

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4752>

ARTIGO ORIGINAL

Análise da influência do tipo de iluminação sobre os resultados de medição de uma máquina de medição por coordenadas com sensor de câmera

RESUMO: Os sistemas de medição desempenham um importante papel nas atividades produtivas atuais, principalmente nas indústrias que utilizam os processos de manufatura. O controle metrológico satisfatório contribui para uma produção mais eficiente, economizando recursos e tornando a empresa mais competitiva, todavia, as exigências mais recentes quanto ao tempo de fabricação e à qualidade dos produtos necessitam de sistemas de medição mais confiáveis, rápidos e seguros, motivando o estudo e desenvolvimento de sistemas de medição que atendam a essa crescente demanda. Assim, o presente artigo aprofundou-se no estudo e na pesquisa na área de metrologia com máquina de medição por coordenadas com sensor de câmera, avaliando a influência da iluminação sobre os resultados de medição. Dois tipos específicos de iluminação foram avaliados: ring e coaxial. Os resultados obtidos constataram que o operador da máquina pode representar uma forte fonte de incerteza de medição, pois operadores distintos levaram a resultados variados. Verificou-se ainda o melhor par de iluminação ring-coaxial, com o qual se obteve uma incerteza-padrão de 0,4 μm e a existência de uma zona de iluminação, compreendida entre 10% e 40% para a ring e entre 0% e 20% para a coaxial, para a qual os resultados se mostraram mais exatos.

Palavras-chave: máquina de medição por coordenadas; sensor de câmera; incerteza de medição.

Analysis of type lighting influence on measurement results of a coordinate measuring machine with camera sensor

ABSTRACT: Measurement systems play an important role in current production processes, especially in industries that use manufacturing processes. Satisfactory

SUBMETIDO 19/07/2020

APROVADO 28/07/2021

PUBLICADO ON-LINE 15/08/2021

PUBLICADO Junho de 2022

EDITORES ASSOCIADOS

Koje Daniel Vasconcelos Mishina,
Marcelo Cavalcanti Rodrigues.

 Joab Sobreira de Andrade ^[1]

 Marlio Antônio da Silva ^[2]

 Manoel Fideles Filho ^[3]

 José Carlos de Lima Júnior ^[4]

 João Bosco de Aquino Silva ^[5]

[1] joab.andrade@ifpb.edu.br. Unidade de Indústria / Laboratório Cajazeirense de Processos de Produção / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Brasil.

[2] marlio.antonio@live.com. Departamento de Engenharia Mecânica / Grupo de Instrumentação e Controle em Estudo de Energia e Meio Ambiente / Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil.

[3] fidelesjp@hotmail.com.

[4] jclj@academico.ufpb.br

[5] jbosco@ct.ufpb.br. Departamento de Engenharia Mecânica / Laboratório de Engenharia de Precisão / Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil.

metrological control contributes to a more efficient production, saving resources and making the company more competitive, however, the current requirements regarding manufacturing time and product quality require more reliable, faster and safer measurement systems, motivating the study and development of measurement systems that meet this growing demand. Thus, this article deepened the study and research in the field of metrology with a coordinate measuring machine with a camera sensor, evaluating the influence of lighting on the measurement results. Two specific types of lighting were evaluated: ring and coaxial. The results showed that the machine operator can represent a strong source of measurement uncertainty, as different operators led to varied results. The best ring-coaxial illumination pair was also verified, with which a standard uncertainty of 0,4 μm was obtained and the existence of an illumination zone between 10% and 40% for the ring, and between 0% and 20% for coax, for which the results were more accurate..

Keywords: : coordinate measuring machine; camera sensor; measurement uncertainty.

1 Introdução

A busca pela miniaturização de peças e componentes de máquinas e pelo aprimoramento de suas funções são tendências na indústria atual em diversos campos, tendo destaque na tecnologia médica e dos polímeros, na indústria de impressão, na mecânica de precisão, entre outros.

Para que peças e componentes manufaturados atinjam os patamares de funcionalidade pretendidos, é necessário fabricá-los com altíssima exatidão. Para que isso ocorra, é exigido que suas dimensões e formas geométricas sejam inspecionadas e medidas de forma confiável. Dessa forma, são requeridas medições com incertezas muito reduzidas, em escalas de comprimento abaixo do micrometro (10^{-6} m).

Todavia, deve-se também garantir rastreabilidade na utilização de padrões utilizados para a calibração de sistemas de medição em inspeções dimensionais. Tais padrões são a chave para o bom desempenho de um equipamento de medição, auxiliando na determinação de sua incerteza e, assim, garantindo resultados confiáveis.

Segundo Mares e Bergmans (2012), as Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC) são ótimas candidatas para medições em microescala. Hoje, tais máquinas atingem precisão de 100 nm. Entretanto, o princípio de funcionamento da maioria das MMC disponíveis no mercado envolve o contato mecânico entre o sensor de medição e a peça a ser aferida, podendo causar deformações plásticas em peças fabricadas com matéria-prima maleável. Outros fatores – tais como dimensões e geometria do mensurando, paredes e cascas finas, por exemplo – podem agravar ainda mais a qualidade metrológica, levando a erros de medição maiores. Além disso, os sensores de contato ou apalpadores apresentam um limite mínimo de dimensões para inspeção de microfuros. Tal limite é determinado pelo diâmetro da esfera do sensor de contato ou apalpador.

A necessidade da medição sem contato para inspeção de peças de pequenas dimensões só aumentou com o advento da chamada Engenharia de Precisão, impulsionado pela miniaturização de componentes mecânicos e elétricos. Nesse contexto, Chen *et al.* (2021) desenvolveram um sistema automatizado de inspeção óptica, sem contato, para medir de forma rápida e exata as dimensões de estruturas de microcanais em chips de microfluidos.

Já Tao *et al.* (2020) propuseram um método eficiente para detectar a exatidão na usinagem de orifícios em matrizes de placa de circuito impresso, utilizando técnicas de medição sem contato.

