

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO
DE TOOLSETTER A LASER PARA MEDIÇÃO DE PEÇAS E
FERRAMENTAS EM TORNOS CNC**

LUCAS ZAMPAR BERNARDI

**PIRACICABA
2022**

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE TOOLSETTER A LASER PARA MEDIÇÃO DE PEÇAS E FERRAMENTAS EM TORNOS CNC

LUCAS ZAMPAR BERNARDI

ORIENTADOR: PROF. DR. MILTON VIERIA JUNIOR

**Dissertação apresentada à Banca
Examinadora do Programa de Pós-
graduação em Engenharia de
Produção da UNIMEP como
exigência parcial para obtenção do
título de Mestre em Engenharia de
Produção**

**PIRACICABA, SP
2022**

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP
Bibliotecário: Joyce Rodrigues de Freitas – CRB: 8/101115

B523a Bernardi, Lucas Zampar
Análise da viabilidade técnica da utilização de toolsetter a laser
para medição de peças e ferramentas em tornos CNC /Lucas
Zampar Bernardi – 2022.
106 fls.; il.; 30 cm.

Orientador (a): Profa. Dra. Milton Vieira Junior.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Metodista de Piracicaba,
Engenharia de Produção, Piracicaba, 2022.

1. Toolsetter. 2. Pré-ajustagem de ferramentas. 3. pressetting. I.
Bernardi, Lucas Zampar. II. Título

CDD – 629.8

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE TOOLSETTER A LASER PARA MEDIÇÃO DE PEÇAS E FERRAMENTAS EM TORNOS CNC

LUCAS ZAMPAR BERNARDI

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 04 de março de 2022, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:



Prof. Dr. Milton Vieira Júnior - PPGE/UNIMEP
Orientador e Presidente



Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon - PPGE/UNIMEP



Prof. Dr. Ivan Correr – FIEL

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil -CAPES - Brasil

Agradeço a Deus pela possibilidade de ter vindo ao mundo e de contribuir para torná-lo um pouco melhor.

Aos meus pais, pelos ensinamentos dos valores, pelo apoio e pelo sacrifício para que eu tivesse uma boa educação pessoal e profissional.

À minha esposa, Angélica, à minha filha, Marina e aos meus familiares, pelo apoio incondicional, companheirismo e incentivo, sempre.

Ao Milton, pela orientação, compreensão e companheirismo.

Ao Ivan, pela disposição, suporte, ajuda e sempre pronto atendimento.

Ao Pedro, pelo apoio na operação do torno CNC, ensaios, e por me ajudar a sanar dúvidas a eles relacionadas.

Aos sócios André, Danyel e Eduardo, pelas palavras de apoio e desejos de sucesso.

Ao Felipe, pelo apoio, companheirismo e desenvolvimento dos aparatos experimentais.

À Márcia, pela revisão do trabalho.

Por fim, agradeço ao tempo, pelo amadurecimento profissional e pessoal.

RESUMO

A etapa de *setup* de um torno CNC é uma etapa importante para garantir a qualidade das peças produzidas e a produtividade da máquina. No Brasil, o ajuste das ferramentas de máquinas CNC é feito majoritariamente de forma manual, o que contribui para elevação do tempo de ociosidade das máquinas, avaria de ferramentas e diminuição da qualidade das peças usinadas. Nesse trabalho, analisou-se, em ensaios que simularam condições reais de trabalho de um torno CNC, a possibilidade de uso de um *toolsetter* a laser — um sistema de medição automática de ferramentas — para fazer a medição das ferramentas e também das peças usinadas antes de retirá-las da placa do torno, de modo a evitar as perdas de qualidade oriundas dessa etapa do processo. Pelos ensaios realizados, a proposta se mostrou capaz não apenas de fazer a medição das ferramentas dentro de um intervalo de tolerância admissível, como também de realizar a medição de peças em processo, contribuindo, assim, com a diminuição de custos e o aumento da produtividade dos processos de usinagem.

PALAVRAS-CHAVE: *toolsetter*, pré-ajustagem de ferramentas, *presseting*, torno CNC, medição laser.

ABSTRACT

The setup step of a CNC lathe is an important step to guarantee the quality of the parts produced and the productivity of the machine. In Brazil, the adjustment of CNC machine tools is mostly done manually, which contributes to increased idle time of machines, tool damage and decreased quality of machined parts. In this work, it was analyzed, in tests that simulated real working conditions of a CNC lathe, the possibility of using a laser toolsetter — an automatic tool measurement system — to measure the tools and also the parts machined before to remove them from the lathe plate, in order to avoid quality losses arising from this stage of the process. Through the tests carried out, the proposal proved capable not only of measuring the tools within an admissible tolerance range, but also of measuring parts in process, thus contributing to the reduction of costs and the increase of productivity. of machining processes.

KEY-WORDS: tool setter, tool presetting, CNC lathe, laser measuring.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	17
Produtividade e competitividade industrial	19
Objetivos deste trabalho.....	20
Metodologia	21
Estrutura da dissertação	22
2 – REVISÃO DA LITERATURA.....	23
Referenciamento de ferramentas em tornos CNC e medição de peças em processo ...	27
Medições manuais.....	28
Medições com o uso de sistemas de pré-ajustagem de ferramentas:	29
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	34
Equipamentos utilizados para os testes.....	35
Descrição do processo de testes.....	41
Verificação de posicionamento do centro de torneamento	41
Medição das ferramentas	45
Medição de peça usinada	46
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
Ensaio de ferramentas.....	51
Ensaio de peças – Diâmetro.....	55
Ensaio de peças – Comprimento.....	58
Ensaio de peças – diâmetro – eixo árvore movimentando.....	60
5 – CONCLUSÃO	63
ANEXOS	65
Anexo 1 – Dados obtidos pelo <i>toolsetter</i> na medição do pino calibrador	65
Anexo 2 – Dados obtidos pelo <i>toolsetter</i> na medição de ferramentas.....	66
Anexo 3 – Dados obtidos pelo <i>toolsetter</i> na medição dos diâmetros da peça	80
Anexo 4 – Dados obtidos pelo <i>toolsetter</i> na medição dos comprimentos da peça.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Outros impactos da pré-ajustagem das ferramentas no processo produtivo	26
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura metodológica da pesquisa	22
Figura 2 – Laboratório de manufatura da UNIMEP, Campus Santa Bárbara d’Oeste.	34
Figura 3 – Toolsetter interno modelo TSG-130 (GeoTecno).....	35
Figura 4 – Torno CNC Multiplic 30D (Romi)	36
Figura 5 – Pino calibrador (GeoTecno)	37
Figura 6 – Relógio comparador (Mitutoyo)	37
Figura 7 – Corpo de teste (GeoTecno)	38
Figura 8 – Pastilha para acabamento (Mitsubishi)	38
Figura 9 – Broca de aço rápido HSS (Dormer)	39
Figura 10 – Pastilha bedame para cortes e sulcos (Korloy)	39
Figura 11 – Pastilha metal duro para desbaste (Iscar)	40
Figura 12 – Pastilha metal duro para acabamento (Sandvik)	40
Figura 13 – Pastilha metal duro para rosqueamento (Sandvik)	41
Figura 14: Carro do torno.....	42
Figura 15: Configuração de aparato experimental para medição de ferramentas	42
Figura 16: conexão do toolsetter ao comando numérico	43
Figura 17: Programa GCODE	44
Figura 18: Fixação do <i>toolsetter</i> na placa do torno para medição de ferramentas	46
Figura 19: Desenho da peça usada para efetuar os ensaios de medição de peças com os pontos correspondentes.....	47
Figura 20 – Ferramenta pino calibrador: variação relativa à média (histograma)	50
Figura 21 – Ferramenta pino calibrador: distância x valor médio (dispersão)	51

Figura 22 – Ferramentas: desvio padrão - eixo X	54
Figura 23 – Ferramentas: desvio padrão — eixo Z	55
Figura 24 – Corpo de teste: desvio padrão — diâmetro	56
Figura 25 – Diâmetros reais do corpo de teste.....	56
Figura 26 – Corpo de teste: desvio padrão — diâmetro	57
Figura 27 – Corpo de teste: desvio padrão — comprimento	58
Figura 28 – Comprimentos reais do corpo de teste	58
Figura 29 – Corpo de teste: comprimento - diferença entre a medida do <i>toolsetter</i> e a medida real	60
Figura 30 – Corpo de teste: diâmetro x valor médio no ponto D2 com o eixo-árvore em 100 RPM (dispersão).....	61
Figura 31 – Corpo de teste: diâmetro x valor médio no ponto D3 com o eixo-árvore em 100 RPM (dispersão).....	62
Figura 32 – Pino calibrador: distância X valor médio (dispersão).....	65
Figura 33 – Pino calibrador: variação da ferramenta relativo à média (histograma)	65
Figura 34 – Ferramenta 1: eixo X-distância x valor médio (dispersão)	66
Figura 35 – Ferramenta 1: eixo X – variação da ferramenta relativo à média (histograma)	66
Figura 36 – Ferramenta 1: eixo Z – distância x valor médio (dispersão)	67
Figura 37 – Ferramenta 1: eixo Z – variação da ferramenta relativo à média (histograma)	67
Figura 38 – Ferramenta 2: eixo X — distancia x valor médio (dispersão)	69
Figura 39 – Ferramenta 2: eixo X – variação da ferramenta relativo à média (histograma)	69

Figura 40 – Ferramenta 2: eixo Z – distancia x valor médio (dispersão)	70
Figura 41 – Ferramenta 2: eixo Z – variação da ferramenta relativa à média (histograma)	70
Figura 42 – Ferramenta 5: eixo X – distancia x valor médio (dispersão)	71
Figura 43 – Ferramenta 5: eixo X – variação da ferramenta relativa à média (histograma)	71
Figura 44 – Ferramenta 5: eixo Z – distancia x valor médio (dispersão)	72
Figura 45 – Ferramenta 5: eixo Z – variação da ferramenta relativa à média (histograma)	72
Figura 46 – Ferramenta 6: eixo X – distancia x valor médio (dispersão)	73
Figura 47 – Ferramenta 6: eixo X – variação da ferramenta relativa à média (histograma)	73
Figura 48 – Ferramenta 6: eixo Z – distancia x valor médio (dispersão)	74
Figura 49 – Ferramenta 6: eixo Z – variação da ferramenta relativa à média (histograma)	74
Figura 50 – Ferramenta 7: eixo X – distancia x valor médio (dispersão)	75
Figura 51 – Ferramenta 7: eixo X – variação da ferramenta relativa à média (histograma)	75
Figura 52 – Ferramenta 7: eixo Z – distancia x valor médio (dispersão)	76
Figura 53 – Ferramenta 7: eixo Z – variação da ferramenta relativa à média (histograma)	76
Figura 54 – Ferramenta 8: eixo X – distancia x valor médio (dispersão)	77
Figura 55 – Ferramenta 8: eixo X – variação da ferramenta relativa à média (histograma)	77
Figura 56 – Ferramenta 8: eixo Z – distancia x valor médio (dispersão)	78

Figura 57 – Ferramenta 8: eixo Z – variação da ferramenta relativa à média (histograma)	78
Figura 58: Diâmetro 1: diâmetro absoluto (histograma)	80
Figura 59: Diâmetro 1: valor médio (dispersão)	80
Figura 60: Diâmetro 1: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)	81
Figura 61: Diâmetro 1: variação do diâmetro relativo à média (histograma)	81
Figura 62: Diâmetro 2: diâmetro absoluto (histograma)	82
Figura 63: Diâmetro 2: valor médio (dispersão)	82
Figura 64: Diâmetro 2: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)	83
Figura 65: Diâmetro 2: variação do diâmetro relativo à média (histograma)	83
Figura 66: Diâmetro 3: diâmetro absoluto (histograma)	84
Figura 67: Diâmetro 3: valor médio (dispersão)	84
Figura 68: Diâmetro 3: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)	85
Figura 69: Diâmetro 3: variação do diâmetro relativo à média (histograma)	85
Figura 70: Diâmetro 4: diâmetro absoluto (histograma)	86
Figura 71: Diâmetro 4: valor médio (dispersão)	86
Figura 72: Diâmetro 4: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)	87
Figura 73: Diâmetro 4: variação do diâmetro relativo à média (histograma)	87
Figura 74: Diâmetro 5: diâmetro absoluto-histograma	88
Figura 75: Diâmetro 5: valor médio (dispersão)	88
Figura 76: Diâmetro 5: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)	89
Figura 77: Diâmetro 5: variação do diâmetro relativo à média (histograma)	89
Figura 78: Diâmetro 6: diâmetro absoluto-histograma	90

Figura 79: Diâmetro 6: valor médio (dispersão)	90
Figura 80: Diâmetro 6: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)	91
Figura 81: Diâmetro 6: variação do diâmetro relativo à média (histograma)	92
Figura 82: Diâmetro 2: diâmetro absoluto (histograma) eixo árvore 100 RPM	92
Figura 83: Diâmetro 2: diâmetro x valor médio (dispersão) eixo árvore 100 RPM	93
Figura 84: Diâmetro 2: posicionamento da máquina - eixo Z+ e Z- (histograma) eixo árvore 100 RPM	93
Figura 85: Diâmetro 2: variação do diâmetro relativo à média (histograma) eixo árvore 100 RPM	94
Figura 86: Diâmetro 3: diâmetro absoluto (histograma) eixo árvore 100 RPM	94
Figura 87: Diâmetro 3: diâmetro x valor médio (dispersão) eixo árvore 100 RPM	95
Figura 88: Diâmetro 3: posicionamento da máquina - eixo Z+ e Z- (histograma) eixo árvore 100 RPM	95
Figura 89: Diâmetro 3: variação do diâmetro relativo à média (histograma) eixo árvore 100 RPM	96
Figura 90: Ponto L1: comprimento absoluto (histograma)	97
Figura 91: Ponto L1: Comprimento x valor médio (dispersão)	97
Figura 92: Ponto L1: variação do comprimento relativo à média (histograma)	98
Figura 93: Ponto L2: comprimento absoluto (histograma)	98
Figura 94: Ponto L2: Comprimento x valor médio (dispersão)	99
Figura 95: Ponto L2: variação do comprimento relativo à média (histograma)	99
Figura 96: Ponto L3: comprimento absoluto (histograma)	100
Figura 97: Ponto L3: Comprimento x valor médio (dispersão)	100
Figura 98: Ponto L3: variação do comprimento relativo à média (histograma)	101

Figura 99: Ponto L4: comprimento absoluto (histograma)	101
Figura 100: Ponto L4: Comprimento x valor médio (dispersão)	102
Figura 101: Ponto L4: variação do comprimento relativo à média (histograma).....	102
Figura 102: Ponto L5: comprimento absoluto (histograma)	103
Figura 103: Ponto L5: Comprimento x valor médio (dispersão)	104
Figura 104: Ponto L5: variação do comprimento relativo à média (histograma).....	104

LISTA DE SIGLAS

- IA – Inteligência Artificial
- IoT – *Internet of Things* - Internet das coisas
- CPPS – *Cyber-physical Production Systems* - Sistemas de produção físico-cibernéticos
- CNC – *Computer Numerical Control* – Controle Numérico Computadorizado
- NC – *Numerical Control* – Controle Numérico
- FMS – *Flexible Manufacturing Systems* - Sistemas flexíveis de manufatura
- CPS – *Cyber-physical System* - Sistema físico-cibernético
- CPMT – Máquina ferramenta físico-cibernética
- CNI – Confederação Nacional da Indústria
- RNC – Registro de Não Conformidade
- RPM – Rotações por Minuto

1 – INTRODUÇÃO

Todo o processo evolutivo dos meios de produção teve como objetivo melhorar a produtividade e a qualidade dos bens produzidos. As máquinas-ferramenta, ou máquinas operatrizes, tiveram importante papel nisso.

O torno foi a primeira máquina-ferramenta criada (CORRÊA, 2013). O processo de torneamento permite usinar peças de formas geométricas por meio da revolução e de uma ferramenta de movimento regulável que vai de encontro à superfície da peça, removendo material. Com torneamento é possível confeccionar eixos e polias por exemplo.

De início operado manualmente, o torno passou por todas as etapas evolutivas das máquinas-ferramenta, durante as revoluções industriais, e hoje pode ser operado automaticamente. O que se buscou, nesse aprimoramento, foi melhorar a usinagem de alta precisão, garantir a repetibilidade das peças, reduzir desperdícios, retrabalhos e custos e aumentar a produtividade industrial (CORRÊA, 2013 e LIU e XU, 2017).

