

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA

RUDDNEY APARECIDO CARDOSO DE OLIVEIRA

**Análise da Confiabilidade de Sistemas de Medição no Controle Dimensional de
Peças Produzidas por Manufatura Aditiva, Corte a Laser e Usinagem CNC**

FLORIANÓPOLIS

2026

Ruddney Aparecido Cardoso de Oliveira

Análise da Confiabilidade de Sistemas de Medição no Controle Dimensional de
Peças Produzidas por Manufatura Aditiva, Corte a Laser e Usinagem CNC

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, para obtenção do título de
Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Eng. André Roberto de Sousa

Florianópolis

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Oliveira, Ruddney Aparecido Cardoso de
Análise da Confiabilidade de Sistemas de Medição no
Controle Dimensional de Peças Produzidas por Manufatura
Aditiva, Corte a Laser e Usinagem CNC / Ruddney Aparecido
Cardoso de Oliveira; orientação de André Roberto de Sousa.
– Florianópolis, SC, 2026.

63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto Federal de
Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em
Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal
Mecânica.

Inclui Referências.

1. Metrologia. 2. MSA. 3. R&R. 4. Manufatura Avançada.
5. Erro de Medição. I. Sousa, André Roberto de. II.
Instituto Federal de Santa Catarina. III. Análise da
Confiabilidade de Sistemas de Medição no Controle
Dimensional de Peças Produzidas por Manufatura Aditiva,
Corte a Laser e Usinagem CNC.

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO NO CONTROLE
DIMENSIONAL DE PEÇAS PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA, CORTE
A LASER E USINAGEM CNC**

RUDDNEY APARECIDO CARDOSO DE OLIVEIRA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Mecatrônico em 2026 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 07 de julho de 2026.

Banca Examinadora:

André Roberto de Sousa, Dr. Eng.

Luiz Fernando Segalin de Andrade, Dr. Eng.

Maurício Edgar Stivanello, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a minha família, todos foram extremamente imprescindíveis para mim nesta jornada.

Em especial, agradeço ao meu pai, Reinaldo, por sempre estar presente em cada obstáculo.

A minha mãe, Ivani, pelo apoio incondicional e por todo o amor.

A minha avó, Jovência, por toda confiança e cuidado.

A minha namorada, Mariana, por todo amor e paciência.

Aos meus avós adotivos Lourival e Leonida, agradeço pelo acolhimento em sua família, todo o suporte e apoio ao longo desses anos.

Sou grato aos amigos que estiveram comigo ao longo da graduação, em especial ao Rodrigo com quem sempre pude contar.

Por fim, quero agradecer a todos os meus professores que foram os ombros aos quais pude me apoiar para enxergar tão longe.

Agradeço, em especial, o meu orientador, André de Sousa, que me ajudou muito para a realização deste trabalho, me norteando em cada etapa.

Ao professor Luiz Segalin que me apoiou e ensinou muito ao longo de minha iniciação científica e na reta final da graduação.

Ao professor Maurício Stivanello agradeço por toda a contribuição neste trabalho e em minha trajetória.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise dos sistemas de medição empregados no controle dimensional de peças produzidas por manufatura aditiva, corte a laser e usinagem por Controle Numérico Computadorizado (CNC). Para isso, aplicou-se a metodologia *Measurement System Analysis* (MSA) do *Automotive Industry Action Group* (AIAG), empregando um delineamento experimental composto por três operadores distintos e cinco amostras de cada processo de fabricação, sendo que cada amostra foi medida cinco vezes por cada operador. Para tanto, realizou-se uma análise quantitativa, por meio dos parâmetros de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R), entre três sistemas de medição aplicados ao controle de diâmetros: paquímetro digital, braço articulado de medição e máquina de medição por coordenadas (MMC) CNC. Os resultados R&R indicaram que todos os sistemas de medição apresentaram exatidão metrológica satisfatória. O processo de torneamento CNC apresentou variabilidade aceitável em todos os cenários. Já nas peças obtidas por corte a laser e manufatura aditiva, os erros significativos de circularidade inflaram os índices %R&RTol no paquímetro e no braço articulado, evidenciando que a variação de posicionamento manual do operador potencializa o erro de medição. Conclui-se que apesar de o processo automatizado via MMC CNC ser o único capaz de mitigar as variações geométricas, a metodologia MSA demonstra que a adequação de um sistema de medição não deve ser avaliada apenas pela sua exatidão intrínseca, mas sobretudo pela sua capacidade de atender aos requisitos específicos de cada aplicação.

Palavras-chave: Metrologia. MSA. R&R. Manufatura Avançada. Erro de Medição.

ABSTRACT

This work aimed to perform an analysis of measurement systems employed in the dimensional control of parts produced by additive manufacturing, laser cutting, and CNC machining. To this end, the AIAG MSA methodology was applied, employing an experimental design composed of three distinct operators and five samples from each manufacturing process, with each sample being measured five times by each operator. For this purpose, a quantitative analysis was carried out using Repeatability and Reproducibility (R&R) parameters among three measurement systems applied to diameter control: a digital caliper, an articulated measurement arm, and a CNC coordinate measuring machine (CMM). The R&R results indicated that all measurement systems presented satisfactory metrological accuracy. The CNC turning process showed acceptable variability across all scenarios. Conversely, for parts obtained by laser cutting and additive manufacturing, significant circularity errors inflated the %R&RTol indices in both the caliper and the articulated arm, demonstrating that the operator's manual positioning variation amplifies the measurement error. It is concluded that although the automated process via CNC CMM is the only one capable of mitigating geometric variations, the MSA methodology demonstrates that the adequacy of a measurement system should not be evaluated solely by its intrinsic accuracy, but above all by its capacity to meet the specific requirements of each application.

Keywords: Metrology. MSA. R&R. Advanced Manufacturing. Measurement Error.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIAG	Automotive Industry Action Group
ANOVA	Análise de variância
CNC	Controle Numérico Computadorizado
FDM	Fused Deposition Modeling
IFSC	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas
MSA	Measurement System Analysis
NDC	Número de Categorias Distintas
R&R	Repetibilidade e Reprodutibilidade
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
%R&R	Variação Total do Processo
VE	Repetibilidade
VO	Reprodutibilidade
VP	Variação do Processo
VT	Variação Total

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	10
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos	13
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 VARIABILIDADE DIMENSIONAL DOS PROCESSOS DE MANUFATURA ...	15
2.2 AÇÕES DE GARANTIA DA QUALIDADE DIMENSIONAL NA MANUFATURA SERIADA.....	15
2.3 REQUISITOS DAS MEDIÇÕES EMPREGADAS EM CONTROLE DE PRODUTO E CONTROLE DE PROCESSO	18
2.4 AS INCERTEZAS DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO	19
2.5 O GUIA MSA DA AIAG PARA ANÁLISE DE PROCESSOS DE MEDIÇÃO	20
2.6 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS AVALIADOS EM UMA ANÁLISE EMPREGADO O MSA	22
2.6.1 Tendência.....	22
2.6.2 Linearidade	23
2.6.3 Estabilidade	24
2.6.4 Repetibilidade.....	24
2.6.5 Reprodutibilidade.....	25
2.7 O PARÂMETRO R&R COMO REQUISITO DE APROVAÇÃO DE UM PROCESSO DE MEDIÇÃO	25
2.7.1 O R&R como indicador de conformidade para controle de produto	28
2.7.2 O R&R como indicador de conformidade para controle de processo.....	29

2.7.3 O parâmetro NDC como indicador de capacidade de discriminação do sistema de medição.....	30
3 PLANEJAMENTO DO ESTUDO	32
3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	32
3.2 PEÇAS E PROCESSOS DE MANUFATURA UTILIZADOS	34
3.3 PROCESSOS DE MEDIÇÃO AVALIADOS	39
3.3.1 Medição manual com braço articulado de medição.....	39
3.3.2 Medição automática com máquina de medição por coordenadas CNC..	40
3.3.3 Medição manual com paquímetro.....	41
3.4 SOFTWARE DE ANÁLISE EMPREGADO	42
4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS	44
4.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS	44
4.2 RESULTADOS OBTIDOS EM MEDIÇÕES COM O PAQUÍMETRO	44
4.3 RESULTADOS OBTIDOS NO PROCESSO DE MEDIÇÃO COM O BRAÇO DE MEDIÇÃO	49
4.4 RESULTADOS OBTIDOS NO PROCESSO DE MEDIÇÃO COM A MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS CNC.....	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

O advento da indústria 4.0 e a necessidade da adoção de tecnologias de manufatura avançada, como a manufatura aditiva, o corte a *laser* e a usinagem por Controle Numérico Computadorizado (CNC), ampliaram a demanda por elevados níveis de precisão e confiabilidade no controle dimensional de peças. Em ambientes industriais cada vez mais competitivos, a qualidade das medições torna-se um fator crítico, uma vez que decisões relacionadas à aceitação ou rejeição de produtos, bem como ao controle de processos, dependem diretamente da confiabilidade dos sistemas de medição utilizados (Montgomery, 2019). Entre as principais áreas associadas a essas mudanças estão a resolução de barreiras metrológicas relacionadas a medidas de grandezas multidimensionais, a garantia da confiabilidade dos resultados de mensuração e a otimização dos fluxos de dados metrológicos, considerando o crescente número de instrumentos de medição (Alonso *et al.*, 2019).

Para que os processos de medição possam controlar processos de produção é necessário que eles próprios estejam sob controle e é necessário empregar métodos de análise aos próprios processos de medição.

Uma das abordagens mais tradicionais e relevantes quanto à análise de sistemas de medição foi a criação do Guia *Measurement Systems Analysis* (MSA), desenvolvido pelo *Automotive Industry Action Group* (AIAG). Este manual fornece direções para avaliação da qualidade e da capacidade de um sistema de medição.

Em vista disso, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) se propõe a analisar a confiabilidade de três métodos de medição utilizados no controle dimensional de peças produzidas por manufatura aditiva, corte a laser e usinagem CNC. Para isso, foi empregada a metodologia MSA em medições realizadas com um paquímetro, com um braço de medição e com uma máquina de medição por coordenadas a fim de qualificar e quantificar seus erros e suas causas pela ótica deste manual.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Conforme a norma ISO 9001:2015 (ABNT, 2015), as organizações devem assegurar que os recursos de monitoramento e medição sejam apropriados para garantir resultados válidos e confiáveis, incluindo requisitos relacionados à calibração,

rastreabilidade e adequação ao uso pretendido. Nesse contexto, a validação dos sistemas de medição deixa de ser apenas uma boa prática e passa a constituir um requisito formal de sistemas de gestão da qualidade.

Entretanto, é comum que sistemas de medição sejam utilizados sem a devida validação metrológica, assumindo-se implicitamente sua adequação. Essa prática pode levar a interpretações incorretas dos dados, comprometendo a qualidade do produto final e resultando em retrabalho, desperdícios e custos adicionais. Nesse sentido, torna-se fundamental distinguir a variabilidade inerente ao processo produtivo daquela introduzida pelo próprio sistema de medição, conceito amplamente abordado no manual MSA (AIAG, 2010), que estabelece a separação entre variação de peça (*part variation*) e variação do sistema de medição (*measurement variation*).

A metodologia MSA constitui uma abordagem estruturada e amplamente reconhecida para a avaliação da capacidade dos sistemas de medição. Por meio de estudos como a análise de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R), é possível quantificar a contribuição do sistema de medição na variação total observada (AIAG, 2010), permitindo uma análise mais confiável dos dados e apoiando decisões mais assertivas no controle da qualidade. Conforme destacado por Pyzdek e Keller (2014), a análise R&R é imprescindível para garantir que os sistemas de medição sejam capazes de distinguir diferenças reais entre peças, evitando decisões baseadas em variações artificiais do sistema.

Adicionalmente, normas específicas da área de metrologia dimensional reforçam a importância da confiabilidade metrológica. A ISO 14253-1:2017 (ISO, 2017) estabelece regras para a tomada de decisão em inspeções, considerando a incerteza de medição e introduzindo conceitos como zonas de aceitação e rejeição com base em tolerâncias especificadas. De maneira complementar, a norma ISO/IEC 17025:2017 (ISO, 2017) estabelece requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração, incluindo a necessidade de avaliação da incerteza de medição, rastreabilidade metrológica e validação de métodos, aspectos diretamente relacionados à confiabilidade dos sistemas de medição analisados neste trabalho.

A relevância deste estudo reside na integração da análise de sistemas de medição aplicada a diferentes processos de manufatura, propiciando uma avaliação comparativa em contextos produtivos distintos. Embora esses processos sejam amplamente utilizados na indústria moderna, ainda existem lacunas na literatura

quanto à análise sistemática da confiabilidade dos sistemas de medição associados a eles, especialmente sob a ótica da metodologia MSA. Um dos estudos disponíveis é o de Kimura (2025) que avaliou o uso da metodologia MSA no micrômetro e no paquímetro como instrumentos de medida no setor de usinagem de uma empresa que utiliza fresadora e tornos mecânicos, mas sem integrar os sistemas de usinagem moderna e os instrumentos de medida por coordenada.

Além disso, ao propor recomendações técnicas com base nos resultados obtidos, este estudo contribui diretamente para a melhoria dos sistemas de medição e, conseqüentemente, para o aumento da confiabilidade no controle dimensional. Isso impacta positivamente a qualidade dos produtos, a eficiência dos processos produtivos e a redução de custos operacionais, conforme os princípios clássicos da qualidade descritos por Juran e Godfrey (1999), que relacionam diretamente a qualidade da medição à qualidade do produto final.

Em se tratando do contexto acadêmico, o presente trabalho reforça a importância da metrologia como elemento essencial na engenharia de manufatura, especialmente diante da crescente complexidade dos processos produtivos modernos. Já do ponto de vista industrial, fornece subsídios para a tomada de decisão baseada em dados confiáveis, contribuindo para o aumento da competitividade e da conformidade com requisitos normativos e de qualidade.

Dessa forma, este trabalho justifica-se pela necessidade de garantir a confiabilidade dos sistemas de medição no controle da qualidade, reduzindo incertezas e promovendo maior robustez nos processos de tomada de decisão, em conformidade com práticas consolidadas da engenharia da qualidade e requisitos normativos internacionais da metrologia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este TCC tem por objetivo geral analisar a confiabilidade de sistemas de medição empregados no controle dimensional de peças produzidas por manufatura aditiva, corte a *laser* e usinagem CNC, por meio da aplicação da metodologia MSA do AIAG, verificando a adequação metrológica dos sistemas de medição no suporte às decisões de controle de produto e controle de processo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar e caracterizar os sistemas de medição utilizados no controle dimensional das peças produzidas por manufatura aditiva, corte a *laser* e usinagem CNC.
- Estudar o guia MSA de análise de sistemas de medição e obter amostras dos processos de manufatura a serem estudados.
- Planejar e executar estudos de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R), conforme as diretrizes do guia AIAG MSA.
- Processar os resultados dos experimentos em software estatístico para a determinação dos parâmetros dos sistemas de medição.
- Determinar a porcentagem de variação atribuída ao sistema de medição em relação à variação total do processo.
- Verificar a adequação dos sistemas de medição para suporte às decisões de aceitação ou rejeição de produto e controle de processo.
- Propor recomendações técnicas para melhoria dos sistemas de medição, quando identificadas limitações de desempenho.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Nesta primeira seção são apresentadas a contextualização do tema e a delimitação do problema de pesquisa, bem como seu objetivo geral, objetivos específicos e a justificativa da escolha do tema.

