem uso de nuvens de pontos geradas pelo processo de segmentação, que por sua vez são afetadas por fatores de influência relacionados à fonte e detector de raios X, ao sistema de posicionamento do objeto, à interação dos raios X com a matéria e ao complexo processamento matemático. O efeito da redução dos pontos extraídos da matriz volumétrica gerada pela tomografia foi estudado neste trabalho, sob a ótica da verificação de tolerância dimensional. Para isso, consideraram-se técnicas de análise estatística de dados, em especial, os gráficos de controle, e fez-se uso de sistemas de medição por coordenadas e softwares de análise de matriz volumétrica e de análise dimensional. Buscou-se, dessa forma, evidenciar o impacto do processo de extração de pontos sobre os resultados das medições. Pôde-se verificar que a troca do método de extração da nuvem de pontos não acarretou alterações estatisticamente significativas nos parâmetros de interesse, denotando por si só um resultado positivo, pois dá uma indicação que o usuário pode se beneficiar de algoritmos de extração de pontos que resultam em nuvem de pontos mais enxutas, sem prejuízo significativo à qualidade das medições.

Palavras chave: Tomografia industrial. Extração da nuvem de pontos. Verificação de tolerâncias dimensionais.

1. INTRODUÇÃO

Por mais de uma década tem-se evidenciado o desenvolvimento e o emprego crescente de tecnologias de medição que possibilitam a digitalização de peças e componentes. Mais recentemente, o processo de escaneamento de peças utilizando a tomografia computadorizada de raios X tem sido continuamente desenvolvido e aplicado nas indústrias. Ele utiliza uma fonte de raios X e um detector da radiação remanescente para obter informações volumétricas do objeto de interesse. O projeto construtivo de um sistema de tomografia voltado para aplicações industriais contempla o aparato de radiação fixo e o sistema de posicionamento do objeto, que inclui uma mesa rotativa que realiza a rotação do objeto durante a obtenção das projeções. O software, por sua vez, tem o papel de filtrar, processar e reconstruir o objeto na forma de uma matriz volumétrica digital, assim como efetuar as análises pertinentes (Kruth *et al*, 2011). Dentre as análises possíveis citam-se a detecção de defeitos internos de fabricação e montagem e a obtenção de informações dimensionais e geométricas para o controle da qualidade e a engenharia dimensional do produto.

Por se tratar de uma tecnologia relativamente nova no contexto da metrologia dimensional, atualmente são muitas as pesquisas relacionadas com a temática. Um dos pontos que tem merecido atenção é a representatividade da nuvem de pontos extraída da matriz volumétrica digital. Desse modo, este trabalho tem como principal foco analisar e explorar os efeitos da redução do tamanho da nuvem de pontos gerada em medições dimensionais baseadas na matriz volumétrica. Busca-se dessa forma adequar a quantidade de pontos extraídos à aplicação, sem prejuízo à qualidade da informação gerada, porém com ganhos em termos de tempo de análise e demanda computacional. Neste contexto, serão testados algoritmos para a redução da quantidade de pontos extraídos e empregados softwares para verificação de tolerâncias dimensionais e geométricas.

2. PROCESSO DE MEDIÇÃO POR TOMOGRAFIA

O hardware do sistema de tomografia tem grande efeito na qualidade dos resultados. Muitos parâmetros provenientes da fonte de raios X (*e.g.* tensão e corrente, tamanho do ponto focal), do detector (*e.g.* tempo de exposição, quantidade de projeções, fusão de pixels, sensibilidade/ganho) e do objeto de interesse (*e.g.* distância fonte-objeto, orientação do objeto em relação ao eixo de rotação) precisam ser configurados de forma apropriada. De forma similar, uma série de etapas de

processamento de imagem e matemático, como a correção e linearização de pixels, o redimensionamento, a reconstrução da matriz volumétrica, a detecção de bordas, etc. precisam ser conduzidas. A corrente e a tensão aplicadas são fatores que influenciam diretamente na intensidade dos raios X e seu poder de penetração, determinando a quantidade de fótons que atingem o objeto. A escolha desses parâmetros é diretamente afetada pelas propriedades do objeto em análise (composição do material, dimensão, geometria). É necessário aplicar valores de tensão suficientemente altos para evitar a extinção dos raios X ao atravessar o objeto na posição de mais material; por outro lado, valores elevados de tensão podem ocasionar perdas de contraste ou saturação do detector com o objeto na posição de menos material.