A implementação dos controles numéricos (NC, do inglês, *Numerical Control*) em máquinas ferramentas, com programas armazenados em cartões ou fitas perfuradas, ou ainda em fitas magnéticas, representou um grande avanço tecnológico para a indústria. Quando o avanço da computação se encontrou com as máquinas-ferramenta NC, por volta da década de 1970, surgiram as primeiras máquinas CNC (do inglês, *Computer Numerical Control*), ou seja, com controle numérico computadorizado. Isso mudou o cenário de fabricação, tornando mais fácil a produção de estruturas curvas ou 3-D complexas, por exemplo, e flexibilizando a produção de peças para diferentes componentes (LIU e XU, 2017). O torno acompanhou essa mudança, e passou-se a ter os tornos CNC.

São consideradas máquinas CNC os equipamentos que operam posicionando ferramentas e peças e ajustando parâmetros de usinagem de acordo com um programa desenvolvido

previamente e executado por um computador. Sua introdução otimizou os processos industriais de usinagem, tornando possível automatizá-los completamente. Além disso, as máquinas CNC tornaram a usinagem mais flexível, pois o tempo de pré-ajustagem de uma nova linha é muito menor quando comparado aos processos tradicionais de usinagem. Em outras palavras, diferentes peças podem ser produzidas com rapidez em uma mesma máquina operatriz, o que é essencial em sistemas flexíveis de manufatura (FMS - do inglês *Flexible Manufacturing System*) fundamentais para a competitividade das empresas, seja pela necessidade de ampliação da gama de produtos, seja pela personalização de produtos, cada vez mais comum, ou ainda pela evolução tecnológica que precisa ser rapidamente incorporada aos novos produtos fabricados. Inovações incrementais nas CNCs as tornaram mais inteligentes, econômicas, rápidas, confiáveis, autônomas e flexíveis (XU, 2017).

Atualmente há CNCs que incorporam tecnologias como IoT (Internet das coisas, do inglês, *Internet of Things*) e computação na nuvem, que as transformam em CPS (do inglês *Cyber-Physical System*), ou seja, sistemas físicos ou de engenharia cujas operações podem ser controladas por meio de um computador central. Aplicados à produção industrial, os CPSs tornam possível integrar horizontal e verticalmente os sistemas de produção e permitem a execução coordenada de distintos processos por meio do comando de um computador central (LIU e XU, 2017 e RAJKUMAR *et al.* 2010).

Os CPPS — sistemas de produção físico-cibernéticos (do inglês, *Cyber-Physical Production System*) — são resultantes da convergência entre o mundo físico e o mundo virtual. Podem monitorar a produção física e interagir autonomamente com outros sistemas e com pessoas. São compostos por máquinas inteligentes, sistemas de armazenamento e instalações de produção que apresentam integração de ponta a ponta (XU, 2017).

A máquina-ferramenta físico-cibernética, ou CPMT (do inglês *Cyber-Physical Machine Tool*), ou ainda máquina-ferramenta 4.0 é a integração de máquina-ferramenta, processos de usinagem, computação e rede de modo que um programa controla o processo de usinagem e é, ao mesmo tempo, afetado por ele, pois recebe informações de sensores, câmeras e outros dispositivos para posteriores análises (LIU e XU, 2017). Em outras palavras, computadores e redes embarcados podem monitorar e controlar os processos de usinagem, com ciclos de feedback nos quais os processos de usinagem podem afetar cálculos e vice-versa.

Produtividade e competitividade industrial

A indústria brasileira ainda está muito aquém do que poderia ser em termos de competitividade internacional. Conforme o relatório Competitividade Brasil 2019/2020, produzido pela CNI (Confederação Nacional da Indústria), dentre 18 países avaliados, o Brasil fica em penúltimo (17º) lugar em competitividade, à frente apenas da Argentina e atrás de outros países como Chile (8º), África do Sul (10º), México (12º), Peru (15º) e Colômbia (16º) (CNI, 2020).

Trata-se de um problema complexo, para o qual contribui a perda de produtividade originada por vários fatores envolvidos no processo produtivo, como veremos no capítulo 2 desse trabalho, entre os quais as questões relacionadas à pré-ajustagem (ou referenciamento, ou *setup*, ou, ainda, *presetting*) das ferramentas de máquinas CNC.

Pré-ajustar, ou referenciar uma ferramenta significa inserir, no comando da máquina, as dimensões de cada ferramenta a ser usada no processo de usinagem de uma dada peça ou lote de peças (CORRER, 2006). Isso é fundamental para garantir a segurança do processo, a qualidade e a repetibilidade das peças. Trata-se de uma atividade que pode ser feita de forma totalmente manual ou com o uso de sistemas e equipamentos exclusivos para esse fim, tanto externos (*presettters*) quanto internos (*toolsetters*).

Na revisão da literatura, um dos dados encontrados é que, no Brasil, o ajuste das ferramentas de máquinas CNC é feito majoritariamente de forma manual, o que contribui para as perdas relacionadas à indisponibilidade das máquinas e a avarias de ferramentas, entre outras causas, além de custos de retrabalho por conta da imprecisão de peças que precisam ser corrigidas manualmente.

Dessa constatação deriva o problema de pesquisa sobre o qual nos debruçamos: o baixo uso de sistemas para referenciamento de ferramentas em tornos CNC e a predominância da pré-ajustagem manual, que contribui para a diminuição da produtividade industrial.

É importante ressaltar que existem alguns tipos de máquinas CNC. Embora, na revisão teórica, a diferenciação entre elas não tenha se mostrado relevante, a atenção, neste trabalho, no que concerne a propostas e soluções, se volta, para as máquinas CNC do tipo torneamento, ou seja, os tornos CNC, especialmente porque os sistemas de toolsetter atuais não são focados na utilização em tornos.

Pretende-se, nesse trabalho, analisar como essa pré-ajustagem pode ser feita, em tornos CNC, de forma automática, com o uso de um sistema interno a laser (*toolsetter*) para referenciamento de ferramentas, que, ademais, pode ser usado também para medição das peças em processo, contribuindo para redução de perdas e consequente melhoria da produtividade e da competitividade da indústria nacional.

Objetivos deste trabalho

Geral: analisar, por meio de ensaios em equipamentos com peças e ferramentas reais, a viabilidade técnica de se utilizar um *toolsetter* a laser de fabricação nacional como método de medição de ferramentas e de peças em tornos CNC, a fim de propiciar melhoria de qualidade e contribuir para o aumento da produtividade.

Específicos:

- Analisar a viabilidade técnica de uso de um *toolsetter* a laser no referenciamento de ferramentas em tornos CNC.

- Analisar a viabilidade técnica de uso de um *toolsetter* a laser para medição de peças em processo, de forma a garantir controle dimensional e repetibilidade das peças usinadas.

Metodologia

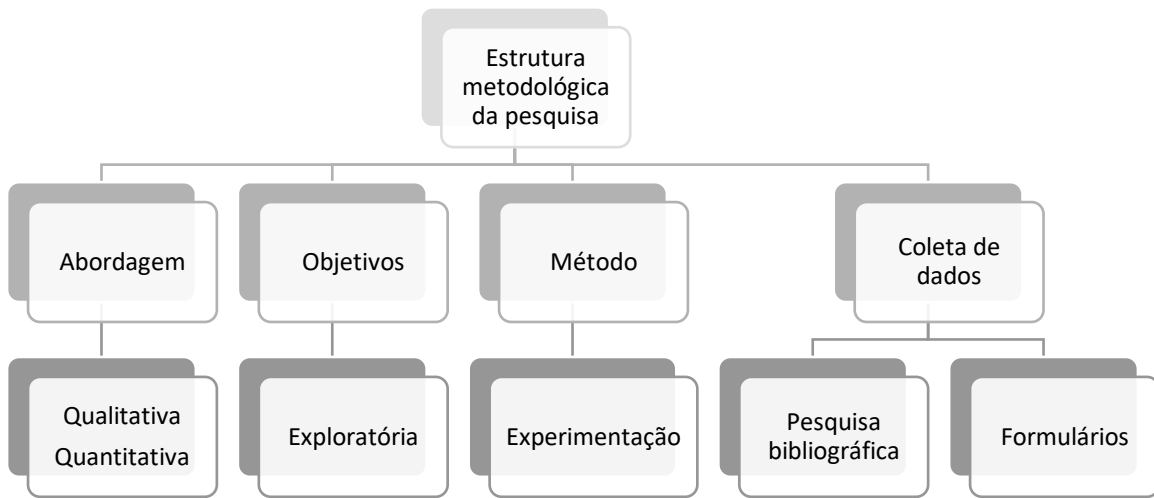
Este estudo foi realizado em duas etapas que, muitas vezes, correram em paralelo. A fim de avaliar a importância e o impacto do trabalho a ser desenvolvido, a primeira etapa foi uma análise bibliográfica de vários autores que apontam os problemas relativos ao uso, pela maioria das empresas brasileiras, de pré-ajustagem manual de ferramentas, e os motivos que as impedem de usar sistemas de *presetting*, mais rápidos e precisos. Assim, pudemos ter a percepção de como a indústria nacional se comporta com relação à questão.

A segunda etapa foi a experimentação, ou seja, a proposição de uso de um equipamento que atendesse aos objetivos da pesquisa — um *toolsetter* que pode tanto fazer o referenciamento das ferramentas de um torno CNC quanto a medição das peças usinadas em intervalos e pontos-chave determinados pelo operador.

Como se pode observar na Figura 1, a abordagem foi de natureza qualitativa e quantitativa, pois pretendeu-se demonstrar, por meio de dados experimentais, a viabilidade técnica da proposta em comparação com os métodos tradicionais utilizados. Definido o problema de pesquisa, buscou-se, na literatura, informações que corroborassem a pertinência do estudo. Por meio de experimentação, foram gerados dados sobre o funcionamento do dispositivo; os resultados dos ensaios foram compilados em formulários e tabelas para posterior análise e verificação da plausibilidade da solução proposta para o problema.

A pesquisa tem caráter exploratório, ou seja, procurou-se entender como deve funcionar um *toolsetter* para sanar as questões relativas às perdas geradas pela pré-ajustagem manual de ferramentas em tornos CNC e pela medição manual de peças.

Figura 1 – Estrutura metodológica da pesquisa



Fonte: o autor, baseado em Vieira Jr., 2019, p. 2.

Estrutura da dissertação

Esta dissertação está composta por 4 capítulos. O primeiro, do qual essa seção faz parte, é a introdução, na qual se apresenta o contexto geral que leva ao problema de pesquisa, os objetivos da pesquisa e um breve informe sobre como ela foi desenvolvida.

O segundo capítulo traz a revisão teórica, explicitando os problemas de produtividade relativos ao uso de pré-ajustagem manual de ferramentas. Nele se apresentam estudos e pesquisas que corroboram a hipótese de que esse é um fator sobre o qual se pode agir para ajudar a melhorar a competitividade da indústria brasileira. Traz, igualmente, autores que mostram os motivos pelos quais tais sistemas não são plenamente usados em nossa indústria.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais e os métodos experimentais necessários para a realização dos ensaios na fase de experimentação e de desenvolvimento do dispositivo propriamente dito.

O quarto capítulo traz os resultados dos ensaios e suas análises e discussões sobre a viabilidade da proposta apresentada.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões e considerações finais.

2 – REVISÃO DA LITERATURA

Reduzir custos tem sido, já há algum tempo, uma das grandes metas para empresas que pretendem se manter competitivamente no mercado. Segundo Morey (2019), em empresas de usinagem, 50% do custo total está relacionado ao tempo do processo de usinagem; a outra metade é rateada entre custos administrativos, mão de obra, insumos produtivos e outras despesas. Logo, faz todo sentido que se invista em aumento da produtividade, ou seja, maximização da produção com otimização do uso de recursos, inclusive tempo.

As máquinas CNC se tornaram tão imprescindíveis aos processos produtivos justamente porque elas têm alta capacidade produtiva. No entanto, como apontam Slack *et al* (2009), a tecnologia, por si só, não resolve os problemas se os métodos e processos forem inadequados. Correr *et al* (2018, p. 19), vão além e afirmam que fatores como a escolha do método de usinagem e da ferramenta, a diminuição de trocas de ferramentas e do tempo de *setup*, bem como a disponibilidade de produtos influenciam a produtividade. Segundo os autores, se esses fatores estiverem adequados, obtém-se maior disponibilidade da máquina, reduzindo-se o tempo de máquina parada. Logicamente, isso é fator que contribui para a obtenção de toda a produtividade de que uma CNC é capaz.

Vieira Jr. *et al* (2006) chamam atenção ao fato de que, muitas vezes, as empresas investem em máquinas-ferramenta CNC para aumentar sua competitividade, aumentando a flexibilidade de produção, a qualidade dos produtos, a redução dos tempos de ciclo e a possibilidade de produzir lotes pequenos, com economia. No entanto, podem não se atentar a métodos e processos inadequados e ineficientes. Os autores citam, como um dos problemas a ser enfrentado, a baixa utilização de *presettters* pela indústria nacional e salientam que, em muitos casos, seria possível aumentar a produção da empresa sem novas máquinas, apenas melhorando a performance das já existente, pois, com frequência, elas trabalham abaixo de sua capacidade de arranque de cavaco (menos de 50% do tempo total do processo).

Correr *et al* (2018) afirmam que a fase de pré-ajustagem da máquina é uma das responsáveis por seus períodos de ociosidade. Simon *et al* (2002) vão além, propondo que essa etapa do processo fosse devidamente analisada para se obter maior tempo de uso da máquina. Eles mostram que idealmente se deveria oferecer à máquina um conjunto de ferramentas específico e qualificado para um determinado trabalho, eliminando a necessidade de ajustes ou de fabricação de peça teste. A usinagem experimental, ou seja, a fabricação de uma peça para posterior medição e inserção de dados de correção (os desvios da medida da peça usinada em relação à medida padrão) na ferramenta é, segundo os autores, responsável por 50 a 75% do tempo gasto para substituição de uma ferramenta. Ajustar todas as ferramentas por esse processo acaba por ser demorado e prolongar o tempo de ociosidade das máquinas, causando considerável perda de produtividade.

Além disso, Battisti *et al* (2016) mostram que a perda não está relacionada apenas ao tempo de ociosidade da máquina, mas também às perdas decorrentes da execução de peças teste, não percebidas porque se diluem no cotidiano da produção. Bergamin *et al* (2016) citam da mesma forma, como concorrentes para as perdas, as movimentações desnecessárias de operadores, as peças em fila e a mudança de lotes. Há que se considerar também a diminuição da qualidade do produto final quando se faz esse tipo de ajuste da ferramenta.

É possível, no entanto, a utilização de aparelhos de pré-ajustagem, os *pressetters*, que permitem o ajuste prévio, rápido e preciso das ferramentas, fora da máquina. Segundo Simon *et al* (2002), o uso desse tipo de aparelho diminui o tempo gasto no processo de *setup*. Isso se traduz em diminuição de perdas, ganho de produtividade e redução de custos e tempo do ciclo de fabricação.

Segundo os autores, as indústrias de países desenvolvidos passaram a usar os aparelhos de pré-ajustagem como parte integrante da tecnologia CNC já a partir dos anos 1970. Já, no Brasil, algumas pesquisas realizadas apontam para o baixo uso de *pressetters*:

- Simon *et al* (2002): pesquisa realizada em 1999, com 411 empresas brasileiras, descobriu que apenas 22,6% delas utilizavam esse recurso.
- Simon *et al* (2008, *apud* CORRER *et al*, 2018): estudo feito com 457 empresas de usinagem brasileiras apontou que apenas 16,6% delas utilizavam esse tipo de sistema.
- Battisti *et al* (2016): pesquisa realizada com 20 empresas da região de Limeira, no estado de São Paulo, mostra que 60% delas se utilizavam de pré-ajuste manual das ferramentas, 30% utilizavam sistemas de pré-ajustagem internos e 10% usavam sistemas de pré-ajustagem externos.
- Barduzzi (2016): estudo realizado com 40 empresas do estado de São Paulo revela que apenas 7,5% delas se utilizavam de sistemas de *presetting*.

O trabalho de Battisti *et al* (*op cit*) demonstra que, nas empresas que usavam a pré-ajustagem manual, o índice médio de disponibilidade das máquinas CNC era de 80,88%. Se, nessas mesmas máquinas, fosse aplicado um sistema de *presetting* interno, esse índice subiria para 97,37%.