Na segunda seção, está a fundamentação teórica que norteia este trabalho. Iniciando pela discussão do conceito de variabilidade dimensional em processos de manufatura. Em seguida delimita-se as formas de garantir a qualidade dimensional em processos seriados. Posteriormente são definidos os requisitos para o controle de processo e produto e apresenta-se a metodologia MSA. Por fim, são demonstrados os parâmetros estatísticos utilizados na análise MSA e as etapas para sua qualificação.

Já a terceira seção, trata da metodologia e a delineação do estudo, compreendendo o planejamento dos ensaios, as peças e processos de manufatura utilizados, os processos de medição avaliados e o software de análise empregado.

Por sua vez, na quarta seção, os resultados são relatados e discutidos criticamente empregando os parâmetros estatísticos e conceitos da doutrina MSA.

Por fim, na quinta seção são apresentadas as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros, sintetizando as conclusões obtidas face aos objetivos propostos inicialmente e destacando as principais contribuições deste trabalho para a área de manufatura automatizada por meio da metrologia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 VARIABILIDADE DIMENSIONAL DOS PROCESSOS DE MANUFATURA

Qualquer processo de manufatura está sujeito a erros que provocam variações nas dimensões das peças produzidas, podendo causar problemas de qualidade que afetam diretamente a funcionalidade, a montagem e a confiabilidade da produção.

Estes erros podem ocorrer devido a fontes de variação oriundas das máquinas, do método de fabricação, do material, do ambiente, do sistema de medição e do fator humano. Por consequência, as principais complicações destes defeitos são a perda de intercambialidade entre os componentes que aumentam o retrabalho e o refugo. A literatura no contexto de processos de fabricação destaca a deterioração de ferramentas, vibrações, variações térmicas e erros de posicionamento como os principais fatores causadores de erros (Groover, 2016; Kalpakjian; Schmid, 2013). Além disso, variações nas propriedades do material, como tensões residuais e dilatação térmica, também contribuem significativamente para os desvios dimensionais (Callister; Rethwisch, 2020).

2.2 AÇÕES DE GARANTIA DA QUALIDADE DIMENSIONAL NA MANUFATURA SERIADA

Para assegurar que as peças sejam produzidas conforme as especificações de projeto, a produção seriada depende de processos de medição confiáveis, empregados tanto no controle de produto quanto no controle de processo. Essa necessidade é reforçada pelos requisitos de sistemas de gestão da qualidade, que estabelecem a obrigatoriedade do controle e da confiabilidade dos processos de medição (ISO 9001, 2015). Nesse contexto, conforme discutido por Albertazzi e Sousa (2008), ao interpretarem os requisitos da norma ISO 9001, torna-se fundamental que a incerteza da medição nas fases de inspeção e testes deve ser conhecida e compatível com as exigências de confiabilidade determinadas.

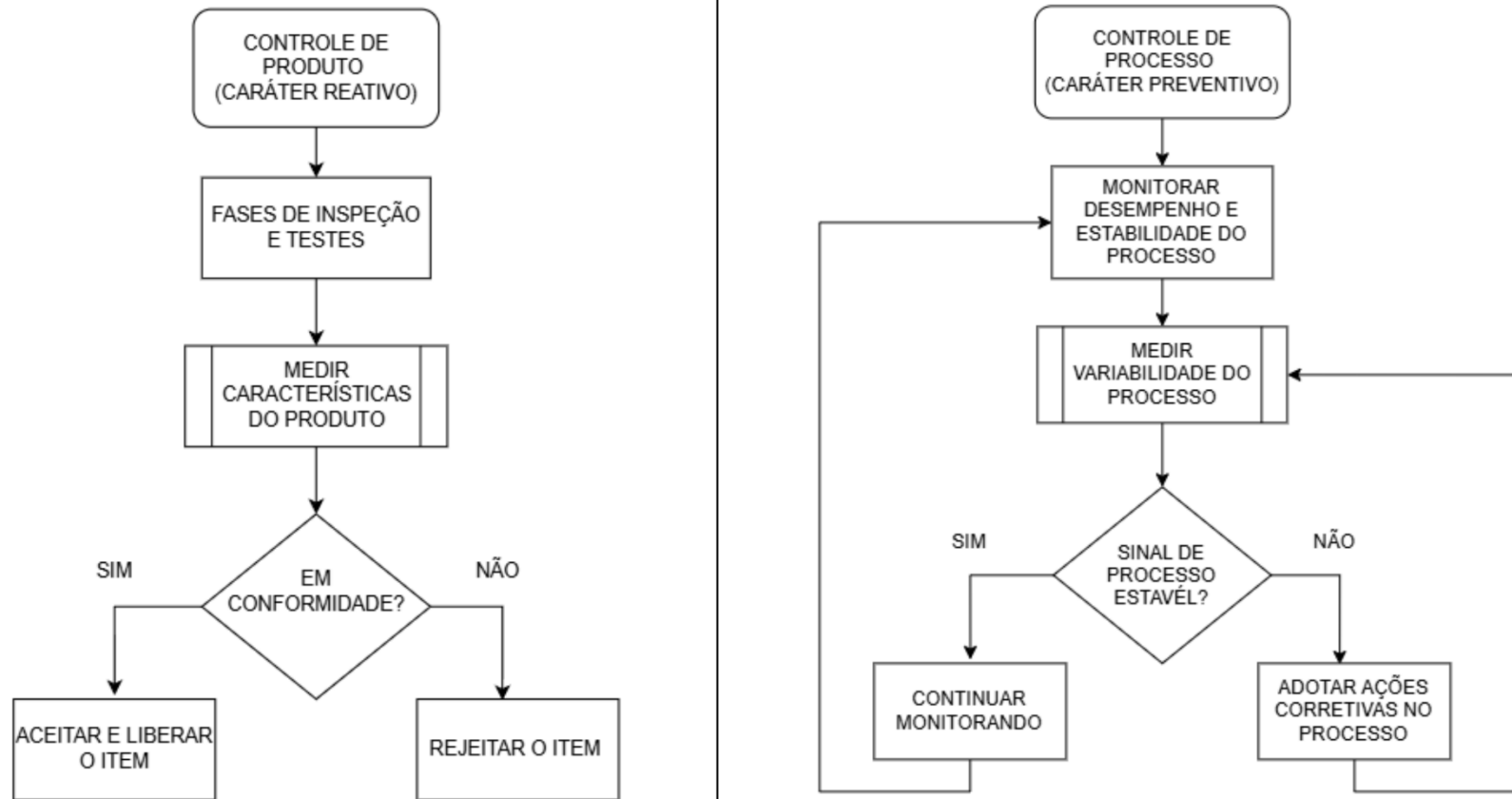
O controle de produto tem como objetivo decidir se o produto está ou não em conformidade com as metas de qualidade estabelecidas (Juran e Godfrey, 1999). Dessa forma, trata-se de uma atividade voltada à decisão de aceitação ou rejeição do

item produzido, garantindo que apenas peças conformes sejam liberadas para as etapas subsequentes do processo produtivo ou para o cliente (ISO 14253-1, 2017).

Já o controle de processo tem como finalidade monitorar o desempenho e a estabilidade do processo de fabricação ao longo do tempo. Nesse caso, as medições são utilizadas para identificar tendências, desvios sistemáticos ou aumento de variabilidade, permitindo a adoção de ações corretivas antes que sejam geradas não conformidades. Assim, enquanto o controle de produto atua de forma reativa, o controle de processo possui caráter preventivo, contribuindo para a manutenção da capacidade e da confiabilidade do processo produtivo (Albertazzi e Sousa, 2008).

A figura 1 ilustra estes dois conceitos:

Figura 1 - Fluxograma comparativo do controle de produto e controle de processo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

2.3 REQUISITOS DAS MEDIÇÕES EMPREGADAS EM CONTROLE DE PRODUTO E CONTROLE DE PROCESSO

No controle de produto, os sistemas de medição devem apresentar exatidão compatível com as tolerâncias especificadas no desenho técnico. Como prática amplamente adotada na indústria, recomenda-se que a incerteza ou a variação do sistema de medição seja significativamente inferior à faixa de tolerância, idealmente da ordem de 10:1 em relação à tolerância especificada (AIAG, 2010). Essa relação contribui para reduzir a probabilidade de decisões incorretas baseadas em resultados de medição.

Quando o desempenho do sistema de medição é inadequado em relação à tolerância, aumenta-se o risco de classificações equivocadas, tais como a reprovação de peças conformes ou a aprovação de peças não conformes. Esse tipo de erro está diretamente relacionado às regras de decisão baseadas em medições e às incertezas associadas, conforme discutido na norma ISO 14253-1 de 2017, que trata da verificação de conformidade considerando a incerteza de medição. Portanto, a compatibilidade entre a capacidade do sistema de medição e os requisitos dimensionais do produto é condição essencial para garantir decisões confiáveis no controle de qualidade (Montgomery, 2013).

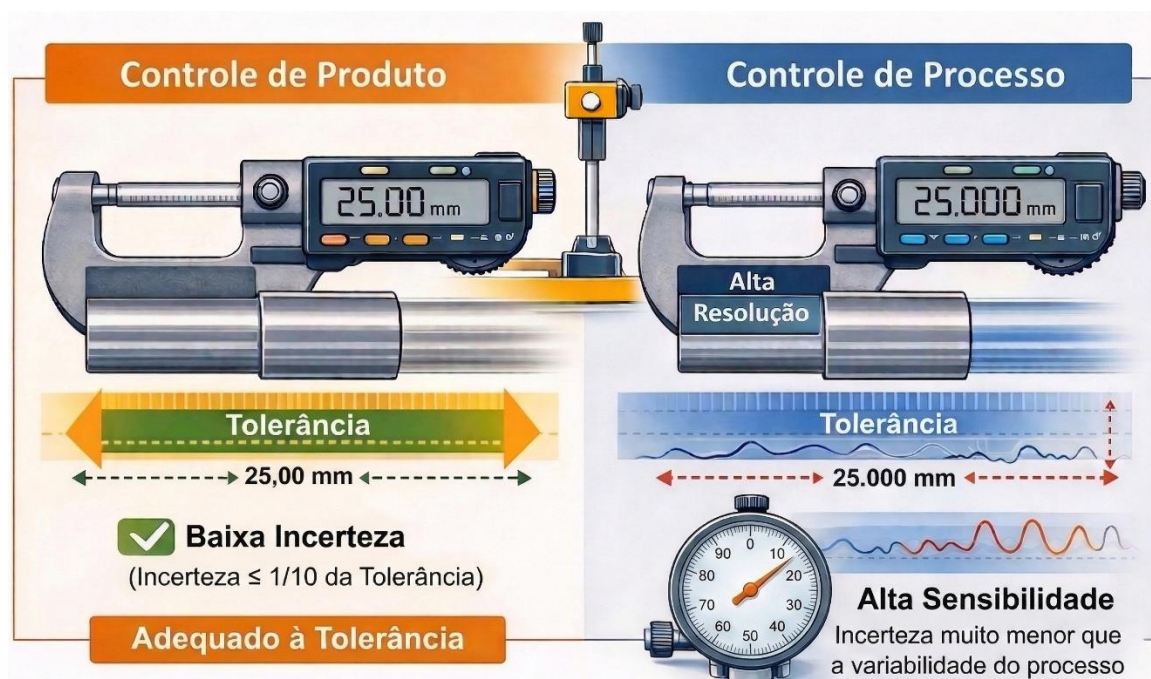
Já no controle de processo, os requisitos de exatidão dos sistemas de medição tendem a ser mais rigorosos, uma vez que é necessário detectar pequenas variações nas características dimensionais das peças, capazes de indicar alterações no comportamento do processo produtivo. Nesse contexto, as medições não têm como finalidade principal a simples aprovação ou reprovação de peças, mas sim o monitoramento contínuo do processo, permitindo a identificação de tendências, desvios sistemáticos ou aumento da variabilidade. Essas informações viabilizam a implementação de ações corretivas de caráter preventivo, antes que ocorram não conformidades significativas (Juran e Godfrey, 1999).

Nesse cenário, a relação entre a variabilidade do processo de manufatura e o desempenho do sistema de medição torna-se fundamental. Processos produtivos com maior variabilidade podem admitir sistemas de medição com menor nível de exatidão relativa, pois as variações são mais facilmente detectáveis. Em contrapartida, processos de alta precisão, caracterizados por tolerâncias estreitas e baixa variabilidade natural, exigem sistemas de medição mais exatos, com maior resolução

e menor incerteza, para que pequenas variações possam ser identificadas e interpretadas de forma confiável. Assim, a adequação do sistema de medição deve ser analisada sempre em função da variabilidade do processo e dos requisitos dimensionais estabelecidos (AIAG, 2010; Pyzdek e Keller, 2014).

A figura 2 ilustra essa diferença nos requisitos de exatidão das medições empregadas para controle de produtos e controle de processos:

Figura 2 – Requisitos de precisão do controle de produto e processo



Fonte: Imagem gerada com auxílio de inteligência artificial a partir de prompt elaborado pelo autor (2026)

2.4 AS INCERTEZAS DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO

Assim como nos processos de manufatura, existem imperfeições presentes nos processos de medição, que provocam erros e variabilidades nos resultados das medições empregadas para controles de produto e de processo. Na metrologia dimensional, as principais causas de erros são oriundas dos instrumentos, dos equipamentos, dos dispositivos, dos locais de medição, dos métodos utilizados e das condições do ambiente de medição. Estes erros podem provocar problemas nas ações de controle de produto e de processos de manufatura, pois a má qualidade das informações metrológicas implica diretamente em decisões relevantes para a indústria como a aprovação ou rejeição de um lote de produtos. Além disso, no

desenvolvimento de um novo projeto diversos parâmetros de tolerância dimensional e de especificações do material, tais quais a pureza do material, a resistência física, o comprimento, a dureza e o ângulo entre duas faces de uma peça são analisados a fim da otimização e adequação as necessidades do projeto (Toledo, 2013).

Por essa razão, é importante avaliar permanentemente os processos de medição por meios de métodos normalizados de ensaios e análises, de modo a atestar a sua adequação para serem empregados nas ações de controle de produto e de processo.

2.5 O GUIA MSA DA AIAG PARA ANÁLISE DE PROCESSOS DE MEDIÇÃO

O Guia MSA é uma diretriz desenvolvida pelas montadoras norte-americanas Ford, General Motors e Chrysler, reunidas no AIAG, com o objetivo de padronizar a avaliação dos sistemas de medição utilizados ao longo de toda a cadeia produtiva automotiva. Estruturado na forma de manual, o documento ganhou ampla aceitação e, atualmente, é adotado mundialmente como referência para análise da confiabilidade de sistemas de medição na indústria (AIAG, 2010).

De maneira geral, o objetivo do MSA é fornecer orientações para avaliar a qualidade e a capacidade de um sistema de medição em ser eficaz nas ações de controle de produto e controle de processo. Embora seus princípios possam ser aplicados a diferentes tipos de medição, o foco principal do manual está nos sistemas utilizados em ambientes industriais. Atualmente, o guia encontra-se em sua 4ª edição, publicada em 2010, que permanece como versão vigente (AIAG, 2010).

Figura 3 - Manual de referência MSA



1990: 1ª Edição
1995: 2ª Edição
2002: 3ª Edição
2010: 4ª Edição



Fonte: AIAG (2010)

No contexto do MSA, o sistema de medição é analisado de forma abrangente, considerando todos os fatores que podem influenciar o resultado obtido ao medir uma determinada característica. O objetivo é assegurar a integridade dos dados utilizados nas análises de produto e de processo, bem como compreender as implicações dos erros de medição nas decisões tomadas (AIAG, 2010).

Entre os elementos avaliados destacam-se:

- Equipamentos de medição;
- Métodos e procedimentos adotados;
- Operadores envolvidos;
- Condições ambientais;
- Dispositivos auxiliares e demais variáveis que possam impactar o resultado.