Quando comparados aos procedimentos de medição por contato tradicionais, os métodos que utilizam sensores que não necessitam de contato para a aferição apresentam maior precisão e eficiência. São amplamente usados em tecnologia de manufatura, inspeção de superfícies de peças com geometrias complexas, na determinação de tolerâncias dimensional e de forma em peças mecânicas. Técnicas de medição sem contato típicas incluem triangulação a laser, medição ultrassônica e medição por visão de máquina (CHAI *et al.*, 2021).

Assim, o uso de MMC equipadas com sistemas de visão computacional tem crescido substancialmente nos últimos anos. A visão computacional ou visão de máquina utiliza os princípios da física óptica para medição a partir da análise de imagens digitais do objeto submetido à medição.

A busca por processos produtivos cada vez mais eficientes é uma exigência do mercado competitivo atual. Buscando isso, aliado ao paradigma da Indústria 4.0 e da Manufatura Inteligente, as indústrias devem modificar a automação industrial tradicional, adotando uma integralização digital de todos os seus componentes. Assim, existe a necessidade de implementar novas técnicas de automação digital, de baixo custo, que possam ser integradas, com eficiência, no processo produtivo existente, porém sem a necessidade de uma reengenharia (FRUSTACI *et al.*, 2020).

A visão de máquina tem mostrado enorme potencial para implementação em processos de manufatura devido ao seu aumento de desempenho, promovendo confiabilidade metrológica, aliado à redução de custos, logo, tem sido cada vez mais utilizada na indústria nas mais diversas aplicações (ZANCUL *et al.*, 2020).

Procedimentos de controle de qualidade como inspeção e medição são realizados comumente nos mais diversos processos industriais, sendo de suma importância na detecção de falhas e defeitos. Em geral, a inspeção geométrica de peças ou equipamentos montados não é feita de forma automatizada, sendo realizada, ao término da montagem, por um ser humano munido de instrumentos especiais como micrômetros, paquímetros, calibradores, entre outros que requerem o contato direto entre operador e instrumento. Isso traz algumas desvantagens, tais como: depende tempo, permite testar apenas uma amostra dentro de um lote de fabricação, está sujeito ao erro humano. Além disso, a coleta de dados acerca da qualidade do processo é ineficiente, impossibilitando uma manutenção preditiva baseada na análise de *big data*. Logo, o desenvolvimento de um sistema digital, objetivando inspecionar de forma automática a conformidade geométrica de componentes manufaturados, utilizando métodos de não contato, pode aumentar drasticamente a produtividade do processo (FRUSTACI *et al.*, 2020).

Há casos em que a inspeção tende a ser um processo cansativo ou difícil, mesmo para os especialistas mais bem treinados. Em certas aplicações, informações precisas devem ser rapidamente ou repetidamente extraídas e usadas. Em alguns ambientes, a inspeção pode ser difícil ou perigosa. A visão computacional pode efetivamente e eficientemente substituir a inspeção humana em tais casos (MALAMAS *et al.*, 2003).

Outros fatores impulsionaram a busca pela medição por imagem, destacando-se: o preço cada vez mais acessível de dispositivos de câmera; o avanço tecnológico no desenvolvimento de sensores fotossensíveis e computadores; rapidez e exatidão na aquisição de dados; possibilidade da inspeção integrada ao processo produtivo.

Apesar de todos os avanços tecnológicos na área de metrologia por imagem ou visão computacional, determinar com exatidão a incerteza de medição em MMC com sensor de câmera para tarefas específicas é ainda uma tarefa difícil e desafiadora, principalmente em decorrência da existência de diversas fontes de incerteza, com naturezas bem distintas. Isso mostra a importância do estudo das principais fontes de incerteza presentes em MMC com sensor de câmera e a determinação de tais incertezas, a fim de obter resultados mais exatos, promovendo maior confiabilidade em medições e inspeções.

Cabe salientar que as medições com MMCs que utilizam sensor por contato ainda apresentam resultados mais confiáveis quando comparadas a MMCs que utilizam sensor de câmera. Além disso, em estudos recentes, usuários diferentes obtiveram resultados distintos, com variações de vários micrometros, quando manusearam sistemas de visão de máquina (CARMIGNATO; VOLTAN; SAVIO, 2010). Isso mostra a necessidade e a importância de se avaliar os parâmetros de repetibilidade e reprodutibilidade de MMCs integradas com sensor de câmera.

2 Materiais e métodos

2.1 MMC

A máquina de medição por coordenadas (MMC) com sensor de câmera em estudo, modelo Crysta-Apex S 7106, é fabricada pela empresa japonesa Mitutoyo, foi adquirida pelo Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e está ilustrada na Figura 1.

Figura 1 ▶
MMC modelo
Crysta-Apex S 7106.
Fonte: arquivo dos autores



A MMC é constituída basicamente de eixos coordenados cujos deslocamentos são controlados via código numérico computadorizado (CNC), mesa metrológica ou desempenho em granito e sensores para medição. A Crysta-Apex S 7106 consiste em uma MMC multissensor, apresentando sensor de contato e sensores para medição sem a necessidade de contato sensor-peça. O sensor de contato é do tipo apalpador de

escaneamento contínuo, enquanto os sensores ópticos são do tipo laser e câmera, sendo este último o principal objeto de estudo deste trabalho.

Os eixos coordenados X, Y e Z da Crysta-Apex S se movem sobre guias aerostáticas, portanto com quase nenhuma influência de atrito, e podem se deslocar em um volume de 700 mm x 1000 mm x 600 mm, respectivamente.

2.2 Sensor de câmera

O sensor, denominado *Quick Vision Probe (QVP)*, é capaz de detectar automaticamente características de peças submetidas à avaliação metrológica a partir de dados de sua imagem captada e ampliada por uma câmera com sensor do tipo CCD (*Charge Coupled Device*). Trata-se de uma ferramenta extremamente útil na medição de componentes com dimensões micrométricas, impossíveis de medir com sensores de contato, e na medição de objetos sensíveis, que não suportam determinados níveis de esforços de medição. O QVP pode ser também utilizado para mensurar a distância sensor-objeto inspecionado por meio da função *auto focus* (MITUTOYO, 2015).