Um efeito importante resultante da interação dos raios X com a matéria é o endurecimento do feixe, que gera artefatos, *i.e.*, estruturas artificiais, que não possuem correspondência com a estrutura real do objeto. O endurecimento do feixe resulta do fato que os fótons de baixa energia são atenuados mais rápido do que os fótons de alta energia; assim, após um dado comprimento percorrido, apenas pacotes com maior energia atravessarão o objeto por completo e alcançam o detector. Para aplicações de metrologia, os artefatos representam um grande problema, pois eles causam variação no espectro final de radiação e assim influenciam a detecção das bordas e dificultam a obtenção de medições confiáveis. Para determinar os limites da superfície de um objeto, utilizam-se algoritmos capazes de definir valores de cinza aplicados de maneira global ou local às superfícies do objeto. Esses valores mostram variações em sua opacidade em função do comprimento radiográfico do material, e servem para determinar o limiar do material com o ar circundante convertendo dados 3D de *voxels* em dados 3D de superfície.

2.1. Nuvem de pontos e software de avaliação GD&T

O software de reconstrução e análise de matriz volumétrica dispõe de ferramentas de extração dos pontos associados às bordas da matriz volumétrica. As coordenadas dos pontos formam uma nuvem de pontos que podem, posteriormente, ser conectados uns aos outros para formar uma malha triangular. No software é possível usar configurações predefinidas para extração dos pontos associados às superfícies dos *voxels* em função de sua velocidade de processamento e quantidade de pontos adquiridos. Ferramentas computacionais de avaliação de tolerâncias dimensionais e geométricas podem então ser empregadas, as quais tomam como dados de entrada o modelo matemático do produto e a nuvem de pontos extraída da matriz volumétrica digital. É possível assim efetuar a verificação das tolerâncias especificadas de forma automática, empregando o método de ajuste definido na ASME Y14.5 (ex. máximo elemento inscrito, mínimo elemento circunscrito, mínima zona) ou, em casos específicos, o método dos mínimos quadrados.

3. PLANO EXPERIMENTAL

3.1. Medições no sistema de tomografia computadorizada

Para investigar o efeito da extração de pontos da superfície na verificação de tolerâncias dimensionais e geométricas, a peça prismática exibida na Figura 1 foi escolhida. De forma a simular um caso de medição efetivamente encontrado na prática industrial, a peça foi fabricada em alumínio em um centro de usinagem de alta exatidão. Dessa maneira, intensificase a presença de artefatos causados pelo endurecimento do feixe, pois a densidade nominal do alumínio é $2,7 \text{ g/cm}^3$ e a maior diagonal da peça é 100 mm, compatível, porém, com a capacidade dos recursos de medição disponíveis. Diferentes elementos geométricos foram selecionados (três planos e um cilindro), dos quais podem ser avaliados o diâmetro do furo cilíndrico, o erro de forma (do furo cilíndrico e dos três planos) e o vetor diretor (do furo cilíndrico). Este último possibilita simular como uma tolerância de orientação e/ou posição seria afetada pela redução dos pontos associados ao elemento.

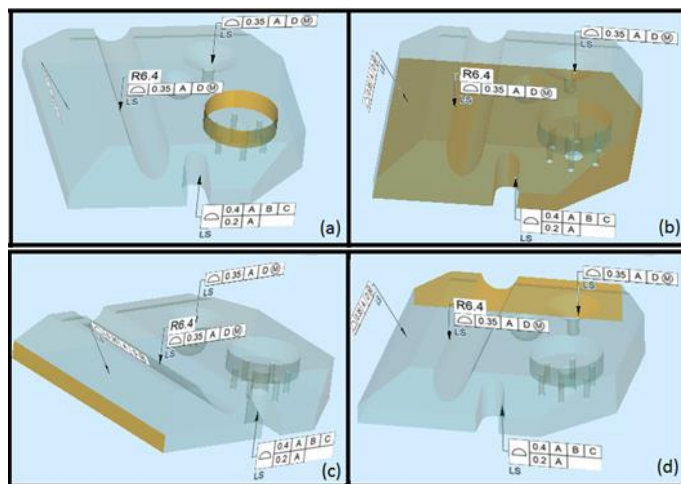


Figura 1. Imagem ilustrativa da peça prismática utilizada como objeto de estudo e identificação dos elementos utilizados na investigação: (a) Cilindro001 - furo cilíndrico, (b) Plano001, (c) Plano002, (d) Plano003