Como resultado de um estudo de MSA, podem ser obtidas informações relevantes para a tomada de decisão, tais como:

- Identificação da necessidade de melhoria no ambiente de medição;
- Necessidade de capacitação ou requalificação de operadores;
- Avaliação da necessidade de substituição do sistema de medição por outro de maior resolução ou exatidão;
- Comparação entre diferentes sistemas de medição;
- Definição de critérios de aceitação ou rejeição de um sistema;
- Identificação de sistemas inadequados para determinado uso;
- Entre outras aplicações voltadas à melhoria da confiabilidade metrológica.

Considerando que decisões relativas à aceitação de produtos e ao controle de processos produtivos dependem diretamente da confiabilidade dos dados de medição, torna-se fundamental verificar se os sistemas utilizados apresentam desempenho adequado frente às tolerâncias especificadas e à variabilidade dos processos analisados. Nesse contexto, a aplicação estruturada da metodologia MSA justifica-se como ferramenta para avaliar quantitativamente a contribuição do sistema de medição na variação observada, permitindo identificar possíveis limitações que possam comprometer a qualidade das decisões. Assim, o problema de pesquisa deste trabalho consiste em determinar se os sistemas de medição empregados nos

processos de manufatura aditiva, corte a *laser* e usinagem CNC são suficientemente confiáveis para suportar, de forma técnica e estatisticamente fundamentada, o controle de produto e o monitoramento do processo produtivo.

2.6 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS AVALIADOS EM UMA ANÁLISE EMPREGANDO O MSA

Um sistema de medição ideal seria aquele capaz de produzir, de forma consistente, apenas resultados verdadeiros sempre que aplicado. Nessa condição hipotética, cada medição corresponderia exatamente ao valor real da característica avaliada. Se o sistema fosse utilizado para medir um padrão devidamente calibrado, o resultado obtido seria sempre igual ao valor nominal certificado do padrão.

Um processo de medição com essas características apresentaria propriedades como erro sistemático nulo (tendência zero), variabilidade inexistente (repetibilidade e reprodutibilidade perfeitas) e estabilidade absoluta ao longo do tempo. Contudo, na prática, nenhum sistema de medição atende plenamente a essas condições ideais. Sempre existirão fontes de erro e variação associadas a fatores como equipamento, operador, método e ambiente (AIAG, 2010; Albertazzi e Sousa, 2008).

Diante dessa realidade, torna-se indispensável analisar as propriedades estatísticas dos sistemas de medição, de modo a quantificar suas limitações e verificar sua adequação aos requisitos dimensionais do produto e às necessidades de controle do processo produtivo. Somente por meio dessa avaliação sistemática é possível assegurar que as decisões tomadas com base nos dados de medição sejam tecnicamente confiáveis.

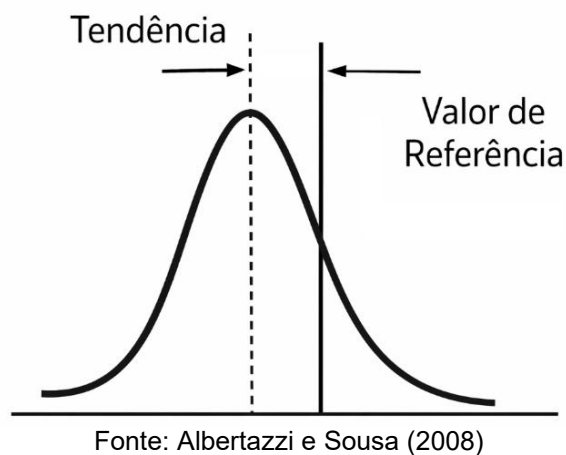
No guia MSA (AIAG, 2010) as seguintes propriedades estatísticas são analisadas:

2.6.1 Tendência

A tendência corresponde à diferença entre a média dos valores obtidos em um processo de medição e um valor de referência. Esse valor de referência pode ser proveniente de um padrão ou de uma peça previamente medida por um sistema de medição com incerteza significativamente menor, idealmente ao menos dez vezes

inferior à do sistema em avaliação (AIAG, 2010; Albertazzi e Sousa, 2008).

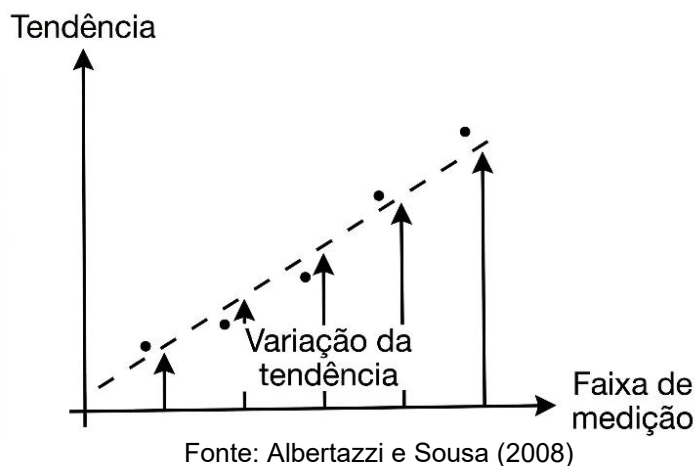
Figura 4 - Tendência



2.6.2 Linearidade

A linearidade, também conhecida como desvio linear da tendência, está associada à forma como varia a tendência em função do valor da indicação. Em um cenário ideal, a tendência de um processo de medição deve ser nula. No entanto, podem ocorrer situações em que a tendência, embora diferente de zero, permanece praticamente constante ao longo de toda a faixa de medição. Em outros casos, a tendência varia conforme o valor medido, podendo aumentar ou diminuir em função da indicação (AIAG, 2010; Albertazzi e Sousa, 2008).

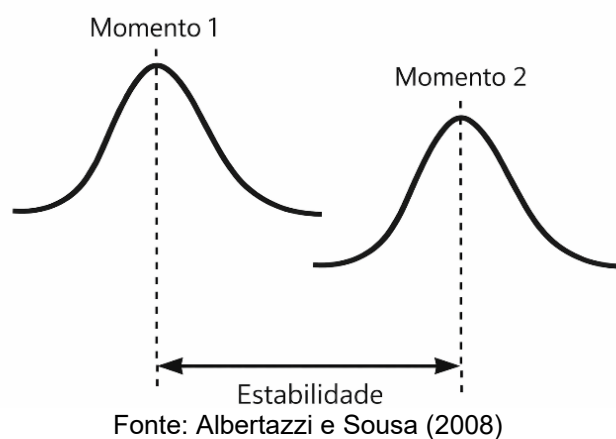
Figura 5 - Linearidade



2.6.3 Estabilidade

A estabilidade refere-se à constância das propriedades estatísticas de um sistema de medição ao longo do tempo. Na prática, ela representa a amplitude de variação da tendência durante um período determinado (AIAG, 2010; Albertazzi e Sousa, 2008).

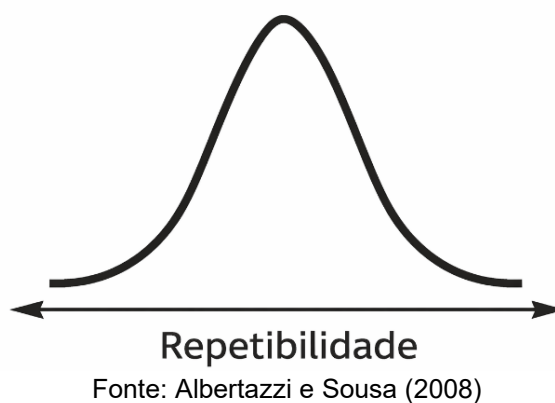
Figura 6 - Estabilidade



2.6.4 Repetibilidade

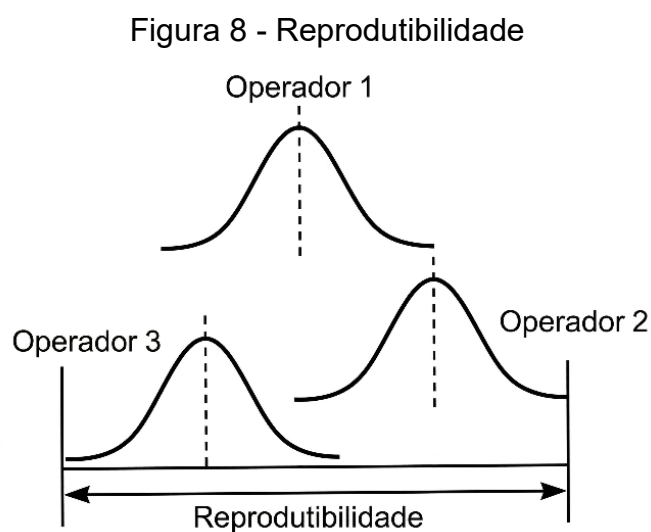
A repetibilidade define-se como a amplitude de variação esperada nos resultados de um processo de medição, desde que mantidas condições idênticas: o mesmo operador, o mesmo instrumento, o mesmo método e a mesma característica do produto, em um curto intervalo de tempo (AIAG, 2010; Albertazzi e Sousa, 2008).

Figura 7 - Repetibilidade



2.6.5 Reprodutibilidade

A reprodutibilidade refere-se ao intervalo em que se espera que as medições de um processo se situem quando realizadas por diferentes operadores, avaliando a mesma característica de um produto sob as condições operacionais usuais do processo de medição (AIAG, 2010; Albertazzi e Sousa, 2008).



Fonte: Albertazzi e Sousa (2008)

2.7 O PARÂMETRO R&R COMO REQUISITO DE APROVAÇÃO DE UM PROCESSO DE MEDIÇÃO

O parâmetro R&R é o mais empregado na indústria para avaliar se a variabilidade dos processos de medição está adequada para que este seja empregado no controle de produto e no controle de processo. No contexto da metodologia MSA, o estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade fornece uma abordagem quantitativa para avaliar a capacidade de um sistema de medição. Ou seja, o R&R representa a parcela da variabilidade total observada que é atribuída ao próprio sistema de medição, sendo composto por dois elementos principais: a repetibilidade, que corresponde à variação obtida quando um mesmo operador mede a mesma peça sob as mesmas condições, e a reprodutibilidade, que se refere à variação decorrente de diferentes operadores medindo a mesma característica. Dessa forma, o parâmetro permite decompor a variabilidade total em componentes associados ao processo produtivo e ao sistema de medição, possibilitando uma análise mais precisa das fontes

de erro (AIAG, 2010).

A importância do parâmetro R&R fundamenta-se no fato de que decisões baseadas em medições só são confiáveis se a variabilidade introduzida pelo sistema de medição for suficientemente pequena em relação à variabilidade total do processo. Caso contrário, torna-se difícil distinguir se a variação observada é devida ao processo produtivo ou ao próprio sistema de medição, comprometendo a eficácia do controle estatístico e a confiabilidade das decisões de aceitação ou rejeição de produtos (Montgomery, 2013).

De acordo com as diretrizes do manual MSA, o critério mais utilizado para avaliar a adequação de um sistema de medição é a porcentagem de contribuição do R&R em relação à variação total do processo (%R&R). Em termos práticos, sistemas de medição com %R&R inferior a 10% são considerados aceitáveis, indicando que a maior parte da variabilidade observada é proveniente do processo produtivo. Valores entre 10% e 30% podem ser aceitáveis dependendo da aplicação, custo de melhoria e criticidade da característica medida, enquanto valores superiores a 30% indicam que o sistema de medição é inadequado e necessita de melhorias (AIAG, 2010; Pyzdek e Keller, 2014).

No contexto industrial, a utilização do R&R como requisito de aprovação de um processo de medição está diretamente relacionada à robustez dos sistemas de controle da qualidade. Um sistema de medição aprovado garante que as variações detectadas refletem efetivamente mudanças no processo produtivo, permitindo a aplicação eficaz de ferramentas como o Controle Estatístico de Processo (CEP). Por outro lado, sistemas de medição inadequados podem mascarar problemas reais ou gerar alarmes falsos, prejudicando a estabilidade do processo e aumentando custos operacionais (AIAG, 2010; Montgomery, 2013).

Para a obtenção deste parâmetro, é realizado um ensaio no qual amostras geradas por um processo de manufatura são medidas por diferentes pessoas, repetidas vezes, gerando uma tabela de dados que é processada empregando o método estatístico ANOVA (análise de variância) (Albertazzi e Sousa, 2008; Pyzdek e Keller, 2014). A figura 9 ilustra este procedimento ao apresentar a planilha de entrada de dados no Minitab, software estatístico especializado e amplamente utilizado na indústria para projetos de melhoria de processos. Nesta planilha as colunas de C1 a C4 contêm os dados no formato original e as colunas de C5 a C8 contêm os mesmos dados no formato preferencial do Minitab (Minitab, 2026).

Figura 9 – Exemplo de ensaio de R&R

	C1	C2	C3	C4	C5	C6-T	C7	C8
	Part	Reading1	Reading2	Inspector	StackedData	Subscripts	Operator	PartNum
1	1	111.9	112.3	1	111.9	Reading1	1	1
2	2	108.1	108.1	1	108.1	Reading1	1	2
3	3	124.9	124.6	1	124.9	Reading1	1	3
4	4	118.6	118.7	1	118.6	Reading1	1	4
5	5	130.0	130.7	1	130.0	Reading1	1	5
6	1	111.4	112.9	2	111.4	Reading1	2	1
7	2	107.7	108.4	2	107.7	Reading1	2	2
8	3	124.6	124.2	2	124.6	Reading1	2	3
9	4	120.0	119.3	2	120.0	Reading1	2	4
10	5	130.4	130.1	2	130.4	Reading1	2	5
11					112.3	Reading2	1	1
12					108.1	Reading2	1	2
13					124.6	Reading2	1	3
14					118.7	Reading2	1	4
15					130.7	Reading2	1	5
16					112.9	Reading2	2	1
17					108.4	Reading2	2	2
18					124.2	Reading2	2	3
19					119.3	Reading2	2	4
20					130.1	Reading2	2	5

Fonte: Pyzdek e Keller (2014, p. 337)

A partir do processamento destes dados, de acordo com guia MSA (AIAG, 2010) são calculados os seguintes parâmetros:

VE – Repetibilidade

Representa a variabilidade natural inerente ao processo de medição, sempre avaliada em condições de medição semelhantes. Envolve medições repetidas da mesma amostra, realizadas pelo mesmo operador utilizando um mesmo sistema de medição, e em um período curto. Dessa forma, a repetibilidade é a causa comum de variação para sucessivas medições realizadas em condições bem definidas.

VO – Reprodutibilidade

Representa a variação ocorrida no processo de medição quando um dos seus componentes é modificado. Normalmente se faz isso mudando o operador, e por isso a reprodutibilidade é conhecida como a variabilidade inerente ao operador.

Com a Repetibilidade e a Reprodutibilidade se calcula o parâmetro R&R através de:

$$R\&R = \sqrt{VE^2 + VO^2}$$

VP – Variação do Processo

Representa a dispersão natural do processo de fabricação das peças. Pode ser determinada por um estudo de capacidade do processo e no próprio estudo de R&R do processo de medição. Esta variação traz informações importantes sobre a parcela de variabilidade inerente atribuída ao processo de fabricação.

