



University of  
Texas Libraries



e-revist@s



Centro Universitário Santo Agostinho

# revistafsa

[www4.fsnet.com.br/revista](http://www4.fsnet.com.br/revista)

Rev. FSA, Teresina, v. 17, n. 6, art. 10, p. 182-203, jun. 2020

ISSN Impresso: 1806-6356 ISSN Eletrônico: 2317-2983

<http://dx.doi.org/10.12819/2020.17.6.10>

DOAJ DIRECTORY OF  
OPEN ACCESS  
JOURNALS

WZB  
Wissenschaftszentrum Berlin  
für Sozialforschung



## Análise de Sistemas de Medição em uma Máquina de Medir por Coordenadas

### Measurement System Analysis on a Coordinate Measuring Machine

#### Rodrigo Schons Arenhart

Mestrado em Engenharia de Produção Universidade Federal de Santa Maria  
Bacharel em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Maria  
E-mail: [rodrigosschonsarenhart@gmail.com](mailto:rodrigosschonsarenhart@gmail.com)

#### Morgana Pizzolato

Doutora em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Maria  
Professora da Universidade Federal de Santa Maria  
E-mail: [morgana.pizzolato@gmail.com](mailto:morgana.pizzolato@gmail.com)

---

#### Endereço: Rodrigo Schons Arenhart

Universidade Federal de Santa Maria – Av. Roraima, nº  
1000, Bairro Camobi, CEP: 97015-900, Santa Maria/RS,  
Brasil.

#### Endereço: Morgana Pizzolato

Universidade Federal de Santa Maria – Av. Roraima, nº  
1000, Bairro Camobi, CEP: 97015-900, Santa Maria/RS,  
Brasil.

Editor-Chefe: Dr. Tonny Kerley de Alencar  
Rodrigues

Artigo recebido em 20/02/2020. Última versão recebida  
em 12/03/2020. Aprovado em 13/03/2020.

Avaliado pelo sistema Triple Review: a) Desk Review  
pelo Editor-Chefe; e b) Double Blind Review (avaliação  
cega por dois avaliadores da área).

Revisão: Gramatical, Normativa e de Formatação



## RESUMO

A Análise de Sistemas de Medição busca diminuir erros do processo produtivo, através do acompanhamento dos componentes de variação de um processo de medição. Esse estudo objetivou analisar um sistema de medição denominado Máquina de Medir por Coordenadas, de um laboratório de Instituição de Ensino Superior Pública. Por conseguinte, a Análise de Sistemas de Medição realizada visou à verificação da adequação ao uso desse Sistema de Medição. Para tanto, foram conduzidos estudos de Estabilidade, Tendência, Linearidade e Repetibilidade & Reprodutibilidade do Sistema de Medição. O sistema de medição foi considerado aceitável, porém, recomenda-se buscar soluções de melhoria, uma vez que os estudos de Tendência e Linearidade apresentaram valores próximos aos limites máximos de aceitação, os quais podem ser vinculados à falta de padronização da fixação das peças na mesa da máquina. O resultado do estudo de Repetibilidade & Reprodutibilidade também foi considerado aceitável, entretanto, o laboratório, através da análise dos resultados, pretende aplicar melhorias para otimizar o processo de medição.

**Palavras-chave:** Análise de Sistemas de Medição. Máquina de Medir por Coordenadas. Laboratório de Calibração e Ensaio.

## ABSTRACT

Measurement Systems Analysis seeks to reduce errors in the production process by monitoring the variation components of a measurement process. This study aimed to analyze a measurement system called Coordinate Measuring Machine, from a laboratory of a Public Higher Education Institution. Therefore, the Measurement Systems Analysis carried out aimed at verifying the suitability for the use of this Measurement System. For this, studies of Stability, Bias, Linearity and Repeatability & Reproducibility of the Measurement System were conducted. The measurement system was considered acceptable, however, it is recommended to seek improvement solutions, since the Bias and Linearity studies presented values close to the maximum acceptance limits, which can be linked to the lack of standardization of the fixation of the parts in the machine table. The result of the Repeatability & Reproducibility study was also considered acceptable, however, the laboratory, through the analysis of the results, intends to apply improvements to optimize the measurement process.

**Keywords:** Measurement System Analysis. Coordinate Measuring Machine. Calibration and Testing Laboratory.

## 1 INTRODUÇÃO

O progresso da humanidade tem sido construído sobre a fundamentação das medidas, desde a domesticação de animais até o domínio sobre o fogo. Entretanto, medir nunca foi suficiente, pois, para que a medição fosse replicada, teria que concordar com as medições dos outros. Assim, foram criados padrões de medida, com os quais as unidades de medidas se baseiam até os dias atuais (LINCK, 2017). Nesse contexto, os Instrumentos de Medição (IM), funcionam como uma extensão das faculdades humanas, podendo ser simplórios como gabaritos, escalas ou galvanômetros. Porém, a partir da evolução da tecnologia e das técnicas de medição, os IM passaram a ser mais elaborados e com maior exatidão, com múltiplos usos e recursos (LIRA, 2015).

A partir disso, ressalta-se a necessidade de uma seleção de um Sistema de Medição (SM), considerando aspectos técnicos, econômicos e logísticos. Aspectos técnicos dizem respeito às técnicas do processo para o qual as medições são realizadas. O custo benefício de um SM está diretamente envolvido na avaliação econômica. E, por fim, os aspectos logísticos tratam de prazos de entrega, assistência técnica, manutenções, calibrações e atualizações (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). A escolha de uma Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) como SM é fundamentada por se tratar de um dispositivo multifuncional com alta velocidade, além de possuir acurácia e eficiência para medições com alto nível de detalhamento (SUTARMAN *et al.*, 2017).

A MMC é empregada para diversos tipos de medições, como circularidade, cilíndricidade, reticidade, perpendicularidade, batimento radial e batimento circular, além de outras características dimensionais (BAUM *et al.*, 2017). Assim, a necessidade de verificar a exatidão dos IM é um pré-requisito importante no qual se tenha como meta do processo o “zero defeitos”, tornando o conhecimento do estado funcional do instrumento extremamente importante (FERREIRA *et al.*, 2013). Para garantir a exatidão, são feitas calibrações e ajustes periódicos, segundo procedimentos pré-estabelecidos, de forma anual, na maioria das aplicações. As calibrações visam comparar os resultados do instrumento de medição com padrões, obtendo com isso um valor de incerteza de medição, porém, esta deve ser realizada com uma determinada frequência, pois erros que não atendam às especificações do método de medição podem surgir, devido a problemas como colisões, ambientes mal controlados, alterações estruturais, falhas de componentes, entre outros (VIEIRA; SOUSA, 2014).

Máquinas que apresentam erros indesejados causam problemas e prejuízos para os usuários da tecnologia, uma vez que informações erradas podem atrasar o desenvolvimento de

produtos, levando a ações indevidas de ajuste em ferramentais de produção, processos e produtos, com sérias consequências técnicas e econômicas, assim como desperdício de material, tempo e energia (SOUSA *et al.*, 2014). Em outro patamar, máquinas que possuem menor taxa de utilização, ou alocadas a ambientes bem controlados e operadas por profissionais qualificados, conservando a estabilidade metrológica, podem maximizar ou melhor dimensionar o intervalo de calibração, diminuindo custos aplicados em qualidade (VIEIRA; SOUSA, 2014).

