



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS MAGNO MONTEIRO DO NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE EM MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR
COORDENADAS COM ACIONAMENTO CNC**

Recife

2025

CARLOS MAGNO MONTEIRO DO NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE EM MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR
COORDENADAS COM ACIONAMENTO CNC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Pernambuco como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Nascimento, Carlos Magno Monteiro do.

Avaliação da repetibilidade em máquina de medição por coordenadas com acionamento CNC / Carlos Magno Monteiro do Nascimento. - Recife, 2025.
49 p.

Orientador(a): Tiago Leite Rolim

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Máquina Medição por Coordenadas. 2. Repetibilidade. 3. ANOVA. I. Rolim, Tiago Leite. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)



**Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP**



**ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2**

Ao 09º dia do mês de abril do ano de dois mil e vinte e cinco, às 09:00 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Avaliação da repetibilidade em máquina de medição por coordenadas com acionamento CNC**, elaborado pelo aluno **Carlos Magno Monteiro do Nascimento**, matrícula 20120000488, sob a orientação do Prof. **Tiago Leite Rolim**. A banca foi composta pelos avaliadores: Prof. **Tiago Leite Rolim** (orientador), Prof. **Carlos Augusto de Oliveira** (avaliador), e Prof. **José Carlos Albuquerque da Silva** (avaliador). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua _____, atribuindo-lhe a média _____, julgando-o apto() / inapto() à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador: Prof. Tiago Leite Rolim Nota:
Assinatura _____

Avaliador Interno: Prof. Carlos Augusto de Oliveira Nota:
Assinatura _____

Avaliador Externo: Prof. José Carlos Albuquerque da Silva Nota:
Assinatura _____

Recife, 09 de abril de 2025.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo a análise da repetibilidade das medições realizadas em uma máquina de medição por coordenadas (MMC), com ênfase nas posições dentro do seu volume de trabalho. A repetibilidade é um aspecto crucial para assegurar a precisão das medições, principalmente em processos industriais que demandam alta exatidão dimensional. Para isso, foram realizadas medições repetidas em diferentes pontos do volume de trabalho da máquina, levando em consideração possíveis variáveis que poderiam influenciar o desempenho da MMC. A Análise de Variância (ANOVA) foi a ferramenta estatística escolhida para o tratamento dos dados. Os resultados obtidos mostraram que a máquina não apresentou variabilidade significativa nas medições em diferentes posições do volume de trabalho, indicando que a repetibilidade das medições é satisfatória e está dentro dos padrões exigidos para um controle de qualidade eficiente. Esses resultados evidenciam a precisão da CMM utilizada, demonstrando que a máquina oferece um desempenho estável e confiável, contribuindo para a melhoria contínua dos processos de medição em ambientes industriais.

Palavras-chave: Máquina Medição por Coordenadas. Repetibilidade. ANOVA|

ABSTRACT

This undergraduate thesis aims to analyze the repeatability of measurements performed on a coordinate measuring machine (MMC), with a focus on positions within its working volume. Repeatability is a crucial aspect in ensuring measurement accuracy, especially in industrial processes that require high dimensional precision. To achieve this, repeated measurements were carried out at different points within the machine's working volume, considering possible variables that could influence the MMC's performance. Analysis of Variance (ANOVA) was the chosen statistical tool for data processing. The results obtained showed that the machine did not exhibit significant variability in measurements at different positions within the working volume, indicating that the measurement repeatability is satisfactory and meets the required standards for efficient quality control. These findings highlight the accuracy of the CMM used, demonstrating that the machine delivers stable and reliable performance, contributing to the continuous improvement of measurement processes in industrial environments.

Keywords: Coordinate Measuring Machine. Repeatability. ANOVA.

LISTA DE SIGLAS

ANOVA – Análise de Variância

CAD – Desenho Auxiado por Computador

CNC – Comando Numérico Computadorizado

MMC – Máquina de Medição por Coordenadas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais componentes da CMM CNC.....	12
Figura 2 – Tipos de Máquinas de Medição por Coordenadas.....	13
Figura 3 - MMC do tipo ponte móvel.....	14
Figura 4 - MMC do tipo ponte fixa.....	14
Figura 5 - MMC do tipo cantilever Fonte.....	15
Figura 6 - MMC do tipo pórtico.....	16
Figura 7 - MMC do tipo braço horizontal.....	16
Figura 8 - Máquina de Medição por Coordenadas.....	17
Figura 9 - Máquina de Medição por Coordenadas e seus subsistemas.....	17
Figura 10 - Diagrama de Ishikawa das principais fontes de erros na medição.....	18
Figura 11 - Modelo de corpo rígido em relação ao eixo Y.....	19
Figura 12 - Conhecimentos requeridos ao operador de MMC.....	20
Figura 13 - Máquina de medição por coordenadas avaliada.....	23
Figura 14 - Modelo CAD da peça.....	24
Figura 15 - Ferramenta utilizada para o apalpamento CNC.....	24
Figura 16 – Posições avaliadas.....	27
Figura 17 – Distribuição linear dos furos.....	28
Figura 18 - Representação do percurso para as medições repetidas.....	28
Figura 19 – Fluxograma de processo para verificação.....	31
Figura 20 - Gráfico de Igualdade de Variâncias C1.....	33
Figura 21 - Gráfico de Igualdade de Variâncias C2.....	35
Figura 22 - Gráfico de Igualdade de Variâncias C3.....	37
Figura 23 - Gráfico de Igualdade de Variâncias C4.....	39
Figura 24 - Gráfico de Igualdade de Variâncias C5.....	41
Figura 25 - Gráfico de Igualdade de Variâncias C5.....	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros de máquina na MMC CNC.....	25
Quadro 2 - Teste de normalidade C1.....	30
Quadro 3 - Teste ANOVA de Medições repetidas C1.....	31
Quadro 4 - Teste de normalidade C2.....	32
Quadro 5 - Teste ANOVA de Medições repetidas C2.....	33
Quadro 6 - Teste de normalidade C3.....	34
Quadro 7 - Teste ANOVA de Medições repetidas C3.....	35
Quadro 8 - Teste de normalidade C4.....	36
Quadro 9 - Teste ANOVA de Medições repetidas C4.....	37
Quadro 10 - Teste de normalidade C5.....	38
Quadro 11 - Teste ANOVA de Medições repetidas C5.....	39
Quadro 12 - Teste de normalidade C6.....	40
Quadro 13 - Teste ANOVA de Medições repetidas C6.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas do diâmetro no furo C1.....	32
Tabela 2 – Medidas do diâmetro no furo C2.....	34
Tabela 3 – Medidas do diâmetro no furo C3.....	36
Tabela 4 – Medidas do diâmetro no furo C4.....	38
Tabela 5 – Medidas do diâmetro no furo C5.....	40
Tabela 6 – Medidas do diâmetro no furo C6.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS	12
2.1.1	Máquina de medição por coordenadas tipo Ponte Móvel.....	14
2.1.2	Máquina de medição por coordenadas tipo Ponte Fixa	14
2.1.3	Máquina de medição por coordenadas tipo Cantilever	15
2.1.4	Máquina de medição por coordenadas tipo Pórtico	15
2.1.5	Máquina de medição por coordenadas tipo Braço Horizontal	16
2.2	MEDIÇÃO POR COORDENADAS	17
2.2.1	Princípio de medição por coordenadas.....	17
2.3	FONTES DE ERRO NA MEDIÇÃO	18
2.3.1	Máquina de Medição.....	18
2.3.2	Ambiente.....	19
2.3.3	Peça	20
2.3.4	Operador e estratégia de medição	20
2.4	REPETIBILIDADE.....	21
2.5	ANÁLISE DE VARIÂNCIA	22
3	METODOLOGIA.....	23
3.3.1	Posições avaliadas no volume de trabalho.....	27
3.3.2	Diâmetros dos Furos	28
3.4	ANÁLISE DE VARIÂNCIA	29
3.5	PROCEDIMENTO (PASSO A PASSO)	29
4	RESULTADOS	32
5	CONCLUSÃO.....	44
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	45
7	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca incessante pela precisão e exatidão na medição de componentes e peças industriais tem se tornado uma necessidade em diversos setores, como a indústria automotiva, aeroespacial, naval e muitos outros. Nesse contexto, as MMC's desempenham um papel fundamental ao possibilitar coleta das dimensões e geometrias de peças complexas. (SILVA, 2009)

Este trabalho de conclusão de curso (TCC) se propõe a explorar o tema "Avaliação da repetibilidade em Máquina de Medição por Coordenadas". O foco central deste estudo reside na avaliação da capacidade de uma máquina de medição por coordenadas em fornecer medidas consistentes e confiáveis em diferentes posições dentro do seu volume de trabalho. Para tanto, foi utilizado um artefato padrão como objeto de medição e aplicaremos técnicas estatísticas, notadamente o teste ANOVA, para analisar os resultados obtidos.

A análise da repetibilidade de uma MMC é de suma importância para garantir que as medições realizadas nesse equipamento sejam confiáveis e estejam em conformidade com os requisitos de qualidade estabelecidos pela indústria. A compreensão das variações e incertezas associadas ao processo de medição é essencial para a tomada de decisões precisas na produção e no controle de qualidade.

Ao longo deste trabalho, será utilizada a metodologia descrita para realizar o estudo de desempenho e a escolha das posições de medição. Em seguida, apresentaremos os resultados obtidos e discutiremos as implicações desses resultados, bem como as conclusões que podem ser derivadas deles.

Este estudo contribuirá para o entendimento mais aprofundado do desempenho das máquinas de medição por coordenadas no tocante as variações das medições, auxiliando empresas e profissionais na busca constante por melhorias na qualidade das análises metrológicas, o que, por sua vez, impacta positivamente na eficiência dos processos industriais.

1.1 JUSTIFICATIVA

A análise da repetibilidade de uma MMC é fundamental para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados em processos de controle de qualidade. A repetibilidade refere-se à capacidade da máquina de realizar medições consistentes sob as mesmas condições operacionais e com a mesma peça de trabalho. Isso é essencial para assegurar que a MMC forneça dados confiáveis em diferentes ciclos de medição, evitando variações indesejadas.

Portanto, este trabalho apresenta um estudo de caso, no tocante a avaliação da repetibilidade (avaliação da precisão) de forma direta, fundamentado na medição de uma peça de trabalho como sendo um artefato padrão.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar a repetibilidade de uma máquina de medição por coordenadas CNC, através das medições dos diâmetros de furos dispostos em uma peça padrão desenvolvida para este fim e colocada em vários pontos do volume de trabalho da máquina, ao longo de dois dos eixos (x e y).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar medições repetidas em uma peça de referência utilizando a MMC;
- Coletar os dados resultantes das medições repetidas, registrando os valores obtidos em cada medição;
- Utilizar a análise de variância (ANOVA) para estabelecer o grau de interferência nos grupos de dados em função da posição;
- Criar um procedimento para avaliar a repetibilidade de uma MMC;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Na indústria, as máquinas de medição por coordenadas desempenham um papel crucial na avaliação geométrica da produção, oferecendo representações de sistemas de coordenadas cartesianas, lineares e tridimensionais (HAMBURG-PIEKAR, 2006).