VT – Variação Total

É devida à ação combinada das variabilidades dos processos de manufatura e de medição. Corresponde à variação observada em medições seriadas onde a variação na dimensão das peças (VP) é combinada com a Repetibilidade (VE) e com a Reprodutibilidade (VO).

$$VT = \sqrt{VP^2 + R\&R^2}$$

2.7.1 O R&R como indicador de conformidade para controle de produto

Segundo o guia MSA (AIAG, 2010), para que um sistema de medição seja considerado adequado ao **controle de produto**, a razão percentual entre a variação do sistema de medição (R&R) e a faixa de tolerância especificada para a característica avaliada deve ser inferior a 10%. Esse critério indica que a contribuição da variabilidade do sistema de medição é pequena quando comparada à variação admissível da peça, reduzindo significativamente o risco de decisões incorretas de aceitação ou rejeição.

A relação percentual é calculada por meio da seguinte expressão:

$$\%R\&R_{TOL} = \frac{R\&R}{Tolerância / 6} \times 100$$

onde:

- **R&R** representa a variação total do sistema de medição (repetibilidade + reprodutibilidade);

- **Tolerância** corresponde à diferença entre o limite superior e o limite inferior especificados no desenho técnico.
- A tolerância é dividida por 6, pois na estatística industrial a variação inerente a um processo de fabricação ou aos erros de medição é modelada predominantemente pela Distribuição Normal (ou Distribuição Gaussiana). A dispersão desta distribuição é quantificada pelo desvio padrão (σ). Estatisticamente, observa-se que aproximadamente 99,73% de toda a variabilidade do processo está contida em um intervalo de $\pm 3\sigma$ em relação à média (sendo 3 para a direita da média e 3 para a esquerda), o que corresponde a uma amplitude total de 6σ . Consequentemente, na prática metrológica, adota-se a amplitude de 6σ como a métrica padrão para representar a variação total esperada de um sistema.

De acordo com o manual, valores entre 10% e 30% podem ser aceitáveis dependendo da aplicação e da criticidade da característica analisada, enquanto valores superiores a 30% indicam que o sistema de medição é inadequado para fins de controle de produto.

2.7.2 O R&R como indicador de conformidade para controle de processo

Para que um sistema de medição seja considerado adequado ao **controle de processo**, o método MSA (AIAG, 2010) compara a variação do sistema de medição (R&R) com a variação total observada no estudo (VT – Variação Total). Essa relação é expressa na forma percentual como:

$$\%R\&R_{VT} = \frac{R\&R}{VT} \times 100$$

onde:

- **R&R** representa a variação combinada de repetibilidade e reprodutibilidade do sistema de medição;
- **VT (Variação Total)** corresponde à variabilidade total observada no estudo, composta pela variação entre peças (VP) somada à variação

do sistema de medição.

No contexto do controle de processo, o critério mais importante é que a variação do sistema de medição seja pequena quando comparada à variação real do processo produtivo. De acordo com o guia MSA (AIAG, 2010), os seguintes limites são geralmente adotados:

- < 10% → sistema adequado;
- 10% a 30% → pode ser aceitável dependendo da aplicação;
- > 30% → sistema inadequado para monitoramento do processo.

Esse critério assegura que a maior parte da variabilidade observada seja devida ao próprio processo produtivo, e não ao sistema de medição, permitindo uma análise confiável da estabilidade e da capacidade do processo.

2.7.3 O parâmetro NDC como indicador de capacidade de discriminação do sistema de medição

A discriminação de um sistema de medição refere-se à sua capacidade de distinguir pequenas variações dimensionais entre peças.

Numericamente, a discriminação é estimada por meio do parâmetro **ndc** (*number of distinct categories*), que representa o número de categorias distintas que o sistema de medição consegue identificar dentro da variação total observada no estudo. Em termos práticos, o ndc indica quantas faixas de variação o sistema é capaz de diferenciar ao longo da variabilidade entre peças.

Matematicamente, o número de categorias distintas (**ndc – number of distinct categories**) é calculado a partir da relação entre a variação entre peças (VP) e a variação do sistema de medição (R&R), conforme a expressão:

$$ndc = 1,41 \times \frac{VP}{R\&R}$$

onde:

- **VP** representa a variação entre peças (desvio-padrão associado à variabilidade real do processo);

- **R&R** corresponde ao desvio-padrão combinado da repetibilidade e reprodutibilidade do sistema de medição;
- O fator **1,41** é um coeficiente estatístico utilizado para ajustar a relação entre as variabilidades envolvidas.

O resultado indica quantas categorias distintas o sistema de medição é capaz de diferenciar dentro da variação observada entre peças. De acordo com o manual MSA, recomenda-se que o valor de **ndc seja igual ou superior a 5**, sendo que valores maiores indicam melhor capacidade de discriminação do sistema de medição.

Neste trabalho, foram aplicados os estudos de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) e a análise do número de categorias distintas (ndc) como parâmetros estatísticos para verificar a adequação dos sistemas de medição ao controle dimensional de produto e ao monitoramento do processo produtivo, conforme as diretrizes estabelecidas pelo guia MSA.

3 PLANEJAMENTO DO ESTUDO

3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Assim como qualquer estudo técnico, a realização de um estudo de MSA deve ser precedida por planejamento e preparação cuidadosos. A ausência de um planejamento adequado pode resultar em retrabalho ou, de forma mais crítica, em conclusões equivocadas sobre a confiabilidade do sistema de medição. Portanto, algumas diretrizes foram observadas obedecendo recomendações do guia MSA (AIAG, 2010):

a) A estratégia do estudo deve ser definida de acordo com as características do sistema de medição. Em sistemas altamente automatizados, a influência do operador tende a ser desprezível; por outro lado, em medições que dependem de julgamento visual ou interpretação humana, a variabilidade associada ao operador pode ser significativa e deve ser considerada no planejamento.

b) Devem ser previamente estabelecidos o número de operadores, o tamanho da amostra, o número de repetições e o período de coleta de dados. Quanto maior a criticidade da característica dimensional analisada, maior deve ser o rigor do estudo, com aumento do número de amostras e repetições para elevar a confiabilidade estatística dos resultados.

c) Como o objetivo do MSA é avaliar o sistema de medição como um todo, os operadores selecionados devem ser aqueles que efetivamente realizam as medições no ambiente produtivo, utilizando os mesmos procedimentos adotados no cotidiano da empresa.

d) A seleção das amostras é fator crítico e deve estar alinhada ao propósito do estudo, à função do sistema de medição (controle de produto ou controle de processo) e à disponibilidade de peças que representem adequadamente o comportamento do processo produtivo.

e) Em sistemas utilizados para controle de processo, é essencial que as amostras representem a variabilidade real do processo. Uma estratégia comum consiste em coletar peças ao longo de diferentes dias ou lotes, de modo a capturar variações naturais do processo ao longo do tempo.

f) Para sistemas empregados exclusivamente no controle de produto (inspeção 100% ou decisão aprovado/reprovado), não é imprescindível que as

amostras representem toda a faixa de variação do processo, mas devem ser compatíveis com a faixa de tolerância especificada.

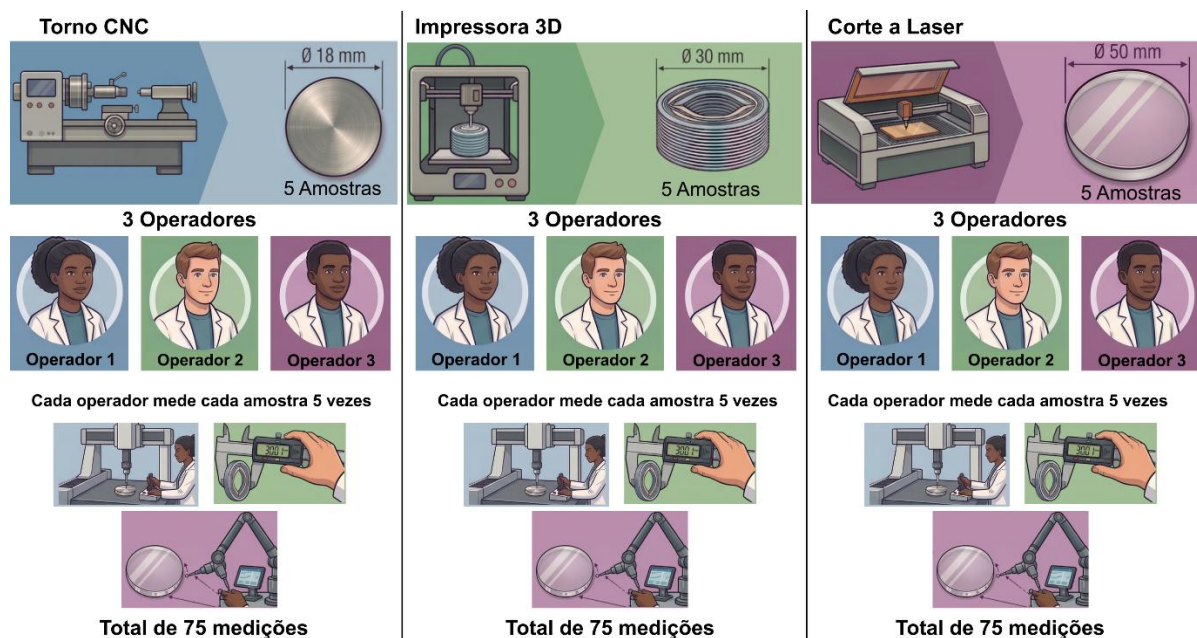
g) Todas as peças selecionadas para o estudo devem ser devidamente identificadas e numeradas, garantindo rastreabilidade e organização durante a execução dos testes.

h) O sistema de medição deve apresentar discriminação suficiente para detectar variações relevantes, sendo recomendável que sua resolução permita perceber, no mínimo, uma fração significativa (tradicionalmente 1/10) da variação esperada do processo ou da tolerância analisada.

i) Todas as pessoas envolvidas devem estar devidamente treinadas quanto ao roteiro experimental definido e aos procedimentos padronizados a serem seguidos durante o estudo.

No presente trabalho foram selecionadas 5 amostras dos processos de manufatura estudados, e 3 pessoas participaram dos ensaios, medindo cada amostra 5 vezes, conforme ilustrado na figura 10 a seguir.

Figura 10 - Arranjo experimental empregado



Fonte: Imagem gerada com auxílio de inteligência artificial a partir de prompt elaborado pelo autor (2026)

3.2 PEÇAS E PROCESSOS DE MANUFATURA UTILIZADOS

Para a realização dos estudos, definiu-se como modelo experimental uma peça do tipo eixo cilíndrico, sendo selecionada como característica dimensional de interesse o seu diâmetro externo. Na especificação dimensional estabelecida para essa característica, definiu-se um campo de tolerância de 0,2 mm. Essa escolha permitiu avaliar o desempenho dos sistemas de medição em uma condição representativa de aplicação industrial, considerando uma característica geométrica de fácil mensuração e amplamente utilizada em processos de manufatura.

Pelo fato de o trabalho usar como amostras peças já prontas, o diâmetro das mesmas não é o mesmo. A peça torneada tem um diâmetro nominal de 18 mm, a peça cortada a *laser* 50 mm e a peça impressa de 30 mm. Esta diferença no tamanho dos diâmetros, de até 32mm, com o mesmo campo de tolerância pode influenciar diretamente nos erros de medida, devido ao posicionamento da peça ao medir e a ergonomia do operador.

Na figura 11 são apresentados os desenhos das peças com a tolerância e na figura 12 estão indicadas as peças selecionadas para os estudos.

Figura 11 - Desenho da peça com a tolerância



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

As amostras utilizadas neste estudo foram fabricadas em diferentes materiais. A peça cortada a *laser* foi fabricada em acrílico reciclado, já a peça impressa foi inicialmente produzida em filamento composto, com concentração de 80% a 90% de liga metálica e de 10% a 20% de polímero (Gong *et al.*, 2018) e, após o processo de sinterização, a parte polimérica foi removida e tornou-se composta apenas por liga

metálica. Por sua vez, foi utilizado aço SAE 1020 para a peça usinada.

Figura 12 – Amostras selecionadas



Fonte: Acervo pessoal do autor (2026)

Estas peças foram geradas por processos de manufatura conforme descritos a seguir:

a) Corte a *laser* de peça acrílica

O corte a *laser* é um processo de fabricação não convencional, por separação térmica, no qual a remoção de material ocorre através da focalização de um feixe de luz de alta densidade energética sobre a superfície da peça (Steen, 1991).

Segundo Gerk e Lima (1997), a estrutura básica de um *laser* é formada pela reunião de três componentes fundamentais: um meio ativo, uma fonte de bombeamento energético (excitação do meio ativo) e um ressonador óptico. O primeiro é composto de elementos capazes de proporcionar uma inversão de população mediante uma excitação externa, proporcionando um ganho a partir da luz de fundo proveniente da radiação de corpo negro. Este meio pode ser constituído por um composto sólido, por misturas de fluidos (líquidos ou gases) ou até mesmo por um campo eletromagnético.

Dos diferentes tipos de meios ativos surgem as várias formas de tecnologia laser. Neste estudo, as peças utilizadas foram cortadas com *laser* de CO₂, tendo como meio ativo a mistura gasosa de dióxido de carbono (CO₂), gás nitrogênio (N₂) e gás

hélio (He), com comprimento de onda de emissão principal de 10,6 μm (Maillet, 1987). Na produção das amostras, foi empregada a máquina de corte a laser Automatisa DUA 1209, com potência de 150W, do laboratório de máquinas operatrizes do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFSC), mostrada na figura 13. Ela utiliza o método de fusão auxiliada por gás inerte, cuja energia fornecida pelo feixe leva apenas o material ao ponto de vaporização. Nesta máquina, o gás inerte, empregado para ejetar o material fundido para fora da região da aresta de corte, é o ar comprimido. Esta técnica é empregada em materiais não metálicos e favorece a produção de peças com geometria complexa, melhorando o acabamento das bordas de corte (Gerk e Lima, 1997).

Vale destacar que processo de corte à laser tem a tendência de produzir conicidade nas bordas das peças cortadas, este efeito é amplificado pela espessura da chapa utilizada onde as espessuras maiores tendem a apresentar um erro de perpendicularidade maior. Isto ocorre pois o feixe de luz gerado pelo equipamento não é um cilindro reto perfeito. Para que o laser atinja a densidade de energia necessária para vaporizar o material, ele precisa passar por lentes que o convergem para um ponto focal (a parte mais estreita e de maior energia do feixe). Acima e abaixo desse ponto focal, o feixe diverge, assumindo o formato de uma ampulheta. Ao cortar uma chapa, dependendo de onde o operador posiciona esse ponto focal (na superfície, no meio ou no fundo da chapa), as faces de entrada e saída do feixe terão larguras diferentes. Desta forma, a largura da fenda de corte (*kerf*) costuma ser maior no topo da chapa e menor no fundo, gerando um perfil em "V" (cônico).

Figura 13 - Automatisa DUA 1209



Fonte: Acervo pessoal do autor (2026)

b) Manufatura aditiva de peça metálica por deposição fundida de filamento composto

A impressão 3D por filamento metálico com sinterização é um processo de manufatura aditiva indireta no qual a peça é inicialmente produzida por extrusão de um filamento compósito, formado por partículas metálicas dispersas em um polímero ligante. Durante a impressão, o material é depositado camada a camada de forma semelhante ao processo convencional de Modelagem por Deposição Fundida, do inglês *Fused Deposition Modeling* (FDM), permitindo a fabricação de geometrias complexas com relativa simplicidade operacional e menor custo de equipamento quando comparado às tecnologias de fusão a laser (Gibson; Rosen; Stucker, 2021).