Por conseguinte, AIAG (2010), define que, para analisar um SM, podem ser utilizadas ferramentas estatísticas que permitem a avaliação do grau de confiabilidade dos dados gerados pelos IM e utilizados pelas organizações. Esses dados representam a base para a tomada de decisão, sendo de vital importância determinar se o SM fornece resultados aceitáveis. Saikaew (2018) conclui que a Análise do Sistema de Medição (ASM) é uma ferramenta de qualidade útil para avaliar a adequação da variabilidade de um SM, a fim de garantir sua qualidade e, consequentemente, produtos que atendam às especificações de projeto.

Desse modo, este estudo tem como objetivo analisar o sistema de medição de uma Máquina de Medir por Coordenadas, visando à verificação da sua adequação ao uso por meio de estudos de Estabilidade, Tendência, Linearidade e Repetibilidade & Reprodutibilidade, conforme as diretrizes do AIAG (2010). Como efeito do estudo, espera-se planejar, de forma sistemática, o uso da ASM nos demais instrumentos de medição do laboratório, encaminhando melhorias conforme necessário.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta uma revisão bibliográfica conduzida a fim de sustentar cientificamente os conceitos apresentados no estudo. Primeiramente, são apresentadas informações gerais sobre máquinas de medir por coordenadas, demonstrando sua importância no ambiente fabril. Por fim, o conceito de Análise de Sistemas de Medição é apresentado, assim como os estudos de Estabilidade, Tendência, Linearidade e R&R.

### 2.1 Máquinas de medir por coordenadas

O panorama tecnológico da metrologia apresenta diversos sistemas de medição. Para um mesmo mensurando é possível encontrar no mercado sistemas com diferentes princípios de medição, níveis de incerteza de medição, grau de automatização, robustez e, principalmente, no

que se refere a custos de aquisição e custos de operação (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). Yang *et al.* (2015) relatam que os produtos se tornaram mais exatos na manufatura mecânica, o que conferiu certa inadequação no uso de alguns instrumentos de medição tradicionais. Nesse sentido, Vieira e Sousa (2014) afirmam que as MMC são o recurso mais robusto que as empresas podem utilizar a fim de caracterizar geometricamente seus produtos, uma vez que as potencialidades matemáticas, assim como a exatidão e a automação, tornam esse tipo de instrumento atrativo para a indústria.

Lira (2015) sustenta que a MMC torna possíveis medições que demandariam maior grau de complexidade com a utilização de instrumentos convencionais de medição. Nóbrega *et al.* (2014) esclarecem que as MMC são compostas por três eixos lineares e perpendiculares entre si que, juntos, formam o plano cartesiano da máquina, sendo que o componente fundamental dessa máquina é o sensor que faz a captura das coordenadas da medição e envia um sinal para o sistema de controle da máquina. Lira (2015) cita a existência de máquinas grandes, capazes de realizarem inspeções completas em automóveis, motores, turbinas e peças complexas de grande porte. Também se pode realizar medições em peças de tamanho extremamente reduzido e com maior necessidade de exatidão. Para isso é indicado o uso de Micro-MMC, que possuem apalpadores pequenos e podem detectar diâmetros ou furos minúsculos (medidas nanomométricas) com uma excelente precisão (ITO *et al.*, 2016).

Sá (2008) argumenta que a MMC se difundiu como um importante instrumento metrológico para utilização em diversos pólos industriais, uma vez que são instrumentos versáteis usados para medir características dimensionais de peças mecânicas. Ferreira *et al.* (2013) expressam que a MMC, no ambiente industrial, é um recurso importante para os sistemas de qualidade, ao monitorar o processo de produção, reduzir erros durante a fabricação, realizar a inspeção de especificações de produtos e garantir uma melhoria contínua da qualidade.

No ambiente produtivo, a MMC é essencial para a qualidade e produtividade, porém, deve estar com erros adequados às especificações do processo; caso contrário, peças não conformes serão produzidas, comprometendo lotes de produtos e gerando um grande desperdício econômico e energético da empresa (VIEIRA; SOUSA, 2014). Albertin *et al.* (2011) concluem que a medição por coordenadas não é uma tarefa trivial, uma vez que envolve inúmeras fontes de erros, podendo ser uma atividade complicada, quando envolver a medição de peças com geometria complexa. Uma rotina de testes periódicos, além da verificação do erro máximo, gera parâmetros importantes relacionados à maneira como o erro de medição varia ao longo dos ensaios (SOUSA *et al.*, 2014).

## 2.2 Análise de Sistemas de Medição

A qualidade está intimamente relacionada ao desempenho e ao controle dos processos e a decisão por ajustar um processo, buscando a melhoria contínua, depende dos dados de medição coletados (CERCAL *et al.*, 2009). Nesse contexto, Kazemi *et al.* (2010) afirmam que a Análise de Sistemas de Medição (ASM) tem sido aplicada em diferentes aspectos de avaliações industriais, avaliando medidas quantitativas e qualitativas dessas indústrias.

Segundo Klaput *et al* (2016), dados confiáveis, fornecidos por um sistema de medição com qualidade comprovada, são um pré-requisito importante para o planejamento da gestão e das melhorias do processo. A implementação e avaliação de sistemas de medição pode ser fator determinante da qualidade em setores industriais, ao confrontar os dados com várias especificidades, buscando menor variação. De acordo com Pan *et al.* (2015), produtos de qualidade só podem ser manufaturados com auxílio de uma etapa de inspeção com uso de um adequado sistema de medição. Desse modo, a confiabilidade de um sistema de medição é uma tarefa importante no controle da qualidade e a ASM apresenta um papel importante no auxílio à melhoria da qualidade de produtos industrializados.

A ASM pode ser considerada uma importante técnica utilizada para diminuir o erro do processo, considerada precedente para a utilização do Controle Estatístico do Processo (CEP). Entre as vantagens da ASM, pode-se destacar a definição de compatibilidade de um sistema de medição com um processo de produção e a redução da variabilidade deste (HAJIPOUR *et al.*, 2013). Doshi e Desai (2019) citam que a aplicação correta da ASM fornece um entendimento detalhado dos componentes da variação do processo de medição e, por conseguinte, há a definição da adequação do sistema de medição para a tarefa de mensuração específica de parâmetros da qualidade do produto.

AIAG (2010) define que a variação total de um sistema de medição é verificada através da avaliação de dois fatores: operador e dispositivo/instrumento. No que diz respeito ao operador, tem-se o estudo de reprodutibilidade; já no que tange ao dispositivo, os estudos são de repetibilidade, da estabilidade, da tendência e da linearidade. O somatório dessas componentes de variação é adicionado à variação inerente ao processo de produção, resultando na variação total do processo.