A Figura 2 ilustra o sensor QVP em detalhe sendo utilizado na inspeção de placas de circuito impresso. Esse sensor dispõe de um sistema de iluminação do tipo LED integrado, permitindo seu controle de duas formas distintas: anelar (*ring*) e coaxial. Em seções posteriores, tais características de iluminação serão melhor detalhadas.

Figura 2 ►

Sensor *Quick Vision Probe (QVP)*.

Fonte: Mitutoyo (2015)



A iluminação do tipo LED permite baixíssimo consumo de energia, abaixo de 10 W de potência. Como um todo, o QVP chega a dissipar apenas 45 W de energia. Tal sensor permite ainda a permutação de lentes de diferentes ampliações.

Uma das grandes vantagens da utilização do sensor QVP recai sobre o fato de que cada imagem gerada pode ser avaliada como um todo, com todos os seus elementos geométricos, gerando uma economia considerável de tempo quando comparado com os métodos de medição tradicionais por contato, ponto-a-ponto (MITUTOYO, 2010).

Entre as características do sensor QVP, pode-se citar:

- Possibilidade de comutação automática de sensor quando acoplado a Máquinas de Medição por Coordenadas Multissensor;

- Sistema de iluminação integrado, com luz branca em LED, para otimização na captura da imagem;
- Baixo consumo de energia, em conformidade com a ISO 14000;
- Lentes objetivas intercambiáveis: 1X, 3X, 5X e 10X;
- Autocalibração e calibração de borda são características padrão.

2.3 VISIONPAK

O VISIONPAK é um software projetado especificamente para uso em conjunto com o sensor QVP, que acrescenta funções de medição por visão computacional para MMC. Com esse software é possível utilizar poderosas ferramentas capazes de detectar, automaticamente, bordas de imagens capturadas pelo QVP de forma extremamente rápida. Além disso, algumas ferramentas podem reconhecer arestas ou bordas anormais nas imagens, criadas por rebarbas das peças ou por sujeira (MITUTOYO, 2016).

O VISIONPAK é, portanto, o software de análise e avaliação de imagens responsável pelo controle do sensor QVP. A seleção do elemento de medição usando o sistema de visão causa a abertura automática da tela do VISIONPAK.

Segundo a empresa Mitutoyo (2010), o VISIONPAK fornece:

- Guia do usuário, com menus e gráficos;
- Seleção simples e resposta rápida de uma ampla gama de ferramentas de medição;
- O reconhecimento automático de bordas com apenas um clique no mouse;
- Quinze diferentes ferramentas de medição, permitindo medir componentes com as mais diversas características dimensionais;
- O reconhecimento automático de áreas de interesse, realizando a focalização da imagem em superfícies específicas de uma peça;
- Armazenamento da imagem da peça com ou sem a utilização de ferramentas de reconhecimento de borda.

3 Tipos de iluminação

Como mencionado anteriormente, através do VISIONPAK é possível realizar o controle da fonte de iluminação de duas formas distintas: pela iluminação do tipo *ring* e do tipo coaxial.

Na iluminação do tipo coaxial, a luz é projetada diretamente sobre a peça através da lente da câmera. É eficaz para identificar as condições da superfície inspecionada. Já na iluminação do tipo *ring* ou anelar, a luz é projetada sobre a peça, em ângulo, a partir do anel de luz de LED que rodeia a lente da câmera.

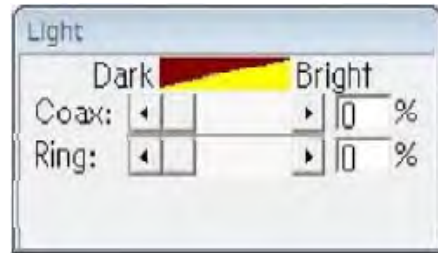
A lâmpada em anel atenua visualmente pequenas fissuras superficiais e áreas de superfície áspera para que não se destaquem. Tal iluminação pode ser usada efetivamente quando a luz coaxial cria muito ruído na imagem, dificultando a detecção de certas bordas.

O ajuste da intensidade de luz é realizado através da janela de controle da iluminação ilustrada na Figura 3. Esse ajuste pode ser aplicado tanto na luz coaxial quanto na anelar com incrementos mínimos de 1%. Recomenda-se ajustar a iluminação de modo que a imagem não apareça saturada e com excesso de brilho.

Figura 3 ▶

Janela de controle da iluminação.

Fonte: Mitutoyo (2010)



4 Resultados da pesquisa

Para estudar a influência dos tipos de iluminação sobre os resultados de medições utilizando sensor de câmera, utilizou-se como padrão de referência o *chessboard* fabricado pela empresa Mitutoyo Ltda., ilustrado na Figura 4. Com esse padrão de calibração de pixel, escolheu-se o padrão quadrado de coloração preta, com dimensões de 0,4 mm, para realizar as medições. Tal dimensão foi escolhida por permitir melhor disposição da imagem na tela de visualização do VISIONPAK, preenchendo-a totalmente com o padrão de medição conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 4 ▶

Chessboard, padrão para calibração de pixel fabricado pela Mitutoyo Ltda.

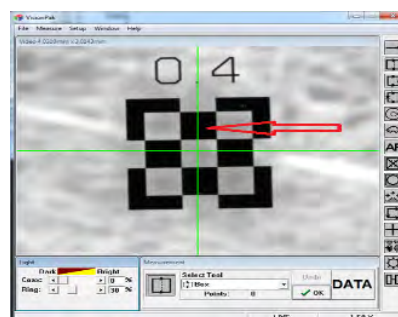
Fonte: arquivo dos autores



Figura 5 ▶

Vista do padrão chessboard na tela de visualização do VISIONPAK.

Fonte: arquivo dos autores



4.1 Iluminação do tipo ring

No teste de influência da iluminação do tipo *ring* sobre os resultados de medição, fixou-se o mensurando de 0,4 mm, utilizando o *chessboard* e o padrão de cor negra.