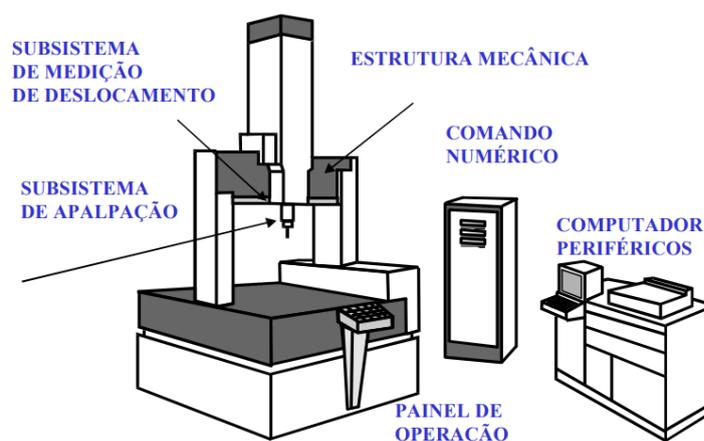
Assegurar a qualidade dos produtos é fundamental e requer o uso de sistemas de medição confiáveis no controle da produção (SILVA et al., 2014, p. 396). É por isso que as máquinas de medição por coordenadas são amplamente adotadas na metrologia industrial devido à sua rapidez, precisão e alto nível de confiabilidade (BARROS, 2012).

Outra vantagem derivada da aplicação de máquinas de medição por coordenadas é a capacidade de avaliar não apenas as características dimensionais, mas também as características geométricas (FANHA, 2011).

A Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) também desempenha um papel essencial na engenharia reversa, permitindo a obtenção precisa de dados dimensionais de peças complexas. Com sua capacidade de capturar coordenadas tridimensionais, a MMC possibilita a reconstrução digital de componentes para análise, reprodução ou otimização do design. A utilização da MMC na engenharia reversa melhora a exatidão da modelagem e reduz o tempo de desenvolvimento de novos produtos. Dessa forma, essa tecnologia se tornou indispensável para indústrias como automotiva e aeroespacial. (SILVA, 2016).

Na Figura 1 podem ser identificados os seguintes componentes: estrutura mecânica, subsistema de apalpação, unidade de controle, equipamentos periféricos e um dispositivo a ser medido.

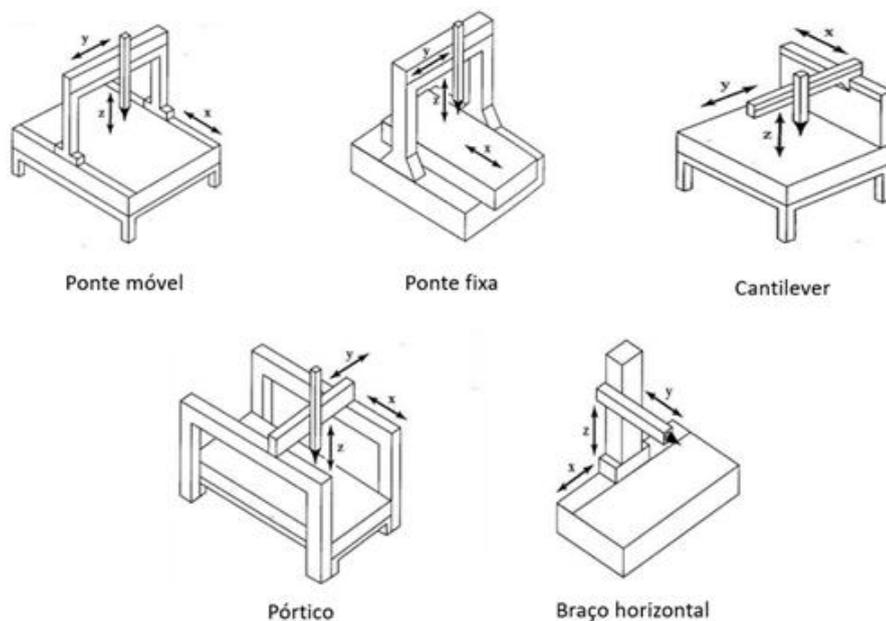
Figura 1 - Principais componentes da MMC CNC.



A versão básica de uma MMC possui três eixos perpendiculares entre si, gerando o volume de trabalho. Assim, o volume de trabalho é o espaço tridimensional dentro da qual a máquina consegue medir com precisão. Esse volume é determinado pelos eixos da máquina (X, Y e Z) e define o espaço máximo onde a peça a ser medida pode ser posicionada e analisada. Cada eixo é acionado por um motor separado. Enquanto o movimento retilíneo do segundo eixo é guiado pelo primeiro eixo, o terceiro eixo, por sua vez, é guiado pelo segundo eixo. Cada eixo está equipado com um sistema de medição de precisão, que nos equipamentos mais simples se trata de uma Régua Óptica (Escala Linear Óptica) que registra continuamente o deslocamento do transporte de uma referência fixa.

O terceiro eixo carrega um cabeçote apalpador com ponta esférica na extremidade (Rubi ou cerâmica Al_2O_3). A figura 2 ilustra os cinco tipos básicos de configuração: ponte móvel, ponte fixa, cantilever, braço horizontal e pórtico.

Figura 2 – Tipos de Máquinas de Medição por Coordenadas.



Fonte: O autor (2025).

Ao contrário dos instrumentos de medição simples e individuais, as MMC's estão aptas a executar um ilimitado número de medições multidimensionais sob várias condições. Os objetos a serem medidos podem ser medidos em várias partes do volume de medição e seguindo várias estratégias. (WÄLDELE, F. 1992)

2.1.1 Máquina de medição por coordenadas tipo Ponte Móvel

As máquinas de medição por coordenadas do tipo Ponte Móvel são amplamente empregadas na indústria devido à sua flexibilidade para medir peças de pequeno e médio porte, apresentando uma incerteza comparativamente menor em relação a outras máquinas. Este modelo de máquina se destaca por suas principais características, que incluem uma mesa estacionária para suporte das peças a serem medidas e um sistema de ponte móvel que possibilita o deslocamento de todos os eixos da máquina, uma vez que todos eles estão conectados a essa ponte (HOCKEN; BOSCH, 2011).

Figura 3 - MMC do tipo ponte móvel.



Fonte: Adaptada do catálogo *Direct Industry* (2025).

2.1.2 Máquina de medição por coordenadas tipo Ponte Fixa

A figura 4 exibe máquinas de medição do tipo Ponte Fixa, que se caracterizam pela presença de uma ponte rígida firmemente conectada à base da máquina. As peças a serem avaliadas são suportadas pela superfície deslizante da máquina, a qual é móvel. Esse movimento realizado pelo componente deslizante é considerado como um dos eixos de coordenadas da máquina. Graças à robustez proporcionada por essa estrutura, as máquinas de medição por coordenadas do tipo Ponte Fixa são atualmente reconhecidas como algumas das mais precisas disponíveis no mercado. (HOCKEN; BOSCH, 2011).

Figura 4 - MMC do tipo ponte fixa.



Fonte: Hexagon Metrology (2023)

2.1.3 Máquina de medição por coordenadas tipo Cantilever

A máquina de medição por coordenadas do tipo Cantilever incorpora em seu design um braço móvel que possibilita a introdução de peças por três lados diferentes, em torno da máquina. Isso torna mais acessível a entrada e a saída das peças a serem medidas, quer seja com o uso de alimentadores automáticos ou não. Além da abertura em três lados, é relevante destacar a leveza da estrutura da máquina que se desloca, considerando um determinado volume de medição. Essas características viabilizam a avaliação de peças longas e contribuem para uma maior eficiência nas operações de medição. (HOCKEN; BOSCH, 2011).

Figura 5 - MMC do tipo cantilever Fonte



Hexagon Metrology (2025)

2.1.4 Máquina de medição por coordenadas tipo Pórtico

Em sua maioria, as máquinas estacionárias de medição por coordenadas do tipo Pórtico garantem grande desempenho. Não somente pela capacidade volumétrica desses gigantes do mundo, mas também impressionam pelos seus materiais robustos, a estrutura estável e a alta precisão, sejam elas alocadas em chão de fábrica, em célula de produção, ou até mesmo em sala de medição.

A figura 6 mostra duas máquinas, sendo uma delas relativamente curta, mais robusta, projetada com uma estrutura maciça para evitar deformações, e outra longa de mesmas características.

Figura 6 - MMC do tipo pórtico.



Fonte: Hexagon Metrology (2025)

2.1.5 Máquina de medição por coordenadas tipo Braço Horizontal

As notáveis vantagens das máquinas de medição por coordenadas de Braço Horizontal se destacam especialmente ao medir peças fabricadas em chapas metálicas para a indústria automotiva ou outros componentes de grande porte usados nas indústrias aeroespacial, naval, de defesa, de maquinaria e ferroviária. Estas máquinas apresentam uma estrutura aberta que proporciona acesso direto às peças usinadas, tornando o carregamento e descarregamento no espaço de medição consideravelmente mais simples. (HOCKEN; BOSCH, 2011).

Figura 7 - MMC do tipo braço horizontal



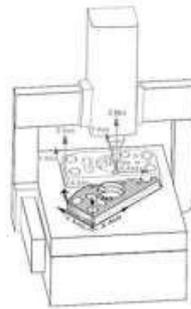
Fonte: Hexagon Metrology (2025)

2.2 MEDIÇÃO POR COORDENADAS

2.2.1 Princípio de medição por coordenadas

Conforme ilustrado na Figura 8, o processo de medição por coordenadas se fundamenta no sistema cartesiano (x, y, z), o qual habilita a execução de medições tridimensionais (SMITH, 2021). Esse enfoque possibilita uma exata determinação da posição de um ponto específico na superfície da peça por meio das coordenadas cartesianas. Com a coleta de uma série de pontos, torna-se viável a minuciosa construção dos elementos geométricos desejados (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008).

Figura 8 - Máquina de Medição por Coordenadas.



Fonte: Hexagon (2019).

Segundo Hamburg-Piekar (2006, p. 7), “em MMC, a geometria de uma peça é obtida por apalpação de pontos discretos sobre a superfície. Cada ponto medido é expresso na forma de coordenadas medidas”.

As coordenadas dos pontos são obtidas através dos sensores, ou apalpadores, que são dispositivos que geram os sinais da MMC. “O sistema reconhece a coleta de uma característica quando a ponta do apalpador toca uma peça fazendo com que a haste sofra um deslocamento ou deflexão.” (ALMEIDA, 2015). As MMC’s consistem fundamentalmente dos subsistemas detalhados na Figura 9.

Figura 9 - Máquina de Medição por Coordenadas e seus subsistemas.



Fonte: Hamburg-Piekar (2006).

2.3 FONTES DE ERRO NA MEDIÇÃO

De acordo com Albertazzi (2008, p. 168), o processo de medição pode ser conceituado como o "conjunto de elementos envolvidos em uma operação de medição, englobando o meio de medição, o procedimento empregado, o executor da medição, o método utilizado e a clara definição do mensurando".

Erros estão sempre presentes em sistemas diversos, inclusive nos processos de medição, representando a discrepância entre o valor real e a indicação obtida pelo sistema de medição (FANHA, 2011).

As fontes de erro de medição podem ser categorizadas em quatro grupos amplos: equipamento, no contexto atual representado pela Máquina de Medir por Coordenadas (MMC), ambiente, peça e operador (ARENHART, 2007). O diagrama de Ishikawa, apresentado na Figura 10, exibe essas fontes de erro.