### 2.2.1 Estabilidade do Sistema de Medição

A estabilidade é a variação total das medições de um SM, medindo uma característica da mesma peça ou padrão ao longo de um período de tempo, possibilitando a verificação do desempenho do SM ao longo do tempo. A maneira mais usual de avaliação da estabilidade é por meio da aplicação de cartas de controle (CC), na qual uma peça padrão é medida ao longo de dias ou semanas (AIAG, 2010). Vale ressaltar que AIAG (2010) recomenda apenas o uso de cartas de controle de Shewahrt, desconsiderando que, na medição da estabilidade, a variação é muito pequena, o que pode levar à obtenção de dados não normais, os quais não são adequados para a construção desse tipo de cartas de controle.

Conforme apresentado por AIAG (2010), o estudo de estabilidade é pautado pelas seguintes diretrizes: (i) obter uma amostra e definir seu valor de referência, medindo a peça padrão 10 vezes e calculando a média; (ii) definir tamanho e frequência da amostra de dados; (iii) medir a peça de 3 a 5 vezes periodicamente; (iv) estabelecer limites de controle; (v) coletar dados em cartas de controle; (vi) calcular o desvio padrão e compará-lo ao do processo.

### 2.2.2 Tendência do Sistema de Medição

A tendência é definida como a diferença entre a média observada de um conjunto de medições e o valor de referência. A tendência pode ser expressa em termos percentuais, em que a base de comparação é a variação total do processo em que geralmente é usada a tolerância do processo. Para executar o estudo de tendência, é necessário obter uma amostra e estabelecer seu valor de referência, fornecido por um laboratório que possua medições rastreáveis ao Sistema Internacional de unidades e selecionar um operador para medir a peça, pelo menos, 20 vezes de maneira usual. A Equação 1 apresenta a equação para o cálculo da tendência de acordo com AIAG, (2010).

$$Tendência (\%) = 100 \times \left( \frac{Tendência}{Tolerância} \right) \quad (1)$$

### 2.2.3 Linearidade do Sistema de Medição

O estudo de linearidade pode ser entendido como a variação da tendência em relação à medição executada, verificando o desempenho do sistema ao longo de toda a sua faixa de



medição. Para executar o estudo de linearidade são utilizadas várias peças, cujos valores de referência contemplem a faixa de uso do SM (AIAG, 2010).

Para o estudo ser realizado, deve-se selecionar um número maior ou igual a cinco peças ao longo da faixa de medição do SM, obter seus valores de referência e confirmar a abrangência da faixa de operação. Normalmente, o estudo é realizado por um operador que mede, pelo menos, 10 vezes cada peça com o SM indicado (AIAG, 2010).

#### 2.2.4 Repetibilidade & Reprodutibilidade do Sistema de Medição

AIAG (2010) define esse estudo como uma estimativa da variação combinada da Repetibilidade & Reprodutibilidade (R&R), sendo a variância resultante da soma das variâncias dentro do SM e entre sistemas. A repetibilidade é a variação nas medidas obtidas com o instrumento de medição, usado várias vezes por um único operador medindo a mesma característica da mesma peça, já a reprodutibilidade se configura na variação na média das medidas feitas por diferentes operadores, utilizando o mesmo instrumento de medição, aferindo as mesmas características da mesma peça.

AIAG (2010) apresenta três métodos de estudo para R&R. O primeiro (método da amplitude) fornece o valor aproximado para a variação da medição e não decompõe a variabilidade em repetibilidade e reprodutibilidade. Neste método, devem ser selecionadas cinco peças e dois operadores; a partir de então, se deve numerar as peças e entregar as mesmas para que os operadores realizem a medição de cada peça uma única vez. Esse método pode ser utilizado para analisar de forma simplificada o R&R e, se for o caso, decidir por um estudo mais aprofundado.

O segundo método utilizado é da média e amplitude, que permite que o SM seja decomposto em dois componentes diferentes, repetibilidade e reprodutibilidade, porém, sem a interação. Para executar este método, deve-se obter uma amostra de 10 peças que represente a amplitude esperada da variação do processo. Além disso, são selecionados três operadores que realizam três medições em cada peça. A partir disso, deve-se numerar as peças, calibrar o dispositivo de medição, se possível, e realizar as medições de forma aleatória entre os operadores.

Já o estudo por meio da Análise de Variância (ANOVA) pode decompor a variabilidade em quatro fontes: peças, operadores, interação entre peça e operador e erro de repetição devido ao equipamento de medição. Ao utilizar a ANOVA para encontrar o R&R, é possível obter mais informações a respeito do sistema de medição, o que guiará a melhorias, de fato, efetivas.



O estudo de R&R, utilizando a ANOVA, é um planejamento experimental do tipo hierárquico com dois fatores (peça e operador) fixos (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Para a realização deste estudo, utiliza-se uma amostra de cinco peças iguais, medidas por três operadores diferentes, onde cada operador realiza três medições em cada peça. As medições são feitas de maneira aleatória, tanto para a peça quanto para o operador. Os operadores não têm acesso às peças, que só lhes são fornecidas no momento da medição, sem distinção entre as mesmas. A planilha de coleta de dados e o controle das peças ficam a cargo de uma pessoa que não esteja envolvida com as medições. Na planilha de coleta de dados, há a diferenciação dos operadores e das peças, além das medidas coletadas durante o ensaio.

Por fim, o estudo de R&R apresenta critérios para a aprovação ou rejeição do SM que, segundo AIAG (2010), são apresentadas três faixas: se o R&R apresentar valor abaixo de 10%, o mesmo é considerado aceitável, sendo recomendado atingir este patamar; se o estudo resulta em um percentual entre 10% e 30%, a decisão deve ser baseada na importância da aplicação da medição, custo do dispositivo, custo de retrabalho, entre outros; já, se a porcentagem for superior a 30%, o sistema de medição não é adequado para aquele uso e devem-se implementar melhorias de redução da variabilidade para que seja utilizado.

### 3 METODOLOGIA

O desenvolvimento da análise do sistema de medição (ASM) no laboratório deu-se através da aplicação dos passos definidos por AIAG (2010). O sistema de medição foi uma máquina de medição tridimensional do tipo toque e óptica, onde foram coletadas medidas realizadas apenas com o uso de apalpador (medição por toque). A aplicação da ASM teve as seguintes etapas: (i) estudo de Estabilidade; (ii) estudo de Tendência; (iii) estudo de Linearidade; e (iv) estudo de Repetibilidade & Reprodutibilidade.

Na primeira etapa, estudo de Estabilidade do SM, foram utilizados dois blocos padrão calibrados de 90,000 mm e 1,007 mm, que foram unidos formando o valor de referência de 91,007 mm. Para acompanhar a estabilidade do SM, por meio de cartas de controle, os padrões foram medidos três vezes (tamanho da amostra), três vezes por semana no turno da tarde, durante três meses, totalizando 35 subgrupos ou amostras.

Para o estudo de tendência do SM, etapa 2, selecionou-se um bloco padrão de 100 mm com valor de referência de 99,99983 mm fornecido por um laboratório de referência. Um operador realiza a medição do padrão vinte vezes, conforme restrições de condições ambientais.