A peça prismática objeto deste trabalho foi medida no sistema de tomografia industrial Carl Zeiss METROTOM 1500, equipado com um tubo microfoco de 225 keV e um detector plano de 400 mm x 400 mm (2048 pixels²) e instalado num laboratório com temperatura controlada e mantida entre $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Na parametrização do equipamento para a tomografia da peça-teste, posicionou-se o eixo de ampliação de forma a projetá-la utilizando toda a área útil do detector, colocou-se um pré-filtro (lâmina de cobre de 3 mm) na saída do tubo de radiação, ajustou-se a tensão da fonte microfoco a um valor suficientemente elevado para evitar a completa extinção do feixe ao atravessar a peça (220 keV) e definiu-se um tempo de integração do detector conveniente para a aplicação (4 s). A corrente da fonte de raios X foi então ajustada de forma a melhorar o contraste / brilho da imagem (500 μA) e a quantidade de projeções definida como o número de pixels cobertos pela sombra resultante da peça-teste na projeção (1500). A fim de avaliar a consistência estatística das medições, o ciclo de medição completo da peça-teste foi repetido cinco vezes sob as condições especificadas (de repetibilidade). Por ciclo de medição completo entende-se o posicionamento adequado da peça no dispositivo de fixação, a colocação do dispositivo de fixação no tomógrafo, o ajuste dos parâmetros supracitados do sistema, a aquisição propriamente dita das projeções (em aprox. 1,5 h de escaneamento) e os processamentos matemáticos feitos paralelamente ou posteriormente à aquisição (ex. aplicação de filtros, redução de artefatos, reconstrução da matriz volumétrica, determinação da superfície, etc.).

No concernente ao processamento e à análise da matriz de *voxels*, o software VGSTUDIO MAX 3.0 foi empregado para determinar a superfície do volume gerado aplicando globalmente o método ISO-50%. Então, diferentes algoritmos de extração dos pontos sobre a superfície calculada, que se diferenciam pela configuração de redução dos pontos e pela distância de amostragem, foram executados para produzir distintas nuvens de pontos. Geraram-se nuvens de pontos nos modos de extração *superprecise*, *precise*, *normal* e *fast*, conforme terminologia do software. As nuvens de pontos foram avaliadas no software de análise de tolerâncias GD&T SMARTPROFILE® v5.0, comercializado pela empresa KOTEM. Por apresentar menor sensibilidade a pontos espúrios e por possuir um melhor efeito de compensação, optou-se pelo uso do método dos mínimos quadrados para ajustar os pontos medidos às geometrias nominais dos elementos de interesse. Para diminuir a probabilidade de se associarem os pontos pertencentes a um dado elemento geométrico da peça a outro elemento, foram ignorados os pontos situados a uma distância das arestas do modelo CAD da peça inferior a 1 mm.

3.2. Medições de referência em máquina de medição por coordenadas

As características de interesse da peça-teste foram calibradas em uma máquina de medição por coordenadas Carl Zeiss PRISMO ultra, instalada em um laboratório com temperatura controlada e mantida entre $(20,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. Aplicou-se para todos os elementos geométricos de interesse o modo de escaneamento para coletar os pontos de medição, e a incerteza de medição foi estimada usando a saída do software Virtual CMM e o conhecimento *a priori* do processo de medição. Da comparação dos resultados das medições de referência com os valores obtidos das nuvens de pontos extraídas das matrizes de *voxels*, pôde-se estimar a tendência (estimativa dum erro sistemático) das medições por tomografia dos parâmetros investigados. Um importante pré-requisito dessa comparação foi analisar de antemão a consistência estatística dos dados que, se confirmada, resultaria numa análise comparativa mais simplificada.

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados associados às análises dos parâmetros dos elementos geométricos da peça, a saber: diâmetro do furo cilíndrico, erro de forma do furo cilíndrico e dos três planos e o vetor diretor do furo cilíndrico; quando variados os parâmetros para geração da nuvem de pontos a partir da matriz volumétrica obtida pela tomografia da peça. Para análise da consistência estatística dos dados utilizaram-se os gráficos de controle de Shewhart, em especial o gráfico de médias e amplitudes. Posteriormente fez-se uma comparação dos valores da tomografia com valores medidos na máquina de medição por coordenadas.