Figura 10 - Diagrama de Ishikawa das principais fontes de erros na medição por coordenadas.



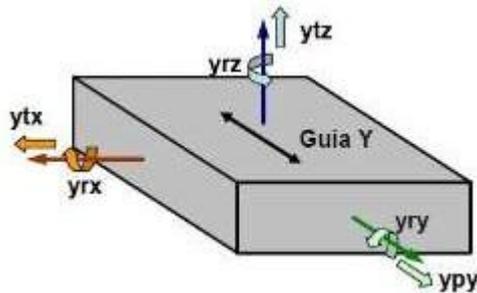
Fonte: Hamburg-Piekar (2006).

2.3.1 Máquina de Medição

Os erros geométricos apresentados pelas máquinas de medição, são consequências das imperfeições de fabricação ou de montagem dos componentes mecânicos, como as guias, mesas, escalas, mancais e rolamentos (BARROS, 2012).

O modelo mais utilizado para descrever os erros geométricos na máquina de medição é o de corpo rígido, mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Modelo de corpo rígido em relação ao eixo Y.



Fonte: Arenhart (2007).

Considerando o modelo de corpo rígido para uma guia apenas (eixo Y, como mostrado na Figura 8), “existem seis graus de liberdade (três de rotação e três de translação) que podem gerar erros de deslocamentos do sistema de apalpação em relação às escalas.” (ARENHART, 2007, p. 7).

2.3.2 Ambiente

As condições ambientais nas quais as medições são realizadas exercem influência direta sobre os resultados obtidos. Fontes que desempenham um papel significativo na introdução de erros relacionados ao ambiente incluem variações de temperatura, vibrações e a presença de partículas em suspensão. A variação de temperatura, embora controlada em laboratórios de medição, ainda apresenta fontes potenciais de erro térmico (FANHA, 2011).

- Fatores ambientais, como a presença de lâmpadas, iluminação natural e outras máquinas;
- Contribuição de calor proveniente das pessoas que operam a máquina;
- Memória térmica, em que a peça medida mantém a temperatura do ambiente circundante;
- Calor gerado pela própria Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) durante sua operação.

Os erros decorrentes de vibrações podem ser mitigados mediante a utilização de amortecedores na mesa da máquina e posicionando as máquinas de medição afastadas do ambiente de produção. Para minimizar os erros resultantes de partículas em suspensão, é importante manter a pressão na sala de medição superior à do ambiente externo (ARENHART, 2007).

2.3.3 Peça

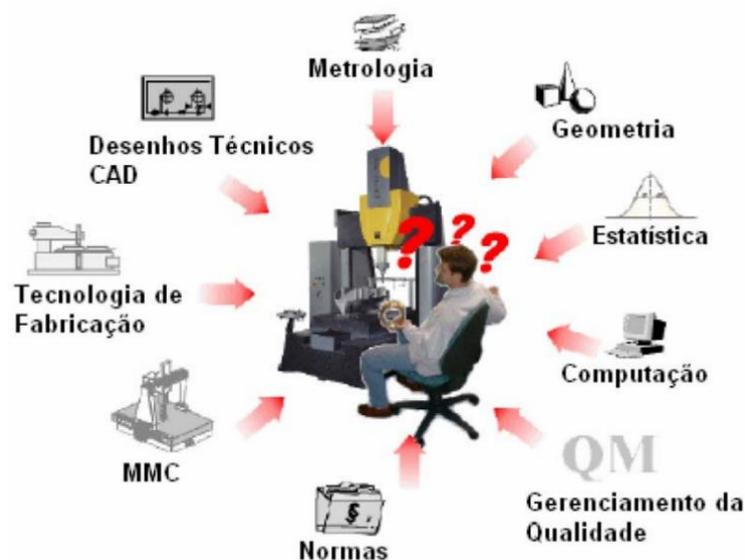
As propriedades da peça como o acabamento superficial (podem gerar interpretações equivocadas dos resultados da medição), rigidez, dureza, coeficiente de dilatação térmica (a peça pode dilatar caso a temperatura varie de forma significativa no ambiente), módulo de elasticidade (pode ocorrer uma deformação elástica quando a peça for apalpada), peso (pode deformar a estrutura da MMC), efeitos de fixação (resulta em fixação inadequada) e desvios na forma da peça, podem representar uma fonte de erro (BARROS, 2012).

2.3.4 Operador e estratégia de medição

Os erros provenientes do uso de estratégias de medição deficientes são relacionados diretamente à qualidade e à quantidade dos pontos adquiridos na extração das características a serem avaliada. Portanto, dependendo da estratégia, a medição pode gerar um desvio de posicionamento. (ARENHART, 2007)

As estratégias de medição são definidas pelo operador, então faz sentido afirmar que as habilidades do operador também possuem forte influência no processo de medição. Na Figura 12 estão mostrados alguns conhecimentos que o operador deve possuir, de forma com que ele possa minimizar os erros provenientes da estratégia de medição.

Figura 12 - Conhecimentos requeridos ao operador de MMC



Fonte: Fanha (2011).

2.4 REPETIBILIDADE

A repetibilidade é um dos principais componentes da incerteza de medição e está relacionada à variação observada quando um mesmo operador, utilizando o mesmo equipamento e sob as mesmas condições experimentais, realiza medições repetidas de uma mesma grandeza. Essa variação é exclusivamente atribuída aos efeitos aleatórios, uma vez que erros sistemáticos tendem a se manter constantes ao longo das medições repetitivas. (GUM)

Matematicamente, a repetibilidade pode ser expressa pelo desvio-padrão da repetibilidade que é dado pela equação (1):

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (1)$$

onde:

- X_i representa cada valor individual medido,
- \bar{X} é a média das medições,
- n o número total de medições repetidas.

Além disso, os valores de repetibilidade podem ser utilizados na Análise de Variância (ANOVA) para avaliar a influência de diferentes fatores no processo de medição. Na ANOVA, a variação observada nas medições pode ser decomposta em diferentes fontes de erro, permitindo a separação entre variações devido a fatores controláveis (como operadores ou instrumentos) e variações puramente aleatórias (relacionadas à repetibilidade).

Vale ressaltar que, enquanto as medições brutas podem conter parcelas de erros sistemáticos (como desvio de calibração ou deriva do instrumento), os valores da repetibilidade refletem unicamente os efeitos aleatórios, tornando-se um indicador confiável da precisão do sistema de medição.

2.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística empregada para comparar várias médias, oriundas de diferentes amostras. Matematicamente, ela é representada pela equação (2):

$$F = \frac{MSG}{MSE} \quad (2)$$

Onde F é a estatística de teste F, MSG é a média dos quadrados entre grupos, e MSE é a média dos quadrados dentro dos grupos.

A ANOVA permite determinar se a diferença observada entre as médias amostrais é devida, apenas, às variações aleatórias de uma amostra a outra, ou se os dados vêm de populações onde as médias são verdadeiramente diferentes. Essa análise é crucial para descobrir se as diferenças entre as médias são estatisticamente significativas.

Por fim, mesmo que se conclua que as médias são diferentes, é necessário também decidir se essas diferenças são o suficiente para poderem ser consideradas importantes. Isso é feito considerando o contexto específico do estudo e utilizando critérios relevantes para determinar a significância prática das diferenças observadas.

3 METODOLOGIA

3.1 MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS CNC AVALIADA

A MMC avaliada neste trabalho, que é do tipo pórtico móvel, está representada na Figura 13. Ela possui um volume de trabalho de 800 mm x 1200 mm x 600 mm (X, Y e Z). O software utilizado para operar a máquina é o PC-DIMS na versão 2016.

Figura 13 – Máquina de medição por coordenadas avaliada.



Fonte: O autor (2025).

O processo de programação da máquina inicia-se com a definição da peça e do plano de medição, seguida da fixação e referenciamento para estabelecer um sistema de coordenadas adequado a escolha de uma ponta compatível com a ordem de grandeza das dimensões a serem analisadas. Em seguida, programa-se a sequência de medições no software da CMM. O software utilizado para realizar a rotina de medição CNC e criação de relatórios de resultados das análises foi o PC DMIS.

Após a devida programação, essa máquina executa medições de geometrias complexas. Além disso, ela gera relatórios estatísticos detalhados, os quais subsidiam a tomada de decisões no processo produtivo, permitindo maior controle de qualidade e otimização dos recursos.

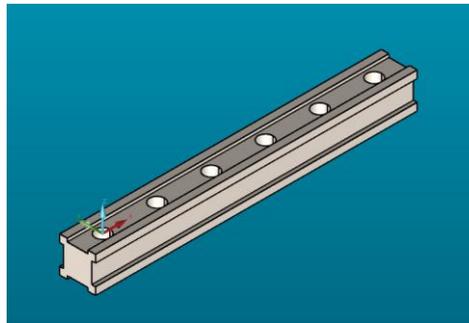
3.2 MÉTODO DE ENSAIO ESCOLHIDO E GEOMETRIA DA PEÇA ENSAIADA

A peça padrão de medição utilizado na pesquisa tem em seu projeto características muito exploradas em processo de medição cotidiana que se resume em distância linear e diâmetro.

Para contemplar as necessidades deste trabalho, foi utilizado um artefato padrão que reúne boa parte destes requisitos e que envolve processos simples em sua fabricação

Na prática, a peça padrão é uma barra de alumínio com seis furos dispostos em linha como ilustra a figura 14. O padrão utilizado neste trabalho é uma peça já utilizada em outras pesquisas correlatas no laboratório de metrologia da UFPE.

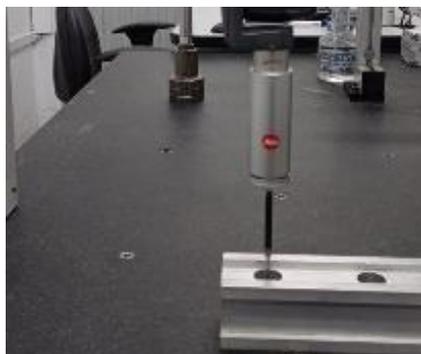
Figura 14 - Modelo CAD da peça.



Fonte: O Autor (2025).

O artefato reúne alguns requisitos positivos, entre eles estão a leveza, a durabilidade do material (alumínio) a facilidade de manipulação e posicionamento sobre o desempenho da máquina, além da facilidade de fabricação. Na figura 15 conseguimos ver o cabeçote posicionado para o momento de uma das medições.

Figura 15 - Ferramenta utilizada para o apalamento CNC.



Fonte: O Autor (2025).

Os parâmetros de operação que foram utilizadas para a medição da peça estão mostrados no Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros de máquina na MMC CNC.

Marca: Hexagon Modelo: B&S INSPECTOR Tipo: Ponte Móvel		
Cursos de operação (mm)	X	800
	Y	1200
	Z	600
Tamanho total (mm)	Lx	1200
	Ly	1750
	Lz	2450
Capacidade (kg)		500
Peso da máquina (kg)		718
Resolução da escala		0,004 μm
velocidade		1000 mm / s
Aceleração		1730 mm / s ²
Pressão do ar		120NL / min, 0,60MPa
Temperatura		20 \pm 2 °C
Umidade		45% - 75%

Fonte: O Autor (2025).