A aplicação do estudo de Linearidade, etapa três, é realizada com a definição de cinco pontos de interesse na faixa de medição da MMC, sendo selecionados pontos através da junção de blocos padrão, conforme apresentados na Tabela 1. Depois disso, o operador mede cada um dos pontos, pelo menos, 10 vezes, de maneira aleatória. Alguns pontos de medição foram fixados na mesa da máquina de diferentes maneiras, devido ao fato de o laboratório não possuir um dispositivo de fixação que compreendesse toda a faixa de medição estipulada do SM.

Na última etapa, é realizado o estudo de Repetibilidade & Reprodutibilidade do SM, utilizando-se uma amostra de cinco peças, medidas por três operadores, em que cada operador executa três medições em cada peça de maneira aleatória. O estudo de R&R foi realizado por meio da ANOVA.

**Tabela 1 – Pontos de medição de Linearidade**

| <b>Blocos utilizados (mm)</b>            | <b>Medida de referência (mm)</b> | <b>Método de fixação</b> |
|--|----------------------------------|--------------------------|
| 50                                       | 49,99968                         | Suporte de micrômetro    |
| 100                                      | 99,99983                         | Suporte de micrômetro    |
| 80, 90 e 100                             | 269,99969                        | Mesa de medição          |
| 50, 60, 70, 80, 90 e 100                 | 449,99900                        | Mesa de medição          |
| 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 | 549,99866                        | Mesa de medição          |

Fonte: Elaborada pelos autores.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

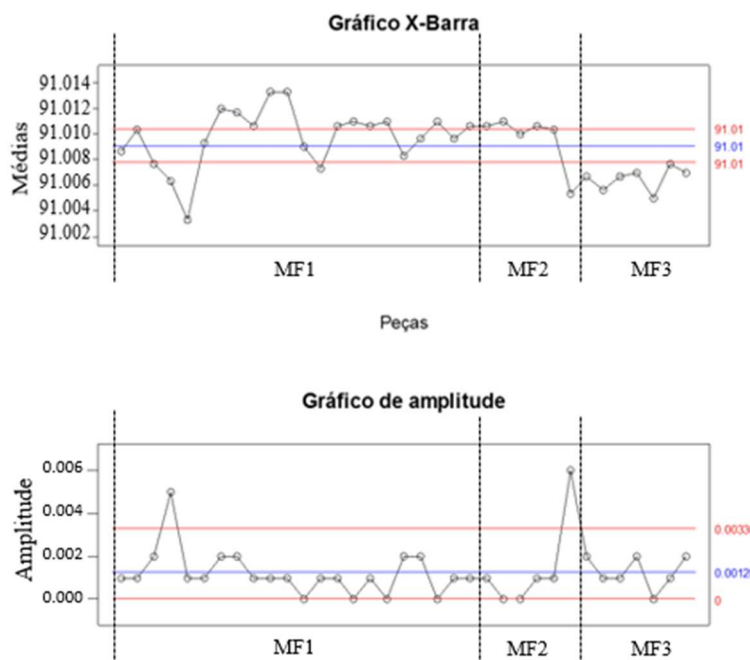
Esta seção apresenta os principais resultados e discussões e o relato ocorre em subseções, conforme as etapas da metodologia da seção 3.

### 4.1 Estudo de Estabilidade

Após coletar dados de 20 amostras de tamanho três, iniciou-se a construção das CC da média e da amplitude. Para essas amostras, o método de fixação de peça foi por fixador de pressão. A partir da amostra 21, utilizaram-se outros dois métodos de fixação, por suporte de micrômetros e por réguas e acessórios de fixação. Na Figura 1, são visualizados problemas de estabilidade, pois a CC da amplitude apresenta nove pontos consecutivos abaixo da média e a CC da média apresenta 26 pontos fora dos limites de controle. Além disso, nota-se que a amplitude média foi de 0,0012 mm, próxima da resolução do equipamento (0,001 mm) e o LCS

da CC da amplitude foi de 0,0033 mm, o que dá uma variação três vezes maior do que a resolução da MMC.

**Figura 1 - Cartas de Controle para Estabilidade**



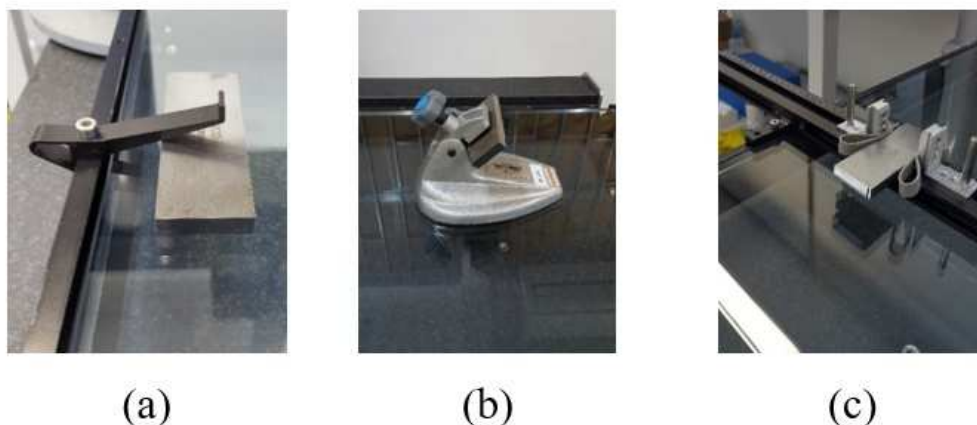
Fonte: Elaborada pelos autores.

Não foi possível concluir sobre a estabilidade do sistema de medição porque não se obteve 20 pontos sem causas especiais para estabelecer os limites de controle. Isso ocorreu porque foram realizadas medições com diferentes métodos de fixação. Entretanto, a aplicação comprovou a importância da fixação das peças na medição com MMC, pois, com as modificações no método de fixação, verificou-se mudança na média na parte final da carta de controle. O último método de fixação, adotado como referência, apresentou medidas mais exatas e precisas do que as obtidas pelos modelos anteriores, porém, o número total de medições não foi necessário para apresentar uma conclusão acerca da estabilidade do sistema de medição.

Devido às grandes variações das medidas obtidas no sistema de medição durante o intervalo de estudo, resolveu-se investigar os fatores envolvidos com o procedimento de medição. Identificou-se um problema com a fixação da peça a ser medida. O primeiro método de fixação (MF1) foi implantado por meio de um dispositivo fixador de pressão, fornecido juntamente com a máquina, que é apresentado na Figura 2 (a). Com este método, o sistema de medição apresentou uma grande variabilidade nas medidas coletadas (englobando a primeira amostra até a de número 22). Como exemplo, tem-se o menor valor encontrado de 91,003 mm

enquanto o maior valor para esse método de fixação foi de 91,014 mm. Com isso, constata-se uma diferença de 0,011 mm entre as medições, sendo significativa para o estudo.

**Figura 2 – Métodos de fixação**



Fonte: Elaborada pelos autores.