Inicialmente, coloca-se o padrão sobre a mesa metrológica e, posteriormente, o sensor de câmera é posicionado, de forma semiautomática através de um *joystick*, sobre

o padrão a ser medido. Semiautomaticamente, ajusta-se a posição do sensor em relação ao mensurando até que se obtenha uma imagem nítida do padrão na tela do computador, ou seja, dentro do campo de visão da câmera. Feito isso, a ferramenta de foco automático, ou *auto focus*, é utilizada para garantir a melhor condição de focalização da imagem.

As iluminações do tipo *ring* e coaxial são, a princípio, ajustadas em 20% ambas. Posteriormente, a ferramenta de ajuste de contraste de regiões de interesse (*Dual Area Contrast Tool*) é utilizada para a obtenção da condição de luminosidade teoricamente ideal, para o par de iluminação *ring*–coaxial. Após o uso de tal ferramenta, as iluminações *ring* e coaxial foram ajustadas em 30% e 0% respectivamente.

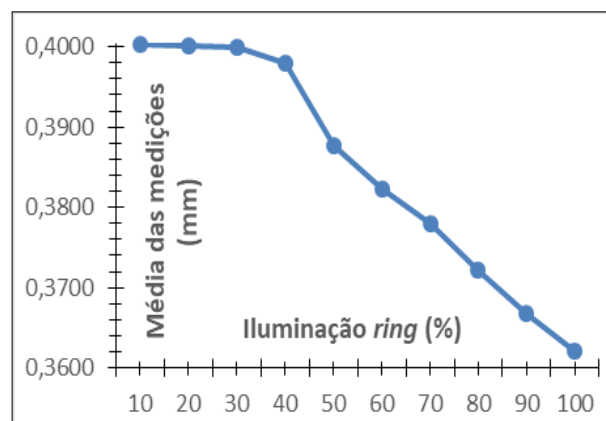
O valor de 0% ajustado para a iluminação coaxial se deve ao fato de a ferramenta de contraste de área permitir a condição de melhor contraste entre as regiões de interesse, indispensável para se obter um bom reconhecimento de bordas em imagens. Como discutido em seções anteriores, isso caracteriza o fato de a iluminação coaxial ser de mais relevância em medições de condições de superfícies, evidenciando falhas e detalhes superficiais. Já a iluminação *ring* auxilia na obtenção de uma melhor detecção de borda.

Antes de iniciar as medições, foi necessário definir um plano padrão, sobre o qual o *chessboard* está teoricamente posicionado. Isso é feito tomando-se quatro pontos sobre as extremidades do padrão a ser medido utilizando a ferramenta *point*. Com esses pontos, o VISIONPAK determina o plano-base e este é alinhado ao plano no qual o padrão se encontra.

Por conseguinte, o padrão escuro de 0,4 mm, pertencente à região de interesse na qual foi utilizada a ferramenta de *auto focus*, foi medido. O padrão escolhido pode ser visto na Figura 5, indicado pela seta. Tal medição foi realizada tomando-se pontos sobre as bordas superior e inferior do padrão geometricamente quadrado, formando linhas ou retas geradas automaticamente com o VISIONPAK através da ferramenta *box*. Com o VISIONPAK, é possível calcular as distâncias entre tais linhas, obtendo-se o comprimento do padrão medido.

Para avaliar a influência apenas da iluminação *ring* sobre os resultados de medição, fez-se variar sua intensidade luminosa, mantendo-se o percentual da iluminação coaxial fixo em 0%. Foram realizadas cinco medições para cada valor de iluminação *ring*, a qual assumiu valores entre 10% e 100%, variando em etapas de 10%. Em suma, foram realizadas cinquenta medições, cinco para cada iluminação específica. Os resultados de tais medições, bem como suas médias, os erros sistemáticos e desvios-padrão, são calculados para análise. Examinando os resultados, observa-se que existe uma tendência de os valores médios decaírem com o aumento da intensidade de iluminação do tipo *ring*. Isso pode ser melhor visualizado no gráfico média das medições versus iluminação *ring*, ilustrado na Figura 6.

Figura 6 ►
Gráfico média das
medições versus
iluminação *ring*.
Fonte: dados da pesquisa



A tendência do decaimento da média com o aumento da iluminação *ring* deve-se, principalmente, à natureza da cor do padrão escolhido para medir: coloração preta ou escura. À medida que a iluminação *ring* é ampliada, há uma tendência natural, explicada pelos fenômenos óticos, de cores claras refletirem a luz sobre as cores mais escuras, tendendo a “sobrepular” estas. De modo geral, os padrões brancos tendem a se “ampliar”, enquanto ocorre “diminuição” dos padrões da cor preta. As palavras “ampliar” e “diminuição” estão entre aspas em decorrência de que as dimensões do padrão fisicamente ou concretamente não sofrem variações de comprimento. O padrão medido é um objeto para calibração de comprimento conhecido, com dimensão pré-estabelecida, com exatidão garantida pelo fabricante.

Observa-se ainda, avaliando a Figura 6, que o distanciamento da média do valor verdadeiro convencional (VVC) de 0,4 mm fica mais acentuado em porcentagens de iluminação *ring* acima de 40%, sofrendo pouca variação até esse valor. Portanto, existe uma faixa, localizada entre 10% e 40% de iluminação *ring*, em que os resultados tendem a ser melhores, ou mais exatos, do ponto de vista metrológico. Porém, para termos melhor convicção desse fato, os erros de medição devem ser avaliados.

Segundo Albertazzi e Sousa (2017), existem dois tipos de erros relacionados a medição: o erro sistemático e o erro aleatório. O primeiro é a parcela previsível do erro, sendo correspondente ao erro médio. Já o segundo é a parte imprevisível do erro, responsável por diferentes medições de um mesmo mensurando apresentarem resultados distintos.

O erro de medição é a diferença entre o valor numérico indicado pelo sistema de medição e o valor verdadeiro do mensurando (INMETRO, 2012). Como dito anteriormente, o valor verdadeiro convencional (VVC) adotado é o comprimento do padrão – 0,4 mm –, e o valor do erro sistemático ou tendência pode ser calculado. Analisando seus valores, constata-se que o erro sistemático apresenta pequena variação para intensidades de iluminação *ring* até 40%. Isso reforça a teoria da existência de uma zona na qual os resultados de medição se aproximam mais do valor verdadeiro convencional (VVC), concretizado pela ocorrência dos pequenos erros de medição.