3.3 MÉTODO DE VALIDAÇÃO

Levando em consideração que a máquina de medição por coordenadas em análise tenha passado por um processo de calibração regular ou um processo de calibração após a montagem, no caso de máquinas novas, o próximo estágio envolve a realização de verificação.

O primeiro passo é a qualificação da máquina, que implica em seguir as diretrizes do programa de medição dedicado. Inicialmente, o programa solicita o deslocamento da máquina para sua posição de trabalho inicial. A ponta esférica de medição a ser utilizada é selecionada a partir do banco de dados do programa, ou então é criada uma configuração para uma nova ponta, especificando o cabeçote a ser usado, a força de apalpamento, o comprimento da haste e o diâmetro da ponta. Após essas configurações, é realizada a calibração da ponta de trabalho, medindo uma esfera padrão localizada sobre o desempenho da máquina.

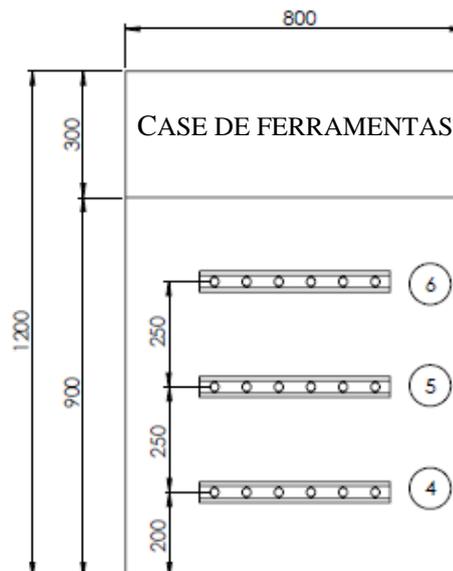
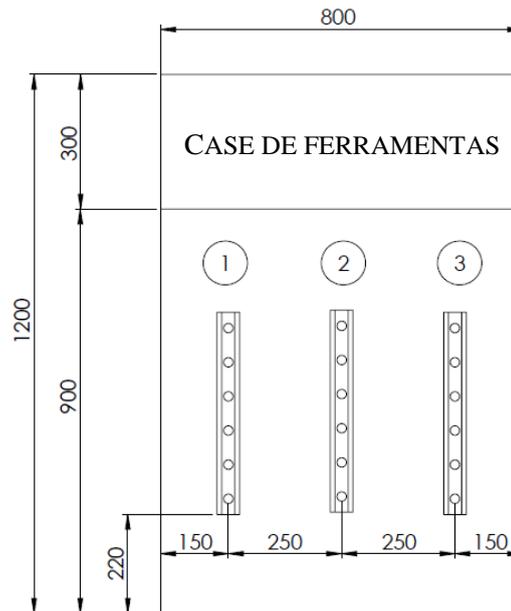
Antes de seguir o procedimento, foi necessário realizar o segundo passo, que consiste em posicionar a peça no local desejado sobre o desempenho da máquina e alinhar a máquina com a peça. Isso envolve a definição de um plano, uma linha e um ponto, conhecido como alinhamento PLP. Essas geometrias são medidas em um artefato padrão e são orientadas de acordo com o projeto mecânico e as instruções do programa de alinhamento. Neste experimento, o plano foi definido na face superior da peça, a origem do sistema de coordenadas foi posicionada no centro do furo 1 do padrão utilizado, e a direção no sentido longitudinal da peça. Para todas as seis posições usadas na máquina, a aresta 1 foi orientada na direção X da máquina.

O terceiro e último passo consistiu na realização das medições de cada furo do padrão em seis posições distintas, conforme ilustrado na figura 16. Para cada posição, serão realizadas 10 medições de maneira automática dos diâmetros internos dos 6 furos usando a opção "círculo" com um valor nominal de 20,00 mm. Para cada dimensão específica, serão feitas 10 repetições, com o objetivo de garantir a consistência dos dados e, conseqüentemente, embasar de forma sólida a tomada de decisões, entretanto o critério de aprovação do método será a ANOVA com confiança de 95%.

3.3.1 Posições avaliadas no volume de trabalho

Para que possamos analisar todo volume de trabalho escolhemos 6 posições aproveitando toda a extensão do desempenho, dessa maneira garantimos que grande parte do volume de trabalho seja analisada e validada como mostra a figura 16.

Figura 16 – Posições avaliadas

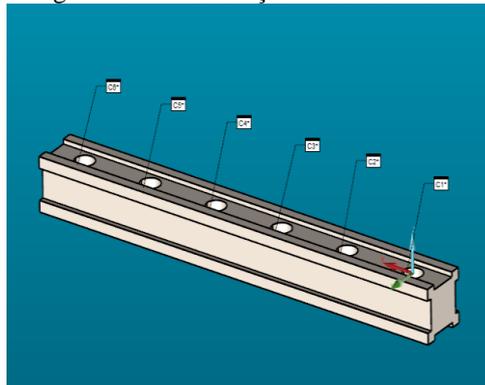


Fonte: O Autor (2025).

3.3.2 Diâmetros dos Furos

Para garantir a precisão da medição, a peça deve ser devidamente fixada na mesa da Máquina de Medição por Coordenadas (CMM), evitando qualquer movimentação que possa comprometer os resultados. Antes de iniciar a medição do furo, é necessário estabelecer um sistema de coordenadas, o que geralmente é feito por meio da medição de uma superfície plana adjacente. O processo de medição é realizado pela ponta esférica, que entra em contato com diversos pontos da superfície interna do furo. Para a determinação de um círculo bidimensional (2D), é necessário coletar no mínimo três pontos, nesse trabalho usei 5 pontos pois quanto maior o número de pontos coletados, maior será a precisão da medição, permitindo uma melhor caracterização da geometria do furo. Foram feitas medições dos diâmetros de cada furo da peça de referência, ou seja, como mostrada na Figura 17.

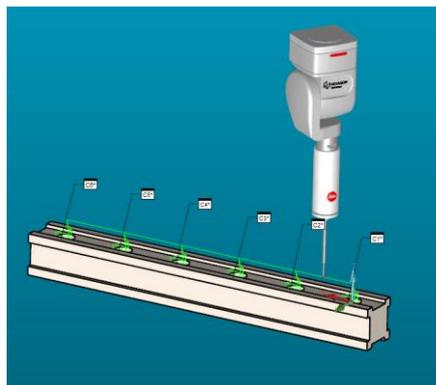
Figura 17 – Distribuição linear dos furos.



Fonte: O Autor (2025).

Como se trata de uma máquina CNC, a repetição das medições são feitas de maneira automática, evitando assim erros provenientes da interação com o operador. A movimentação ocorre conforme ilustração mostrada na figura 18.

Figura 18 - Representação do percurso para as medições repetidas.



Fonte: O Autor (2025).

3.4 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística empregada para comparar várias médias, oriundas de diferentes amostras. O método permite determinar se a diferença observada entre as médias amostrais é devida, apenas, às variações aleatórias de uma amostra a outra, ou se os dados vêm de populações onde as médias são verdadeiramente diferentes. Essa análise é crucial para descobrir se as diferenças entre as médias são estatisticamente significativas.

Por fim, mesmo que se conclua que as médias são diferentes, é necessário também decidir se essas diferenças são o suficiente para poderem ser consideradas importantes. Isso é feito considerando o contexto específico do estudo e utilizando critérios relevantes para determinar a significância prática das diferenças observadas.

Os dados foram submetidos à ANOVA e, posteriormente, à comparação múltipla das médias por cada um dos testes de médias. As pressuposições de normalidade e homogeneidade de variâncias foram verificadas pelo teste de Shapiro-Wilk. O nível de significância adotado em todos os casos foi o de 5%, e todas as análises estatísticas foram feitas usando o software (jamovi 2.6.13).

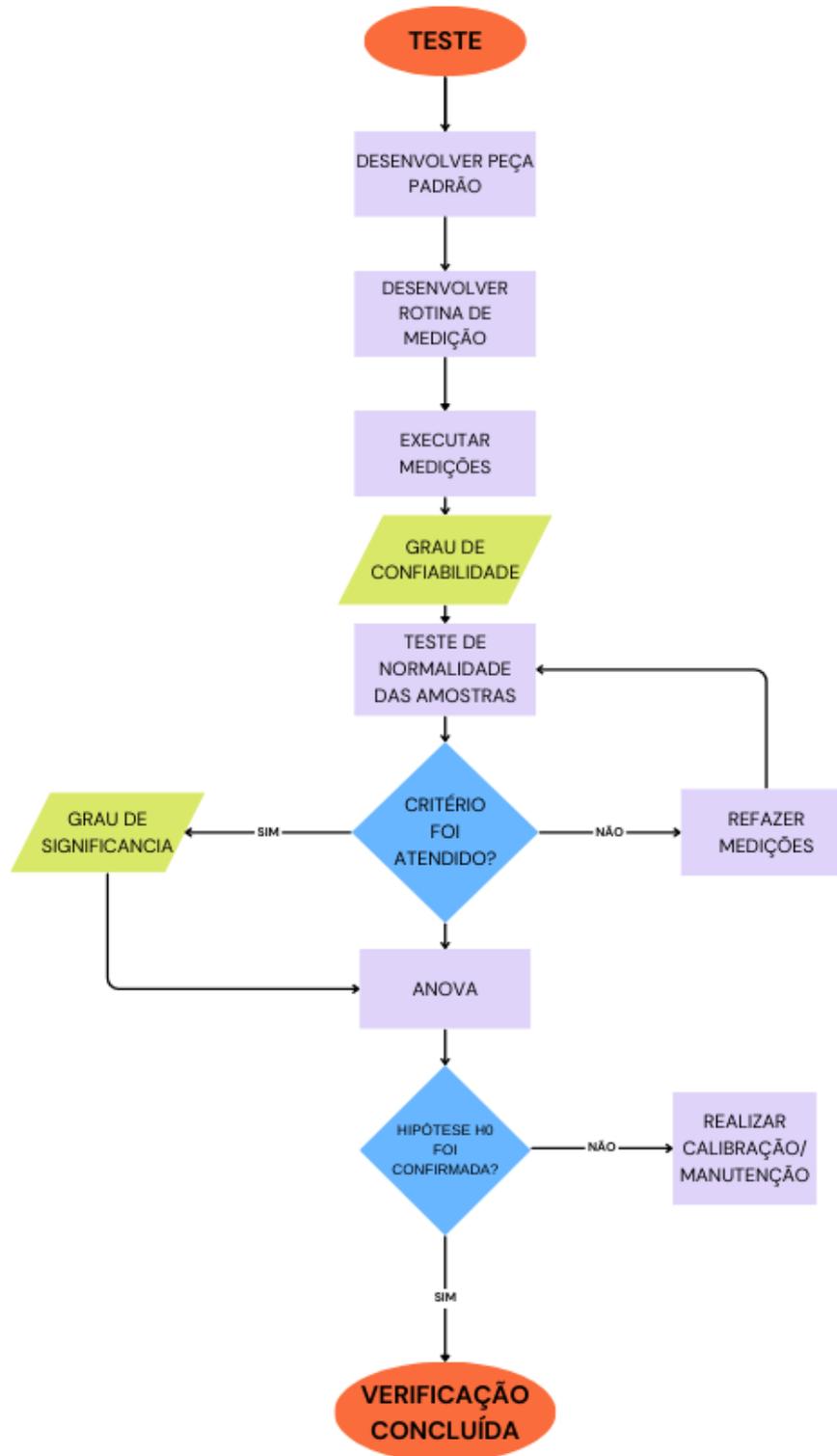
Para o nosso caso a hipótese nula (H_0) afirma que não há variação significativa entre as amostras e H_1 afirma que pelo menos uma amostra varia significativamente quando comparadas as outras.