No segundo método de fixação (MF2), os blocos-padrão foram fixados em um suporte de micrômetro, conforme a Figura 2 (b). Com este método, o sistema de medição apresentou melhoria de acurácia em suas medições, porém, medições com alta variabilidade ainda foram encontradas. As amostras com essa configuração iniciaram na amostra número 23 e acabaram na amostra número 28. A menor medida realizada com este método de fixação foi 91,003 mm e a maior foi 91,011 mm, uma amplitude de 0,008 mm, que apresenta uma melhoria em relação ao primeiro método de fixação, mas ainda não se configura uma ótima medida.

No terceiro método de fixação (MF3), utilizaram-se as réguas e acessórios de fixação fornecidos juntamente com a máquina, em que os blocos são presos no dispositivo através de pressão, conforme a Figura 2 (c). Nesse método de fixação, o bloco fica mais bem posicionado, com maior firmeza, quando comparado aos outros métodos utilizados, proporcionando resultados mais precisos. Com esse método de fixação, foi efetuada a coleta de dados das últimas seis amostras do estudo, sendo que a menor medida feita pela máquina foi de 91,005 mm e a medida máxima encontrada foi de 91,008 mm, uma amplitude de 0,003 mm, quando comparada com os resultados anteriores. Outro ponto importante é recordar que o valor de referência dos blocos somados é de 91,007 mm; assim, com este método de fixação, os valores ficaram mais próximos do valor de referência.

Cabe ressaltar que a melhoria dos resultados das medições não se deve exclusivamente ao método de fixação (MF3). Foi realizado um ajuste no software da máquina durante a coleta de dados para o estudo que influenciou diretamente no resultado das medições, tornando-os

mais precisos. Entretanto, observou-se uma grande variação nas medidas realizadas com as fixações do MF1 e MF2, feitas novamente após o ajuste da máquina, o que comprova que o MF3 diminuiu a variabilidade do sistema de medição.

#### 4.2 Estudo de Tendência

Os resultados gerados pelo *software Action* no estudo de tendência estão apresentados na Tabela 2. Para a análise numérica dos resultados o AIAG (2010), recomenda-se também a utilização dos mesmos critérios utilizados na análise R&R. Nesse caso, a repetibilidade é aceitável se o valor encontrado for abaixo de 10%; pode ser aceitável, dependendo do SM, se o valor estiver na faixa compreendida entre 10% e 30%; e é rejeitado se o valor for superior a 30%. Para os resultados coletados, verifica-se que a repetibilidade encontrada foi de 16,66%, o que indica atendimento a esse critério.

**Tabela 2 – Resultados do estudo de Tendência**

| Valor de referência | 100      |
|---------------------|----------|
| Média               | 100,0034 |
| Tendência           | 0,0034   |
| Estatística T       | 5,2032   |
| P-valor             | 0,0003   |
| Limite inferior     | 0,0020   |
| Limite superior     | 0,0049   |
| VE (%)              | 16,6644  |
| Desvio padrão       | 0,0023   |

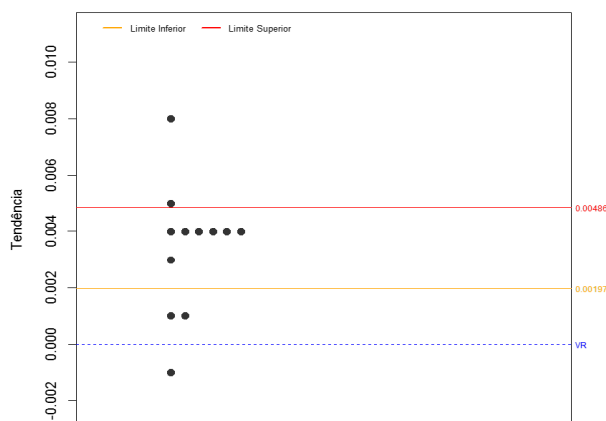
Fonte: Elaborada pelos autores.

Após a análise do VE%, realizou-se a verificação da significância do intervalo de confiança (intervalo entre o limite inferior e superior), o qual deve conter o zero, como demonstrado na Equação 2. Nessa análise, verificou-se que o zero não está contido no intervalo (ver Tabela 2), indicando que a tendência do SM é significativa a 95%, o que leva a uma reprovação do SM.

$$\text{Tendência} - t_{(n-1, 1-\alpha/2)} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \text{zero} \leq \text{Tendência} + t_{(n-1, 1-\alpha/2)} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Além da análise numérica do intervalo de confiança, pode-se chegar à mesma conclusão realizando a análise gráfica observando a Figura 5, onde visualiza-se que o zero não está contido no intervalo, pois os limites superior e inferior estão acima do valor de tendência zero.

#### Figura 5 – Análise gráfica da Tendência



Fonte: Elaborada pelos autores.

### 4.3 Estudo de Linearidade

Como critério para aprovação da linearidade do SM, deve-se observar se o zero está contido no intervalo de confiança construído para toda a faixa de medição estudada. Isso pode ser observado tanto nos dados da Tabela 3 quanto na Figura 8. Em ambos os casos, observa-se que o zero só está contido no intervalo de confiança no primeiro ponto de medição. Com isso, conclui-se que a tendência é significativa ao longo da faixa de medição, mas deve-se lembrar que a fixação de peças é um ponto que deve ser melhorado e pode interferir diretamente nesse resultado. Porque os dois primeiros pontos de medição foram fixados com o uso de suporte de micrômetros e os demais foram posicionados na mesa de medição, assim, um novo estudo de tendência e linearidade, com o mesmo método de fixação para todos os pontos, deve ser realizado. Logo depois da realização dos estudos, a máquina foi ajustada pelo fabricante, então, isso indica que resultados diferentes podem ser obtidos se os estudos forem conduzidos novamente.

**Tabela 3 – Resultados da Tendência ao longo da faixa de medição**

| Valor de referência | Média    | Tendência | Estatística T | P-valor | Limite inferior | Limite superior | Desvio padrão |
|---------------------|----------|-----------|---------------|---------|-----------------|-----------------|---------------|
| 50                  | 49,9995  | -0,0005   | -0,5906       | 0,5693  | -0,0024         | 0,0014          | 0,0027        |
| 100                 | 100,0033 | 0,0033    | 4,1798        | 0,0024  | 0,0015          | 0,0051          | 0,0025        |
| 270                 | 270,0283 | 0,0283    | 7,8286        | 2,6E-05 | 0,0201          | 0,0365          | 0,0114        |
| 450                 | 450,0609 | 0,0609    | 28,2958       | 4,2E-10 | 0,0560          | 0,0658          | 0,0068        |
| 550                 | 550,1095 | 0,1095    | 44,5181       | 7,3E-12 | 0,1039          | 0,1151          | 0,0078        |

Fonte: Elaborada pelos autores.