4.1. Análise da consistência estatística dos parâmetros do furo cilíndrico

Com base nas nuvens de pontos extraídas das matrizes de *voxels* foram determinados o diâmetro, o erro de forma e o vetor diretor do cilindro associado aos pontos a ele atribuídos. Os valores medidos de cada parâmetro foram organizados em $k = 4$ subgrupos (k denota o número de algoritmos testados) de tamanho $n = 5$ (n refere-se ao número de ciclos de medição executados), para então serem calculados os parâmetros de cada gráfico de controle.

Diâmetro do elemento associado ao furo. Realizou-se o diâmetro do furo pela associação de elemento geométrico do tipo cilindro aos pontos usando o método dos mínimos quadrados. O gráfico de controle resultante é mostrado na Figura 2 (esq.). Observa-se que não há condições de instabilidade no gráfico de amplitudes, *i.e.*, o desvio padrão estimado é estatisticamente consistente e inferior a 0,001 mm. No gráfico de médias, por sua vez, podem ser observados dois pontos fora dos limites de controle, os quais implicariam, em princípio, que haveria divergência significativa entre os algoritmos de extração das nuvens de pontos. Entretanto, é passível de nota o fato de os limites de controle do gráfico serem excedidos em, no máximo, 0,5 μm (no caso do algoritmo *normal*), *i.e.*, da mesma ordem de grandeza do desvio padrão das medições e desprezível para as análises em questão.

Erro de forma do elemento associado ao furo. Do mesmo elemento geométrico associado conforme item anterior estimou-se o erro de forma. O gráfico de controle é exibido na Figura 2 (dir.). Da análise pelo gráfico de amplitudes, verifica-se que inexistem condições de instabilidade. Isso significa dizer que o desvio padrão estimado é estatisticamente consistente e adequado para estimar os limites de controle do gráfico de médias. No gráfico de médias não se observam pontos fora dos limites de controle, embora seja perceptível um padrão não aleatório das médias (*i.e.*, evidencia-se uma tendência crescente). Pode-se então interpretar que o erro de forma aumenta com o uso de um algoritmo de extração de pontos de maior precisão e que gera uma nuvem com significativo incremento no número de pontos. No entanto, seriam necessários mais estudos para confirmar essa hipótese, pois a análise ficou limitada a quatro estimativas da média.

Vetor diretor do elemento associado ao furo cilíndrico. Como citado anteriormente, analisar a consistência estatística do vetor diretor do elemento associado ao furo aplicando os diferentes métodos de extração dos pontos teria relevância no âmbito das tolerâncias de orientação e posição. Os gráficos de controle associados aos vetores u e v são exibidos na Figura 3. Não se observam condições de instabilidade nos gráficos de amplitudes ou nos gráficos de médias. Isso significa, por exemplo, que na verificação da tolerância de posição do eixo do cilindro em relação ao sistema de referência predefinido, a diminuição do tamanho da nuvem de pontos não teria impacto na qualidade da medição, apesar da consequente diminuição da demanda computacional.

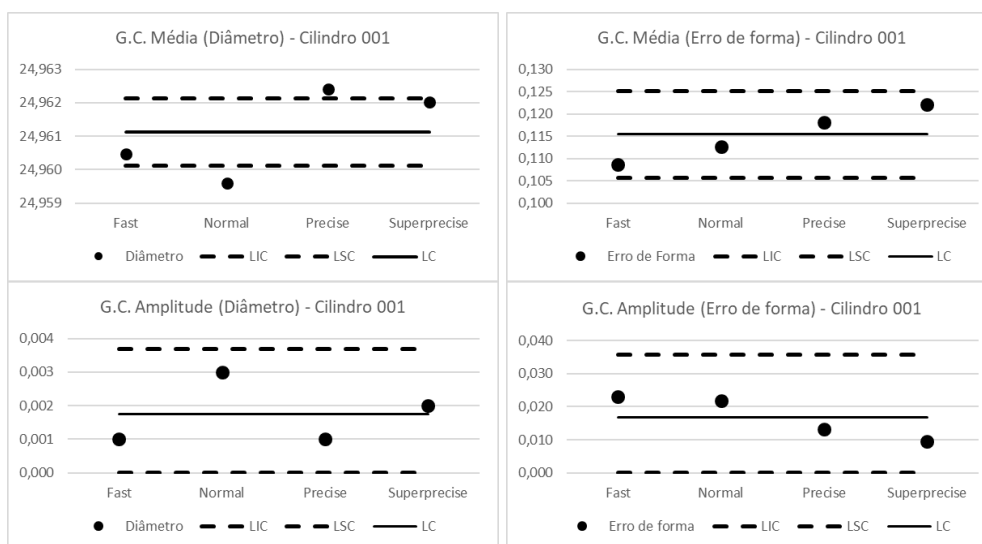


Figura 2. Gráficos de controle do diâmetro (esq.) e do erro de forma (dir.) do furo (valores em milímetros)