3.5 PROCEDIMENTO (PASSO A PASSO)

- **PASSO 1** - DESENVOLVER PEÇA PADRÃO COM CARACTERÍSTICAS SIMILARES AS PEÇAS MEDIDAS NO COTIDIANO DA MÁQUINA.
- **PASSO 2** - DESENVOLVER ROTINA DE MEDIÇÃO PARA MEDIÇÃO NO CASO DE MÁQUINAS COM ACIONAMENTO CNC.
- **PASSO 3** - ESCOLHER 6 POSIÇÕES OU MAIS DESTRIBUÍDAS UNIFORMEMENTE AO LONGO DO EIXO X E Y.
- **PASSO 4** - MEDIR O ELEMENTO DA PEÇA 10 VEZES OU MAIS NAS POSIÇÕES ESCOLHIDAS.
- **PASSO 5** - COLETAR O RESULTADO DAS MEDIDAS DOS ELEMENTOS ESCOLHIDOS PARA O ESTUDO.
- **PASSO 6** - FAZER TESTE DE NORMALIDADE DAS AMOSTRAS. CASO O RESULTADO A RESPEITO DA NORMALIDADE DA AMOSTRA FOR NEGATIVO AS MEDIÇÕES DEVEM SER REFEITAS PARA AQUELE ELEMENTO NAQUELA DETERMINADA POSIÇÃO.
- **PASSO 7** - COMPARAR AS AMOSTRAS PRODUZIDAS PARA CADA ELEMENTO NAS POSIÇÕES DETERMINADAS APARTIR DA ANOVA.
(A ANOVA TESTARÁ DUAS IPÓTESES, H_0 E H_1 . H_0 DIZ QUE NÃO HÁ VARIAÇÃO SIGNIFICATIVA ENTRE AS POSIÇÕES COMPARADAS, JÁ H_1 DIZ QUE EXISTE PELO MENOS DUAS AMOSTRAS COM VARIAÇÃO SIGNIFICATIVA ENTRE-SE.)
- **PASSO 8** - ANALISANDO OS RESULTADOS TEREMOS AS SEGUINTES CONCLUSÕES, SE H_0 FOR CONFIRMADA A MÁQUINA PASSARÁ NO TESTE DE DESENHO. SE A IPÓTESE ALTERNATIVA FOR CONFIRMADA O FABRICANTE OU UMA EMPRESA DE MANUTENÇÃO ESPECIALIZADA DEVERÁ SER CONSULTADA.

O mesmo está representado na figura 19.

Figura 19 – Fluxograma de processo para verificação



Fonte: O Autor (2025)

4 RESULTADOS

4.1 Experimento no furo C1

Foram realizadas 10 medições repetidas no furo C1 em cada posição, abaixo a tabela 1 com as medidas.

Tabela 1– Medidas do diâmetro no furo C1.

FURO C1	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2	POSIÇÃO 3	POSIÇÃO 4	POSIÇÃO 5	POSIÇÃO 6
MEDIÇÃO 1	21,0714	21,0715	21,0717	21,0714	21,0714	21,0715
MEDIÇÃO 2	21,0715	21,0713	21,0716	21,0715	21,0717	21,0716
MEDIÇÃO 3	21,0715	21,0715	21,0717	21,0716	21,0715	21,0714
MEDIÇÃO 4	21,0713	21,0715	21,0716	21,0717	21,0716	21,0715
MEDIÇÃO 5	21,0715	21,0714	21,0717	21,0718	21,0718	21,0715
MEDIÇÃO 6	21,0716	21,0716	21,0715	21,0717	21,0715	21,0716
MEDIÇÃO 7	21,0714	21,0714	21,0714	21,0715	21,0715	21,0715
MEDIÇÃO 8	21,0716	21,0716	21,0716	21,0714	21,0716	21,0717
MEDIÇÃO 9	21,0715	21,0715	21,0715	21,0715	21,0715	21,0714
MEDIÇÃO 10	21,0714	21,0716	21,0714	21,0715	21,0716	21,0715
MÉDIA	21,0715	21,0715	21,0716	21,0716	21,0716	21,0715
DESVIO	0,00009	0,00010	0,00012	0,00013	0,00012	0,00009

Fonte: O Autor (2024).

Antes de proceder com a ANOVA dos dados, verificou-se inicialmente as pressuposições de normalidade no furo C1 nas seis posições diferentes como mostra o quadro 2 abaixo através do teste Shapiro Wilk o valor de p apresentou valores acima de 0,05 evidenciando distribuição normal dos dados amostrais.

Quadro 2 – Teste de normalidade C1.

Estatística Descritiva

Estatística Descritiva						
	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2	POSIÇÃO 3	POSIÇÃO 4	POSIÇÃO 5	POSIÇÃO 6
Média	21.0715	21.0715	21.0716	21.0716	21.0716	21.0715
Desvio-padrão	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
W de Shapiro-Wilk	0.9108	0.8858	0.8781	0.8960	0.9165	0.8850
p Shapiro-Wilk	0.28687	0.15201	0.12398	0.19775	0.32832	0.14880

Fonte: O Autor

Em seguida, fez-se a ANOVA dos dados do experimento, onde verificou-se que os tratamentos não apresentaram resultado significativo, ou seja, não houve evidências de diferença entre as médias das diferentes posições.

Quadro 3 – Teste ANOVA de Medições repetidas C1.

Efeito Intra-Sujeitos					
	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Posição	9.400e-8	5	1.880e-8	1.683	0.1582
Residual	5.027e-7	45	1.117e-8		

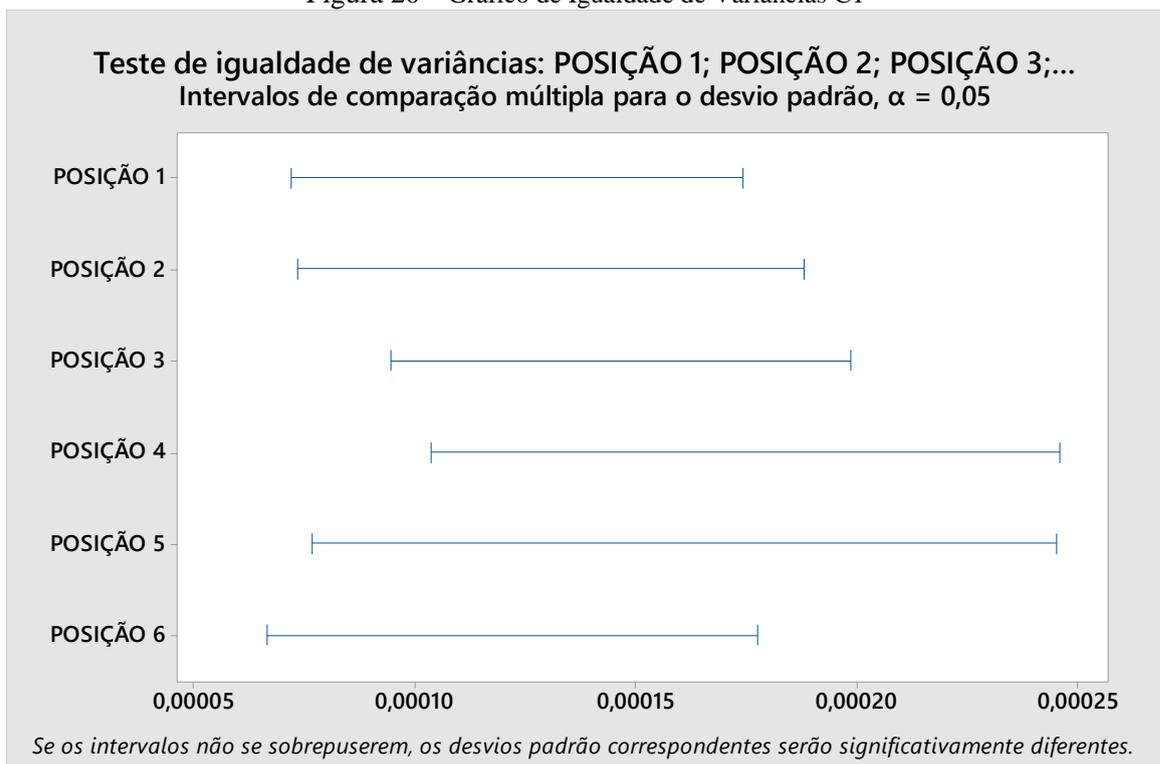
Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3

Fonte: O Autor (2025).

No teste ANOVA a estatística F calculada é menor que F crítico 2,59 (tabelado), fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a tridimensional apresentou boa repetibilidade. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 15,82%.

Graficamente é possível inferir que as amostras não tiveram diferença no intervalo de confiança como mostra a figura 20.

Figura 20 – Gráfico de Igualdade de Variâncias C1



Fonte: O Autor (2024).

4.2 Experimento no furo C2

Utilizando o mesmo método adotado com o furo C2 foram realizadas 10 medições repetidas no furo C2 em cada posição, abaixo a tabela 3 com as medidas.

Tabela 2 – Medidas do diâmetro no furo C2

FURO C2	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2	POSIÇÃO 3	POSIÇÃO 4	POSIÇÃO 5	POSIÇÃO 6
MEDIÇÃO 1	21,0435	21,0432	21,0431	21,0433	21,0432	21,0434
MEDIÇÃO 2	21,0436	21,0433	21,0431	21,0433	21,0434	21,0433
MEDIÇÃO 3	21,0432	21,0435	21,0433	21,0432	21,0434	21,0435
MEDIÇÃO 4	21,0435	21,0432	21,0432	21,0435	21,0432	21,0436
MEDIÇÃO 5	21,0432	21,0433	21,0432	21,0432	21,0434	21,0434
MEDIÇÃO 6	21,0434	21,0432	21,0434	21,0431	21,0435	21,0431
MEDIÇÃO 7	21,0434	21,0432	21,0432	21,0434	21,0432	21,0433
MEDIÇÃO 8	21,0436	21,0435	21,0431	21,0432	21,0434	21,0434
MEDIÇÃO 9	21,0435	21,0431	21,0434	21,0432	21,0434	21,0432
MEDIÇÃO 10	21,0434	21,0434	21,0432	21,0431	21,0431	21,0431
MÉDIA	21,0434	21,0433	21,0432	21,0433	21,0433	21,0433
DESVIO	0,00014	0,00014	0,00011	0,00013	0,00013	0,00016

Fonte: O Autor (2024).

Inicialmente foram verificadas as pressuposições de normalidade no furo C2 nas seis posições diferentes como mostra a quadro 4 abaixo através do teste Shapiro Wilk com o valor de p acima de 0,05 evidenciando distribuição normal dos dados amostrais.

Quadro 4 – Teste de normalidade C2.