Após a etapa de impressão, a peça verde (*green part*) passa por um processo de remoção do ligante polimérico (*debinding*), seguido de sinterização em forno sob atmosfera controlada. Nessa etapa, as partículas metálicas se difundem e se consolidam, promovendo a densificação do material e conferindo à peça propriedades mecânicas próximas às de componentes metálicos convencionais (Gonzalez-Gutierrez *et al.*, 2018). Destaca-se que camadas mais finas (0,1 mm) deixam o acabamento superficial da peça melhor, mais uniforme e precisa. Enquanto camadas mais grossas aceleram a impressão, mas criam um "efeito escada" (degraus visíveis) que aumentam a rugosidade e dificultam a medição exata com instrumentos de contato.

Na produção das amostras foi empregado o sistema MetalFuse do IFSC, composto pela impressora 3D Forge 1, pelo forno de *debinding* D200-E e pelo forno de sinterização S200-C, mostrados na figura 14.

Figura 14 – Sistema MetalFuse



Fonte: Página da internet de Top3dshop¹

¹ Disponível em: <https://top3dshop.com/product/raise3d-d200-e-3d-printer>

c) Torneamento de Comando Numérico Computadorizado (CNC, do inglês, *Computer Numerical Control*)

O torneamento CNC realiza o processo de fabricação por meio da remoção de cavaco (usinagem), assim como é empregado no torno mecânico. Em ambas as máquinas, o movimento principal de corte é gerado pela rotação da peça bruta e a geometria final é obtida através do deslocamento coordenado da ferramenta de corte, que remove material de forma progressiva, até que as tolerâncias dimensionais e geométricas especificadas no projeto sejam atingidas (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

Diferente do torno mecânico, cujo processo não é automatizado, o torno CNC utiliza um comando numérico, o código G, que converte as instruções geométricas em movimentos precisos dos eixos da máquina (Groover, 2020). De acordo com Smid (2007), o código G é a linguagem de programação padronizada que coordena o movimento e a operação de máquinas CNC. Essa linguagem atua como uma interface de baixo nível que traduz instruções geométricas complexas em comandos discretos de posicionamento cartesiano e de velocidade de corte e/ou rotação. O torneamento CNC permite a automação completa do ciclo produtivo, desde a troca indexada de ferramentas na torre até a compensação dinâmica de desgaste de insertos. Dessa forma, a máquina pode executar movimentos circulares ou trajetórias lineares com exatidão dimensional e alta repetibilidade (Smid, 2007). Vale destacar que o movimento de avanço da ferramenta de corte gera uma topografia superficial inerente ao processo, caracterizada por sulcos periódicos. Essa microgeometria, comumente denominada rugosidade de passo (ou marcas de avanço), atua como um fator de interferência direto quando a peça é submetida ao controle dimensional utilizando instrumentos de contato tradicional, como paquímetros e micrômetros.

Na produção das amostras foi empregado o torno CNC Romi GL240 do laboratório de automação da manufatura do IFSC, mostrado na figura 15.

Figura 15 – Romi GL240



Fonte: Página da internet de Megamachine²

3.3 PROCESSOS DE MEDIÇÃO AVALIADOS

3.3.1 Medição manual com braço articulado de medição

O braço articulado de medição é uma máquina de medição por coordenadas portátil, amplamente utilizada na indústria para a inspeção de peças de pequenas a grandes dimensões (Bosch, 2014). Trata-se de um sistema de medição manual composto por segmentos articulados e juntas rotativas, cuja cinemática é semelhante à de manipuladores robóticos industriais. Sua principal vantagem está na flexibilidade de uso e na facilidade de acesso a diferentes regiões da peça. Entretanto, por se tratar de um sistema manual, os resultados são significativamente influenciados pela habilidade e pela técnica do operador (Hansen, 2001). Em condições adequadas de uso, a exatidão típica desses sistemas situa-se em torno de $\pm 0,02$ mm (Faro, 2023).

Para a medição dos diâmetros das peças, foi elaborado um procedimento no

² Disponível em: <https://megamachine.com.br/produto/torno-cnc-romi-g240-2007-fanuc/>

qual cada elemento circular foi avaliado por meio de quatro pontos, distribuídos angularmente a cada 90°. Essa estratégia buscou obter uma estimativa mais representativa do diâmetro, reduzindo a influência de desvios locais de forma. A figura 16 apresenta o braço articulado de medição utilizado, bem como o ambiente em que os ensaios foram realizados.

Figura 16 - Braço articulado de medição



Fonte: Acervo pessoal do autor (2026)

3.3.2 Medição automática com máquina de medição por coordenadas CNC

A máquina de medição por coordenadas (MMC) é um sistema de medição por coordenadas com cinemática cartesiana, composto por três eixos ortogonais entre si e um sistema apalpador responsável pela aquisição de pontos na superfície da peça (Bosch, 2014). Diferente do braço de medição articulado, a MMC opera de forma automatizada por meio de um controlador CNC, o que permite maior repetibilidade e redução da influência do operador durante o processo de medição (Pfeifer, 2002). Por essa razão, é amplamente utilizada na indústria para inspeção dimensional de peças seriadas que exigem alta exatidão. A exatidão da medição depende das características do equipamento, das condições ambientais e da estratégia de medição adotada; para dimensões inferiores a 100 mm, valores típicos de incerteza da ordem de $\pm 0,005$ mm são frequentemente observados (Zeiss, 2023).

Para a medição dos diâmetros das peças, foi elaborado um programa de inspeção no qual cada elemento circular foi avaliado por meio de quatro pontos, distribuídos angularmente a cada 90° . Essa estratégia buscou caracterizar o diâmetro de forma consistente, reduzindo a influência de desvios locais de forma e aumentando a confiabilidade dos resultados. A figura 17 apresenta a MMC utilizada, bem como o ambiente controlado adotado para a realização dos ensaios.

Figura 17 – Máquina de medição por coordenadas



Fonte: Acervo pessoal do autor (2026)

3.3.3 Medição manual com paquímetro

O paquímetro é um dos instrumentos de medição mais difundidos na metrologia dimensional. Amplamente utilizado no controle dimensional de peças de baixa a média precisão, destaca-se pelo baixo custo, facilidade de uso e robustez para aplicação em ambientes de produção (Lira, 2016). Entretanto, sua exatidão é limitada tanto pela própria concepção construtiva do instrumento, como o erro de Abbe, quanto pela influência do operador durante a medição (Link; Agostinho, 2014). O Erro de Abbe é um erro sistemático de deslocamento linear. Ele se manifesta quando há um pequeno desvio angular (como inclinação, folga ou jogo mecânico nas guias do

instrumento) durante a medição. Devido à distância entre a escala e o ponto de contato (conhecida como "braço de Abbe"), esse pequeno ângulo atua como uma alavanca, amplificando o desvio angular e transformando-o em um erro linear significativo na leitura (Lira, 2016). Em condições ideais de uso, a exatidão típica de um paquímetro situa-se em torno de $\pm 0,02$ mm (Mitutoyo, 2023).

Neste trabalho, foi utilizado um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. Para a medição dos diâmetros externos, buscou-se realizar as leituras sempre na mesma posição angular e axial da peça, com o objetivo de minimizar a influência de erros de forma e garantir maior consistência entre as medições. No entanto, a altura de medição não foi indexada, cada operador mediu em alturas aleatórias a cada repetição, o que pode interferir nos erros de medida oriundos da metrologia.

A figura 18 mostra o paquímetro digital empregado nas medições.

Figura 18 – Paquímetro digital



Fonte: Acervo pessoal do autor (2026)

3.4 SOFTWARE DE ANÁLISE EMPREGADO

Para o processamento dos dados obtidos nos ensaios e para a realização da análise do sistema de medição (MSA), foi utilizado o software estatístico Minitab (Pyzdek e Keller, 2014). Trata-se de uma ferramenta amplamente empregada em análises estatísticas aplicadas à indústria, à pesquisa e ao controle da qualidade, oferecendo recursos robustos para tratamento de dados, modelagem estatística e geração de gráficos (Minitab, 2026).

O software dispõe de funcionalidades específicas para estudos de sistemas de medição, permitindo a execução automatizada de análises de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R), estudos de tendência, linearidade e estabilidade, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelo guia MSA 4ª edição. Dessa forma, o uso do Minitab contribuiu para a obtenção de resultados numéricos e gráficos

consistentes, facilitando a interpretação do desempenho dos sistemas de medição avaliados.

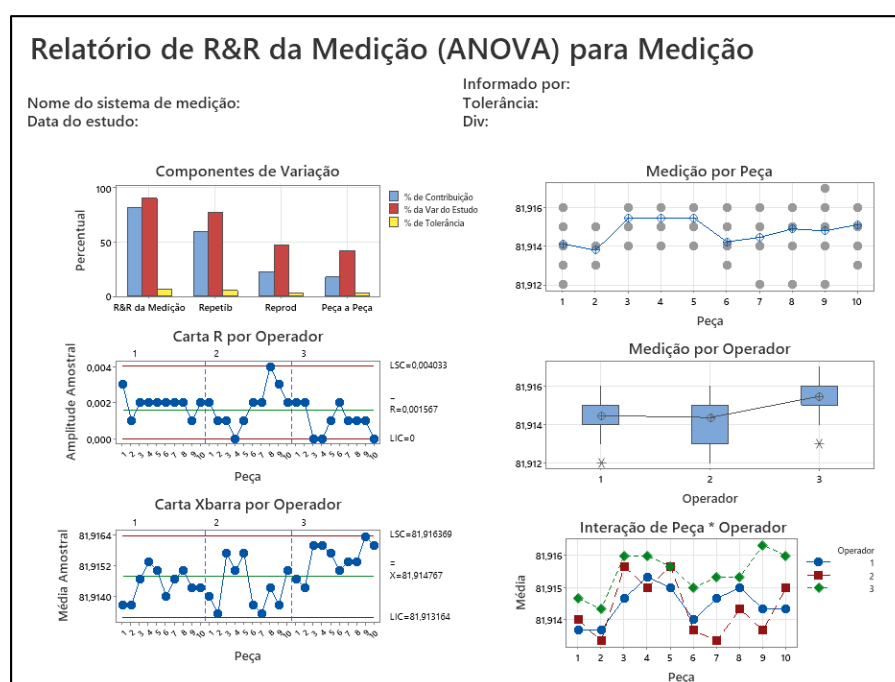
As figuras 19 e 20, a seguir, ilustram um exemplo de uma análise de sistema de medição gerado pelo Minitab, destacando as principais informações utilizadas na avaliação do desempenho do sistema de medição. Entre os resultados apresentados, destacam-se os índices de repetibilidade e reprodutibilidade, a contribuição percentual das fontes de variação, além de representações gráficas que auxiliam na interpretação da capacidade do sistema de medição.

Figura 19 - Resultados de um estudo de MSA gerado pelo Minitab

Fonte	DesvPad (DP)	%Var do		
		Var do Estudo (6 × DP)	Estudo % de Tolerância (%VE)	% de Tolerância (VE/Toler)
Total de R&R da Medição	0,0011126	0,0066754	90,63	6,68
Repetibilidade	0,0009475	0,0056849	77,18	5,68
Reprodutibilidade	0,0005832	0,0034990	47,51	3,50
Operador	0,0005832	0,0034990	47,51	3,50
Peça a Peça	0,0005188	0,0031126	42,26	3,11
Variação Total	0,0012276	0,0073654	100,00	7,37

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 20 – Resultados gráficos de um estudo de MSA gerado pelo Minitab



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

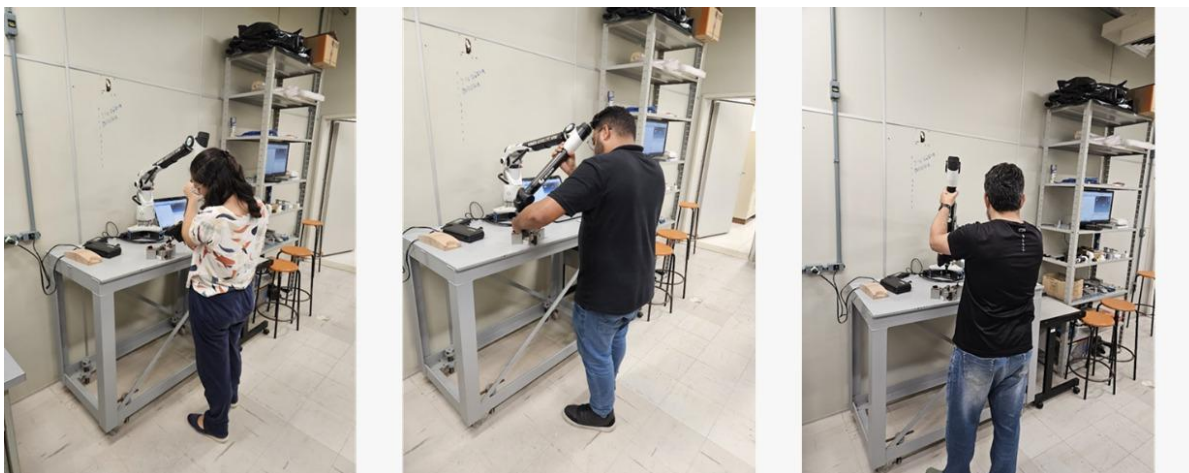
4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

4.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para a aquisição dos dados, as cinco amostras provenientes de cada processo de fabricação foram medidas em ordem aleatória por três operadores participantes do estudo. Cada operador realizou cinco medições em cada peça, de modo a possibilitar a avaliação da repetibilidade e da reprodutibilidade do sistema de medição. Dessa forma, para cada sistema de medição analisado foram obtidos 75 resultados de medição (5 amostras x 5 medidas por operador x 3 operadores), os quais foram inicialmente registrados em planilhas de ensaio e posteriormente inseridos em software específico para análise estatística.

A coleta de dados foi realizada em um mesmo período e sob as mesmas condições ambientais, com o objetivo de minimizar a influência de variações externas, especialmente variações de temperatura, que poderiam introduzir efeitos adicionais na variabilidade das medições. A figura 21 ilustra momentos destes ensaios:

Figura 21 - Aquisição dos dados nos ensaios de avaliação dos processos de medição



Fonte: Acervo pessoal do autor (2026)

4.2 RESULTADOS OBTIDOS EM MEDIÇÕES COM O PAQUÍMETRO

O emprego do paquímetro para o controle da tolerância de produto e para o monitoramento das variações associadas aos processos de manufatura resultou nos parâmetros apresentados na Tabela 1, na qual são apresentados os valores de

variação entre peças (VP), variação total (VT), variação do sistema de medição (R&R), bem como os indicadores percentuais de contribuição do R&R em relação à tolerância da peça e à variação total do processo, além do número de categorias distintas (ndc) obtido para cada processo de fabricação analisado.