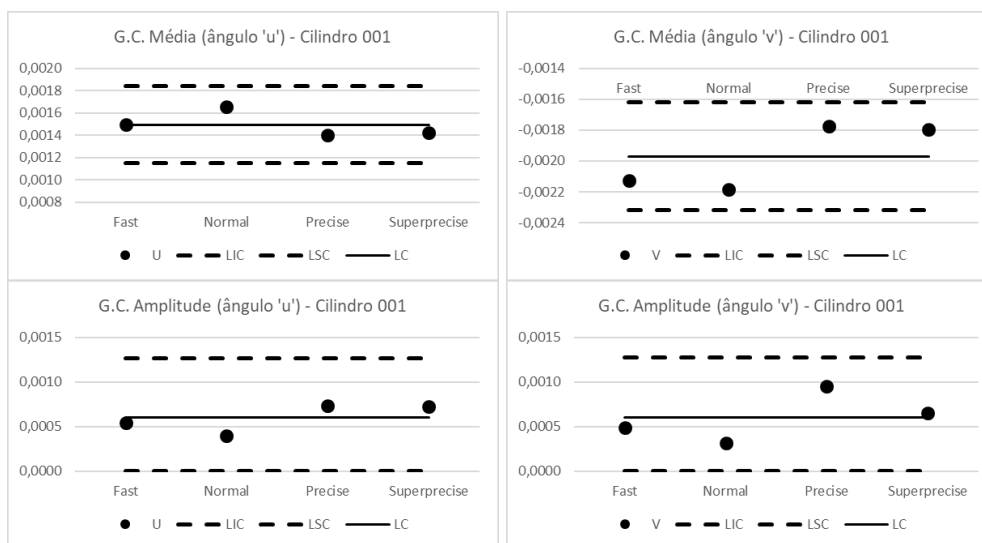


Figura 3. Gráficos de controle de médias e amplitudes do vetor diretor u (esq.) e do vetor diretor v (dir.) do furo

4.2. Análise da consistência estatística dos parâmetros do plano

No software de análise foram associados elementos geométricos do tipo plano aos pontos correspondentes de cada um dos planos avaliados com o método dos mínimos quadrados. O erro de forma foi determinado para cada configuração estudada, resultando nos gráficos de controle de médias e amplitudes da Figura 4. Observa-se que não há condições de instabilidade nos gráficos de amplitudes correspondentes a cada plano. Nos respectivos gráficos de médias também não são verificados pontos fora dos limites de controle. É possível observar para os três planos que os valores das médias dos dois algoritmos de maior precisão situam-se acima da linha central do gráfico, enquanto os valores das médias dos dois outros algoritmos estão aquém da linha central. Isso pode ser um indício de que alguns pontos extremos associados a cada plano foram removidos durante o processo de extração com os algoritmos que resultam numa quantidade de pontos mais enxuta. Para confirmar essa hipótese, contudo, seriam necessárias análises adicionais.

4.3. Limite de redução do tamanho da nuvem de pontos

De forma geral, os gráficos de controle apresentados nas seções anteriores, associados aos parâmetros de interesse dos elementos geométricos da peça-teste, não exibiram condições de instabilidade, mesmo com a diminuição do tamanho das nuvens de pontos. Cabe salientar que, em relação à nuvem de pontos mais densa, pôde-se verificar uma redução por um fator próximo a 10 da quantidade de pontos da nuvem menos densa, a saber (em milhares de pontos): plano 001 - redução de aprox. 156,3 para 19,3; plano 002 - redução de aprox. 12,4 para 1,6; plano 003 - redução de aprox. 22,9 para 2,5; cilindro 001: redução de aprox. 12,4 para 1,8. Isso implica uma redução considerável no tempo de processamento dos pontos em análises de tolerâncias, em especial quando são empregados algoritmos de ajuste baseados em pontos extremos (e.g., observou-se uma redução de 60 s para menos de 20 s na avaliação dos elementos considerados neste trabalho). Dito isso, estudou-se o efeito de reduções ainda mais significativas da quantidade de pontos em alguns parâmetros de interesse. Para isso, uma macro foi desenvolvida para realizar as seguintes tarefas: (a) importação da nuvem de pontos original; (b) diminuição da quantidade de pontos a um nível desejado; (c) exportação da nuvem de pontos final. Para cada elemento geométrico da peça, *i.e.*, Cilindro001, Plano001, Plano002, Plano003, o conjunto original de pontos foi aleatoriamente filtrado, gerando novos conjuntos com redução de 10% a 50%. A redução da quantidade de pontos em até 50% gerou diferenças claramente desprezíveis, especialmente para o Plano001, que possui dimensões maiores e, por conseguinte, a exclusão dos pontos próximos às arestas do elemento tem menor impacto.