Quando se tratava de empresas de pequeno porte, os autores demonstraram que o índice de disponibilidade das máquinas caía para 70%, e seria de 96,1% se fosse usado um sistema de *presetting* interno.

Nas empresas de médio porte, continuam os autores, o índice de disponibilidade iria de 80,4% para 97,7% caso fosse usado um sistema de *presetting* interno.

Por fim, nas empresas de grande porte, embora o índice de disponibilidade das máquinas seja consideravelmente maior, ficando em 93,6% com pré-ajustagem manual, ele ficaria em torno de 98,6% com o uso de *presetting* interno.

Bergamini *et al* (2016), por sua vez, apresentaram estudo realizado em empresa de usinagem durante o qual foram cronometrados os tempos de referenciamento manual e automático das ferramentas. Pelo método manual, todo o processo foi realizado em 34min22seg, enquanto, pelo método automático, o mesmo processo levou 3min52seg,

gerando uma economia de tempo de 30min30seg. Além disso, verificando os históricos das ordens de produção e os Registros de Não Conformidade (RNCs) da empresa, os autores constataram que cerca de 10% das peças fabricadas apresentavam problemas relativos a desvios dimensionais, que precisavam ser corrigidos posteriormente, e que cerca de 2% das ferramentas eram danificadas durante a pré-ajustagem manual.

Como se pode notar, o referenciamento manual de ferramentas não aumenta os custos de produção apenas por causa do tempo de indisponibilidade das máquinas, mas também por falhas oriundas do processo manual que podem, inclusive, comprometer “a confiabilidade e segurança do processo produtivo” (CORRER, 2018, p.20). Correr (2018) faz um resumo de uma série de estudos feitos sobre o tema, apresentado no quadro a seguir.

Quadro 1 – Outros impactos da pré-ajustagem das ferramentas no processo produtivo

Autor (es)	Fatores	Características
Vieira Jr. <i>et al</i> (2016) Bergamini <i>et al</i> (2016)	Variações dimensionais (degraus e marcas na superfície usinada).	Necessidade de acabamento manual da peça.
Barnett (2006) Felix (2014) Bergamini <i>et al</i> (2016)	Avarias nas ferramentas durante o referenciamento.	Necessidade de reafiação ou substituição da ferramenta.
Vieira Jr. <i>et al</i> (2016) Bergamini <i>et al</i> (2016)	Refugo de peças	Necessidade de produção de nova peça
Marposs (2003)	Correção e compensação manual das medidas das ferramentas	Interferência na confiabilidade e segurança do processo produtivo.
Albert (2000)	Inserção manual dos valores de medição	Interferência na confiabilidade e segurança do processo produtivo.

Fonte: Adaptado de CORRER (2018, p. 20).

Pelos estudos e pesquisas apresentados, é possível perceber que a maioria de empresas brasileiras pesquisadas não usa sistemas ou aparelhos de *presseting* automáticos e isso adiciona custos ao processo produtivo. Tais custos são gerados tanto pelo tempo de indisponibilidade das máquinas CNC quanto por erros cometidos na pré-ajustagem manual de ferramentas, que causam perdas, retrabalhos e impactos na confiabilidade do processo produtivo

Nota-se, pelas datas dos estudos apresentados no Quadro 1, que as pesquisas e estudos referidos foram feitos há alguns anos, então, é possível que tenha havido uma mudança de cenário, mas, ainda assim, é plausível imaginar que, em termos de competitividade, as empresas brasileiras ficaram para trás e tiveram mais de 30 anos de atraso com relação às empresas de países desenvolvidos, que já usavam sistemas de *presetting* automáticos a partir da década de 1970.

Tanto Simon (2008) quanto Fullone e Aronson (respectivamente 2002 e 2000, *apud* BATTISTI *ET AL*, 2016), as empresas brasileiras não usam sistemas de *presetting* por falta de conhecimento sobre as vantagens desses sistemas e por seu alto custo. Vieira Jr. *et al* (2006), por sua vez, apresentam, além dos motivos já citados, a necessidade de assistência técnica e a dificuldade para encontrar esse tipo de serviço em território nacional. No que tange à falta de conhecimento sobre os benefícios de tais sistemas, Vieira Jr. (2018) destaca que esta é uma razão importante para que as empresas não utilizem sistemas de pré-ajustagem de ferramentas, e salienta ser esse um fator que pode interferir na análise da relação custo/benefício do equipamento, por parte das empresas.

Pode-se constatar que, pelo menos no que concerne especificamente ao tema aqui tratado, ou seja, ao ganho de produtividade e de confiabilidade no processo produtivo por meio do uso de equipamentos/sistemas de referenciamento automático de ferramentas, ainda há muito caminho a ser trilhado.

Referenciamento de ferramentas em tornos CNC e medição de peças em processo

Como se viu, o *presetting* — ou referenciamento — das ferramentas nas máquinas CNC é fator importante para melhorar a produtividade das empresas. Via de regra, o *presseting* manual gera perdas pelo tempo que as máquinas ficam sem produzir, pelo desperdício de matérias-primas, pelo deslocamento desnecessário de trabalhadores e pelo comprometimento da qualidade final dos produtos e da confiabilidade e segurança do

processo produtivo. Por isso, neste capítulo são examinadas mais atentamente as possibilidades de referenciamento, suas vantagens e desvantagens. São elas:

- **Medições manuais:** a) sem usinagem; b) com usinagem experimental.
- **Medições com o uso de sistemas de pré-ajustagem de ferramentas:** a) internos (*toolsetter*); b) externos (*presetters*).

Trata-se, a seguir, de cada uma dessas modalidades de referenciamento.

Medições manuais

As medições ditas manuais são aquelas em que o referenciamento é feito sem o uso de nenhum dispositivo exclusivo para isso. São métodos que consomem, em média, de 50% a 75% do tempo gasto na substituição de uma ferramenta (CORRER, 2006) e geram os problemas já elencados anteriormente.

As medições manuais são classificadas em dois tipos, como se pode ver a seguir.

a) Medição manual sem usinagem:

Nessa operação, o pré-ajuste é feito diretamente na máquina. Segundo Correr (2006), nela o operador seleciona as ferramentas a serem utilizadas, monta-as nos suportes e insere-as no magazine da máquina. Em seguida, determina o referenciamento da peça, o que, em geral, se faz movimentando a primeira ferramenta ao longo dos eixos X e Z até que ela toque a peça. Todas as demais ferramentas precisam ser movimentadas, uma por uma, até tocarem a face superior da mesma peça (eixo Z), de modo que se possa determinar o comprimento delas. Em seguida, ele insere as informações no comando da máquina.

Battisti *et al* (2016) apontam que, para evitar danos à ferramenta, posiciona-se, entre ela e a peça, uma folha de papel, filme plástico ou suporte padrão.

Correr (2006) menciona, ainda, que toda a operação está sob comando do operador. É ele quem controla o contato da aresta da ferramenta com a superfície

de referência, por isso, precisa ter experiência e muito cuidado para não danificar a aresta de corte da ferramenta.

A imprecisão e a baixa repetibilidade, o risco de danos às ferramentas, por quebra ou desgaste prematuro, e o tempo gasto na operação são os principais problemas desse tipo de pré-ajustagem. Há que se considerar também a possibilidade de erro humano na digitação dos valores para incorporá-los ao comando da máquina.

b) Medição com usinagem experimental

Na medição com usinagem experimental, o operador faz o mesmo processo de escolha das ferramentas, montagem nos suportes e inserção no magazine da máquina. A partir dessa etapa, a operação muda. O operador insere, no comando da máquina, as medidas aproximadas das ferramentas. Em seguida, é feita a usinagem de uma peça e, posteriormente, essa peça é medida, com um paquímetro ou micrômetro, a fim de se verificar os desvios dela com relação às dimensões determinadas no projeto. Esses desvios são inseridos manualmente, no comando da máquina, como dados de correção para a respectiva ferramenta (CORRER, 2006).

Na medição por meio da usinagem experimental, os problemas são relativamente semelhantes aos já citados para a medição sem usinagem, acrescidos dos custos relativos à peça experimental.

Medições com o uso de sistemas de pré-ajustagem de ferramentas:

As medições com o uso de sistemas de pré-ajustagem de ferramentas são as realizadas com auxílio de equipamentos exclusivos para esse fim. Segundo Correr (2006), os sistemas de *presetting* informam ao comando da máquina as dimensões das ferramentas que serão usadas. Tais dimensões são interpretadas pelo programa CNC, que faz as compensações necessárias.

Há dois tipos de sistemas de pré-ajustagem:

a) Sistemas externos de pré-ajustagem (*presetters*).

Os *presseters* são equipamentos que realizam os ajustes previamente, fora da máquina, de maneira rápida e precisa. Os dados são transferidos automaticamente para o comando da máquina.

Segundo Correr (2006), há vários tipos de *pressetters*, mas seu funcionamento é semelhante. Após a escolha das ferramentas e suas respectivas montagens nos suportes, elas são posicionadas no suporte de fixação do equipamento de *presetting*, análogo ao suporte de fixação da própria CNC. São determinadas as dimensões das arestas de corte das ferramentas em relação ao ponto de referência do sistema e determinadas as medidas das ferramentas. Os dados são, então, transmitidos ao comando da máquina.

Entre as vantagens desse tipo de pré-ajustagem está a não interrupção do trabalho da máquina para realizar o pré-ajuste de um próximo trabalho. Todo o processo, como citado, é feito fora da máquina, ou seja, enquanto ela continua sua operação de usinagem. Quando chega o momento de iniciar um novo trabalho, basta inserir as ferramentas pré-ajustadas no magazine da máquina. Zooler (1998) mostra que, em uma empresa que troca 20 vezes de ferramenta a cada 8h, o uso de um *presetter* pode economizar 3 min a cada troca de ferramentas e gerar um aumento de produtividade de 12,5%. O autor ressalta, ainda, que essa economia de tempo e consequente aumento de produtividade não são as únicas vantagens do *presetter*. A capacidade de inspecionar ferramentas, armazenar dados sobre elas e a qualidade da medição são, também, vantagens importantes, especialmente quando as peças a serem produzidas exigem alta precisão. Os erros em peças produzidas são, muitas vezes, provenientes da má qualidade do pré-ajuste, e quando esse é realizado de maneira precisa, os ajustes na primeira peça podem ser reduzidos ou até eliminados.

A eliminação de problemas como quebras ou desgastes prematuros das arestas das ferramentas é outra vantagem importante do *presetting* externo e, conforme

Beard (1998), também há uma redução significativa da taxa de refugo oriunda da preparação e um aumento de pelo menos 20% no tempo de arranque de cavaco.

Em relação aos *toolsetters* (sistemas internos de pré-ajustagem), os *presettters* têm a vantagem de poder ser instalados em qualquer lugar, permitindo maior flexibilidade (COSTA *et al*, 2015).

Os *presettings* podem ser manuais ou automáticos. Os manuais utilizam tecnologias mais simples, como réguas, relógios e comparadores, por exemplo, e dependem da habilidade de seu operador, portanto, são mais suscetíveis a erros de medição. Entre eles há os mecânicos ou ópticos. Os *presettings* mecânicos precisam ser operados por uma pessoa treinada para tal, e recebem esse nome porque a detecção da ferramenta é feita por contato mecânico, ou seja, o operador a manipula para determinar onde deve ser feita a medição. Já os ópticos funcionam com a ajuda de um projetor óptico, que disponibiliza a sombra da ferramenta a ser ajustada para que o operador a gire até poder identificá-la manualmente (CORRER, 2006)

Os *presettings* automáticos se valem de tecnologias mais avançadas, tais como lasers e réguas ópticas, e anulam a possibilidade de erro por parte do operador, pois o sensor precisa apenas ser movido para a área de ferramentas. Por isso, têm um custo mais elevado do que os manuais. Um bom exemplo deles são os *presettings* fotográficos, bastante avançados e fáceis de utilizar. Neles o sistema indica, automaticamente, o diâmetro e o comprimento máximo da ferramenta. Podem também verificar possíveis falhas nas arestas, e por isso são especialmente úteis quando são usadas ferramentas de corte muito complexas e caras que, em caso de avarias, podem causar prejuízos consideráveis (CORRER, 2006).

b) Sistemas internos de pré-ajustagem (*toolsetters*)

Os sistemas internos de pré ajustagem, conhecidos como *toolsetters*, possuem um software instalado no comando da máquina e fazem as medições automaticamente ou semiautomaticamente, dentro da própria máquina.

Conforme Correr (2018), eles são instalados sobre a mesa de trabalho ou em partes internas das máquinas. Cabe ao operador apenas informar ao comando da máquina as medidas aproximadas das ferramentas. Caso detecte algum problema em uma ou mais ferramentas, a própria máquina faz a compensação ou impede a continuação do processo de usinagem até que o problema seja resolvido. Com isso, evita-se a produção de peças fora do padrão estabelecido.

Há dois tipos de *toolsetters* mais utilizados: a laser e por contato.

Toolsetters por contato: os *toolsetters* por contato fazem as medições por meio de sensores de contato, que transmitem para a máquina informações sobre dimensões, quebras ou desgastes da ferramenta. (COSTA *et al*, 2015). O sistema de detecção por contato pode ser por condução elétrica ou utilizando sensores piezoelétricos. Esses *toolsetters* são os mais utilizados em centros de torneamento (CORRER, 2006).

Toolsetters a laser: segundo Costa *et al* (2015), os *toolsetters* a laser são capazes não apenas de gravar as dimensões das ferramentas, como também de monitorar o processo de usinagem, automatizando as correções de comprimento e diâmetro das ferramentas por meio da análise de desgastes, quebras ou outras alterações que possam ocorrer durante o processo de usinagem. Os autores afirmam, ainda, que o sistema a laser faz as medições no momento em que a ferramenta interrompe seu fluxo.

O equipamento cujo uso foi analisado e que será apresentado no próximo capítulo é desse tipo — um *toolsetter* a laser que, como já foi dito anteriormente, não apenas faz a pré-ajustagem sem contato das ferramentas, como também é capaz de medir as peças usinadas, em determinados pontos-chave informados previamente pelo operador.

Já foi visto que os *presetters* e *toolsetters* aumentam a produtividade porque reduzem o tempo de indisponibilidade da máquina, mas, quando são do tipo sem contato, ou seja, a laser, reduzem mais ainda os custos porque praticamente eliminam a possibilidade de

avarias nas ferramentas, durante o referenciamento das ferramentas na máquina, e a necessidade de usinagem teste.

É importante salientar que o uso dado ao dispositivo, neste estudo, propõe uma inovação — a função de medição de peças em processo, importante para controle da qualidade da produção, reduzindo as perdas decorrentes de não conformidade e aumentando a repetibilidade das peças.

A medição das peças produzidas por um torno CNC é comumente feita de distintas formas. Tanto pode ser feita manualmente, depois de a peça usinada, com o uso de apalpadores ou micrômetros, por exemplo, cuja desvantagem é a peça ter de ser retirada da placa do torno e, se necessário, recolocada para ajustes, o que aumenta a margem de erro e diminui a produtividade, quanto por meio de *toolsetters* com sensores, que transferem as informações para softwares (FERRAZ JR., 2002) e têm a vantagem de permitir a medição da peça sem retirá-la da placa do torno, aumentando a precisão. Vale ressaltar, no entanto, o que já foi dito anteriormente, a saber, que os atuais sistemas de *toolsetter* disponíveis não focam a utilização em tornos.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Em consonância com o objetivo desse estudo e com a metodologia apresentada no Capítulo 1, o propósito da experimentação e dos ensaios realizados no laboratório de manufatura da UNIMEP (Figura 2), Campus de Santa Barbara d’Oeste, estado de São Paulo, foi analisar o uso de um sistema nacional e já comercializado de *presetting* interno — um *toolsetter* — em tornos CNC, não apenas para referenciamento das ferramentas, mas também para medição das peças em processo.

Figura 2 – Laboratório de manufatura da UNIMEP, Campus Santa Bárbara d’Oeste.



Fonte: o autor

O sistema permite a automação da etapa de pré-ajustagem de ferramentas, identificando e compensando automaticamente o comprimento e o diâmetro das ferramentas utilizadas no processo de usinagem, além de possibilitar a medição das peças após a finalização do processo de usinagem, visando ao controle da qualidade de forma automática. O sistema também poderá apenas gerar os dados e solicitar uma ação do operador. Essa última forma é a mais comumente usada no Brasil, em virtude de ter

custos menores. De todo modo, o fator decisivo para isso é sempre o comando numérico empregado no torno.