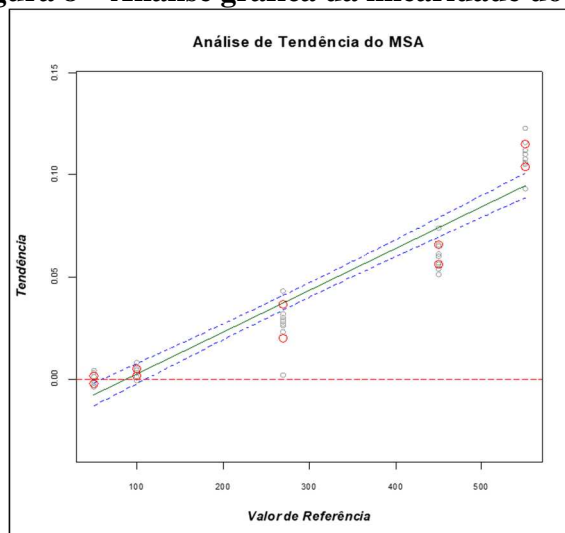
Ainda para analisar se a linearidade do SM é adequada deve-se verificar o “*p-valor*” na Tabela 4. O “*p-valor*” calculado pelo software foi de 5,3E-27, valor menor que 0,05, o que indica que o coeficiente angular é estatisticamente diferente de zero.

**Tabela 4 – Testes dos coeficientes da regressão linear**

|                      | Estimativa | Desvio padrão | Estatística T | P-valor |
|----------------------|------------|---------------|---------------|---------|
| Intercepto           | -0,0179    | 0,0031        | -5,6771       | 7,8E-07 |
| Coefficiente angular | 0,0002     | 9,1E-6        | 22,3292       | 5,3E-27 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Seguindo a análise gráfica da linearidade, observa-se que a tendência segue aumentando ao longo da faixa de estudo e que apesar do zero pertencer ao intervalo de confiança no primeiro ponto ele não está centralizado no intervalo de confiança. Outro fator a ser observado é a dispersão das medidas dos pontos fixados por suporte de micrômetros para os outros, a variabilidade das medidas no primeiro caso é muito menor (pontos 1 e 2). Sendo assim, não se recomenda a aceitação do SM, aconselhando-se a repetição do mesmo com um método de fixação padronizado para todas as peças.

**Figura 8 – Análise gráfica da linearidade do SM**

Fonte: Elaborada pelos autores.

#### 4.4 Estudo de Repetibilidade & Reprodutibilidade

Para o estudo do R&R, utilizou-se o método da ANOVA, apresentada na Tabela 5, obtendo-se uma avaliação preliminar, cujos resultados são apresentados nas Tabela 5 (ANOVA), Tabela 6 (Contribuição das variâncias) e Tabela 7 (Variação total), demonstrando que não há contribuição de reprodutibilidade e operadores nesse processo de medição.



**Tabela 5 – ANOVA**

|                | Graus de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrados médios | Estatística F | Pr(>F)  |
|----------------|--------------------|--------------------|------------------|---------------|---------|
| Peças          | 4                  | 6,8523             | 1,7131           | 193,1999      | 1,1E-24 |
| Operadores     | 2                  | 0,0135             | 0,0068           | 0,7637        | 0,4739  |
| Repetitividade | 38                 | 0,3369             | 0,0089           | NA            | NA      |

Fonte: Elaborada pelos autores.

**Tabela 6 – Contribuição das variâncias**

|                   | Variâncias | Contribuição (%) |
|-------------------|------------|------------------|
| Repetitividade    | 0,0089     | 4,4732           |
| Reprodutibilidade | 0,0000     | 0,0000           |
| Operadores        | 0,0000     | 0,0000           |
| Peças             | 0,1894     | 95,5268          |
| R&R               | 0,0089     | 4,4732           |
| Total             | 0,1982     | 100,0000         |

Fonte: Elaborada pelos autores.

**Tabela 7 – Variação total**

|                   | Desvio padrão | Variação total (%) |
|-------------------|---------------|--------------------|
| Repetitividade    | 0,0942        | 21,1499            |
| Reprodutibilidade | 0,0000        | 0,0000             |
| Operadores        | 0,0000        | 0,0000             |
| Peças             | 0,4352        | 97,7378            |
| R&R               | 0,0942        | 21,1499            |
| Total             | 0,4452        | 100,0000           |

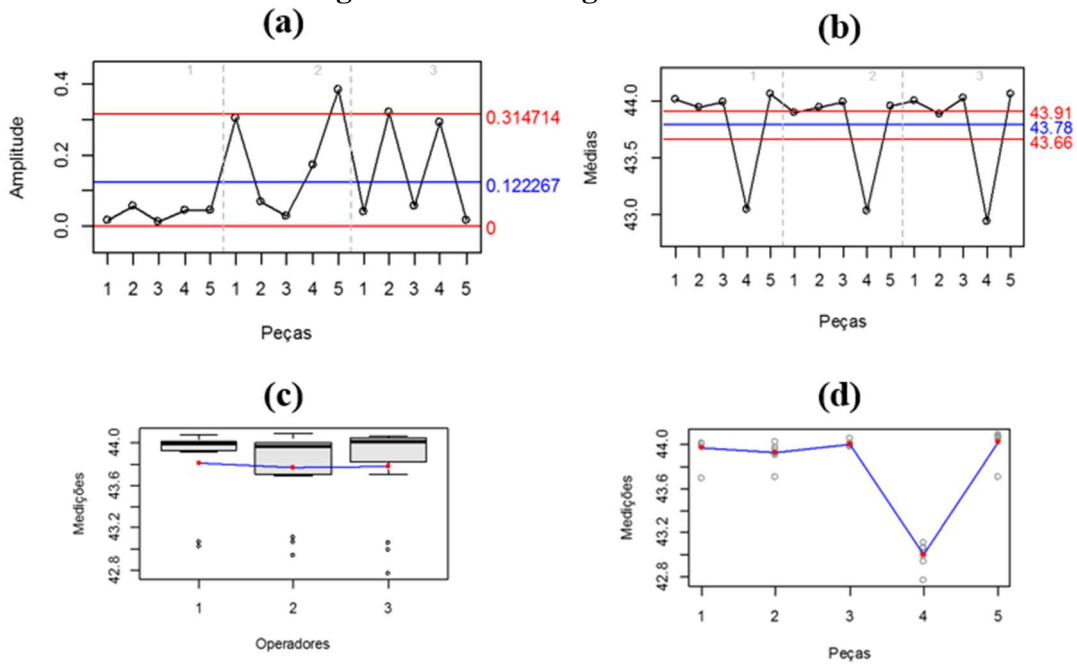
Fonte: Elaborada pelos autores.

A partir da ANOVA, o *software Action* gera cinco gráficos: gráfico de amplitude, gráfico de médias, gráfico por peça, gráfico por operador e gráfico de interações. A análise gráfica da ANOVA é apresentada na Figura 10, sendo iniciada pelo gráfico da amplitude (a), o qual se manteve dentro dos limites previstos, sendo que apenas a medição do operador 2 da peça número 5 apresentou um desvio em relação às outras medições, o que pode ter ocorrido devido a alguma condição anormal de funcionamento do *software* da máquina.