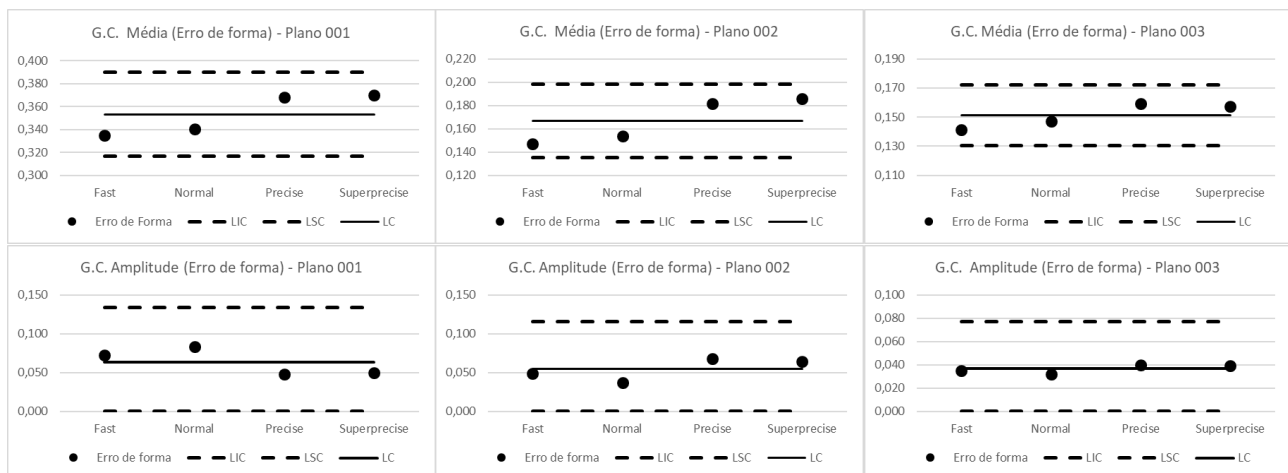


Figura 4. Gráfico de controle de médias e amplitudes do erro de forma dos planos (valores em milímetros)

4.4. Determinação dos erros sistemáticos das medições por tomografia

De forma a avaliar a exatidão das medições por tomografia, medições de referência foram executadas em uma máquina de medição por coordenadas de alta exatidão. Na Tabela 1 são listados os valores de referência e os valores obtidos pela tomografia para o diâmetro e o erro de forma do furo cilíndrico e o erro de forma dos planos. Por ser muito dependente da interação com a matéria e do método de determinação da superfície, para o diâmetro observa-se um erro sistemático de $(0,030 \pm 0,005)$ mm, equivalente a 30% da tolerância especificada. Ainda mais significativos foram os valores de tendência verificados para os planos, em especial para o Plano001. O valor obtido pela tomografia foi 20x maior que o valor de referência, muito além do valor de planeza especificado. As razões principais dessa divergência são a forte presença de artefatos e o tamanho do ponto focal, que têm direta correlação com a corrente e tensão aplicadas.

A divergência entre os valores dos erros de forma medidos com os dois sistemas de medição dá uma clara indicação que, para casos como o explorado neste trabalho, o desenvolvimento de métodos de compensação dos erros baseados nos

pontos é um campo de pesquisa a ser explorado, como recentemente descrito por Baldo *et al* (2019). A necessidade de operar com nuvens de pontos menores, porém sem prejuízo à informação efetivamente obtida, é uma condição importante para o êxito de aplicação desses métodos de compensação dos erros.