Tabela 1 - Resultados da análise do processo de medição com o paquímetro

PROCESSO	VP (mm)	VT (mm)	R&R (mm)	%R&R _{Tol}	%R&R _{VT}	ndc
Corte a <i>laser</i>	0,055	0,076	0,051	155,50	68,20	1
Manufatura aditiva	0,088	0,089	0,013	39,61	14,83	9
Torneamento CNC	0,034	0,035	0,008	22,87	21,75	6

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Desta tabela podem ser feitas as seguintes afirmações:

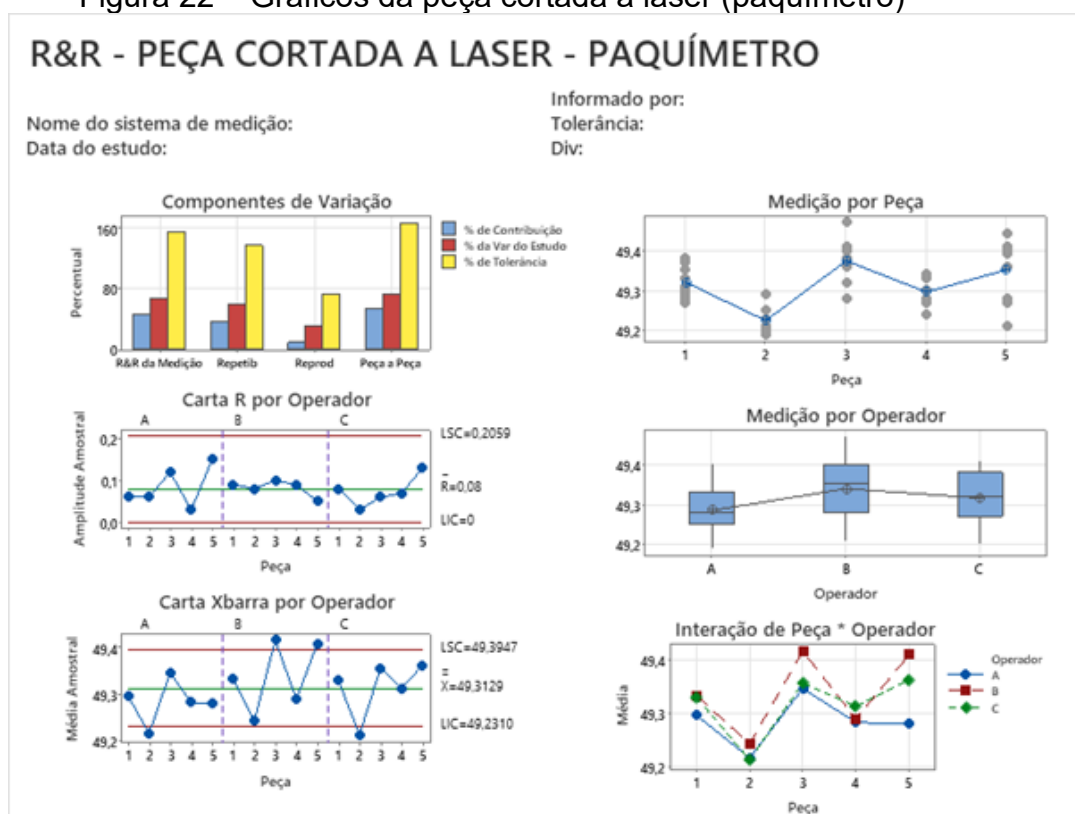
- O processo de medição usando paquímetro não se mostrou capaz de controlar a tolerância de projeto de $\pm 0,1$ mm nem de controlar o processo de manufatura das peças cortadas a laser, visto que os valores percentuais de R&R ficaram acima de 30%. O processo de medição apresenta alta variabilidade (R&R = 0,051 mm), quase da mesma ordem da variação do processo de fabricação em si (VP = 0,055 mm).
- Esta mesma avaliação no processo de manufatura aditiva indica uma condição menos crítica, sendo o processo de medição considerado apto para controle do processo de manufatura. O processo de medição teve o R&R = 0,013 mm para uma variação do processo de fabricação VP = 0,088 mm, resultando em um R&R_{vt} de 14,83%. No entanto, o processo de medição continua inapto para o controle da tolerância de desenho (%R&R = 39,61%).
- Quando se avalia a adequação do processo de medição com paquímetro para as peças usinadas o diagnóstico é bastante positivo. A variabilidade do processo de medição foi abaixo de 30% tanto na comparação com a tolerância de desenho (22,87%) como na comparação com a variação do processo de fabricação (21,75%).
- Essa diferença de resultados foi bastante influenciada pela precisão na forma dos círculos gerados por cada processo. Nos processos de corte

a laser e manufatura aditiva a posição de medição impacta bastante no diâmetro, pois as peças possuem erro de circularidade significativo. Como a medição é manual, a posição varia a cada repetição. No torneamento CNC a forma do círculo é bastante precisa, fazendo com que o resultado do diâmetro não varie muito em função da posição de medição.

- O ndc acima de 5 reforça a afirmação de que o processo de medição será capaz de identificar pequenas variações no processo de fabricação das peças produzidas por manufatura aditiva e usinagem CNC e, assim, ser usado para controlar o processo.

Os gráficos gerados nestes estudos podem ser visualizados nas figuras a seguir:

Figura 22 – Gráficos da peça cortada a laser (paquímetro)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A análise dos gráficos relacionados à peça cortada a *laser* com medição pelo paquímetro está descrita no quadro 1:

Quadro 1 – Análise dos gráficos da peça cortada a laser (paquímetro)

GRÁFICO	ANÁLISE
Componentes de variação	Sistema de medição (R&R) tem variabilidade da mesma ordem do processo de fabricação e bem acima da tolerância.
Medição por peça	A variação entre peças é da mesma ordem da variação ao medir cada peça
Carta R	Medições sem sinais de instabilidade
Medição por operador	Operadores com resultados semelhantes, com leve tendência do operador B medir um pouco acima dos demais
Carta x barra	A variação entre peças é encoberta para variação da própria medição (LSC – LIC)
Interação peça x operador	Sem diferenças relevantes na forma de medir dos operadores

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 23 – Gráficos da peça impressa (paquímetro)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

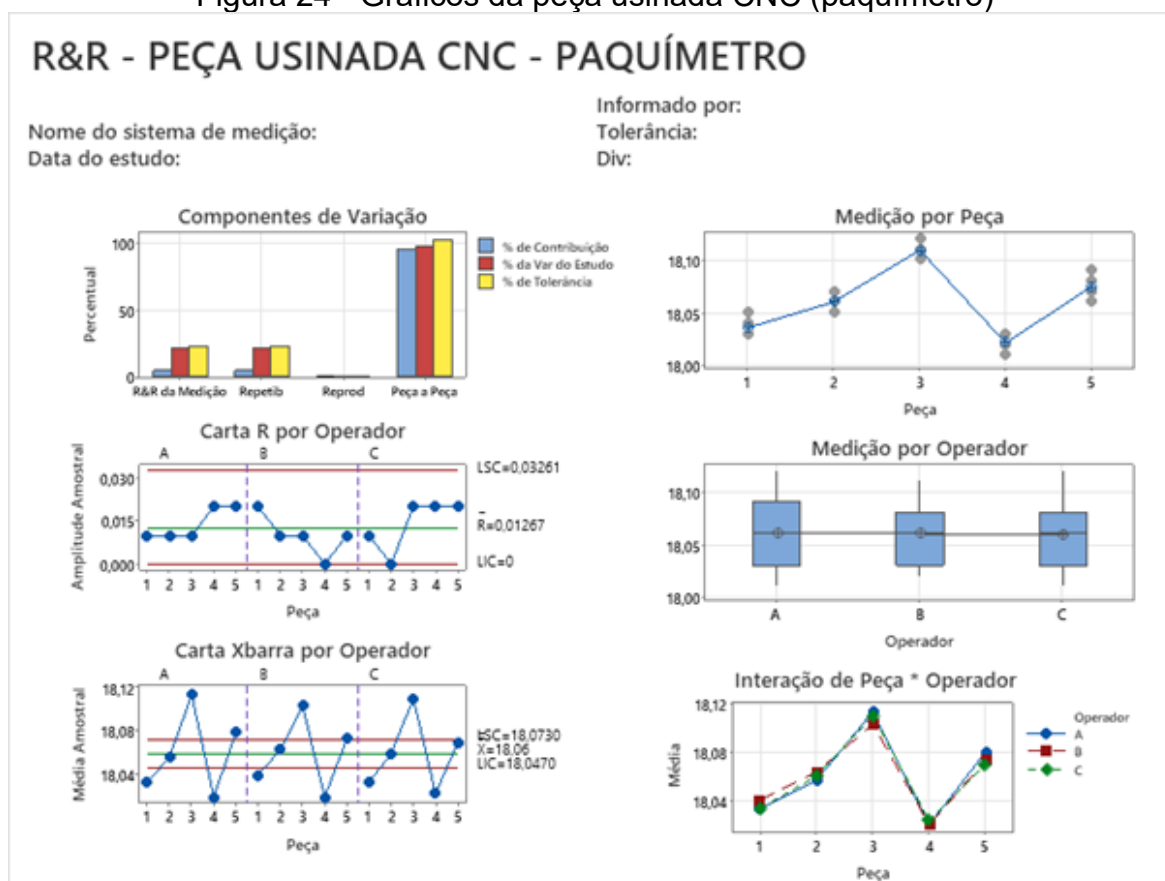
A análise dos gráficos relacionados à peça impressa com medição pelo paquímetro é descrita no Quadro 2:

Quadro 2 – Análise dos gráficos da peça impressa (paquímetro)

GRÁFICO	ANÁLISE
Componentes de variação	Sistema de medição (R&R) tem variabilidade menor que o processo de fabricação, mas acima de 30% da tolerância.
Medição por peça	A variação entre peças é bem maior que a variação ao medir cada peça
Carta R	Medições sem sinais de instabilidade
Medição por operador	Operadores com resultados semelhantes, tendo o operador A pior repetibilidade
Carta x barra	A variação entre peças é bem maior do que a variação da medição (LSC – LIC)
Interação peça x operador	Sem diferenças relevantes na forma de medir dos operadores

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 24 - Gráficos da peça usinada CNC (paquímetro)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A análise dos gráficos da peça usinada CNC com medição pelo paquímetro é descrita no Quadro 3:

Quadro 3 - Análise dos gráficos da peça usinada CNC (paquímetro)

GRÁFICO	ANÁLISE
Componentes de variação	Sistema de medição (R&R) tem variabilidade menor que o processo de fabricação e abaixo de 30% da tolerância.
Medição por peça	A variação entre peças é bem maior que a variação ao medir cada peça
Carta R	Medições sem sinais de instabilidade
Medição por operador	Operadores com resultados semelhantes, tendo o operador A pior repetibilidade
Carta x barra	A variação entre peças é maior do que a variação da medição (LSC – LIC)
Interação peça x operador	As linhas são paralelas, mostrando não haver diferenças relevantes na forma de medir dos operadores

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.3 RESULTADOS OBTIDOS NO PROCESSO DE MEDIÇÃO COM O BRAÇO DE MEDIÇÃO

Os resultados numéricos obtidos com os ensaios realizados com o braço de medição estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados da análise do processo de medição com o braço de medição

PROCESSO	VP (mm)	VT (mm)	R&R (mm)	%R&R _{Tol}	%R&R _{VT}	ndc
Corte a <i>laser</i>	0,069	0,086	0,051	153,59	59,62	1
Manufatura aditiva	0,068	0,076	0,035	103,91	45,28	2
Torneamento CNC	0,036	0,037	0,009	27,71	25,14	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

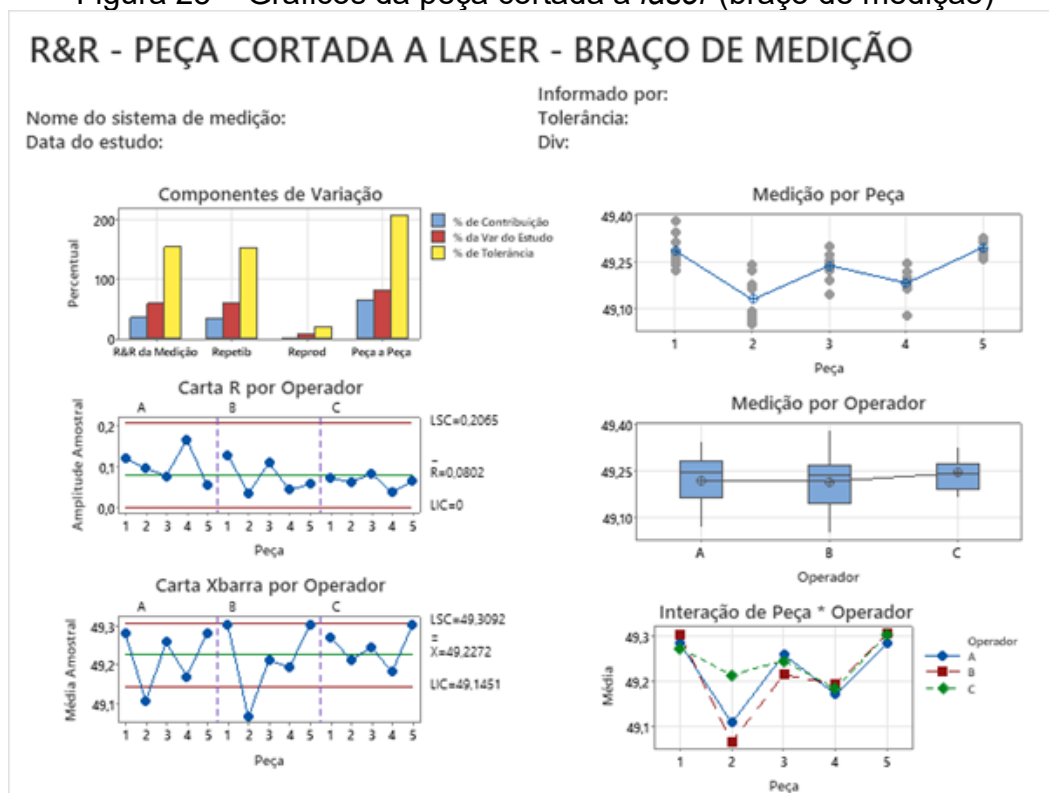
Desta tabela podem ser feitas as seguintes afirmações:

- O processo de medição utilizando o braço de medição não se mostrou capaz de controlar a tolerância de projeto de $\pm 0,1$ mm nem de controlar o processo de manufatura das peças cortadas a laser, visto que os valores percentuais de R&R ficaram acima de 30%. O processo de medição apresenta alta variabilidade (R&R = 0,051 mm), quase da

mesma ordem da variação do processo de fabricação em si ($VP = 0,069$ mm).

- Ao empregar esta mesma avaliação no processo de manufatura aditiva temos um resultado similar ao processo de corte a laser, visto que os valores percentuais de R&R também ficaram acima de 30%. O processo de medição apresenta uma variabilidade elevada ($R\&R = 0,035$ mm), próximo da variabilidade do processo de fabricação ($VP=0,068$ mm)
- Avaliando a adequação do processo de medição com braço de medição para as peças usinadas dispomos de bons pareceres. A variabilidade do processo de medição foi abaixo de 30% tanto na comparação com a tolerância de desenho (27,71%) como na comparação com a variação do processo de fabricação (25,14%).
- A diferença de resultados tem origem na precisão na forma dos círculos produzidos por cada processo. Nos processos de corte a laser e manufatura aditiva a posição de medição impacta diretamente no diâmetro aferido, pois as peças possuem erro significativo de circularidade. Tendo em vista que a medição é manual, a posição varia a cada repetição. Por sua vez, no torneamento CNC a forma dos círculos é bastante precisa, resultando em uma baixa variação dos diâmetros em função da posição de apalpação.
- O ndc abaixo de 5 nos processos de corte a laser e manufatura aditiva reforçam sua incapacidade em controlar o processo. Em contrapartida, o ndc acima de 5 no processo de torneamento CNC evidencia que o processo de medição será capaz de identificar pequenas variações no processo de produção.