Para isso, foram identificadas variáveis que poderiam exercer algum tipo de influência sobre o dispositivo em estudo e definidas as formas de monitoramento e controle a serem usadas durante os testes, necessários para verificar a precisão e a repetibilidade da medição feita.

Para os testes, o sistema foi instalado em um torno CNC e foi simulado seu trabalho em situação real.

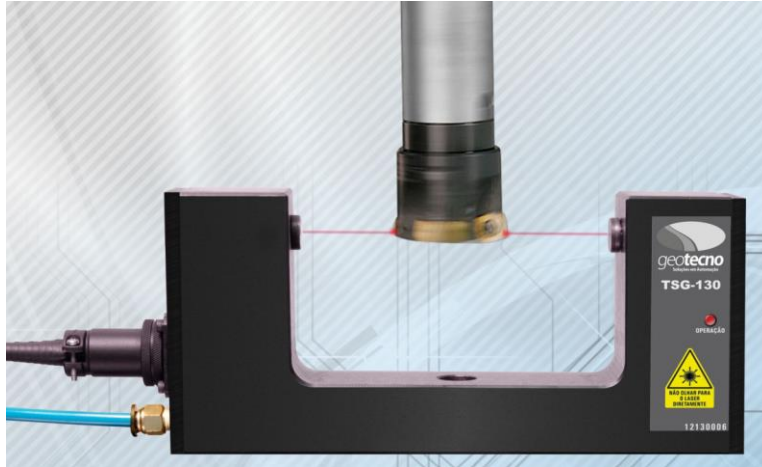
Antes de começar as medições, foi realizada uma verificação dos desvios no carro transversal e no carro longitudinal do torno CNC, utilizando o relógio comparador. Uma vez concluído que os desvios encontrados estavam menores que a resolução do instrumento utilizado (0,01 mm), a máquina foi considerada apta à realização dos ensaios com o *toolsetter* a laser.

Equipamentos utilizados para os testes

A escolha das ferramentas a serem analisadas no trabalho se deu pela habitualidade nos usos em processos de torneamentos. Para levar a cabo os experimentos realizados, foram utilizados os seguintes equipamentos:

1. ***Toolsetter* interno** (Figura 3): modelo: TSG-130, Fabricante GeoTecno. O dispositivo *toolsetter* laser tem precisão de posicionamento de $\pm 0,002$ um e repetibilidade de 0,002 um para uma confiança aproximada de 99.7 %, quando utilizada baixíssima velocidade de aproximação (80mm/min), conforme informações do fabricante.

Figura 3 – Toolsetter interno modelo TSG-130 (GeoTecno)



Fonte: o autor

2. **Torno CNC** (Figura 4): modelo Multiplic 30D (Centur 30D com opcional Multiplic), Fabricante Indústrias Romi. Dimensões entre pontas de 1000 mm, diâmetro admissível sobre o barramento de 430 mm, diâmetro admissível sobre o carro de 200 mm, curso transversal do carro (eixo X) de 220 mm, curso longitudinal do carro (eixo Z): 1065 mm, comando numérico GE Fanuc, rotação máxima 3.000 RPM, resolução do comando numérico de 0,0005mm e torre porta-ferramentas com capacidade para 8 ferramentas e 6 ferramentas montadas.

Figura 4 – Torno CNC Multiplic 30D (Romi)



Fonte: o autor

3. **Pino calibrador** (Figura 5): em aço inox 304, com diâmetro nominal de 60mm, Fabricante GeoTecno.

Figura 5 – Pino calibrador (GeoTecno)



Fonte: o autor

4. **Relógio comparador** (Figura 6): modelo 2046-08, Fabricante Mitutoyo. Capacidade de 10,0 mm, com resolução 0,01mm, exatidão +/- 0,013mm e mostrador 0-100mm.

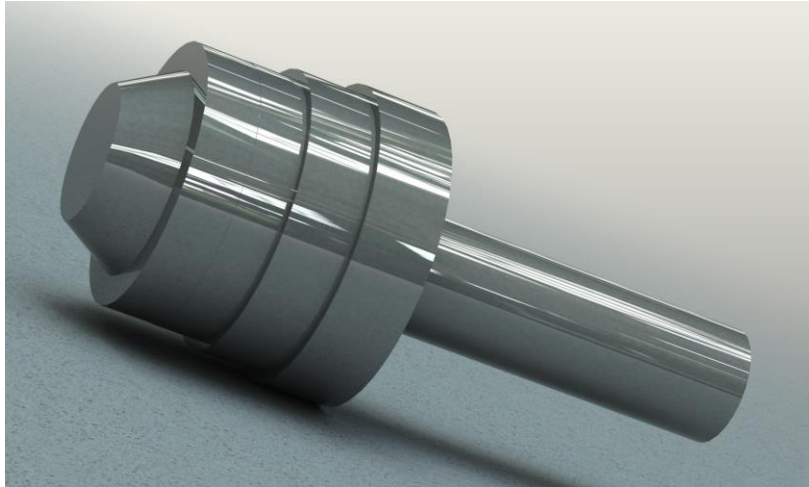
Figura 6 – Relógio comparador (Mitutoyo)



Fonte: o autor

5. **Corpo de teste** (Figura 7): fabricado pela GeoTecno, em aço 1020, com dimensões aferidas por meio de máquina de medição Zoller – Medidoras universais – SmartCheck, de uma empresa parceira.

Figura 7 – Corpo de teste (GeoTecno)



Fonte: o autor

6. **Pastilha para acabamento** (Figura 8): classe P – Aço, modelo TNMG 160404-R, do fabricante Mitsubishi, para utilização em acabamento. Posição da ferramenta na torre porta-ferramentas, durante os ensaios: 1

Figura 8 – Pastilha para acabamento (Mitsubishi)



Fonte: o autor

7. **Broca aço rápido HSS** (Figura 9): broca utilizada para furos, com diâmetro nominal de 10mm, do fabricante Dormer. Posição da ferramenta na torre porta-ferramentas, durante os ensaios: 2

Figura 9 – Broca de aço rápido HSS (Dormer)



Fonte: o autor

8. **Pastilha bedame para cortes e sulcos** (Figura 10): modelo Mgmn200g, fabricante Korloy. Posição da ferramenta na torre porta-ferramentas, durante os ensaios: 5.

Figura 10 – Pastilha bedame para cortes e sulcos (Korloy)



Fonte: o autor

9. **Pastilha metal duro para desbaste** (Figura11): Modelo WNMG160404, fabricante Iscar. Posição da ferramenta na torre porta-ferramentas, durante os ensaios: 6

Figura 11 – Pastilha metal duro para desbaste (Iscar)



Fonte: o autor

10. **Pastilha metal duro para acabamento** (Figura 12): fabricante Sandvik. Posição da ferramenta na torre porta-ferramentas, durante os ensaios: 7.

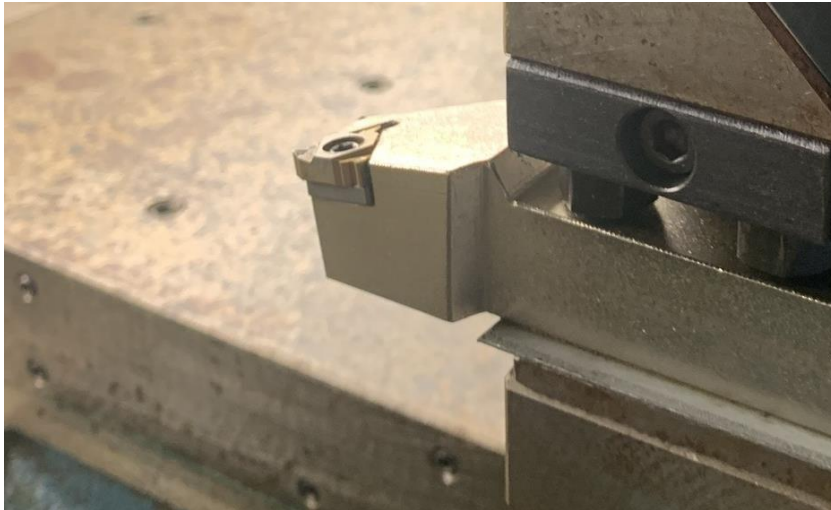
Figura 12 – Pastilha metal duro para acabamento (Sandvik)



Fonte: o autor

11. **Pastilha metal duro para rosqueamento** (Figura 13): modelo R166 0L 16VM01-001 1020, fabricante Sandvik. Posição da ferramenta na torre porta-ferramentas, durante os ensaios: 8

Figura 13 – Pastilha metal duro para rosqueamento (Sandvik)



Fonte: o autor

Descrição do processo de testes

O processo de testes se desenrolou em três etapas:

- Verificação de posicionamento do centro de torneamento.
- Medição das ferramentas.
- Medição da peça já usinada.

A seguir apresentam-se, em detalhes, cada uma delas.

Verificação de posicionamento do centro de torneamento

Inicialmente foi realizada a verificação de repetibilidade de posicionamento no carro do torno (Figura 14), por meio de uma rotina de movimentação — o carro saiu de posição inicial, deslocou-se 2mm e retornou para a mesma posição. Usando um relógio

comparador, foi feita a verificação do posicionamento e o erro encontrado foi menor do que 0,01mm, que é a menor divisão do instrumento utilizado.

Esse procedimento foi executado nos eixos X e Z, com o intuito de verificar as condições da máquina na qual foi posteriormente instalado o *toolsetter*.

Figura 14: Carro do torno



Fonte: o autor

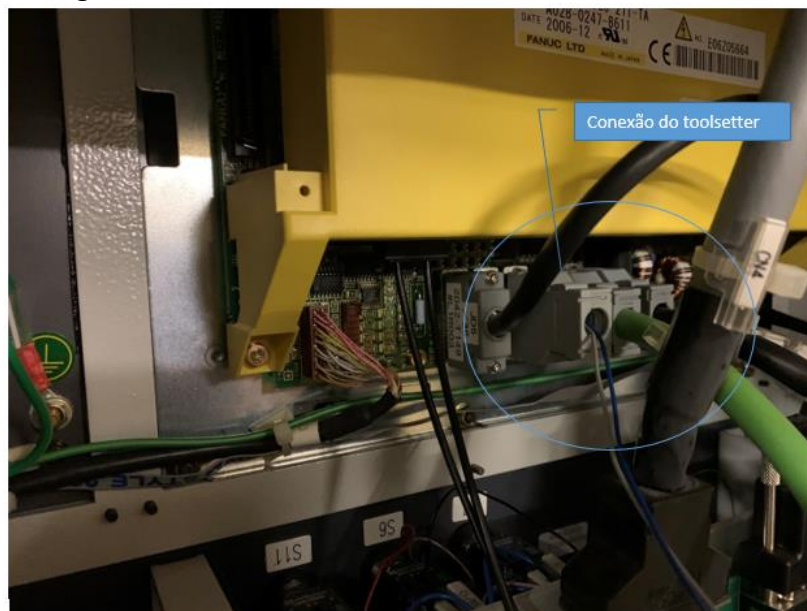
Após a verificação da repetibilidade do carro transversal do torno, o sistema de *toolsetter* foi instalado (Figura 15) e seu sistema elétrico de detecção conectado à entrada rápida do comando numérico da máquina (Figura 16)

Figura 15: Configuração de aparato experimental para medição de ferramentas



Fonte: o autor

Figura 16: conexão do toolsetter ao comando numérico



Fonte: o autor

A fim de capturar as coordenadas dos pontos a serem assinalados pelo programa e salvá-los para posterior processamento, foi configurado e conectado um computador à máquina.

Da mesma forma, para que os ensaios fossem possíveis, foi necessário desenvolver previamente um programa GCODE (Figura 17) que fizesse a movimentação do carro do CNC, nos eixos X e Z, até o feixe laser do *toolsetter* ser interrompido, e exportasse as coordenadas absolutas dos eixos através da porta serial RS-232 do CNC.

Figura 17: Programa GCODE

```
%  
:0003(ZAMPAR)  
S300M3  
  
#1=0  
  
N321  
G94  
  
F2.5  
G31G91X-5  
  
POPEN  
DPRNT[P#5041[35]]  
  
PCLOS  
#1=#1+1  
  
G1G91X0.3F30  
  
IF[#1LT100]GOTO321  
  
M30  
%
```

Fonte: o autor

A função do programa é fazer o eixo avançar em velocidade lenta. Quando o feixe de laser é interrompido, automaticamente o programa detém o eixo que estava se movimentando e salva as coordenadas do ponto em que houve a interrupção, tanto no computador conectado quanto no programa da máquina CNC. Para o computador, as coordenadas do ponto são enviadas via conexão serial e todas ficam salvas. No comando numérico da

máquina CNC, ficam salvas, como arquivo temporário, apenas as coordenadas do último ponto.

No primeiro teste executado, a janela de depuração do CNC, ou seja, a janela que apresenta as informações sobre o status da máquina, detectava quando o feixe laser era interrompido, mas não interagia com o programa de medição (descrito a seguir). A fim de possibilitar tal interação, fez-se necessária a liberação (desbloqueio) do software do CNC, feita com apoio de um técnico externo, especializado em manutenção desse tipo de máquina. A partir disso, foram iniciados os testes de funcionamento do *toolsetter*.

Após os procedimentos de marcação (de cada ponto), o carro retornou à posição inicial do teste e o processo foi repetido 100 vezes para cada eixo e cada ferramenta testada. As operações de avanço e deslocamento foram feitas em todos os ensaios. A velocidade de avanço do eixo da ferramenta¹ utilizada foi de 2,5mm/minuto e o deslocamento do carro, ao longo das repetições, foi de 0,5mm.

Medição das ferramentas

Como o principal objetivo na medição das ferramentas é medir o desgaste das mesmas para evitar erros na usinagem, no processo de medição foram levados em consideração apenas as variações dimensionais entre as diversas medidas realizadas. É importante considerar que, para cada ensaio de ferramenta, a mesma medição foi repetida 100 vezes, com exceção da ferramenta pino calibrador, para qual foram feitas 400 repetições. A partir de todas essas medidas, verificou-se qual a variação para cada ferramenta (desvio padrão).

No processo de medição de ferramentas, o *toolsetter* foi fixado na placa do torno (Figura 18), usando-se um esquadro entre ele e o barramento do torno para posicioná-lo para

¹ O eixo X vem pré-definido no comando numérico da máquina e é o que desloca as ferramentas (carro longitudinal). O eixo Z é o deslocamento no sentido centro da castanha (carro transversal). É possível também obter a indexação da posição em graus da peça, para o caso de peças com geometria mais complexa.

início dos testes, a fim de garantir paralelismo entre o feixe de laser e as ferramentas a serem medidas.

Figura 18: Fixação do *toolsetter* na placa do torno para medição de ferramentas



Fonte: o autor

Com o setup concluído, iniciaram-se as medições utilizando a ferramenta pino calibrador, para o qual foram realizadas medições em uma quantidade maior de pontos — em caráter de excepcionalidade, foram 400 pontos apenas no eixo Z a fim de verificar a repetibilidade e a precisão no conjunto formado pelo *toolsetter* e pelo torno CNC. A ferramenta entrou e saiu do feixe de laser 400 vezes, e em cada uma delas o ponto foi marcado.

Medição de peça usinada

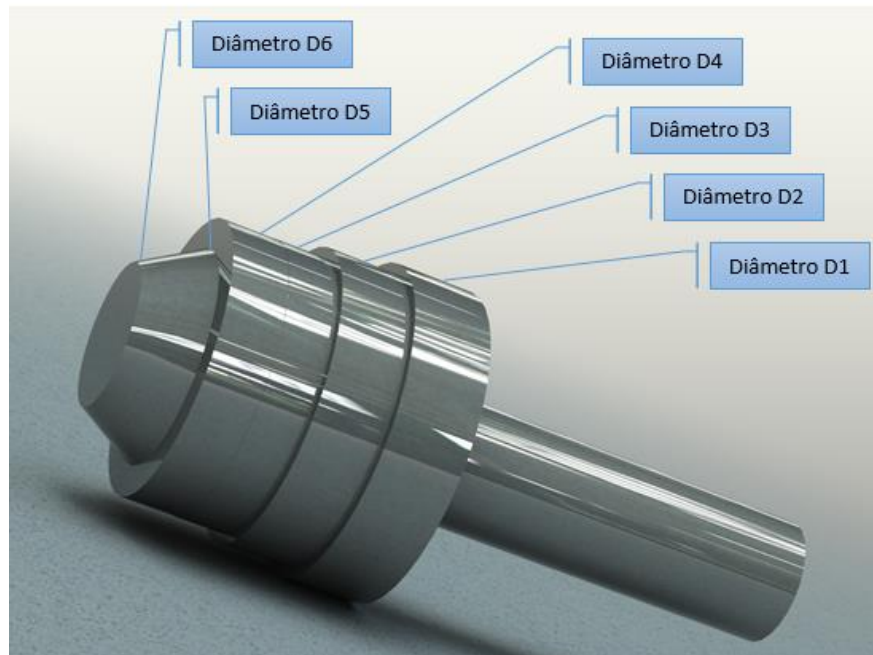
Para as medições da peça usinada foram feitos dois tipos de ensaios:

- a) **Ensaio de medição estática:** no ensaio de medição estática, a peça se encontrava fixada no eixo árvore do torno, sem qualquer tipo de movimento.

b) **Ensaio de medição dinâmica:** na medição dinâmica, por sua vez, a peça se encontrava fixada no eixo árvore do torno, em movimento de rotação de 100RPM.