Tabela 1. Valores de referência (CMM - PRISMO ultra) e valores obtidos pela tomografia (TC - METROTOM 1500)

Elemento Geométrico	CMM - PRISMO ultra		TC - METROTOM 1500	
	Tamanho	Erro de forma	Tamanho	Erro de forma
Cilindro001	(24,9905 ± 0,0005) mm	(0,021 ± 0,001) mm	(24,960 ± 0,005) mm	(0,11 ± 0,03) mm
Plano001		(0,017 ± 0,001) mm		(0,34 ± 0,05) mm
Plano002		(0,007 ± 0,001) mm		(0,15 ± 0,05) mm
Plano003		(0,021 ± 0,001) mm		(0,14 ± 0,05) mm

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho pôde-se evidenciar que a mudança do método de extração da nuvem de pontos não acarretou mudanças estatisticamente significativas nos parâmetros de interesse, denotando um resultado positivo, pois dá uma indicação que o usuário pode se beneficiar de algoritmos de extração de pontos que geram nuvem de pontos mais enxutas, sem prejuízo significativo à qualidade das medições. O resultado é bastante pertinente para situações em que a energia requerida da fonte é muito elevada, como na tomografia de objetos metálicos (caso da peça prismática de alumínio utilizada), na qual a presença de artefatos de imagem, como ilustrado por Baldo *et al* (2019), é intensificada e o tamanho do ponto focal se aproxima do erro de forma especificado para os elementos geométricos. Isso foi propositalmente planejado por representar um cenário típico e de crescente interesse de aplicação da tomografia na fabricação de peças da indústria metalomecânica. Pela comparação com as medições de referência, que possibilitou avaliar a tendência das medições do diâmetro do furo cilíndrico e do erro de forma dos planos, pôde-se constatar que os erros de forma resultantes do processo de usinagem de diferentes elementos da peça não foram corretamente caracterizados pela medição por tomografia, dando espaço para o desenvolvimento de métodos de compensação dos erros baseados nos pontos.

6. REFERÊNCIAS

- ASME Y14.5, 2018, “Dimensioning and Tolerancing: Engineering Drawing and Related Documentation Practices”. American Society of Mechanical Engineers.
- Baldo, C.R., Fernandes, T.L., Donatelli, G.D., Szikszay-Molnar, G., Vrantzaliev, K. e Doytchinov, K., 2019. “Proposition and experimental evaluation of a point-based compensation approach to reduce systematic errors in CT measurements”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 30, No. 4, 045002.
- Kruth, J.P., Bartscher, M., Carmignato, S., Schmitt, R., De Chiffre, L. e Weckenmann, W., 2011. “Computed tomography for dimensional metrology”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 2, p. 821-842.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EXPERIMENTAL STUDY OF THE POINT REDUCTION EFFECT ON TOMOGRAPHY-BASED DIMENSIONAL TOLERANCE ANALYSIS

Christian Raffaello Baldo

Center for Engineering, Modeling and Applied Social Sciences - CECS, Federal University of ABC, Santo André - SP, Brazil
christian.baldo@ufabc.edu.br

Thiago Linhares Fernandes

Gustavo Daniel Donatelli

Center for Metrology and Instrumentation - CMI, CERTI Foundation, Florianópolis - SC, Brazil
thf@certi.org.br, gd@certi.org.br

Abstract. The use of computed tomography as a tool for dimensional metrology has gained evidence in the last few years. To make dimensional and geometric tolerance analysis consistent, specific evaluation software packages have been applied. They make use of point clouds generated by the segmentation process, which in turn are affected by several influence factors related to the X-ray source and detector, to the positioning system of the object, to the interaction of X-ray beam with the matter, and to complex mathematical processing. The effect of the reduction of the points extracted from the volumetric matrix obtained by tomography was investigated in this work, from the perspective of dimensional tolerance verification. For this, statistical data analysis techniques were considered, and coordinate measuring systems, volumetric matrix evaluation and dimensional and geometrical evaluation software were employed. The goal was to show the impact of the point extraction process on the CT-based measurement results. One could observe that the use of different extraction algorithms did not result in statistically significant changes in the features' parameters. This is on its own a positive outcome of this work, since it indicates that the user can benefit from extraction algorithms capable of producing reduced point clouds with insignificant effect on the quality of the measurement results.

Keywords: Industrial tomography, Point cloud extraction, Dimensional tolerance verification.

RESPONSIBILITY NOTICE

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