Estatística Descritiva

Estatística Descritiva						
	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Posição 6
Média	21.04	21.04	21.04	21.04	21.04	21.04
Desvio-padrão	1.418e-4	1.370e-4	1.135e-4	1.269e-4	1.449e-4	1.636e-4
W de Shapiro-Wilk	0.8787	0.8877	0.8482	0.9032	0.8620	0.9465
p Shapiro-Wilk	0.1260	0.1599	0.0553	0.2375	0.0805	0.6272

Fonte: O Autor (2024).

Em seguida, fez-se a ANOVA dos dados do experimento, onde verificou-se que os tratamentos não apresentaram resultado significativo, ou seja, não houve evidências de diferença entre as médias das diferentes posições.

Quadro 5 – Teste ANOVA de Medições repetidas C2.

Efeito Intra-Sujeitos					
	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Posição	2.080e-7	5	4.160e-8	1.838	0.1247
Residual	1.019e-6	45	2.264e-8		

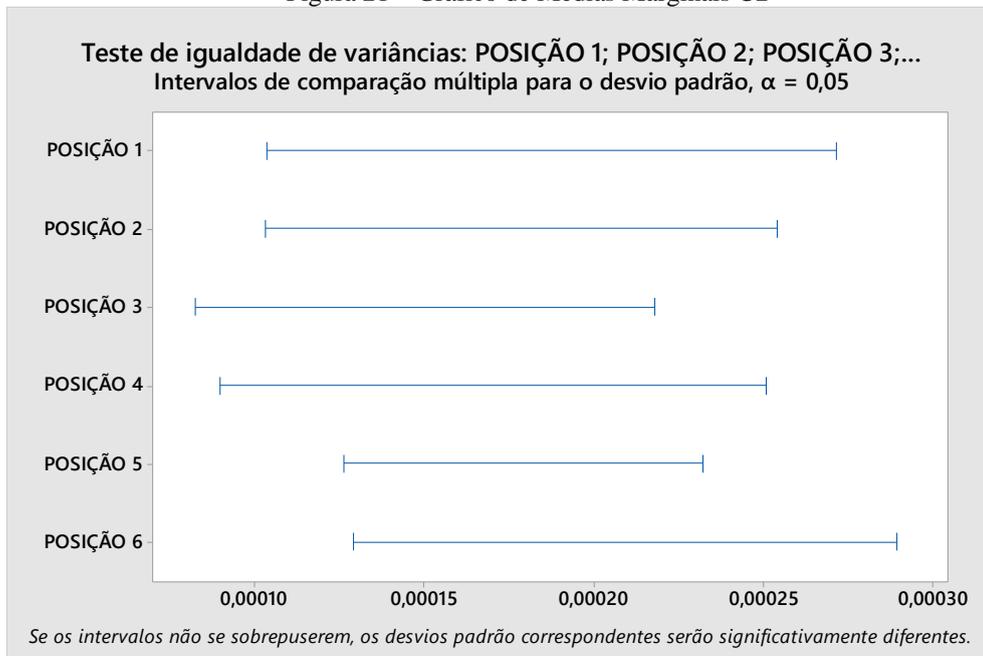
Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3

Fonte: O Autor (2024).

No teste ANOVA a estatística F calculada é menor que F crítico 2,59 (tabelado), fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a tridimensional apresentou boa repetibilidade. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 12,47%.

Graficamente é possível inferir que as amostras não tiveram diferença no intervalo de confiança como mostra a figura 21.

Figura 21 – Gráfico de Médias Marginais C2



Fonte: O Autor (2025).

4.3 Experimento no furo C3

Foram realizadas 10 medições repetidas no furo C3 em cada posição, abaixo a tabela 3 com as medidas.

Tabela 3 – Medidas do diâmetro no furo C3.

FURO C3	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2	POSIÇÃO 3	POSIÇÃO 4	POSIÇÃO 5	POSIÇÃO 6
MEDIÇÃO 1	21,0599	21,0599	21,0597	21,0595	21,0601	21,0597
MEDIÇÃO 2	21,06	21,0597	21,0595	21,0598	21,0598	21,0595
MEDIÇÃO 3	21,0598	21,0598	21,0597	21,0599	21,0599	21,0600
MEDIÇÃO 4	21,0596	21,0599	21,0599	21,0596	21,0598	21,0596
MEDIÇÃO 5	21,0600	21,0598	21,0596	21,0597	21,0596	21,0597
MEDIÇÃO 6	21,0601	21,0596	21,0595	21,0600	21,0597	21,0595
MEDIÇÃO 7	21,0597	21,0598	21,0598	21,0598	21,0598	21,0598
MEDIÇÃO 8	21,0596	21,0598	21,0594	21,0595	21,0596	21,0595
MEDIÇÃO 9	21,0598	21,0600	21,0592	21,0599	21,0597	21,0599
MEDIÇÃO 10	21,0598	21,0598	21,0593	21,0600	21,0601	21,0600
MÉDIA	21,0598	21,0598	21,0596	21,0598	21,0598	21,0597
DESVIO	0,00017	0,00011	0,00022	0,00019	0,00018	0,00020

Fonte: O Autor (2024).

Antes de proceder com a ANOVA dos dados, verificou-se inicialmente as pressuposições de normalidade no furo C3 nas seis posições diferentes como mostra o quadro 6 abaixo através do teste Shapiro Wilk o valor de p apresentou valores acima de 0,05 evidenciando distribuição normal dos dados amostrais.

Quadro 6 – Teste de normalidade C3.

Estatística Descritiva

Estatística Descritiva						
	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Posição 6
Média	21.06	21.06	21.06	21.06	21.06	21.06
Desvio-padrão	2.283e-4	1.101e-4	2.221e-4	1.889e-4	3.129e-4	1.989e-4
W de Shapiro-Wilk	0.9173	0.9203	0.9780	0.9091	0.8714	0.8861
p Shapiro-Wilk	0.3352	0.3591	0.9535	0.2749	0.1037	0.1531

Fonte: O Autor (2024).

Em seguida, fez-se a ANOVA dos dados do experimento, onde verificou-se que os tratamentos não apresentaram resultado significativo, ou seja, não houve evidências de diferença entre as médias das diferentes posições.

Quadro 7 – Teste ANOVA de Medições repetidas C3.

Efeito Intra-Sujeitos					
	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Posição	4.673e-7	5	9.347e-8	2.111	0.0815
Residual	1.993e-6	45	4.428e-8		

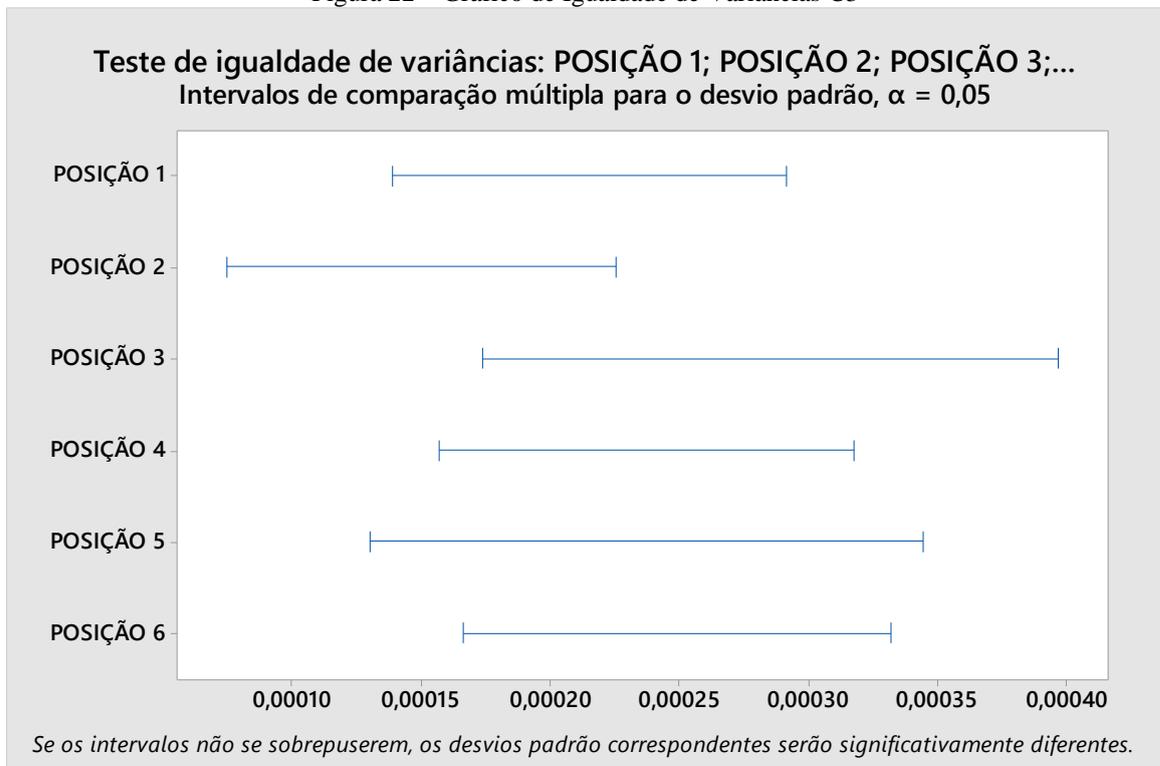
Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3

Fonte: O Autor (2025).

No teste ANOVA a estatística F calculada é menor que F crítico 2,59 (tabelado), fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a tridimensional apresentou boa repetibilidade. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 8,15%.

Graficamente é possível inferir que as amostras não tiveram diferença no intervalo de confiança como mostra a figura 22.

Figura 22 – Gráfico de Igualdade de Variâncias C3



Fonte: O Autor (2025).

4.1 Experimento no furo C4

Foram realizadas 10 medições repetidas no furo C4 em cada posição, abaixo a tabela 2 com as medidas.

Tabela 4 – Medidas do diâmetro no furo C4.

FURO C4	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2	POSIÇÃO 3	POSIÇÃO 4	POSIÇÃO 5	POSIÇÃO 6
MEDIÇÃO 1	21,0525	21,0522	21,0521	21,0525	21,0522	21,0524
MEDIÇÃO 2	21,0522	21,0521	21,0522	21,0524	21,0528	21,0523
MEDIÇÃO 3	21,0522	21,0523	21,0524	21,0523	21,0521	21,0521
MEDIÇÃO 4	21,0521	21,0524	21,0526	21,0526	21,0526	21,0523
MEDIÇÃO 5	21,0526	21,0522	21,0523	21,0524	21,0527	21,0524
MEDIÇÃO 6	21,0522	21,0522	21,0522	21,0525	21,0521	21,0523
MEDIÇÃO 7	21,0527	21,0521	21,0525	21,0528	21,0522	21,0521
MEDIÇÃO 8	21,0521	21,0523	21,0522	21,0524	21,0525	21,0523
MEDIÇÃO 9	21,0526	21,0526	21,0524	21,0523	21,0527	21,0522
MEDIÇÃO 10	21,0524	21,0520	21,0520	21,0525	21,0522	21,0523
MÉDIA	21,0524	21,0522	21,0523	21,0525	21,0524	21,0523
DESVIO	0,00023	0,00017	0,00019	0,00015	0,00028	0,00011

Fonte: O Autor (2025).

Antes de proceder com a ANOVA dos dados, verificou-se inicialmente as pressuposições de normalidade no furo C4 nas seis posições diferentes como mostra o quadro 8 abaixo através do teste Shapiro Wilk o valor de p apresentou valores acima de 0,05 evidenciando distribuição normal dos dados amostrais.