Os gráficos da peça cortada a *laser* medido pelo braço de medição podem ser visualizados nas figuras a seguir:

Figura 25 – Gráficos da peça cortada a *laser* (braço de medição)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

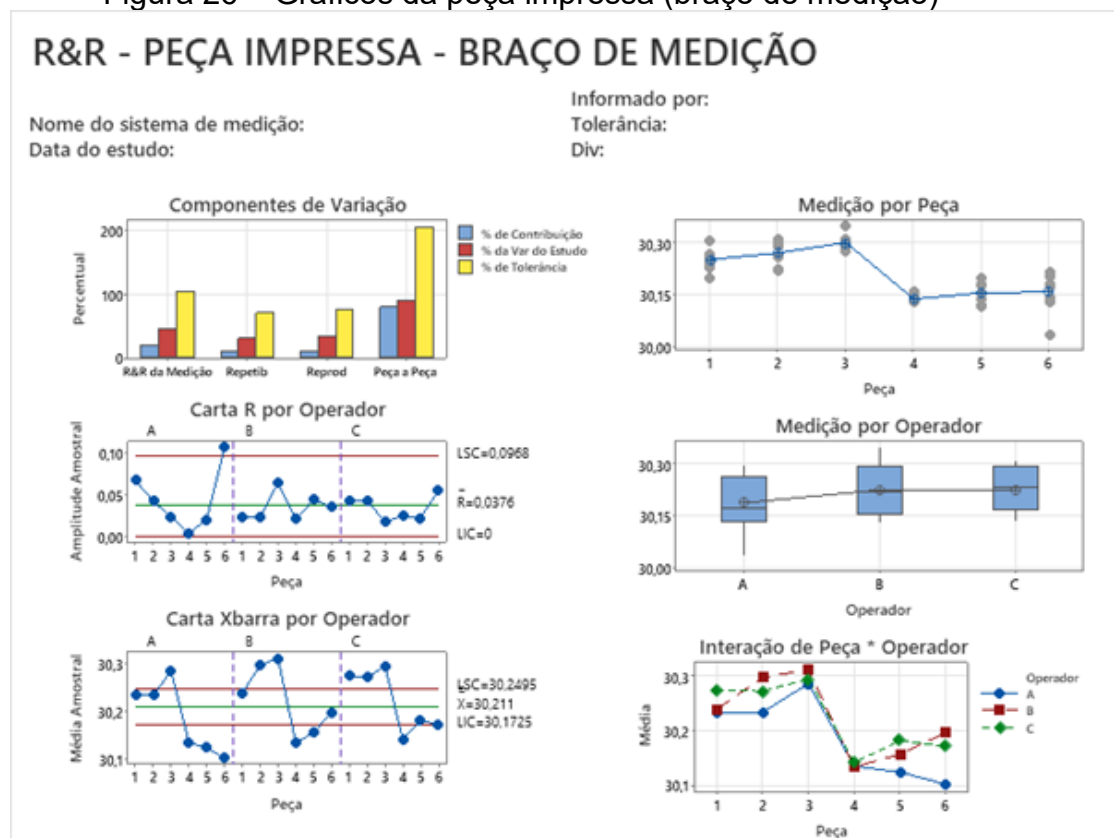
A análise dos gráficos relacionados à peça cortada a *laser* está descrita no Quadro 4:

Quadro 4 - Análise dos gráficos da peça cortada a laser (braço de medição)

GRÁFICO	ANÁLISE
Componentes de variação	Sistema de medição (R&R) tem variabilidade da mesma ordem do processo de fabricação e bem acima da tolerância.
Medição por peça	A variação entre peças é da mesma ordem da variação ao medir cada peça
Carta R	Medições sem sinais de instabilidade
Medição por operador	Operadores com resultados semelhantes, com leve tendência do operador A medir um pouco acima dos demais e o operador C tem a melhor repetibilidade entre os 3.
Carta x barra	A variação entre peças é encoberta pela variação da própria medição (LSC – LIC). Indicando que o instrumento não consegue discriminar a diferença entre as peças.
Interação peça x operador	Sem diferenças relevantes na forma de medir dos operadores

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 26 – Gráficos da peça impressa (braço de medição)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

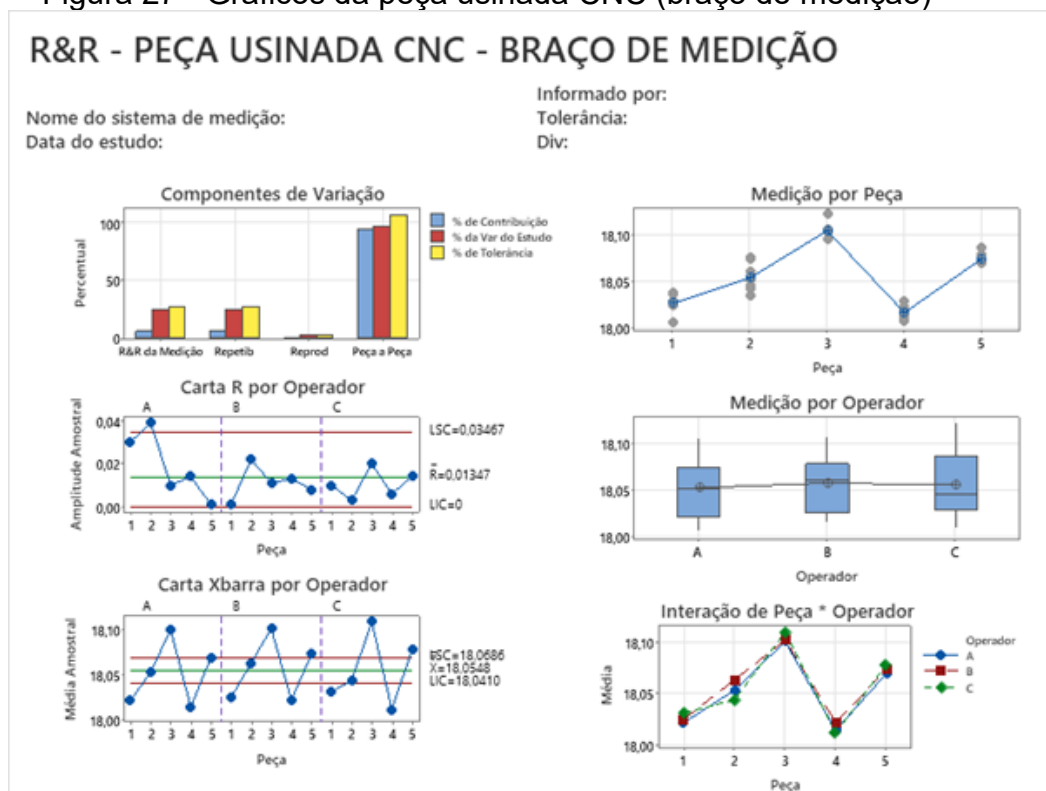
A análise dos gráficos da peça impressa e medida com o braço de medição está descrita no Quadro 5:

Quadro 5 - Análise dos gráficos da peça impressa (braço de medição)

GRÁFICO	ANÁLISE
Componentes de variação	Sistema de medição (R&R) tem variabilidade de ordem menor do processo de fabricação, mas ainda assim acima da tolerância.
Medição por peça	A variação entre peças é da mesma ordem que a variação ao medir cada peça
Carta R	Apenas a sexta peça do operador A apresenta um sinal elevado de instabilidade, se aproximando do Limite Superior de Controle (LSC)
Medição por operador	Operadores com resultados semelhantes, com leve tendência do operador A medir um pouco abaixo dos demais.
Carta x barra	A variação entre peças é maior do que a variação da medição (LSC – LIC)
Interação peça x operador	As linhas se cruzam nas peças 1, 2 e nas peças 5,6 indicando interação na forma de medir dos operadores.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 27 - Gráficos da peça usinada CNC (braço de medição)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A análise dos gráficos relacionados à peça usinada CNC e medido com o braço de medição está descrita do Quadro 6:

Quadro 6 - Análise dos gráficos da peça usinada CNC (braço de medição)

GRÁFICO	ANÁLISE
Componentes de variação	Sistema de medição (R&R) tem variação mínima em comparação com o processo de fabricação e está abaixo do limite de tolerância (30%).
Medição por peça	A variação entre peças é maior que a variação ao medir cada peça.
Carta R	Uma leve instabilidade na segunda peça do operador A, mas sem interferir na estabilidade do processo.
Medição por operador	Operadores com resultados muito semelhantes e operador C tem a melhor repetibilidade.
Carta x barra	A variação entre peças é maior do que a variação da medição (LSC – LIC)
Interação peça x operador	As linhas são paralelas, mostrando não haver diferenças relevantes na forma de medir dos operadores

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.4 RESULTADOS OBTIDOS NO PROCESSO DE MEDIÇÃO COM A MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS CNC

Os resultados numéricos obtidos com os ensaios realizados com a máquina de medição por coordenadas estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados da análise do processo de medição com a MMC

PROCESSO	VP (mm)	VT (mm)	R&R (mm)	%R&R _{Tol}	%R&R _{VT}	ndc
Corte a <i>laser</i>	0,076	0,076	0,007	22,08	9,63	14
Manufatura aditiva	0,059	0,060	0,008	23,28	13,02	10
Torneamento CNC	0,033	0,033	0,002	5,34	5,34	26

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

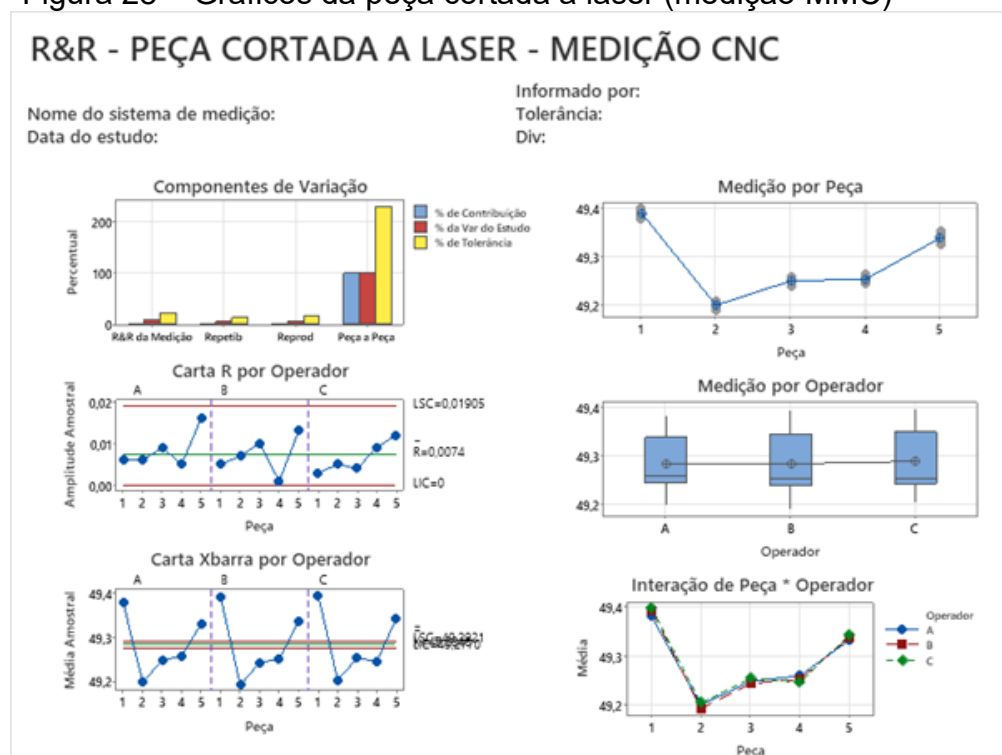
Desta tabela podem ser feitas as seguintes afirmações:

- O processo de medição usando a MMC CNC se mostrou capaz de controlar a tolerância de projeto de $\pm 0,1$ mm e de controlar o processo de manufatura das peças cortadas a laser, visto que os valores percentuais de R&R ficaram abaixo de 30%. O processo de medição apresenta baixa variabilidade (R&R = 0,007 mm), muito abaixo da ordem da variação do processo de fabricação em si (VP = 0,076 mm).
- Esta mesma avaliação no processo de manufatura aditiva indica uma condição similar, sendo o processo de medição considerado apto para controle do processo de manufatura. O processo de medição teve o R&R = 0,008 mm para uma variação do processo de fabricação VP = 0,059 mm, resultando em um R&R_{vt} de 13,02%. Por consequência, o processo de medição é apto para o controle da tolerância de desenho (%R&R = 23,28%).
- Ao analisar os resultados da medição das peças torneadas, obtemos os melhores resultados do estudo. Obtendo um R&R_{vt} de 5,34% com uma variação de apenas 0,002 mm no processo de medir e 0,033 para a variação do processo de fabricação. Desta forma, o processo de medição é capaz de controlar a tolerância de desenho (%R&R=5,34).

- A diferença dos resultados obtidos neste método de medição é influenciada pela eliminação dos erros por fator humano e ao controle das variáveis físicas durante o contato com a peça. Na MMC a peça é fixada na mesa e o programa é executado, desta forma a movimentação dos eixos e a estratégia de palpação são executadas de forma idêntica para todas. Além disso, a falta de circularidade nas amostras cortadas a laser e impressas é contornada ao se coletar mais pontos de referência para o cálculo do diâmetro.
- O ndc acima de 5 evidencia a capacidade do processo de medição de identificar pequenas variações nos 3 processos de fabricação.

Os gráficos da peça cortada a *laser* com medição da máquina de medição por coordenadas podem ser visualizados a seguir:

Figura 28 – Gráficos da peça cortada a laser (medição MMC)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

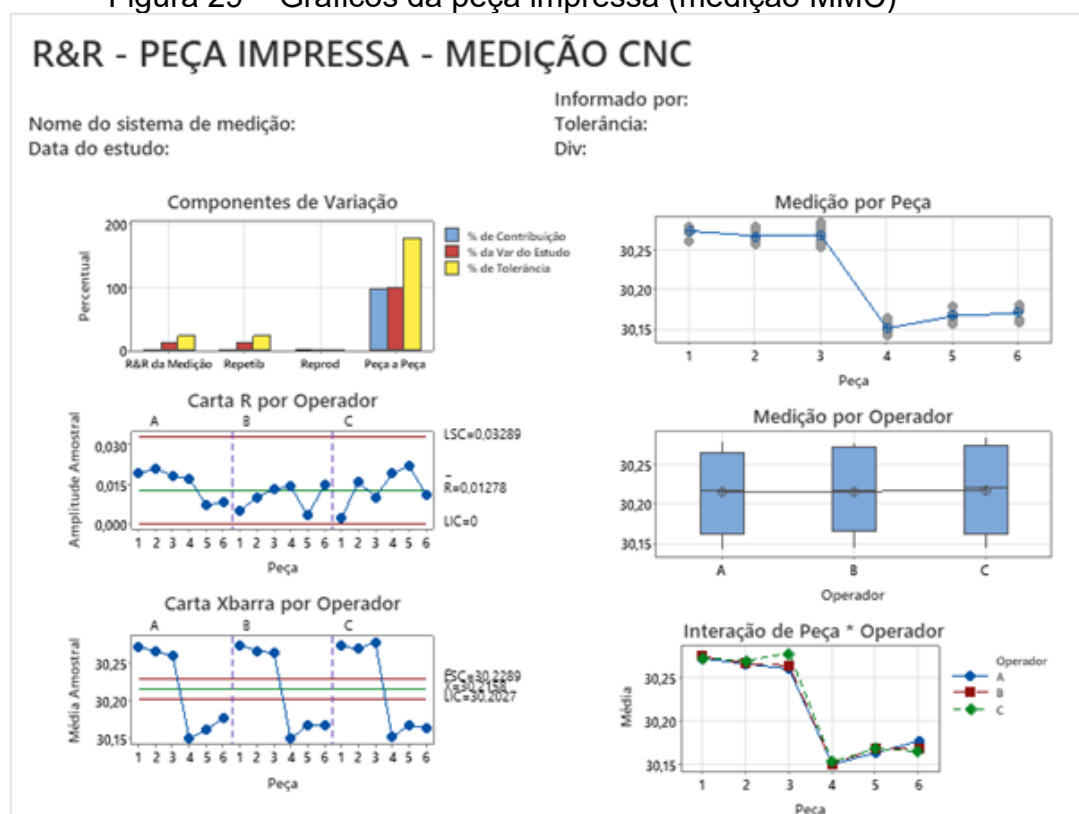
A análise dos gráficos relacionados à peça cortada a *laser* com medição da MMC está descrita no Quadro 7:

Quadro 7 - Análise dos gráficos relacionados à peça cortada a laser (medição MMC)

GRÁFICO	ANÁLISE
Componentes de variação	Sistema de medição (R&R) tem variabilidade de ordem menor do processo de fabricação e abaixo do valor de tolerância
Medição por peça	A dispersão vertical dos pontos cinzas sobre cada peça é mínima, quase imperceptível. A variação entre peças é maior que a variação ao medir cada peça.
Carta R	Todos os pontos estão sob controle estatístico, não há instabilidade no processo.
Medição por operador	Operadores com resultados muito semelhantes e repetibilidade equivalente entre cada operador.
Carta x barra	Todos os pontos dos três operadores estão fora dos limites de controle (LSC e LIC). Desta forma, a variação entre peças é maior do que a variação da medição.
Interação peça x operador	As linhas são paralelas, mostrando não haver diferenças relevantes na forma de medir dos operadores

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 29 – Gráficos da peça impressa (medição MMC)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A análise dos gráficos da peça impressa com medição da MMC é escrita no

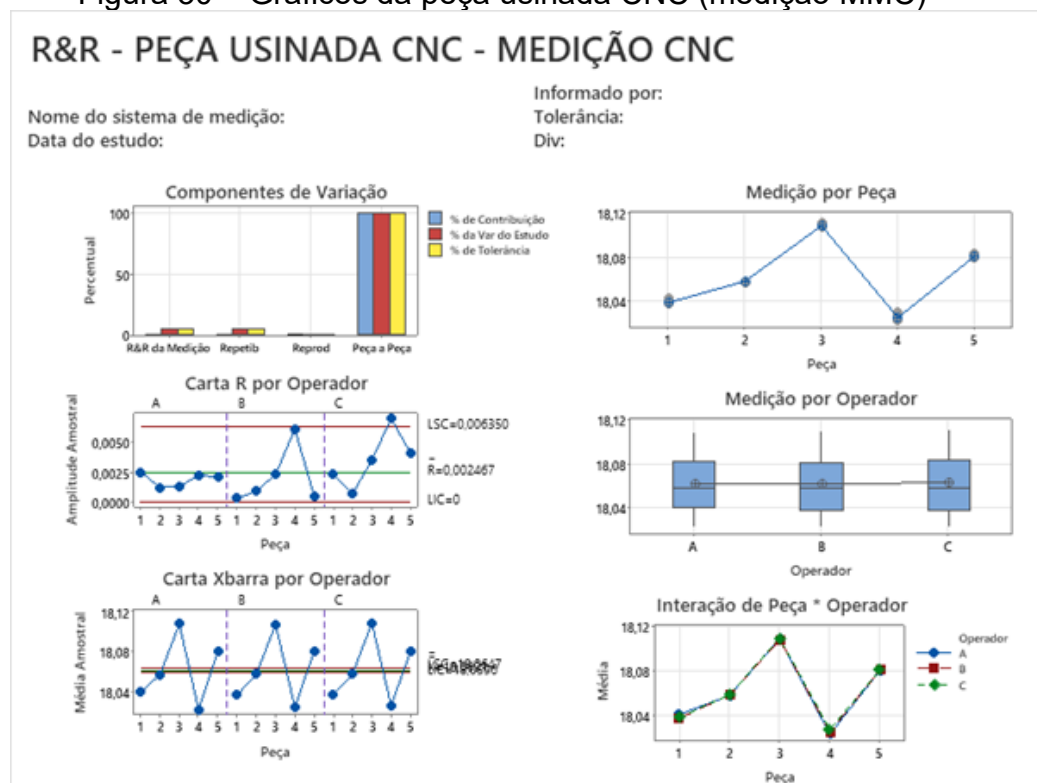
Quadro 8:

Quadro 8 - Análise dos gráficos relacionados à peça impressa (medição MMC)

GRÁFICO	ANÁLISE
Componentes de variação	O sistema de medição (R&R) apresenta variabilidade inferior à do processo de fabricação e ao valor de tolerância especificado.
Medição por peça	A reduzida dispersão vertical dos pontos cinza em cada peça indica baixa variabilidade de medição. Além disso, a variabilidade entre as peças é significativamente maior que a variabilidade observada nas medições repetidas de uma mesma peça.
Carta R	Todos os pontos estão sob controle estatístico, não há instabilidade no processo.
Medição por operador	Operadores com resultados muito semelhantes e repetibilidade equivalente entre cada operador.
Carta x barra	Todos os pontos dos três operadores estão fora dos limites de controle (LSC e LIC). Desta forma, a variação entre peças é maior do que a variação da medição.
Interação peça x operador	As linhas são paralelas, mostrando não haver diferenças relevantes na forma de medir dos operadores.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 30 – Gráficos da peça usinada CNC (medição MMC)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A análise dos gráficos relacionados à peça usinada CNC com medição da MMC é descrita no Quadro 9:

Quadro 9 - Análise dos gráficos relacionados à peça usinada CNC (medição MMC)

GRÁFICO	ANÁLISE
Componentes de variação	Sistema de medição (R&R) apresenta variabilidade significativamente inferior à variabilidade do processo de fabricação e ao valor de tolerância. Dessa forma, a contribuição do erro de medição para a variabilidade total do processo pode ser considerada desprezível.
Medição por peça	A dispersão dos pontos no gráfico é quase nula. Desta forma, é possível afirmar com precisão micrométrica a dimensão dos diâmetros das peças e a variabilidade entre peças é muito maior do que a variabilidade ao medir cada peça.
Carta R	Todos os pontos estão sob controle estatístico, não há instabilidade no processo.
Medição por operador	Operadores com resultados muito semelhantes e repetibilidade equivalente entre cada operador.
Carta x barra	Todos os pontos dos três operadores estão fora dos limites de controle (LSC e LIC). Desta forma, a variação entre peças é maior do que a variação da medição e é evidenciada pelo gráfico.
Interação peça x operador	As linhas dos operadores correm perfeitamente síncronas, paralelas e fundidas. Evidenciando não haver diferenças na forma de medir dos operadores

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este TCC se propôs a avaliar criticamente a confiabilidade de sistemas de medição aplicados ao controle dimensional na manufatura moderna. A partir da utilização da metodologia MSA do AIAG, foi possível quantificar a adequação metrológica de diferentes métodos aplicados em peças produzidas por corte a laser, manufatura aditiva e torneamento CNC, propiciando dados para a tomada de decisão em controle de produto e de processo.

A etapa de identificação e caracterização dos sistemas de medição evidenciou que a variação total do sistema (R&R) não é originada unicamente pelo instrumento de medição, mas sim pela interação entre a microgeometria superficial da peça e o método de contato metrológico. Desta maneira, comprovou-se que em processos com acabamento superficial texturizado há dificuldades para instrumentos de palpação pontual manual, como as camadas da impressão 3D e as estrias do corte a laser. Isto é evidenciado ao analisar o R&R do braço articulado, onde o erro superou 150% da tolerância ao medir as amostras cortadas a laser.

Com o estudo do guia MSA e a aplicação dos métodos nas amostras, foi possível correlacionar a mecânica dos processos de fabricação com o comportamento estatístico dos dados. Mediante esta análise, verificou-se estatisticamente que o torneamento CNC propicia superfícies regulares e alta integridade superficial, demonstrando assim ser o processo mais robusto e menos sensível ao erro humano. Desta forma, permitiu a aprovação dos três sistemas de medição empregados as peças torneadas, tendo variação de R-barras de apenas 12,67 μm ao utilizar o paquímetro convencional, onde R-barras é a média da diferença entre a maior e a menor medida que os operadores obtiveram ao medir a mesma peça várias vezes.

Por fim, o planejamento e a execução dos estudos de R&R, bem como seus resultados, corroboraram com o papel da engenharia mecatrônica e da automação na mitigação do ruído de medição. O uso do método automatizado de medição, CNC, praticamente eliminou o erro de reprodutibilidade ao padronizar as rotas de aferição e a força do apalpador. O impacto dessa robustez técnica foi evidenciado nos dados obtidos nos gráficos de Carta R, onde a amplitude do erro nas peças cortadas a laser teve média de 7,4 μm , a amplitude média do erro em peças impressas é de 12,7 μm e apenas 2,4 μm para as amostras usinadas. Destaca-se que a Carta R é o gráfico estatístico responsável por quantificar a repetibilidade do sistema, avaliando a

dispersão e a consistência das leituras para uma mesma peça por meio do cálculo da amplitude média do erro. Por consequência, essa estabilização da amplitude do erro gerou o estreitamento dos limites de controle, possibilitando gerar um número de categorias distintas (NDC) satisfatório (≥ 5), tendo como menor valor $ndc=10$ e o maior $ndc=26$.

Em síntese, os resultados deste trabalho indicam que todos os sistemas de medição avaliados apresentaram exatidão metrológica satisfatória, porém sua adequação depende diretamente das características geométricas e da variabilidade inerente às superfícies das peças analisadas. Para geometrias de maior regularidade dimensional, instrumentos manuais e portáteis mostraram-se adequados ao suporte de decisões de controle dimensional. Em contrapartida, para peças produzidas por processos com maior rugosidade geométrica e variabilidade superficial, os resultados evidenciaram maior necessidade de sistemas automatizados de medição por coordenadas CNC, capazes de oferecer maior confiabilidade metrológica e capacidade de discriminação para o monitoramento estatístico do processo produtivo.

Nesse contexto, a aplicação da metodologia MSA demonstrou que a adequação de um sistema de medição não deve ser avaliada apenas pela sua exatidão intrínseca, mas sobretudo pela sua capacidade de atender aos requisitos específicos de cada aplicação. Assim, o principal mérito do estudo MSA consiste em verificar quantitativamente a contribuição do sistema de medição para a variabilidade observada, fornecendo subsídios técnicos para decisões mais confiáveis no controle de produto e no controle de processo.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a ampliação do número de amostras e da diversidade de geometrias avaliadas, incluindo peças com diferentes níveis de complexidade geométrica, tolerâncias dimensionais e materiais. Essa ampliação permitiria verificar com maior robustez estatística a influência das características geométricas e da variabilidade superficial na adequação dos sistemas de medição empregados.

Adicionalmente, sugere-se a realização de estudos utilizando peças de mesma geometria nominal produzidas por diferentes processos de manufatura. Tal abordagem permitiria isolar com maior rigor o efeito do processo produtivo sobre a

variabilidade dimensional, reduzindo possíveis influências associadas às diferenças geométricas entre as amostras analisadas.

Outra possibilidade de continuidade consiste na investigação de outros parâmetros metrológicos previstos no guia MSA, tais como tendência, linearidade e estabilidade dos sistemas de medição, permitindo uma avaliação mais abrangente do desempenho metrológico dos equipamentos empregados.

Também se recomenda a inclusão de outros sistemas de medição dimensional, como scanners ópticos tridimensionais, sistemas de visão computacional, possibilitando análises comparativas com tecnologias emergentes da manufatura digital e da indústria 4.0.

Além disso, estudos futuros podem avaliar o impacto das condições ambientais e operacionais, como temperatura, vibração, iluminação e experiência do operador sobre os resultados de medição, especialmente em sistemas manuais, nos quais a influência humana tende a ser mais significativa.

Por fim, recomenda-se investigar a integração dos resultados da metodologia MSA com ferramentas de Controle Estatístico do Processo (CEP), buscando analisar de forma conjunta a capacidade dos processos produtivos e a confiabilidade dos sistemas de medição, de modo a apoiar decisões industriais mais robustas e fundamentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **Associação Brasileira De Normas Técnicas**. ISO 9001 – Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos. Rio de Janeiro: 2015.
- AIAG. Automotive Industry Action Group. **Análise dos Sistemas de Medição – MSA: Manual de Referência**. 4ª ed. Instituto da Qualidade Automotiva – IQA, 2010.
- ALBERTAZZI, A., SOUSA, A. R. de. **Fundamentos de metrologia: científica e industrial**. Barueri, Manole, 2008.
- ALONSO, V., DACAL-NIETO, A., BARRETO, L., *et al.* "Industry 4.0 implications in machine vision metrology: an overview", **Procedia Manufacturing**, v. 41, p. 359–366, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.020>.
- BOSCH, J. A. **Coordinate Measuring Machines and Systems**. New York: CRC Press, 2014.
- CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 10. ed. [S.l.], Wiley, 2020.
- FARO TECHNOLOGIES. **FaroArm Technical Specifications**. Florida, 2023.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9. São Paulo: Artliber, 2014.
- GIBSON, I. *et al.* **Additive manufacturing technologies**. 3. ed. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2020.
- GERK, E; LIMA, J. L. **O corte a laser: da teoria à máquina**. México. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 1997.
- GONG, Haijun *et al.* Material properties and shrinkage of 3D printing parts using Ultrafuse stainless steel 316LX filament. **MATEC Web of Conferences**, v. 249, 2018.
- GONZALEZ-GUTIERREZ, J. *et al.* Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives. **Materials**, v. 11, n. 5, 2018.
- GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. 7. [S.l.]: Wiley, 2020.
- HANSEN, H. N. The Impact of the Operator on Measurement Uncertainty. *In: Proceedings of the 1st International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN)*. [S.l.].
- JURAN, J. M., BLANTON GODFREY, A. **Juran's quality handbook**. [S.l.], McGraw-Hill Companies, 1999.

KALPAKJIAN, S., SCHMID, S. **Manufacturing Engineering & Technology**. 7. ed. Filadélfia, PA, USA, Prentice Hall, 2013.

KIMURA, J. A. K. P. **Sistema de Análise de Medição (MSA) como ferramenta de avaliação do sistema de medição no setor de usinagem de uma indústria metalúrgica**. Londrina, 2025. Acesso em: 26 jul. 2026.

LINK, R.; AGOSTINHO, O. L. **Metrologia Dimensional e Geométrica: Teoria e Prática**. São Paulo: Artliber, 2014.

LIRA, F. A. **Metrologia na Indústria**. 10. ed. São Paulo: Érica, 2016.

MAILLET, H. (ed.). **O LASER - Princípios e técnicas de aplicação, tradução do francês “Le laser - Principes et techniques d’application”**. Ed. Manole. São Paulo, 1987.

MINITAB, LLC. Minitab Statistical Software: Data analysis, statistical & process improvement tools. State College, PA: Minitab, LLC, 2026. Disponível em: <https://www.minitab.com/pt-br/>. Acesso em: 20 abr. 2026.

MITUTOYO SUL AMERICANA. **Catálogo Geral de Metrologia Dimensional**. São Paulo, 2018/2019.

MONTGOMERY, D. C. **Statistical quality control: A modern introduction**. 7. ed. Nashville, TN, USA, John Wiley & Sons, 2013.

PFEIFER, Tilo. **Production Metrology**. Munique, Germany: De Gruyter Oldenbourg, 2002.

PYZDEK, T., KELLER, P. A. **The six SIGMA handbook, fourth edition**. 4. ed. [S.l.], McGraw-Hill Education, 2014.

SMID, Peter. **CNC Programming Handbook**. 3. ed. Nova Iorque, NY, USA: Industrial Press, 2008.

STEEN, W. **Laser Material Processing**. Nova Iorque, NY, USA: Springer, 2014.

TOLEDO, J. C. **Sistemas de medição e metrologia**. Curitiba, Intersaberes, 2013.

ZEISS, Carl. **Metrology Handbook: Coordinate Measuring Machines**. Oberkochen: [S.n.].