A partir da iluminação de 50%, há um aumento brusco no valor do erro sistemático. E, à medida que se amplia a intensidade de iluminação *ring*, o erro sistemático tende a crescer cada vez mais, atingindo seu valor máximo em módulo na intensidade de luminosidade de 100%. Observa-se ainda que o menor valor do erro sistemático foi atingido com 30% de iluminação *ring*, sendo igual a –0,001 mm. Vale ressaltar que a iluminação de 30% foi ajustada, inicialmente, de forma automática com a utilização da ferramenta de ajuste de contraste entre regiões de interesse (*Dual Area Contrast Tool*), sendo essa a possível razão para a obtenção de menor erro sistemático.

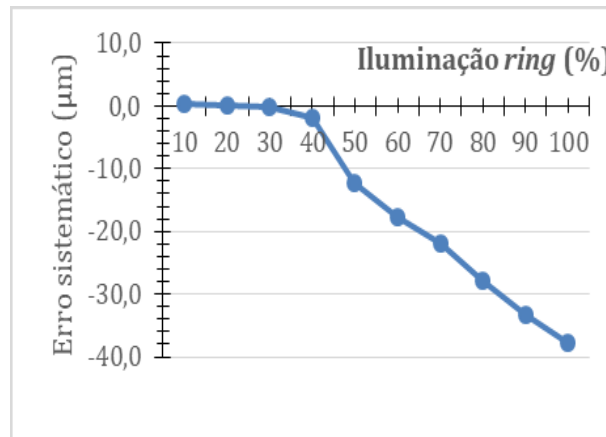
Assim, a faixa de iluminação *ring* na qual se obteve valores de indicações próximos ao valor verdadeiro convencional coincidiu com a faixa na qual se obteve os menores erros de medição. Isso reforça a ideia da existência de uma região ótima na qual os valores de iluminação *ring* apresentam melhores resultados de medição. O gráfico da Figura 7 (página seguinte) ilustra melhor o que foi dito.

Vale ressaltar que o uso da ferramenta de ajuste de contraste de regiões de interesse (*Dual Area Contrast Tool*) propiciou o ajuste automático do par de iluminações *ring*-coaxial em 30% – 0%. Acredita-se que isso tenha propiciado os melhores resultados de medição e, conseqüentemente, menor erro sistemático.

Figura 7 ▶

Gráfico erro sistemático de medição versus iluminação *ring*.

Fonte: dados da pesquisa

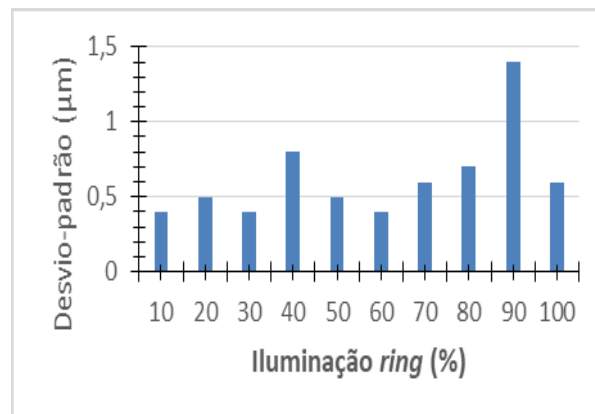


Para avaliar de forma quantitativa o erro aleatório, foram analisados os valores de desvios-padrão relativos aos erros de medição. Tais desvios representam a incerteza-padrão, que é uma medida da intensidade da componente aleatória do erro de medição. A Figura 8 ilustra como se comportaram os resultados de incerteza-padrão em função da variação da iluminação *ring*.

Figura 8 ▶

Gráfico do desvio-padrão das medições em função da iluminação *ring*. Fonte:

dados da pesquisa



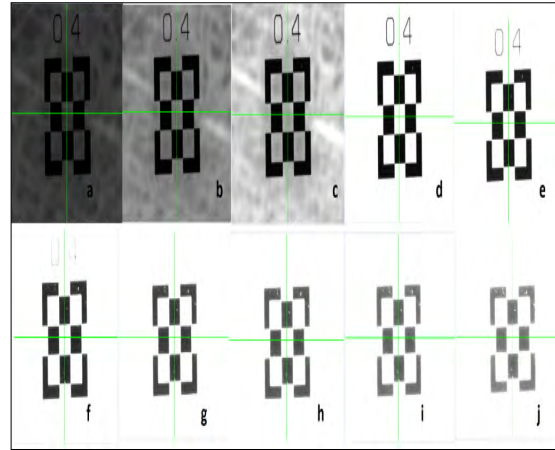
As menores incertezas-padrão foram encontradas na faixa entre 0% e 30% de iluminação *ring*, assumindo valor mínimo na intensidade de 30%, enfatizando que ali houve menor dispersão nos resultados. Após essa faixa de iluminação, os desvios assumem valores maiores em sua maioria, chegando ao máximo de 1,4 µm com 90% de intensidade luminosa *ring*. Cabe ressaltar que o comportamento ou a forma como os desvios-padrão aparecem ou decrescem é de natureza randômica, logo imprevisível, como a parcela do erro que esse elemento representa, o erro aleatório.

Todavia, para compatibilizar a incerteza-padrão como componente da incerteza expandida a ser determinada no futuro, optou-se por levar em consideração a faixa de iluminação *ring* correspondente entre 10% e 40%, tomada como faixa ideal. Nessa faixa, a maior incerteza-padrão encontrada foi de 0,80 µm para *ring* de 40%, sendo esse valor a incerteza graças à fonte de iluminação *ring*.