A peça usada nos ensaios e os pontos marcados na medição podem ser vistos na Figura 19.

Figura 19: Desenho da peça usada para efetuar os ensaios de medição de peças com os pontos correspondentes



Fonte: o autor

Para o processo de medição da peça, o *toolsetter* experimental foi fixado na torre porta-ferramentas do torno e a peça a ser medida foi fixada em sua placa. O eixo representado pela placa de fixação da peça (e, logo, pelo diâmetro da peça) é o eixo Z. Determinou-se previamente que a linha central da placa era o ponto 0 (zero), para facilitar a medição dos dados. A partir dessa linha central, criou-se um eixo cartesiano virtual, e um dos lados da castanha passou a ser o lado positivo do eixo, enquanto o outro passou a ser o lado negativo.

O laser do *toolsetter*, preso no porta ferramentas do torno, se movimenta entre os eixos X e Z como se fosse uma ferramenta, portanto, perpendicular à peça. É preciso lembrar também que o programa marca a coordenada sempre que o laser é interrompido, ou seja,

é na interrupção que o ponto é capturado. A isso se chama interrupção por borda de detecção.

As bordas de detecção podem ser bordas de subida ou bordas de descida. Por uma limitação relacionada ao comando numérico da máquina, o programa criado (Figura 17) não detecta borda de descida, apenas de subida. Para que fosse capaz de detectar ambas as bordas, seria necessário aumentar sua complexidade, e o objetivo do experimento era analisar se o aparato experimental atingia aos objetivos estabelecidos, por isso, tal complexidade não era necessária. Além disso, o trabalho com borda única também torna mais simples a análise dos dados.

Ao se executar o programa, o *toolsetter* move o laser até encontrar a borda de detecção (uma face da peça) e grava esse ponto como uma coordenada Z+. Em seguida, o *toolsetter* faz o laser recuar. Para se obter a coordenada Z-, ou seja, a borda de detecção oposta, o programa avança o laser para o lado oposto do ponto 0 (zero) e repete o procedimento descrito de avanço, interrupção (do laser) e capturação (do ponto). Isso significa que os valores de Z+ e Z- devem ser semelhantes, uma vez que ambos são relativos ao ponto 0 (zero), ou seja, à linha de centro da placa.

Para reduzir a chance de erros, durante os ensaios teve-se o cuidado de não mexer no eixo X, apenas mover o *toolsetter*, via programa, para fazer a leitura do lado oposto da peça, de forma invertida. A posição do eixo X manteve-se também durante a medição de todos os pontos, ou seja, de D1 a D6. Para fazer a medição de L1 a L6, o eixo mantido foi o Z.; o movimento do *toolsetter* e os processos de captura foram mantidos da mesma forma. A referência de zero, nesse caso, foi a face mais externa ao comprimento L1.

Note-se, pela Figura 18, que, em virtude do formato cônico da última porção da peça usinada, para ela foram marcados dois pontos de medição, um em cada extremidade do cone.

É importante salientar que todas as dimensões da peça, tanto em comprimento quanto em diâmetro, incluindo o comprimento do eixo X, na parte cônica da peça, foram obtidas

com a utilização de um equipamento Zoller e consideradas como referência em todos os ensaios.

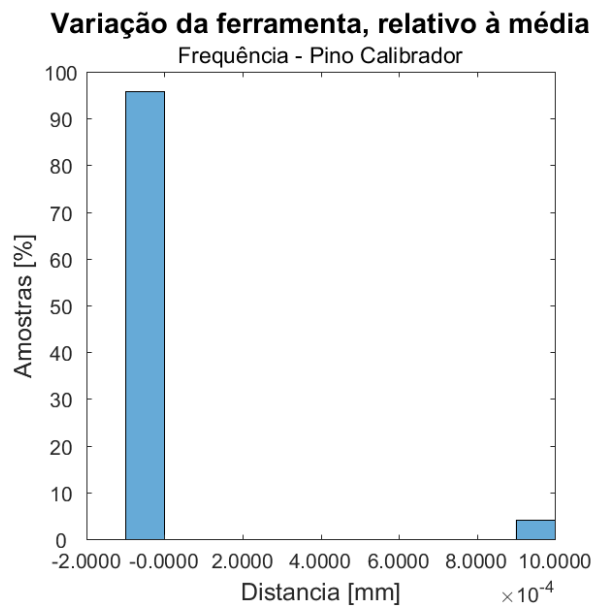
Tais procedimentos foram repetidos 100 vezes para cada ponto detectado, a fim de se obter um espaço amostral. A partir disso, o diâmetro de cada parte da peça é obtido subtraindo-se Z^- de Z^+ .

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de medição foram iniciados pelo pino calibrador que, por sua geometria, é o que deve dar a melhor repetibilidade possível, ou seja, o menor desvio padrão. Seu acabamento superficial era retificado, o que proveu uma ótima repetibilidade entre as aquisições. É importante ressaltar que esse pino calibrador foi gentilmente cedido pela empresa GeoTecno, fabricante do *toolsetter*, e é utilizado pela empresa para as calibrações e verificações de sistemas recém instalados.

Como pode ser observado na Figura 20 a repetibilidade, nas 700 medições, foi adequado para a continuidade dos ensaios. Apenas 4% das amostras tiveram um desvio de 1 milésimo de milímetro (0,001 mm). Pode-se considerar que esse desvio é normal e esperado, visto que as incertezas dos comandos numéricos de tornos CNC podem chegar à ordem de 3 milésimos de milímetro.

Figura 20 – Ferramenta pino calibrador: variação relativa à média (histograma)

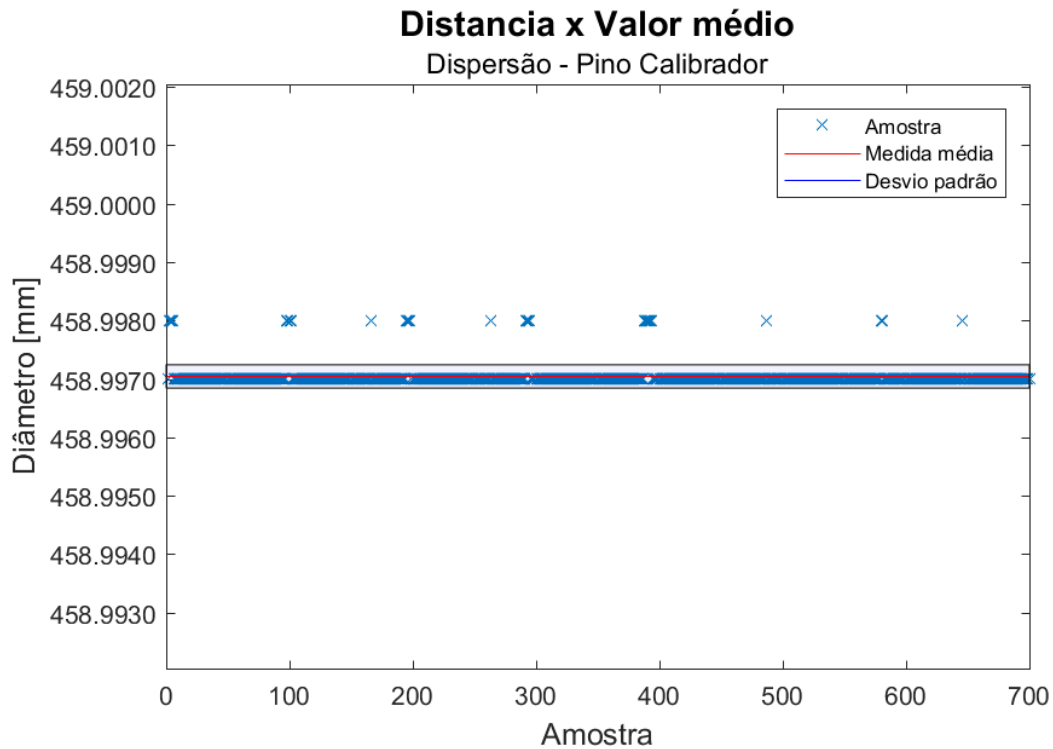


Fonte: o autor

Tem-se constatado que, em centros de usinagem e torneamento de pequeno e médio porte, os erros geométricos mais significativos são normalmente erros de posicionamento linear, histerese e erros de perpendicularidade entre eixos (SOUZA, 2000).

Devido à repetibilidade encontrada no ensaio com o pino calibrador, era esperado que o desvio padrão dos pontos resultantes desse ensaio também tivesse um valor de baixa grandeza. O valor de desvio padrão encontrado foi de 0,0002 mm, conforme exposto na Imagem 22.

Figura 21 – Ferramenta pino calibrador: distância x valor médio (dispersão)



Fonte: o autor

Ensaio de ferramentas

Após o ensaio do pino calibrador e a confirmação da repetibilidade do aparato experimental, foi feita a análise dos dados das ferramentas.

Devido à grande quantidade de dados gerados pelos ensaios, foi utilizado um software específico para análise chamado MATLAB², que possui linguagem de alto desempenho para computação técnica e integra computação, visualização e programação em um ambiente de fácil uso, no qual problemas e soluções são expressos matematicamente.

² O nome se originou da expressão “laboratório de matriz” (PEDROSA *et al*, 2017).

Trata-se de um sistema interativo cujo elemento básico de dados é um *array* que não necessita ser dimensionado. Assim é possível resolver problemas técnicos de computação, particularmente os com formulações matriciais e vetoriais, com grande economia de tempo em relação ao que se levaria para escrever um programa em uma linguagem escalar não interativa, como C ou Fortran (PEDROSA *et al*, 2017).

Originalmente, o MATLAB foi pensado para facilitar o acesso ao software de matriz desenvolvido por LINPACK e EISPACK, referências em computação matricial. Evoluiu com a contribuição dos usuários e é padrão em cursos universitários introdutórios às áreas de matemática, engenharia e ciências. Da mesma forma, é a ferramenta preferencial para pesquisa, desenvolvimento e análise de produtividade na indústria. Comumente seus usos incluem matemática e computação; desenvolvimento de algoritmos; modelagem, simulação e prototipagem; análise, exploração e visualização de dados; gráficos científicos e de engenharia e desenvolvimento de aplicativos, incluindo construção de interface gráfica do usuário (PEDROSA *et al*, 2017).

As análises realizadas para cada uma das ferramentas ensaiadas sempre foram relativas à média das medidas, pois, no processo de torneamento, é mais importante a medida relativa, já que com isso conseguimos medir o desgaste das ferramentas e posteriormente fazer as devidas compensações.

Foram ensaiados, para as ferramentas, os eixos X e Z relativos aos eixos do carro longitudinal e do carro transversal, respectivamente, visto que, dependendo do tipo de processo de torneamento e do tipo de ferramenta empregado, pode ocorrer o contato de mais de um eixo, ao mesmo tempo, com a peça que está sendo usinada.

Foram adquiridos 100 pontos para análise de cada eixo (X e Z) das ferramentas. As descrições dessas análises são apresentadas a seguir:

- Variação dimensional como referência à média, no eixo X e no eixo Z.
 - Foi calculada a diferença absoluta entre cada ponto adquirido e a média de todos os pontos nos respectivos eixos.

- Desvio como referência à média, no eixo X e no eixo Z
 - Baseado na análise anterior, foi feita a análise do desvio padrão para cada ferramenta e cada eixo. Foi escolhido a análise do desvio padrão pois é uma das medidas estatísticas mais comumente usadas para demonstrar a variabilidade dos dados. É uma medida que estima o grau em que o valor de determinada variável se desvia da média.

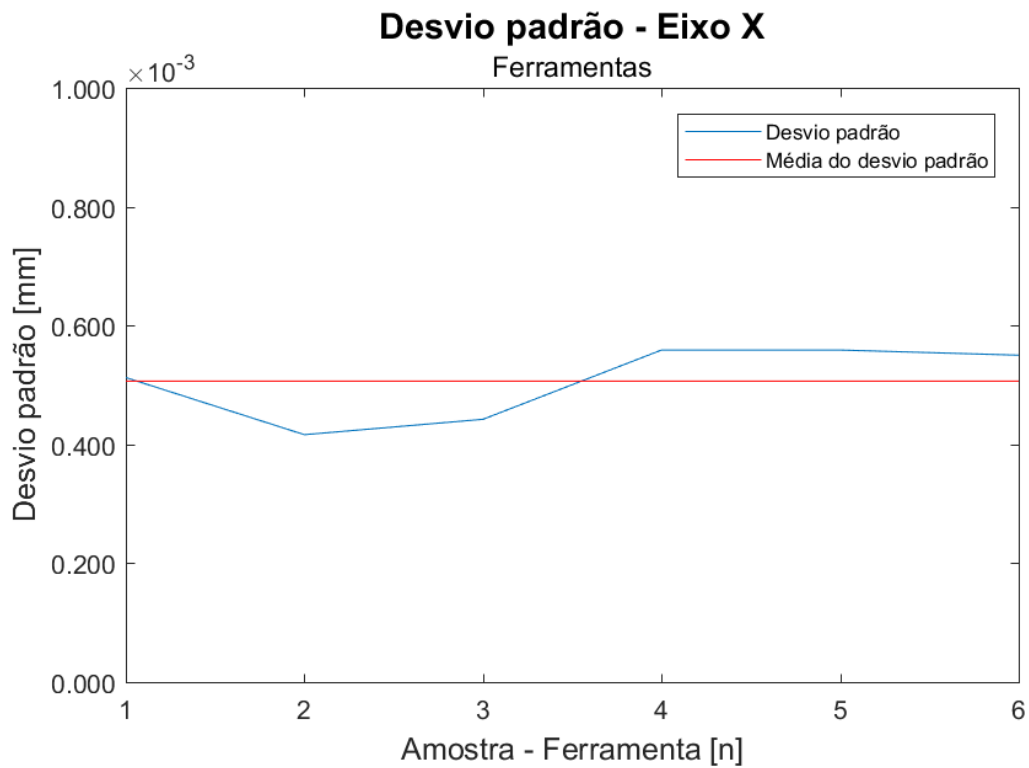
Os resultados de cada análise descrita e de cada ferramenta podem ser consultados nos anexos desse trabalho (Figuras 32 a 104).

De posse das análises individuais de cada ferramenta, os dados foram sintetizados a fim de avaliar a possibilidade do uso prático do sistema de *toolsetter*.

Para a apresentação dessa análise no trabalho, foram plotados os valores de desvio padrão para cada ferramenta, em cada um dos eixos.

Na Figura 22, são demonstrados o desvio padrão e o desvio médio no eixo X para cada ferramenta. O maior desvio padrão encontrado foi de 0,00055mm, e o desvio padrão médio foi de 0,00050mm.