Quadro 8 – Teste de normalidade C4.

Estatística Descritiva

Estatística Descritiva

	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Posição 6
Média	21.05	21.05	21.05	21.05	21.05	21.05
Desvio-padrão	2.271e-4	1.713e-4	1.853e-4	1.494e-4	2.767e-4	1.059e-4
W de Shapiro-Wilk	0.8809	0.9397	0.9692	0.8913	0.8545	0.8456
p Shapiro-Wilk	0.13346	0.54933	0.88345	0.17555	0.06569	0.05147

Fonte: O Autor (2024).

Em seguida, fez-se a ANOVA dos dados do experimento, onde verificou-se que os tratamentos apresentaram resultado significativo, evidenciado pelo valor de p acima de 0,05.

Quadro 9 – Teste ANOVA de Medições repetidas C4.

ANOVA de Medições Repetidas

Efeito Intra-Sujeitos					
	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Fator Med. Rep. 1	3.960e-7	5	7.920e-8	2.217	0.06895
Residual	1.607e-6	45	3.572e-8		

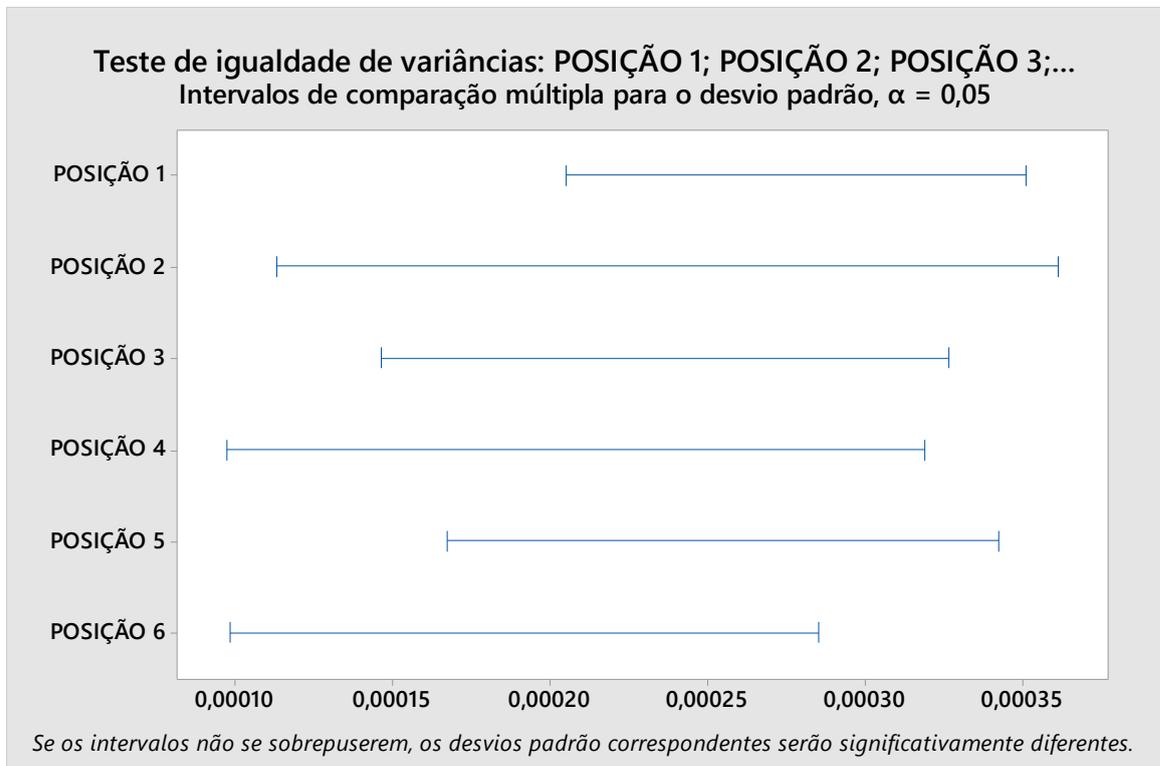
Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3

Fonte: O Autor (2024).

No teste ANOVA a estatística F calculada é menor que F crítico 2,59 (tabelado), fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a tridimensional apresentou boa repetibilidade. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 6,89%.

Graficamente é possível inferir que as amostras não tiveram diferença no intervalo de confiança como mostra a figura 23.

Figura 23 – Gráfico de Igualdade de Variâncias



Fonte: O Autor (2024).

4.1 Experimento no furo C5

Foram realizadas 10 medições repetidas no furo C5 em cada posição, abaixo a tabela 5 com as medidas.

Tabela 5 – Medidas do diâmetro no furo C5.

FURO C5	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2	POSIÇÃO 3	POSIÇÃO 4	POSIÇÃO 5	POSIÇÃO 6
MEDIÇÃO 1	21,0115	21,0117	21,0116	21,0114	21,0117	21,0114
MEDIÇÃO 2	21,0116	21,0113	21,0115	21,0116	21,0113	21,0118
MEDIÇÃO 3	21,0114	21,0118	21,0114	21,0114	21,0119	21,0112
MEDIÇÃO 4	21,0115	21,0118	21,0113	21,0116	21,0117	21,0110
MEDIÇÃO 5	21,0114	21,0114	21,0115	21,0115	21,0118	21,0119
MEDIÇÃO 6	21,0113	21,0117	21,0114	21,0114	21,0116	21,0115
MEDIÇÃO 7	21,0116	21,0119	21,0113	21,0117	21,0115	21,0113
MEDIÇÃO 8	21,0115	21,0117	21,0116	21,0115	21,0114	21,0110
MEDIÇÃO 9	21,0114	21,0116	21,0114	21,0117	21,0110	21,0114
MEDIÇÃO 10	21,0115	21,0117	21,0116	21,0116	21,0118	21,0115
MÉDIA	21,0115	21,0117	21,0115	21,0115	21,0116	21,0114
DESVIO	0,00009	0,00018	0,00012	0,00012	0,00028	0,00030

Fonte: O Autor (2024).

Antes de proceder com a ANOVA dos dados, verificou-se inicialmente as pressuposições de normalidade no furo C5 nas seis posições diferentes como mostra a quadro 10 abaixo através do teste Shapiro Wilk o valor de p apresentou valores acima de 0,05 evidenciando distribuição normal dos dados amostrais.

Quadro 10 – Teste de normalidade.

Estatística Descritiva

Estatística Descritiva						
	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Posição 6
Média	21.01	21.01	21.01	21.01	21.01	21.01
Desvio-padrão	9.487e-5	1.838e-4	1.174e-4	1.174e-4	2.751e-4	2.981e-4
W de Shapiro-Wilk	0.9108	0.8850	0.8780	0.8780	0.9284	0.9426
p Shapiro-Wilk	0.2869	0.1488	0.1239	0.1239	0.4323	0.5824

Fonte: O Autor (2024).

Em seguida, fez-se a ANOVA dos dados do experimento, onde verificou-se que os tratamentos não apresentaram resultado significativo, ou seja, não houve evidências de diferença entre as médias das diferentes posições.

Quadro 11 – Teste ANOVA de Medições repetidas.

Efeito Intra-Sujeitos					
	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Posição	4.293e-7	5	8.587e-8	2.019	0.0941
Residual	1.914e-6	45	4.253e-8		

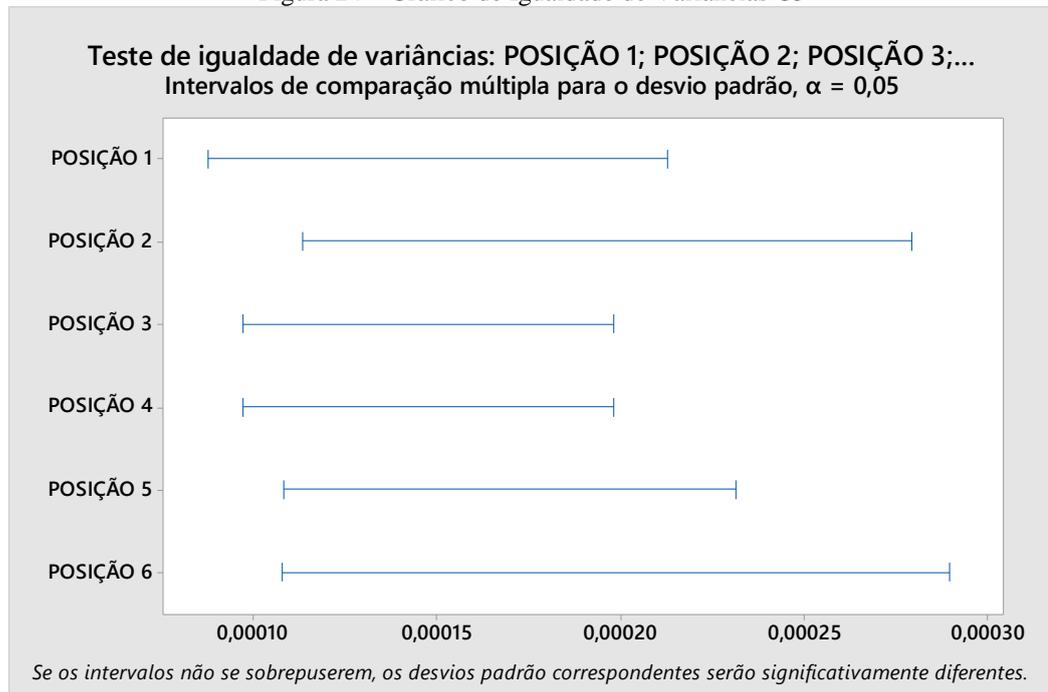
Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3

Fonte: O Autor (2024).

No teste ANOVA a estatística F calculada é menor que F crítico 2,59 (tabelado), fazendo com que a hipótese H_0 seja aceita, ou seja, a tridimensional apresentou boa repetibilidade. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H_0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 9,41%.

Graficamente é possível inferir que as amostras não tiveram diferença no intervalo de confiança como mostra a figura 24.

Figura 24 – Gráfico de Igualdade de Variâncias C5



Fonte: O Autor (2024).

4.1 Experimento no furo C6

Foram realizadas 10 medições repetidas no furo C6 em cada posição, abaixo a tabela 6 com as medidas.

Tabela 6 – Medidas do furo C6 em seis posições diferentes.

FURO C6	POSIÇÃO 1	POSIÇÃO 2	POSIÇÃO 3	POSIÇÃO 4	POSIÇÃO 5	POSIÇÃO 6
MEDIÇÃO 1	21,0426	21,0426	21,0425	21,0422	21,0422	21,0424
MEDIÇÃO 2	21,0421	21,0420	21,0421	21,0424	21,0421	21,0422
MEDIÇÃO 3	21,0423	21,0422	21,0425	21,0422	21,0423	21,0425
MEDIÇÃO 4	21,0422	21,0421	21,0423	21,0423	21,0421	21,0423
MEDIÇÃO 5	21,0423	21,0423	21,0424	21,0420	21,0423	21,0422
MEDIÇÃO 6	21,0421	21,0422	21,0422	21,0421	21,0422	21,0425
MEDIÇÃO 7	21,0422	21,0425	21,0426	21,0424	21,0420	21,0421
MEDIÇÃO 8	21,0425	21,0421	21,0424	21,0422	21,0424	21,0424
MEDIÇÃO 9	21,0420	21,0424	21,0425	21,0420	21,0422	21,042
MEDIÇÃO 10	21,0422	21,0423	21,0426	21,0424	21,0425	21,0422
MÉDIA	21,0423	21,0423	21,0424	21,0422	21,0422	21,0423
DESVIO	0,00018	0,00019	0,00017	0,00015	0,00015	0,00017

Fonte: O Autor (2024).