A Figura 9 ilustra as imagens do padrão geradas no VISIONPAK para cada valor de iluminação *ring* utilizado. Observa-se que as imagens capturadas pelo *Quick Vision*

Probe ficam menos nítidas à medida que a intensidade de iluminação *ring* cresce a partir de 40%. Pode-se ver claramente essa perda de nitidez através do desaparecimento parcial do número de indicação do comprimento do padrão (0,4 mm), que se torna imperceptível a partir da iluminação *ring* igual a 70% (ver Figura 9, letra g).

Figura 9 ▶
Padrão *chessboard* medido, com as seguintes iluminações: a) 10%; b) 20%; c) 30%; d) 40%; e) 50%; f) 60%; g) 70%; h) 80%; i) 90%; j) 100%.
Fonte: arquivo dos autores



Analisando a Figura 9, observa-se ainda o aparecimento de falhas na imagem, caracterizadas por pontos brancos de luminosidade que tendem a danificar ou mascarar as bordas dos padrões de cor escura. O aparecimento de tais falhas prejudica a detecção de borda – crucial e indispensável na medição por imagem –, acarretando erros na detecção exata da posição da borda, e conseqüentemente tende a elevar os erros e incertezas de medições.

Em resumo, os testes para avaliação da iluminação do tipo *ring* apontam que a ferramenta de contraste automático entre regiões de interesse (*Dual Area Contrast Tool*) deve ser utilizada para obter a melhor situação de luminosidade sobre o padrão avaliado, acarretando melhores resultados de medições, com valores mais próximos do valor verdadeiro e com menores erros, como mostrado anteriormente.

Todavia, existe uma faixa de valores na qual os resultados são melhores do ponto de vista metrológico. Essa zona abrange a quantidade de iluminação *ring* de 10% a 40%. Assim, recomenda-se utilizar essa porcentagem de iluminação *ring* para inspeções e medições de detecção de borda com o padrão *chessboard*, sendo contabilizada uma incerteza-padrão de 0,80 μm em 40% de intensidade de iluminação *ring*.

Ademais, é necessário avaliar quais as conseqüências da utilização do tipo de iluminação coaxial em conjunto com a *ring* sobre os resultados de medição. Isso será discutido na seção seguinte.

4.2 Iluminação do tipo coaxial

Para avaliar a influência da iluminação coaxial sobre os resultados de medição, utilizou-se os mesmos procedimentos iniciais realizados para os testes de iluminação *ring*, aplicando as ferramentas *auto focus* para a obtenção do melhor foco da imagem e *Dual Area Contrast Tool* para se obter o melhor par de iluminação *ring*-coaxial. Mais uma vez, tal par ficou melhor ajustado em 0% para o coaxial e 30% para o *ring*.

Adicionalmente, quatro pontos dispostos sobre o padrão foram tomados, utilizando a ferramenta *point*, para definir um plano padrão a ser alinhado com o plano do *chessboard*. O padrão escolhido para medição foi o mesmo ilustrado na Figura 5 através da seta.

Feito isso, escolheu-se avaliar a influência da iluminação coaxial em conjunto com a iluminação *ring*, uma vez que esta deve assumir um valor não nulo, o que acarretaria a não aparição da imagem do padrão de medição na tela de visualização do VISIONPAK, impossibilitando sua aferição.

Para avaliar apenas a influência da iluminação do tipo coaxial, fez-se esta variar, mantendo-se fixo o valor da iluminação *ring*. Foram utilizadas as intensidades de iluminação *ring* dentro da faixa em que se obteve os melhores resultados de medição nos testes realizados para avaliar sua influência em medições, discutida na seção anterior. Tal faixa compreende os valores de 10%, 20%, 30% e 40% de intensidade de iluminação *ring*.

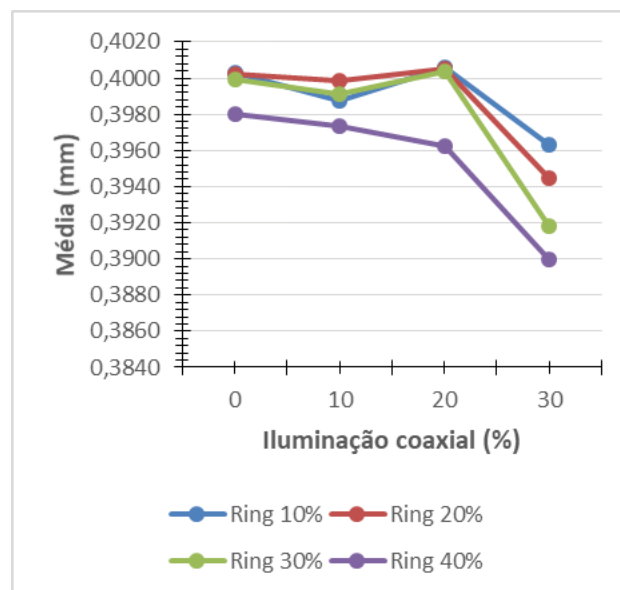
A iluminação coaxial foi variada de 0% até o limite de 40%, variando em intervalos de 10%. Esse limite foi admitido pelo fato de que maiores valores de iluminação coaxial acarretavam a não aparição da imagem do padrão a ser medido, impossibilitando a detecção de bordas da imagem e consequentemente tornando impossível sua aferição.

A partir dos resultados das medições realizadas, encontram-se as médias das indicações, os desvios-padrão e os erros sistemáticos.

Para melhor visualizar como se comportam as médias indicativas das medições realizadas, foram plotadas, em um mesmo gráfico, as médias das indicações em função da iluminação coaxial para cada valor de iluminação do tipo *ring*. Tal gráfico pode ser visto na Figura 10.

Ao se avaliar a Figura 10, observa-se que as médias das indicações se aproximam mais do VVC (0,4 mm) na situação em que o valor da iluminação coaxial vale 0%, sobretudo quando a iluminação do tipo *ring* é fixado em 10%, 20% e 30%, havendo baixíssima variação quando a luz coaxial muda para 10% e 20%. Os maiores distanciamentos entre o VVC e a média das indicações ocorreram quando se fixou a iluminação *ring* em 40%.