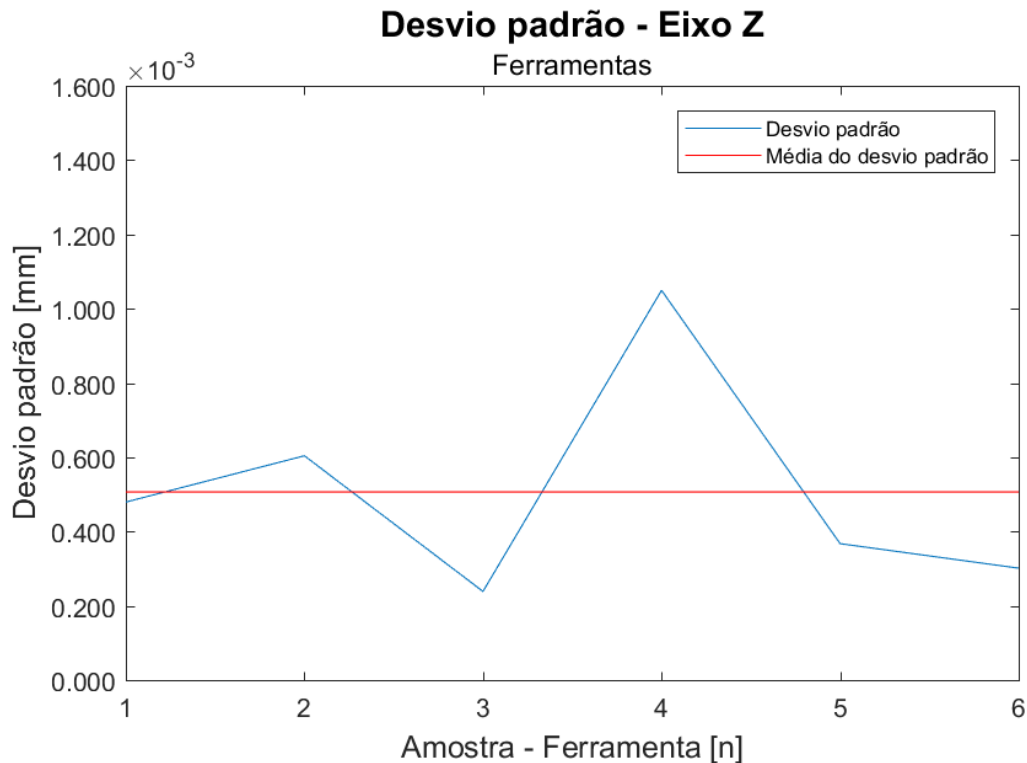
Figura 22 – Ferramentas: desvio padrão - eixo X



Fonte: o autor

Na Figura 23, são demonstrados o desvio padrão e o desvio médio, no eixo Z, para cada ferramenta. O maior desvio padrão encontrado foi de 0,0010mm e o desvio padrão médio foi de 0,00050mm. Esse desvio maior ocorrido na amostra n=4 (ferramenta 6) foi provavelmente causado pela dificuldade de encontrar o ponto correto da aresta da ferramenta, já que, nos experimentos, o posicionamento dessas arestas era feito de forma manual.

Figura 23 – Ferramentas: desvio padrão — eixo Z



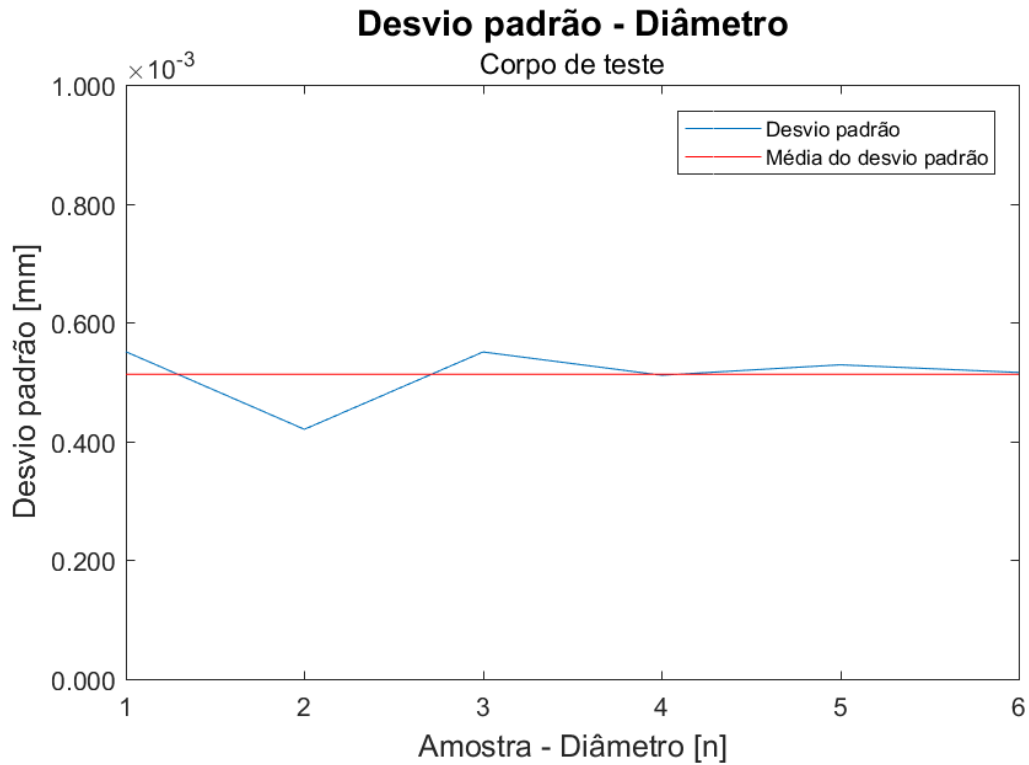
Como apresentado, todos os desvios encontrados nos ensaios das ferramentas, no pior caso, são três vezes menores que as precisões consideradas comuns em centros de torneamento.

Ensaio de peças – Diâmetro

Após a análise dos dados das ferramentas, foram analisados os dados das medições de peças, a fim de verificar os desvios de medidas. De posse dessas análises, posteriormente foi verificada a possibilidade de uso de um *toolsetter* no processo de inspeção de qualidade de centros de torneamento, o que será comentado na conclusão.

Observou-se, assim, o desvio padrão entre as medições de cada ponto do diâmetro. O desvio máximo encontrado foi de 0,00055 mm e o padrão médio de 0,00051 mm, conforme se pode ver na Figura 24.

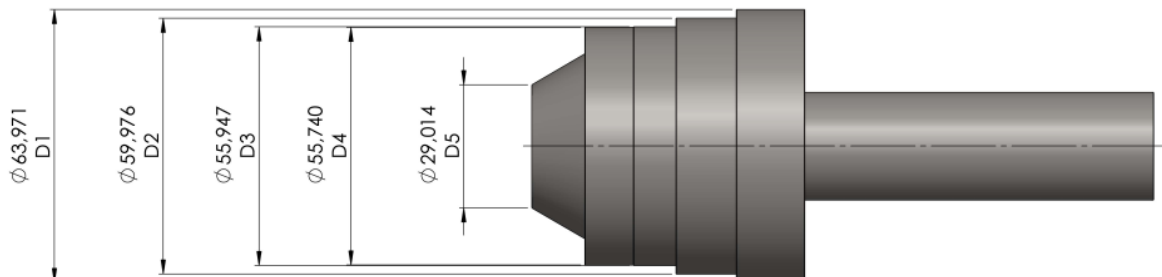
Figura 24 – Corpo de teste: desvio padrão — diâmetro



Fonte: o autor

Outro objeto de análise foi a diferença entre os diâmetros medidos no *toolsetter* e os medidos externamente (Figura 25), com uma máquina de medir por coordenada.

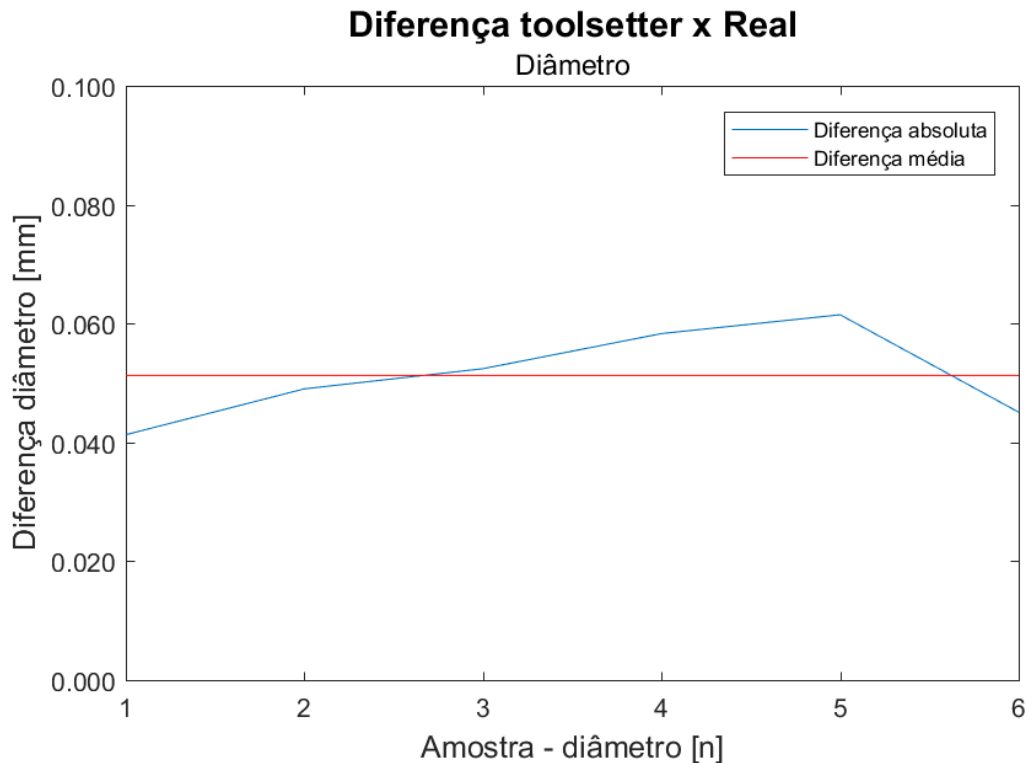
Figura 25 – Diâmetros reais do corpo de teste



Fonte: o autor

Como observado na Figura 26, o erro médio nas medidas foi de 0,0513 mm, e o erro máximo encontrado foi de 0,0615 mm. A principal origem desse erro foi o a fixação do corpo de prova fora de centro na placa do torno. Não foi possível melhorar a fixação da peça porque não havia espaço físico para utilização do contraponto do torno. Além disso, o corpo de prova havia sido fabricado em outra máquina, uma vez que houve mudanças no laboratório, que não permitiram usinar a peça no mesmo torno em que o *toolsetter* foi testado, o que contribuiu para adicionar erro às medidas. Outra contribuição para o erro veio do uso de um relógio comparador centesimal — o único disponível para centralização da peça na placa do torno durante os ensaios — que se mostrou insuficiente para essa aplicação; o ideal teria sido a utilização de um relógio comparador milesimal. Em um processo de manufatura com o *toolsetter* integrado, esse tipo de erro não acontece, pois a medição é feita logo após o término da usinagem, antes da retirada da peça da castanha do torno.

Figura 26 – Corpo de teste: desvio padrão — diâmetro



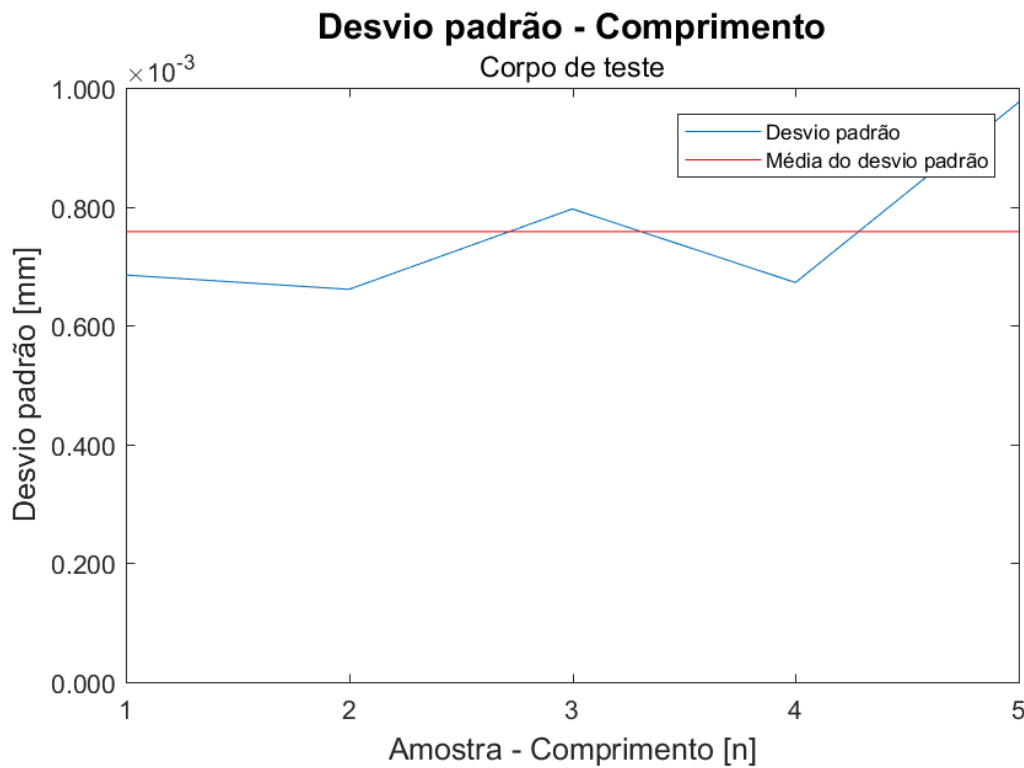
Fonte: o autor

Ensaio de peças – Comprimento

A próxima análise feita foi da medição do comprimento do corpo de prova, a fim de verificar os desvios de medidas. O objetivo dessa etapa também foi verificar a possibilidade de uso de um *toolsetter* no processo de inspeção de qualidade de centros de torneamento.

Foi observado o desvio padrão entre as medições de cada ponto do diâmetro. O desvio máximo foi de 0,0009 mm e o médio de 0,0007mm, conforme Figura 27.

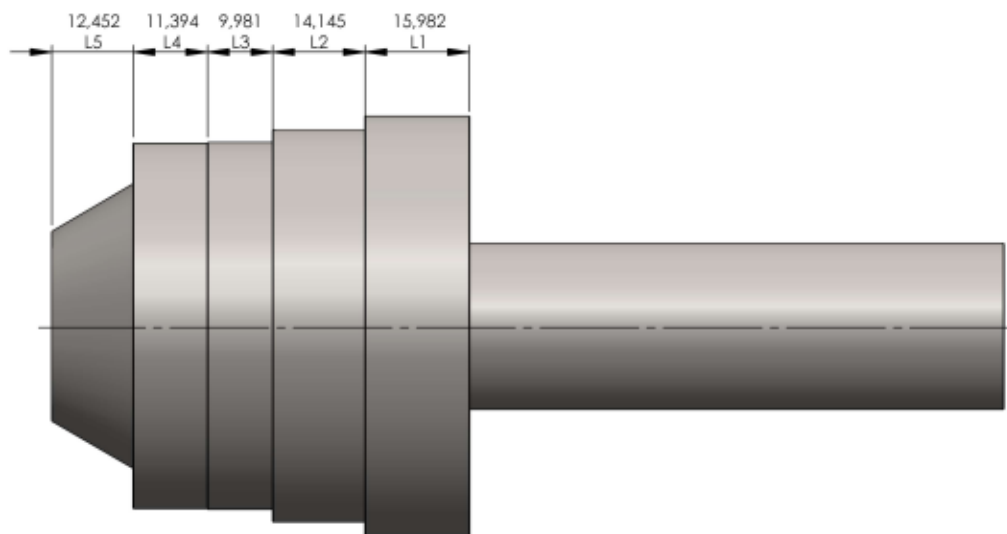
Figura 27 – Corpo de teste: desvio padrão — comprimento



Fonte: o autor

Continuando a análise, foi feito o comparativo entre a diferença dos comprimentos medidos no *toolsetter* e dos comprimentos reais (Figura 28).