Na análise das médias, que avalia a repetibilidade, observou-se, a partir da análise do gráfico (b) na Figura 10, que a maior parte dos pontos se manteve fora dos limites de controle, sendo considerado adequado. No gráfico (c) da Figura 10, que avalia a reprodutibilidade, comparam-se as medições entre os operadores, que devem ser similares, uma vez que as medições ocorreram nas mesmas peças; a reta que intersecta os três operadores apresentou uma variação aceitável para o SM. No que diz respeito à interação entre peça e SM, avalia-se o gráfico (d) da Figura 10, que analisa a consistência do SM em relação às peças. Como as peças não são idênticas, o SM deve identificar essa variação. Caso alguma das peças apresente uma

maior variação, comprova-se que o sistema teve maior dificuldade em medi-la e a peça deve ser inspecionada, a fim de identificar a causa do problema. Observa-se que não houve uma evidente maior variação, porém, a peça número 4 apresentou uma medida menor em relação à média das outras peças, aproximadamente 43,0 mm contra 44,0 mm das outras peças, o que pode ser atribuído ao estado de conservação dessa determinada peça.

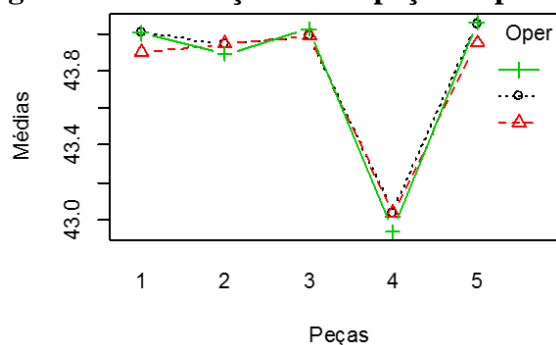
**Figura 10 – Análise gráfica inicial**



Fonte: Elaborada pelos autores.

Por fim, é feita a análise do gráfico de interações entre peça e operador. Nesse caso, não verificou-se interação entre peça e operador, pois, conforme a peça a ser medida era trocada, a medição executada pelos operadores se mantinha no mesmo intervalo, variação que pode ser visualizada na Figura 12.

**Figura 12 – Interações entre peças e operadores**



Fonte: Elaborada pelos autores.

Com isso, é concluída a avaliação completa dos resultados obtidos por meio da utilização da ANOVA. Para finalizar a aplicação do estudo R&R, fez-se uma nova verificação dos dados por meio de uma segunda ANOVA, sem o critério do operador, pois o mesmo foi insignificante para o processo de medição apresentado. Os resultados obtidos a partir da aplicação da segunda ANOVA estão relacionados na Tabela 8 (ANOVA final), Tabela 9 (Contribuição das variâncias) e Tabela 10 (Variação total).

**Tabela 8 - ANOVA final**

|                | Graus de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrados médios | Estatística F | Pr(>F)  |
|----------------|--------------------|--------------------|------------------|---------------|---------|
| Peças          | 4                  | 6,8523             | 1,7131           | 195,5095      | 1,1E-25 |
| Repetitividade | 40                 | 0,3505             | 0,0088           | NA            | NA      |

Fonte: Elaborada pelos autores.

**Tabela 9 – Contribuição das variâncias**

|                | Variâncias | Contribuição (%) |
|----------------|------------|------------------|
| Repetitividade | 0,0088     | 4,4224           |
| Peças          | 0,1894     | 95,5776          |
| R&R            | 0,0088     | 4,4224           |
| Total          | 0,1981     | 100              |

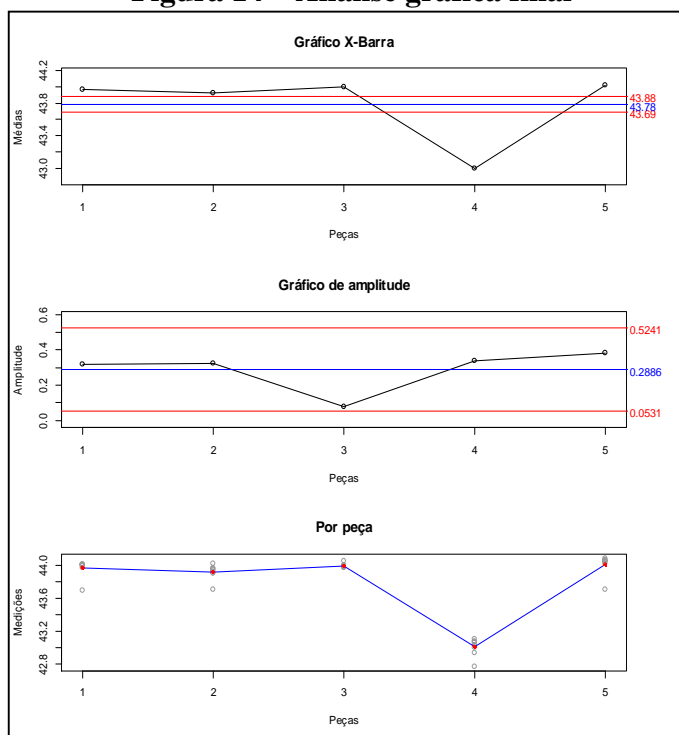
Fonte: Elaborada pelos autores.

**Tabela 10 – Variação total**

|                | Desvio padrão | Variação total (%) |
|----------------|---------------|--------------------|
| Repetitividade | 0,0936        | 21,0295            |
| Peças          | 0,4352        | 97,7638            |
| R&R            | 0,0936        | 21,0295            |
| Total          | 0,4451        | 100                |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Observou-se que a avaliação final da ANOVA remeteu aos valores de 21,03 % de R&R, dentro da faixa de aceitação do SM, porém, por se tratar de um laboratório que visa ao desenvolvimento de novos produtos e processos, acredita-se, em conjunto com os gerentes do laboratório, que o SM deve apresentar números abaixo do identificado, visando à melhoria contínua e o aumento da confiabilidade de suas medições. A análise gráfica, apresentada na Figura 14, manteve-se no mesmo padrão encontrado anteriormente.

**Figura 14 – Análise gráfica final**

Fonte: Elaborada pelos autores.

No gráfico “*X-Barra*”, percebe-se a variação da média das medidas, onde se evidencia que a peça de número 4 apresenta uma medida menor, quando comparada às outras peças da amostra. Já no gráfico de amplitude, percebe-se uma maior variação na peça de número três, que quase atingiu o limite de controle inferior do gráfico, o que demonstra que a peça teve as medidas com uma maior amplitude. Por fim, na análise por peça, é visto que as peças apresentaram uma variabilidade similar entre si, com especial destaque para a peça de número 3, que teve a menor variabilidade entre as peças da amostra, evidenciando medidas melhor distribuídas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ferramenta ASM demonstrou grande utilidade para a avaliação quantitativa do sistema de medição analisado. Isso pode ser comprovado através dos resultados gerados por todos os estudos desenvolvidos no trabalho. O estudo de estabilidade não foi conclusivo para o SM, porém, foi nítida a redução da média e da variabilidade a partir da amostra 28 das Cartas de Controle, que é explicada pelo uso de um método de fixação mais robusto e pelo ajuste realizado na máquina, durante o período de estudo.