Figura 10 ►
Gráfico da média das medições em função da iluminação coaxial.
Fonte: dados da pesquisa

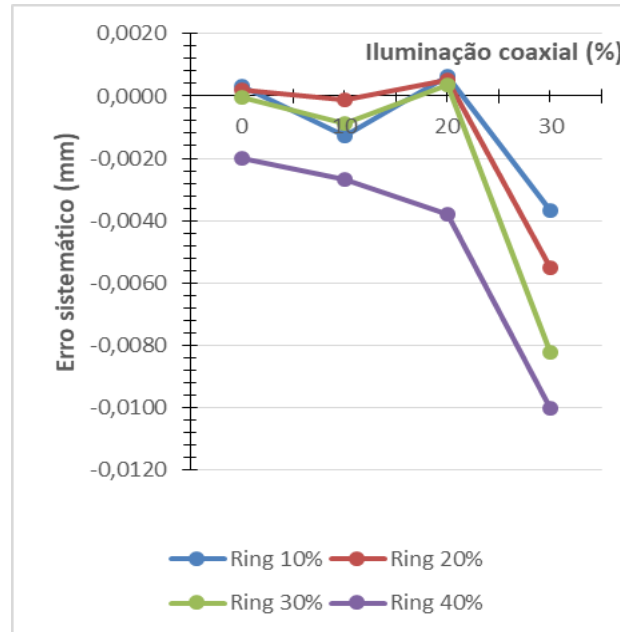


Para a intensidade de luz coaxial fixada em 30%, à medida que se amplia a intensidade de luz *ring*, ocorre maior afastamento entre a média das indicações e o VVC. Essa situação foi também constatada quando se avaliou a iluminação do tipo *ring* na seção anterior. Para os demais valores de iluminação coaxial tal fato não ocorre em totalidade.

O maior distanciamento entre as indicações e o VVC caracteriza um maior erro de medição. Para se concluir que faixa de valores de iluminação coaxial e *ring* apresentam resultados mais exatos, faz-se necessário avaliar o comportamento dos erros de medição.

A Figura 11 ilustra o comportamento dos erros sistemáticos em função da iluminação coaxial para valores fixos de iluminação *ring*.

Figura 11 ►
Gráfico do erro sistemático em função da iluminação coaxial.
Fonte: dados da pesquisa



Analisando a Figura 11, observa-se que os maiores erros de medição ocorrem para iluminação do tipo *ring* fixa em 40%, de tal forma que, à medida que se aumenta a intensidade de luz coaxial, aumenta o erro de medição. Observa-se ainda que, fixando a iluminação coaxial em 30%, os erros são maiores em comparação aos erros com iluminação coaxial fixada em 0%, 10% e 20%, elevando ainda mais à medida que se amplia a iluminação do tipo *ring*.

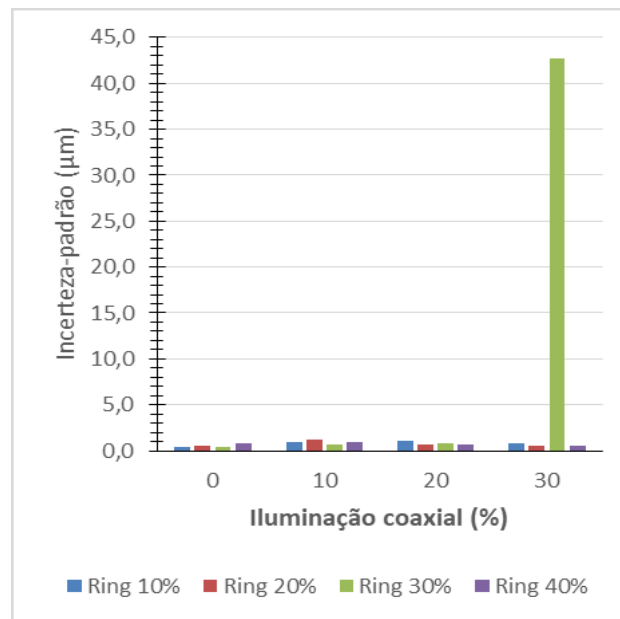
Portanto, menores erros e consequentes melhores resultados foram obtidos com iluminação coaxial entre 0% e 20% em conjunto com a iluminação *ring* em faixas entre 10% e 30%. Logo, existe uma faixa ótima de valores para a iluminação coaxial em que se pode obter melhores resultados do ponto de vista do erro de medição.

Assim como na utilização de iluminação do tipo *ring*, quando se escolhe a iluminação coaxial, há uma incerteza nos resultados de medição interligados à não condição ideal de luminosidade. Para determinar a incerteza graças à iluminação coaxial, toma-se a incerteza-padrão como os desvios-padrão das medições realizadas.

Na Figura 12, constam as incertezas-padrão para os testes de avaliação da influência de iluminação coaxial para valores fixos de iluminação *ring*.

Figura 12 ▶

Incertezas-padrão para o uso do par de iluminação *ring-coaxial*. Fonte: dados da pesquisa

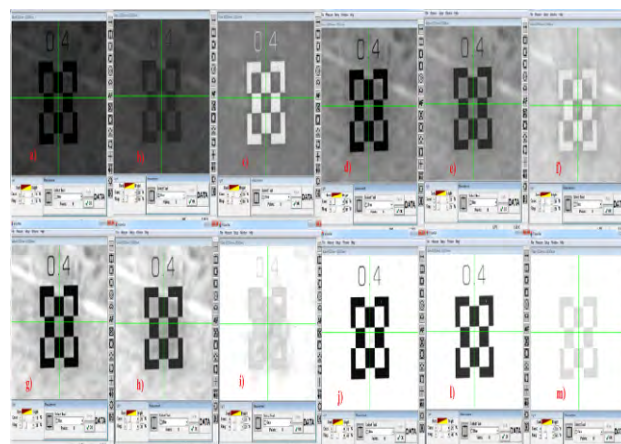


Analisando a Figura 12, o que mais chama a atenção é a presença de uma incerteza-padrão bem discrepante das demais. Para o par de iluminações coaxial e *ring* fixadas em 30%, há a ocorrência de um desvio-padrão de 43 µm, bem superior aos demais desvios. Tal fato ocorre devido ao primeiro valor de indicação obtido para a iluminação fixada, em que se obteve uma indicação de 0,3155 mm. Portanto, um valor muito distante do VVC (0,4 mm). A indicação conseguida é gerada via software de análise e avaliação de imagem, o VISIONPAK. A iluminação deve ser adequada para gerar uma imagem o mais nítida possível.