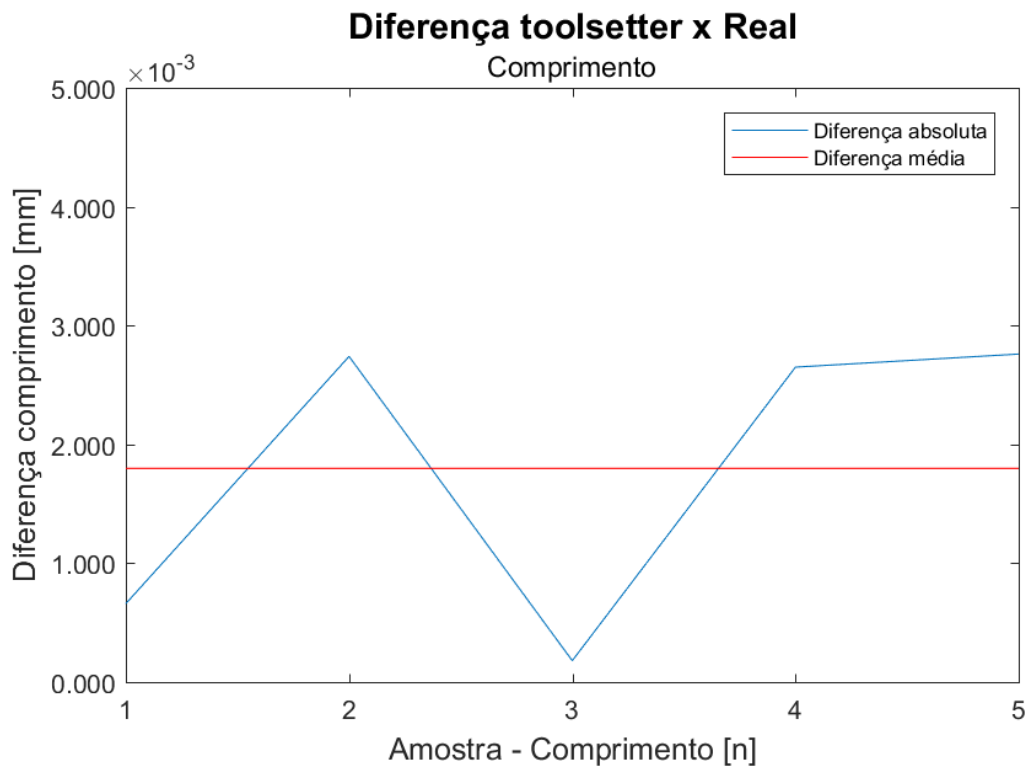
Figura 28 – Comprimentos reais do corpo de teste



Fonte: o autor

Como observado na Figura 29, o erro médio nas medidas foi de 0,0028mm, e o erro máximo encontrado foi de 0,0027 mm. O fato de o erro de medição do comprimento ser menor que o erro relativo ao diâmetro se deve à explicação anterior, já que o não paralelismo da peça fixada na castanha em relação ao barramento do torno não sofre tanta influência do sentido da medida (carro longitudinal).

Figura 29 – Corpo de teste: comprimento - diferença entre a medida do *toolsetter* e a medida real



Fonte: o autor

Ensaio de peças – diâmetro – eixo árvore movimentando

Apesar de se já ter um prévio conhecimento do resultado dessa análise, foi realizado o ensaio a fim de sustentar a tese de que o desvio dimensional na medição dos diâmetros realmente era causado pela excentricidade na fixação do corpo de prova na placa do torno.

Foram escolhidos apenas dois diâmetros para análise, pois eram os que possuíam o menor batimento, de acordo com os dados levantados pela medição do corpo de prova na máquina de medir.

Como pode ser observado nas Figuras 30 e 31, há uma grande dispersão de pontos ocasionada pelo movimento rotacional do eixo árvore. Essa dispersão ainda poderia ser maior; conseqüentemente o desvio padrão também seria, porém o *toolsetter* utilizado

nos experimentos possui filtro analógico interno, fazendo com que, provavelmente, pontos dispersos tenham sido descartados automaticamente.

Figura 30 – Corpo de teste: diâmetro x valor médio no ponto D2 com o eixo-árvore em 100 RPM (dispersão)

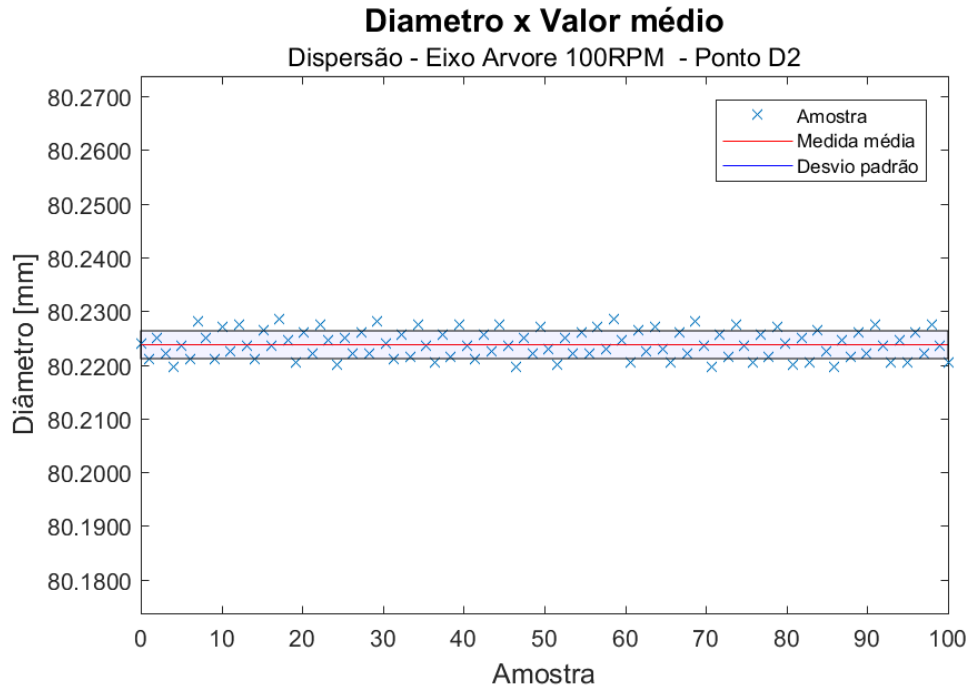
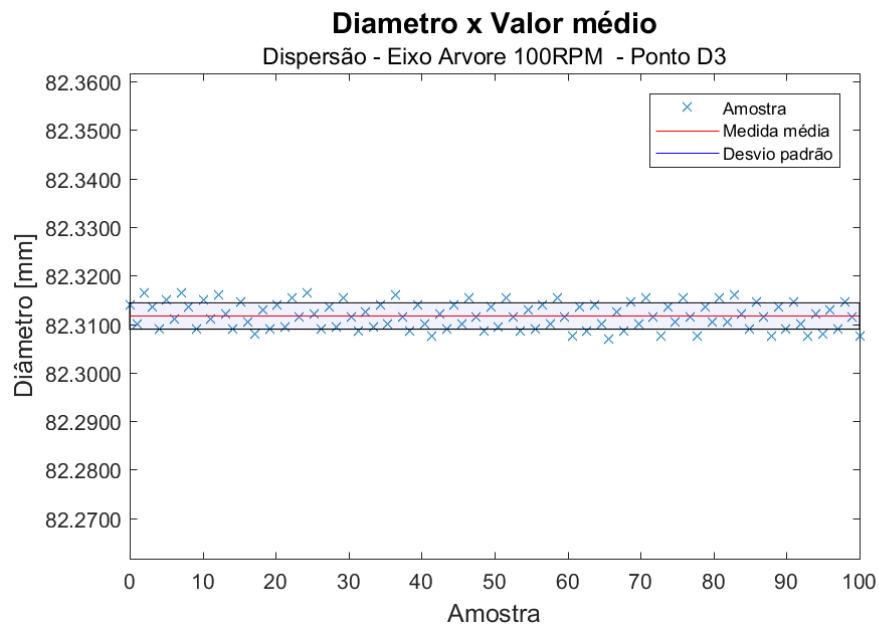


Figura 31 – Corpo de teste: diâmetro x valor médio no ponto D3 com o eixo-árvore em 100 RPM (dispersão)



Fonte: o autor

De posse dessa análise dos dados obtidos com o eixo árvore se movimentando, foi reforçada a teoria que relaciona a origem do erro nas medições do diâmetro com a fixação do corpo de teste na castanha do torno.

É importante ressaltar, por fim, que a ordem de importância e grandeza dos erros para os diâmetros, comprimentos e ferramentas é sempre definida em função dos requisitos de tolerância da peça a ser usinada.

5 – CONCLUSÃO

Os testes indicaram que é tecnicamente viável usar um *toolsetter* a laser para referenciamento de ferramentas e medição de peças em processo, em tornos CNC. Isso significa que empresas que já possuam o equipamento para medição de ferramentas em outras máquinas CNC, podem ampliar seu uso para os tornos CNC.

Pela análise dos dados, foi possível perceber que, ao se fazer a medição da peça em movimento (rotação), houve uma variação do seu diâmetro, conforme sua posição. Esse tipo de variação – denominada comumente de batimento — é normal quando a peça é usinada, retirada da placa para medição e recolocada na placa. Com o sistema aqui proposto, a retirada e a recolocação se tornam desnecessárias, uma vez que a peça pode ser medida em processo, o que elimina o batimento, ou seja, mais uma fonte de erro na usinagem.

Para que possa fazer as medições tanto das ferramentas quanto das peças usinadas, o *toolsetter* precisa estar fixado em algum ponto, conforme o modelo do torno, em que ele consiga fazer as duas medições.

As principais considerações e conclusões são apresentadas a seguir:

1. É possível utilizar o *toolsetter* como ferramenta auxiliar na medição de ferramentas. A incerteza da leitura ficou dentro da incerteza do conjunto torno – *toolsetter*.
2. É possível utilizar o *toolsetter* como ferramenta auxiliar na medição de peças estáticas. A incerteza da leitura, nesses casos, ficou dentro da incerteza do conjunto torno – *toolsetter*.
3. Faz-se necessário realizar mais pesquisas para utilizar em definitivo o *toolsetter* como ferramenta auxiliar na medição de peças de forma dinâmica, devido ao problema de batimento causado pela fixação da peça na placa do torno. Isso pode ser resolvido realizando a medição dinâmica em uma peça recém usinada, sem que ela tenha sido retirada da placa do torno.

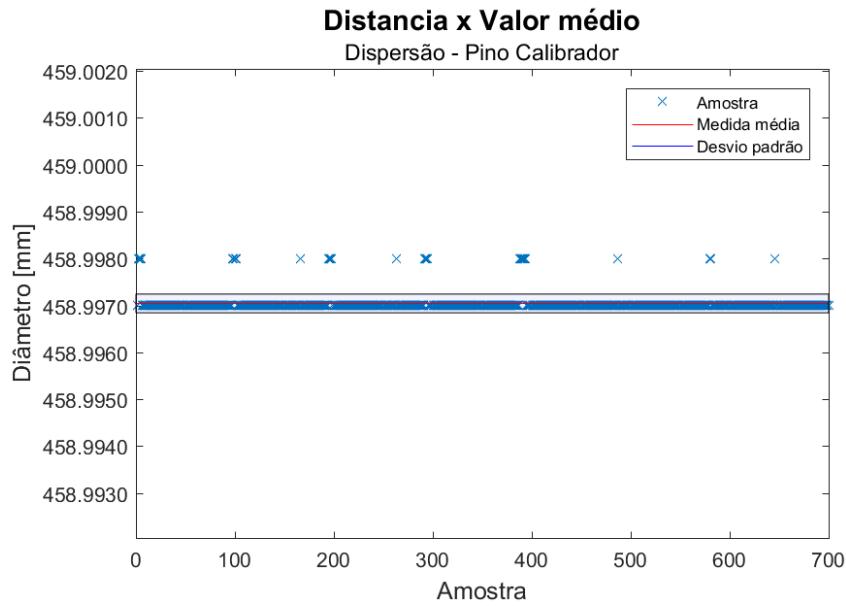
4. Outro ponto observado foi a resposta do *toolsetter* a rotações acima de 100 RPM. O aparelho acaba perdendo pontos devido ao seu filtro analógico interno, que reduz o tempo de resposta do *toolsetter*. Para medições dinâmicas em altas velocidades, é necessário um *toolsetter* com rápida resposta de gatilho.
5. Como as incertezas do conjunto *toolsetter* ficaram dentro da incerteza da própria máquina, sugere-se realizar a medição em uma máquina de medir por coordenada externa, utilizando o *toolsetter* como disparo ou realizando os experimentos em outro torno, com incertezas menores.
6. Como trabalhos futuros, sugere-se:
 - Realizar os testes de controle de desgaste das ferramentas durante o processo de usinagem e fazer todos os ensaios de medição de peça logo após a usinagem, a fim de verificar os desvios na medição de diâmetro.
 - Analisar a possibilidade de uso do *toolsetter* para medição de ferramentas e medição de peças em processo em centros de torneamento.
 - Fazer análises financeiras do quanto o uso do *toolsetter* para referenciamento de ferramentas em tornos CNC impacta as empresas em termos financeiros, pela redução de perdas, tanto em tempo quanto em avaria de ferramentas e não necessidade de usinagem de peça teste.
 - Analisar o ganho de qualidade na produção e seu impacto financeiro.
 - Investigar os tempos necessários para instalação do *toolsetter* e possíveis soluções para gerenciar os tempos de máquina parada que persistirem.

Por fim, ressalta-se que, para a aplicação em questão, o *toolsetter* atendeu às expectativas de uso e aos objetivos desse trabalho, que era provar a viabilidade técnica do uso do *toolsetter* para referenciamento de ferramentas e medição de peças em processo.

ANEXOS

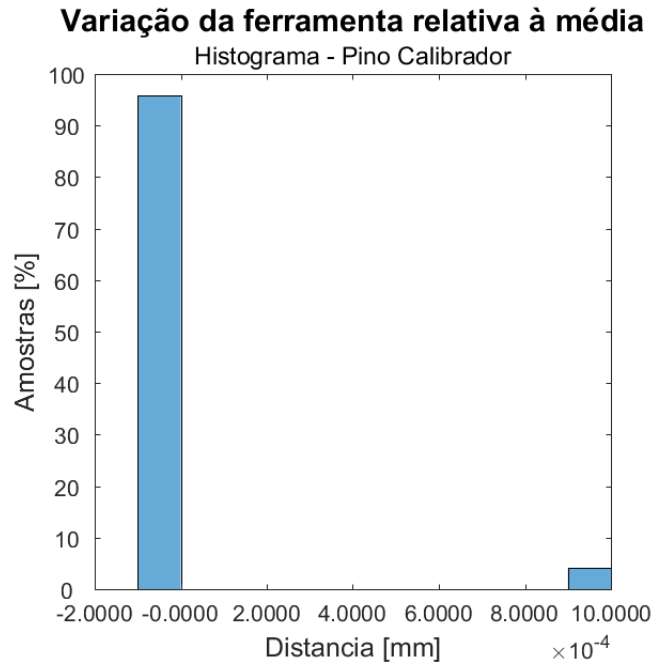
Anexo 1 – Dados obtidos pelo *toolsetter* na medição do pino calibrador

Figura 32 – Pino calibrador: distância X valor médio (dispersão)



Fonte: o autor

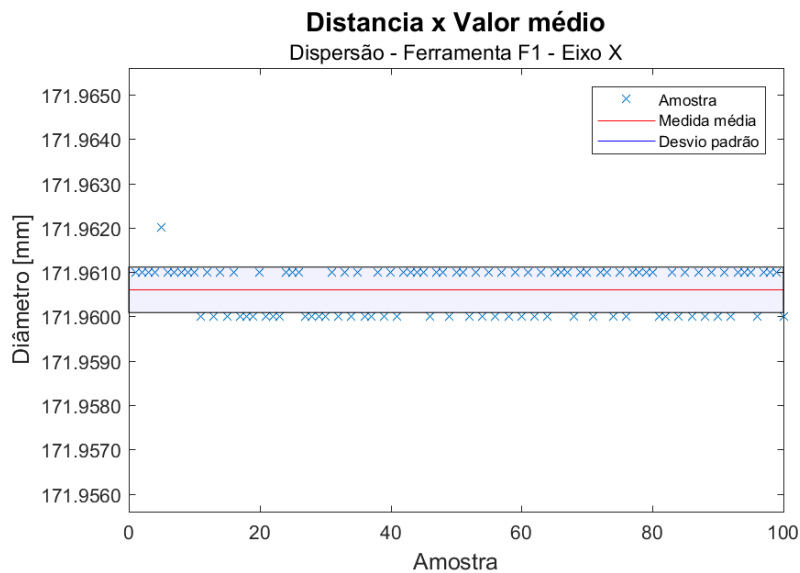
Figura 33 – Pino calibrador: variação da ferramenta relativo à média (histograma)



Fonte: o autor

Anexo 2 – Dados obtidos pelo *toolsetter* na medição de ferramentas

Figura 34 – Ferramenta 1: eixo X-distância x valor médio (dispersão)



Fonte: o autor

Figura 35 – Ferramenta 1: eixo X – variação da ferramenta relativo à média (histograma)