Antes de proceder com a ANOVA dos dados, verificou-se inicialmente as pressuposições de normalidade no furo C5 nas seis posições diferentes como mostra o quadro 12 abaixo através do teste Shapiro Wilk o valor de p apresentou valores acima de 0,05 evidenciando distribuição normal dos dados amostrais.

Quadro 12 – Teste de normalidade.

Estatística Descritiva

Estatística Descritiva						
	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Posição 6
Média	21.04	21.04	21.04	21.04	21.04	21.04
Desvio-padrão	1.841e-4	1.889e-4	1.663e-4	1.549e-4	1.494e-4	1.687e-4
W de Shapiro-Wilk	0.9243	0.9645	0.9161	0.8868	0.9662	0.9374
p Shapiro-Wilk	0.3946	0.8353	0.3254	0.1559	0.8540	0.5249

Fonte: O Autor (2024).

Em seguida, fez-se a ANOVA dos dados do experimento, onde verificou-se que os tratamentos não apresentaram resultado significativo, ou seja, não houve evidências de diferença entre as médias das diferentes posições.

Quadro 13 – Teste ANOVA de Medições repetidas.

Efeito Intra-Sujeitos					
	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Posição	2.393e-7	5	4.787e-8	1.883	0.1162
Residual	1.144e-6	45	2.542e-8		

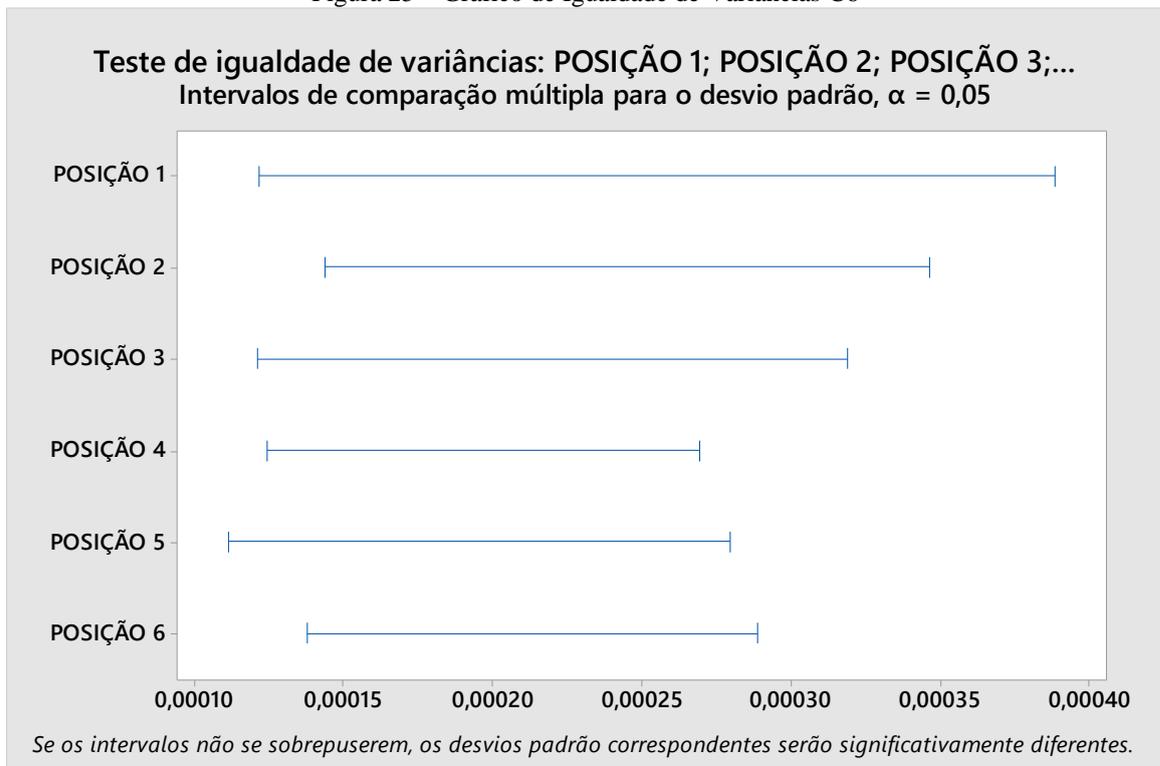
Nota. Soma de Quadrados de Tipo 3

Fonte: O Autor (2024).

No teste ANOVA a estatística F calculada é menor que F crítico 2,59 (tabelado), fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a tridimensional apresentou boa repetibilidade. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 11,62%.

Graficamente é possível inferir que as amostras não tiveram diferença no intervalo de confiança como mostra a figura 25.

Figura 25 – Gráfico de Igualdade de Variâncias C6



Fonte: O Autor (2025).

5 CONCLUSÃO

- Realizar medições repetidas em uma peça de referência utilizando a MMC;
Medidas executadas respeitando as fontes de erros de maneira que elas sejam minimizadas.
- Coletar os dados resultantes das medições repetidas, registrando os valores obtidos em cada medição;
Os valores obtidos foram armazenados em uma planilha excel.
- Utilizar a análise de variância (ANOVA) para estabelecer o grau de interferência nos grupos de dados em função da posição;
Quando garantidas das considerações necessárias (distribuição normal/homogeneidade de variâncias) o teste foi realizado, levando a conclusão que não há variação significativa entre as amostras obtidas medindo a peça em posições diferentes do volume de trabalho.
- Criar um procedimento para avaliar a repetibilidade de uma MMC;
Foi desenvolvido um passo a passo para auxiliar o usuário responsável pela análise, somado a isso foi criado um fluxograma que representa de maneira gráfica etapas necessárias para a realização do estudo.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificar a repetibilidade da MMC em outras posições;
- Verificar a repetibilidade da MMC variando a posição da peça ao longo do eixo z.
- Fazer o teste da ANOVA para um grau de significância menor.

7 REFERÊNCIAS

1. ÁLVARES, A. J. (1990). A tecnologia de medição por coordenadas como base para regulação da qualidade geométrica do processo de usinagem CNC. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: [link]. Acesso em: 14 ago. 2023.
2. BARROS, W. S. (2012). Estudo sobre a confiabilidade metrológica de máquinas de medição por coordenadas na utilização de varreduras por contato. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: [link]. Acesso em: 14 ago. 2023.
3. DELGADO, C.; EDUARDO, J. (2018). Diseño e implementación de un prototipo de router CNC portátil para el maquinado de superficies de madera, mediante el uso de software libre para el laboratorio de mecatrónica. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidad de las fuerzas armadas. Disponível em: [link]. Acesso em: 14 ago. 2023.
4. FANHA, M. C. A. (2011). Estudo de estratégias de medição para controle do dimensionamento geométrico e toleranciamento (GD&T) em peças estampadas. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Pará. Disponível em: [link]. Acesso em: 14 ago. 2023.
5. FERREIRA, A. M. (2013). Estudo dos erros de forma no fresamento de geometrias complexas. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Tupy. Disponível em: [link]. Acesso em: 14 ago. 2023.
6. HOCKEN, R.J.; BOSCH, J.A. The international standard of length. In: HOCKEN, R.J.; PEREIRA, P.H. Coordinate Measuring Machines and Systems. 2.ed. New York, Marcel Dekker, Inc. 2011.
7. HAMBURG-PIEKAR, D. S. (2006). Calibração de peças padrão em máquinas de medir por coordenadas. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: [link]. Acesso em: 14 ago. 2023.
8. MSA - MANUAL DE REFERÊNCIA – Análise dos Sistemas de Medição, 4ª edição, 2010. Disponível em: <http://goo.gl/NmyXUJ>. Acesso em 10 setembro de 2023.
9. NETO, A. A. B. (2003). A tecnologia da medição por coordenadas na calibração de peças padrão e medição de peças com geometrias complexas. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: [link]. Acesso em: 14 ago. 2023.
10. OLIVEIRA, J. E. F. (2009). Desenvolvimento de um programa computacional para a integração de dados de projeto, fabricação e medição de peças torneadas com ênfase na síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: [link]. Acesso em: 14 ago. 2023.
11. SILVA, E. S.; NÓBREGA, L. H. M. S.; SILVA, V. N.; FILHO, M. S. (2014). Projeto e desenvolvimento de uma máquina de medição por coordenadas automatizada. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automação, Belo Horizonte, MG. 20 a 24 de set.

12. HEXAGON. (2019). Introdução à coordenação de metrologia. Disponível em: [link]. Acesso em: 01 ago. 2023.
13. RENISHAW. (2019). QC20-W ballbar system. Disponível em: [link]. Acesso em: 15 ago. 2023.
14. ISO 1101. (2017). Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO - International Standard Organization.
15. TRAPET, E.; WÄLDELE, F. (1993). Quality Assurance of Coordinate Measuring Machines, PTB.
16. ALBERTAZZI, A. G.; SOUSA, A. R. (2008). Fundamentos de metrologia científica e industrial. Barueri: Manole.
17. ABREU, A. M. (2007). Capítulo 5: Testes de hipóteses estatísticas. Disponível em: [link]. Acesso em: 14 ago. 2023.
17. SMITH, J. R. (2021). Avanços recentes em tecnologia de medição por coordenadas. *Journal of Metrology and Measurement*, 45(3), 321-335.
18. GOMES, L. S. (2019). Aplicações da metrologia dimensional em processos industriais. *Revista Brasileira de Metrologia*, 25(1), 87-102.
19. MARTINS, R. F.; SANTOS, P. A. (2018). Tendências em calibração de máquinas de medição por coordenadas. In: *Proceedings do Congresso Internacional de Metrologia*, São Paulo, SP.
20. RODRIGUES, C. A. (2017). Desenvolvimento de sistemas de medição para controle de qualidade na indústria automobilística. *Revista de Metrologia Industrial*, 12(2), 45-60.
21. LIMA, E. M. (2016). Metrologia 4.0: A revolução da metrologia na indústria inteligente. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Metrologia*, Brasília, DF.
22. SILVA, J. L. et al. Avaliação de incertezas em medições realizadas em máquinas de medir por coordenadas (MMC). *Revista Brasileira de Metrologia*, 2009.
23. XAVIER, W. G. et al. Estudo experimental para avaliação da incerteza de medição de máquinas de medir por coordenadas tridimensionais. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 2017.
24. SILVA, A. B. et al. Avaliação de desempenho em máquinas de medir por coordenadas. *Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)*, 2016.
25. CUNHA, D. A. et al. Metodologia para avaliação de desempenho em máquinas de medir por coordenadas tridimensionais. *Revista Produção Online*, 2012.

26. NUNES, M. V. et al. Estudo da variação de repetibilidade e reprodutibilidade em medições de peças produzidas na indústria automotiva utilizando Máquina de Medir por Coordenadas (MMC). Revista Produção Online, 2011.
27. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição* (GUM). JCGM 100:2008. Disponível em: <https://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>