O ajuste de iluminação inadequada pode gerar pontos de sombras e fugas de luz na imagem que tendem a encobrir arestas de medição. Essas falhas podem levar a análises equivocadas realizadas pelo software, fazendo com que, por exemplo, o algoritmo de reconhecimento de bordas reconheça um ou vários pontos de falhas como pertencentes às bordas de imagem cruciais à medição. Caso isso ocorra, a curva de ajuste gerada pelo algoritmo e que representa a aresta de medição pode não representar a aresta real do objeto. Em outras palavras, o software de processamento de imagem tende a medir uma aresta fora de sua posição real. Isso é uma fonte de incerteza muito significativa e é concretizado pelo valor de incerteza-padrão conseguido nos presentes testes (43 µm). A Figura 13 ilustra as imagens do *chessboard* geradas com o sensor QVP para pares de iluminação *ring-coaxial* específicos.

Figura 13 ▶

Imagens do *chessboard* geradas na tela do VISIONPAK pelo QVP para os pares de iluminação *ring-coaxial*: a) 10%-10%; b) 20%-10%; c) 30%-10%; d) 10%-20%; e) 20%-20%; f) 20%-30%; g) 10%-30%; h) 20%-30%; i) 30%-30%; j) 10%-40%; l) 20%-40%; m) 30%-40%.
Fonte: arquivo dos autores



Pode-se observar na Figura 13 como as intensidades de iluminação coaxial e *ring* influenciam na nitidez ou na qualidade da imagem gerada pelo sensor QVP. A Figura 13 i) representa a imagem gerada com iluminações coaxial e *ring* em 30%. Essa configuração é nitidamente a pior, pois gerou uma imagem com muita sombra e falhas, mascarando as arestas dos padrões, indispensáveis à medição exata. Isso explica como foi possível o resultado de 0,3155 mm para um padrão de 0,4 mm.

5 Considerações finais

Diante do que foi exposto, observa-se a importância e a dificuldade de se determinar as incertezas relacionadas a sistemas de medição de forma exata. Observa-se ainda que o operador é uma fonte de incerteza a ser considerada, pois operadores distintos podem obter resultados variados com o mesmo equipamento, devendo a reprodutibilidade ser avaliada.

Testes da influência da iluminação foram realizados, obtendo-se o melhor par de luminosidade *ring*–coaxial utilizando a incerteza-padrão como fator avaliativo. Nesses testes, um padrão do tipo *chessboard* foi utilizado. Como resultado, obteve-se incertezas-padrão na ordem de 0,40 μm . Constatou-se, além disso, a determinação de uma zona ou região nas quais os valores de iluminação tendem a conseguir medições mais exatas. Tal região compreende intensidade de iluminação do tipo *ring* entre 10% e 40%, e de 0% a 20% para a iluminação do tipo coaxial.

Referências

ALBERTAZZI, A.; DE SOUSA, A. R. **Fundamentos da metrologia científica e industrial**. 2. ed. São Paulo: Manole, 2017. 480 p.

CARMIGNATO, S.; VOLTAN, A.; SAVIO, E. Metrological performance of optical coordinate measuring machines under industrial conditions. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 59, n. 1, p. 497-500, Dec. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.128>.

CHAI, Z.; LU, Y.; LI, X.; CAI, G.; TAN, J.; YE, Z. Non-contact measurement method of coaxiality for the compound gear shaft composed of bevel gear and spline. **Measurement**, v. 168, p. 108453, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108453>.

CHEN, P.-C.; LIN, Y.-T.; TRUONG, C.-M.; CHEN, P.-S.; CHIANG, H.-K. Development of an Automated Optical Inspection System for Rapidly and Precisely Measuring Dimensions of Embedded Microchannel Structures in Transparent Bonded Chips. **Sensors**, v. 21, n. 3, p. 698, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21030698>.

FRUSTACI, F.; PERRI, S.; COCORULLO, G.; CORSONELLO, P. An embedded machine vision system for an in-line quality check of assembly processes. **Procedia Manufacturing**, v. 42, p. 211-218, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.072>.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos fundamentais

e gerais e termos associados. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf. Acesso em: 15 set. 2016.

MALAMAS, E. N.; PETRAKIS, E. G. M.; ZERVAKIS, M.; PETIT, L.; LEGAT, J.-D. A survey on industrial vision systems, applications and tools. **Image and Vision Computing**, v. 21, n. 2, p. 171-188, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00152-X).

MARES, A. I.; BERGMANS, R. H. Evaluation of an optical coordinate measuring machine for measuring grated structures. **Measurement Science and Technology**, v. 23, n. 9, p. 094012, 2012. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/23/9/094012/meta>. Acesso em: 13 nov. 2017.

MITUTOYO. **Manual do VISIONPAK**. 2010.

MITUTOYO. **Manual Crysta-Apex S Series**. 2015. Disponível em: https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/CRYSTA_ApexS-_2202.pdf. Acesso em: 22 ago. 2016.

MITUTOYO. **Data Processing System for Manual/ CNC CMM – MCOSMOS**: Catalog N°. E16008. 2016. Disponível em: https://www.mitutoyo.ca/images/E16008_4_MCOSMOS_social.pdf. Acesso em: 22 ago. 2016.

TAO, W.; XU, Y.; LIU, H.; WANG, C.; ZHENG, L. Machining accuracy detection of PCB hole by X-ray micro-CT. **Micron**, v. 131, p. 102826, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micron.2020.102826>.

ZANCUL, E.; MARTINS, H. O.; LOPES, F. P.; SILVA NETO, F. A. Machine vision applications in a Learning Factory. **Procedia Manufacturing**, v. 45, p. 516-521, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.069>.