A componente tendência apresentou, assim como a estabilidade, problemas para sua aceitação, uma vez que os limites inferior e superior ficaram acima do valor de referência, reprovando o SM. Esses resultados ocorreram de forma similar no estudo de linearidade, sendo que os maiores erros foram encontrados devido ao dispositivo de fixação da peça não ser padronizado, sendo aconselhável a revisão desse método de fixação e reaplicação deste estudo.

Quanto à aplicação de R&R, verificou-se a não significância do critério operador, definindo que esse não contribui significativamente para os erros gerados pelo SM. Sendo assim, uma segunda aplicação da ANOVA foi feita, sem o critério do operador, gerando um resultado de 21,03%. O resultado gerado pode ser aceitável, mas o laboratório espera melhorar seu sistema de medição, uma vez que visa à melhoria da confiabilidade de suas medições.

Por conta do exposto, como resultado principal, verifica-se a existência de problemas de tendência e linearidade no SM. Isso pode ser corroborado através da obtenção de um R&R de aproximadamente 21%, quando o ideal buscado está na região dos 10%. A solução para esse problema deve passar por um novo estudo ASM, com um método de fixação de peças padronizado e aprovado e com a máquina devidamente ajustada e calibrada.

## REFERÊNCIAS

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP – AIAG Measurement Systems Analysis (MSA) Reference Manual – Fourth Edition. Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation. 2010.

ALBERTAZZI, A.; SOUSA A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri: Manole, 2008.

ALBERTIN, M. R.; JÚNIOR, L. S.; SILVA, J. B. A. Uma proposta para garantia da qualidade metrológica em peças de geometria complexa. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, vol. 6, n. 3, 2011.

BAUM, F. A.; DEMATTÉ, E.; FAGUNDES, A. B.; PEREIRA, D.; BEUREN, F. H. Análise da estabilidade de uma Máquina de Medir por Coordenadas: um procedimento experimental. In: VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, PR, 2017.

CERCAL, A. J.; ZVIRTES, L.; CORTIVO, N. D. Sistemática para a análise de sistema de medição (MSA): Estudo aplicado em uma empresa fornecedora de produtos para a indústria automotiva. In: XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Salvador, BA, 2009.

DOSHI, J. A.; DESAI, D. A. Measurement system analysis for continuous quality improvement in automobile SMEs: multiple case study. **Total Quality Management & Business Excellence**, vol. 30, n. 6, 2019. doi:10.1080/14783363.2017.1324289

FERREIRA, F. A. M.; OLIVA, J. V.; PEREZ, A. M. S. Evaluation of the performance of coordinate measuring machines in the industry, using calibrated artefacts. **Procedia Engineering**, v.63, 2013. doi:10.1016/j.proeng.2013.08.232

HAJIPOUR, V.; KAZEMI, A.; MOUSAVI, S. M. A fuzzy expert system to increase accuracy and precision in measurement system analysis. **Measurement**, vol. 42, 2013. doi: 10.1016/j.measurement.2013.04.015

ITO, S.; KIKUCHI, H.; CHEN, Y.; SHIMIZU, Y.; GAO, W.; TAKAHASHI, K.; KANAYAMA, T.; ARAKAWA, K.; HAYASHI, A. A Micro-Coordinate Measurement Machine (CMM) for large-scale dimensional measurement of micro-slits. **Applied Sciences**, v. 156, n. 6, 2016. doi:10.3390/app6050156

KAZEMI, A.; HALEH, H.; HAJIPOUR, V.; RAHMATI, S. H. A. Developing a Method for increasing accuracy and precision in measurement system analysis: a fuzzy approach. **Journal of Industrial Engineering**, vol. 6, 2010.

KLAPUT, P.; VYKYDAL, D.; TOSENOVSKY, F.; HALFAROVA, P.; PLURA, J. Problems of application of measurement system analysis (MSA) in metallurgical production. **Metalurgija**, vol 55, n. 3, 2016.

LINCK, C. **Fundamentos de metrologia**. 2 ed. Porto Alegre: SAGAH, 2017.

LIRA, F. A. **Metrologia dimensional: técnicas de medição e instrumento para controle e fabricação industrial**. São Paulo: Érica, 2015.

NÓBREGA, L. H. M. S.; SILVA, E. S.; SILVA, V. N.; FILHO, M. S.; FURTADO, F. H.; SILVA, R. F. A. Análise metrológica de um protótipo de apalpador tipo touch trigger para medição por coordenadas. In: 3º Congresso Internacional de Metrologia Mecânica, Gramado, RS, 2014.

PAN, J.; LI, C.; OU, S. Determining the optimal allocation of parameters for multivariate measurement system analysis. **Expert Systems with Applications**, vol. 42, n. 20, 2015. doi: 10.1016/j.eswa.2015.04.038

Portal Action. **ANOVA**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/anova>>. Acesso em: 04 de agosto de 2019.

SÁ, L. A. N. D. Estudo da repetitividade na medição por coordenadas. In: 16º Congresso de Iniciação Científica da UNIMEP, Piracicaba, 2008.

SAIKAEW, C. Na implementation of measurement system analysis for assessment of machine and part variations in turning operation. **Measurement**, vol. 118, 2018. doi: doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.008

SOUZA, A. R.; VIEIRA, G. S.; MEDEIROS, A. T.; BUENO, M. A. Monitoramento preditivo da estabilidade metrológica de máquinas de medir por coordenadas. In: 3º Congresso Internacional de Metrologia Mecânica, Gramado, RS, 2014.

SUTARMAN; HARYONOEDIHERMAWAN; AULAWI, D. F. Applications Use of Coordinate Measuring Machine (CMM) for Measurement Products Multi Function at PT. Mepopuspitekserpong, Tangerang. **Journal of Research in Mechanical Engineering**. Nairobi, Vol. 3, Mar. 2017.

VIEIRA, G. S.; SOUSA, A. R. Dispositivos para verificação da exatidão de medição volumétrica de máquinas de medir por coordenadas. In: **SEPEI 2014** – 4º Seminário de Pesquisa, Extensão e Inovação do IFSC, Gaspar, SC, 2014.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996.

YANG, J.; LI, G.; WU, B.; GONG, J.; WANG, J.; ZHANG, M. Efficient methods for evaluating task-specific uncertainty in laser-tracking measurement. **MAPAN-Journal of Metrology Society of India**, vol. 30, n. 2, 2015. doi:10.1007/s12647-014-0126-9.

**Como Referenciar este Artigo, conforme ABNT:**

ARENHART, R. S; PIZZOLATO, M. Análise de Sistemas de Medição em uma Máquina de Medir por Coordenadas. **Rev. FSA**, Teresina, v.17, n. 6, art. 10, p. 182-203, jun. 2020.

| Contribuição dos Autores                                     | R. S.<br>Arenhart | M.<br>Pizzolato |
|--|-------------------|-----------------|
| 1) concepção e planejamento.                                 | X                 | X               |
| 2) análise e interpretação dos dados.                        | X                 | X               |
| 3) elaboração do rascunho ou na revisão crítica do conteúdo. | X                 | X               |
| 4) participação na aprovação da versão final do manuscrito.  | X                 | X               |