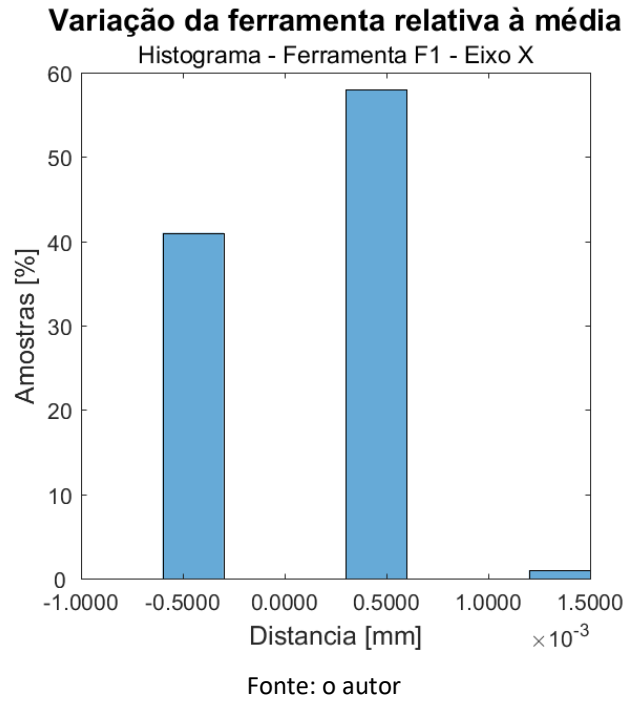


Figura 36 – Ferramenta 1: eixo Z – distância x valor médio (dispersão)

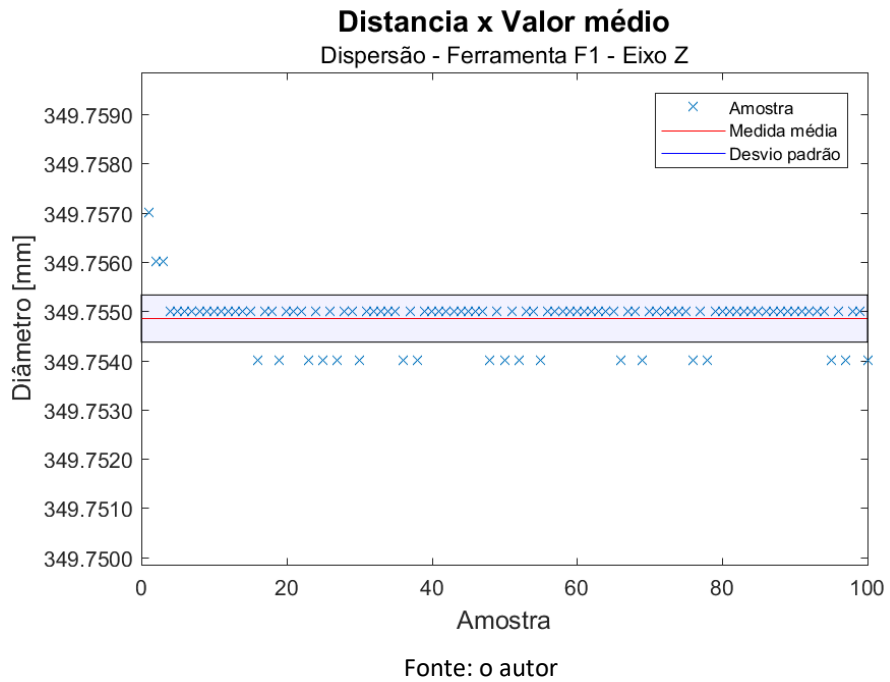
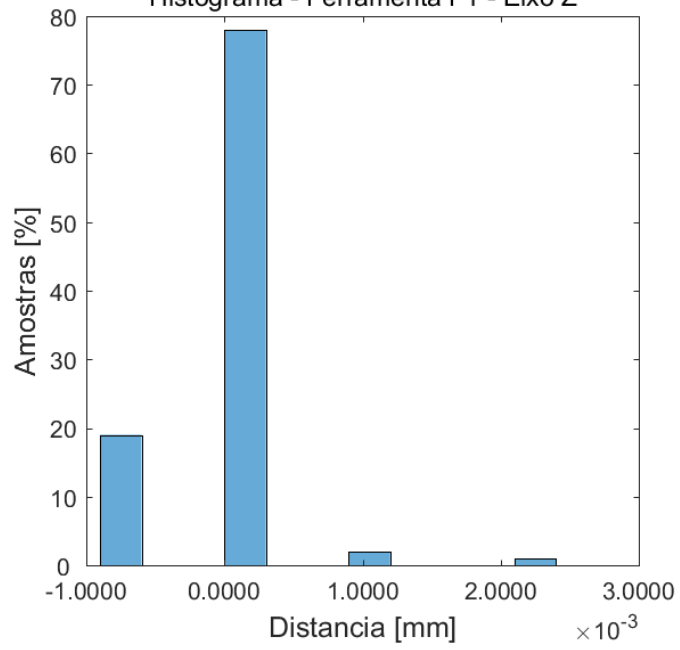


Figura 37 – Ferramenta 1: eixo Z – variação da ferramenta relativo à média (histograma)

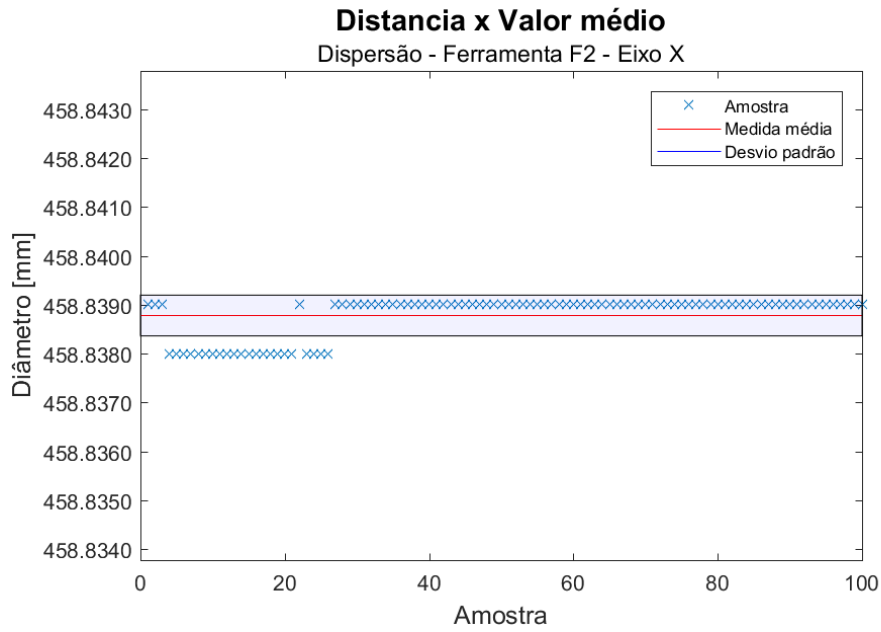
Varição da ferramenta relativa à média

Histograma - Ferramenta F1 - Eixo Z



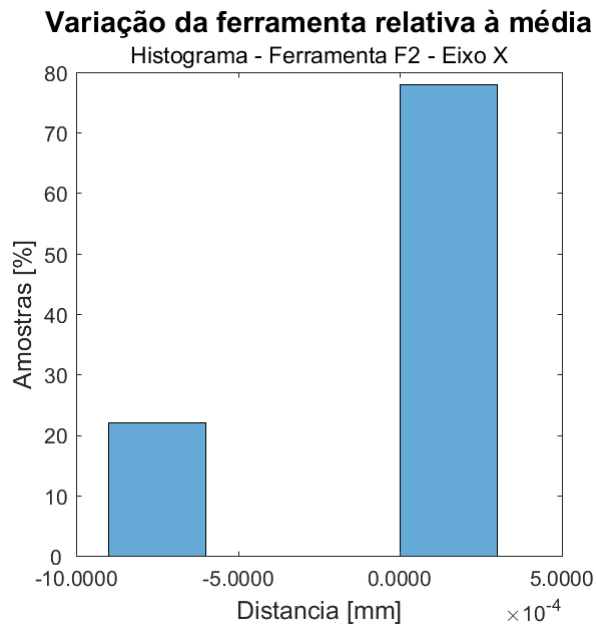
Fonte: o autor

Figura 38 – Ferramenta 2: eixo X — distancia x valor médio (dispersão)



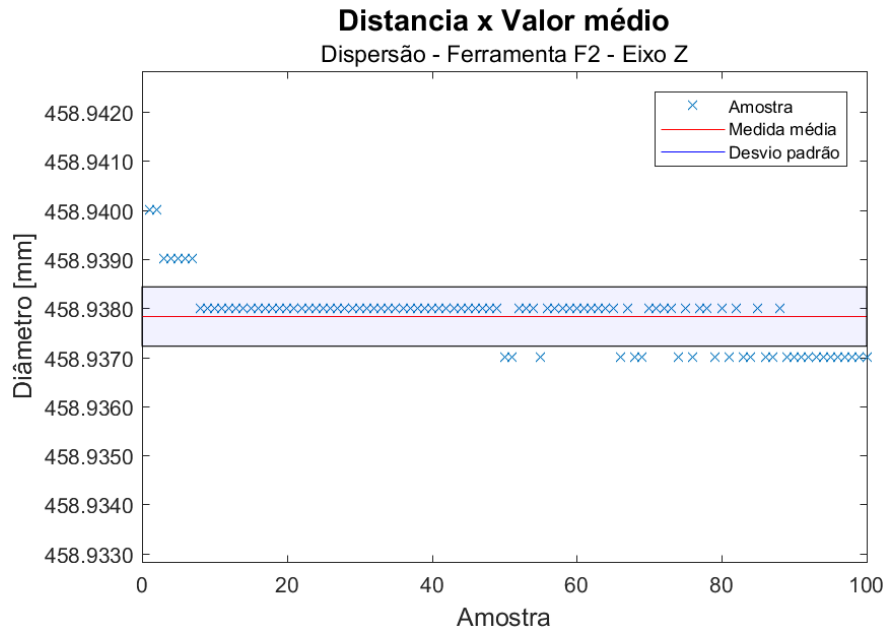
Fonte: o autor

Figura 39 – Ferramenta 2: eixo X – variação da ferramenta relativo à média (histograma)



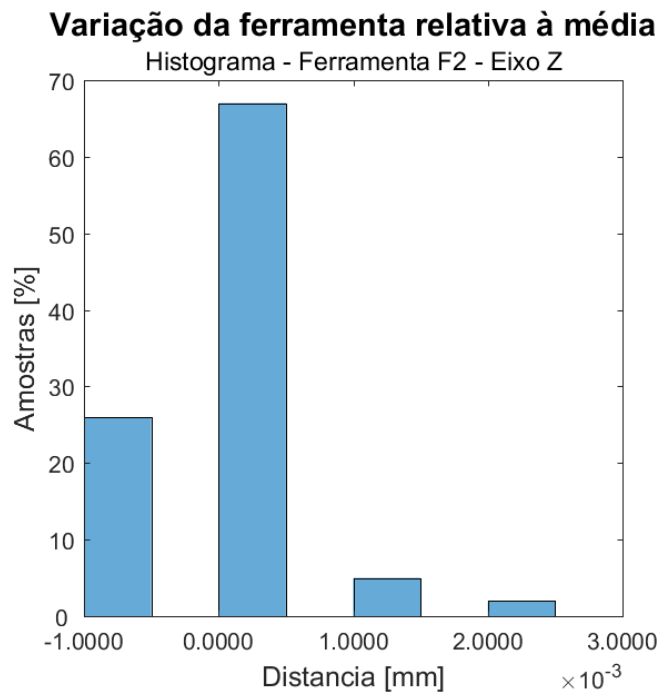
Fonte: o autor

Figura 40 – Ferramenta 2: eixo Z – distancia x valor médio (dispersão)



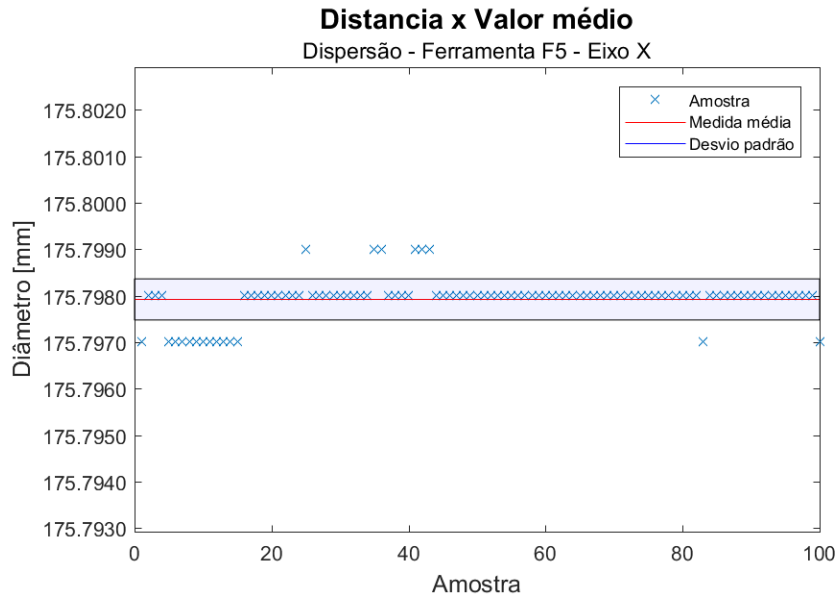
Fonte: o autor

Figura 41 – Ferramenta 2: eixo Z – variação da ferramenta relativa à média (histograma)



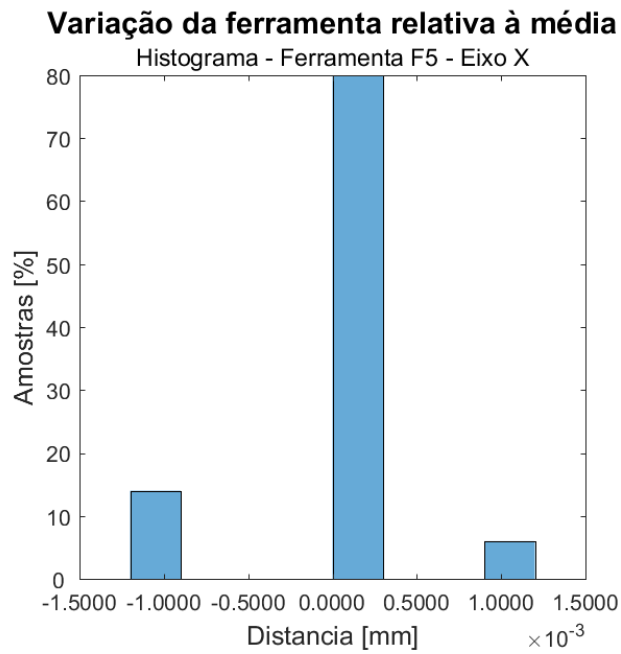
Fonte: o autor

Figura 42 – Ferramenta 5: eixo X – distancia x valor médio (dispersão)



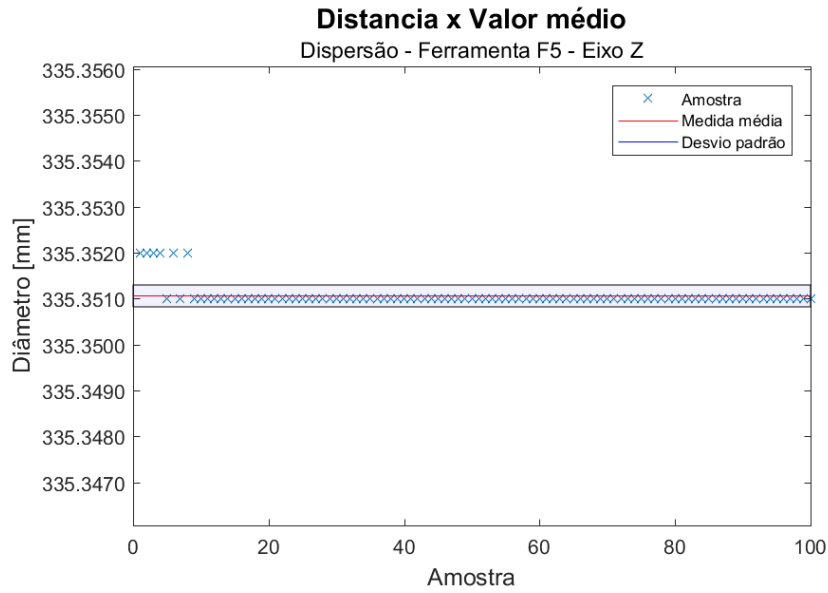
Fonte: o autor

Figura 43 – Ferramenta 5: eixo X – variação da ferramenta relativa à média (histograma)



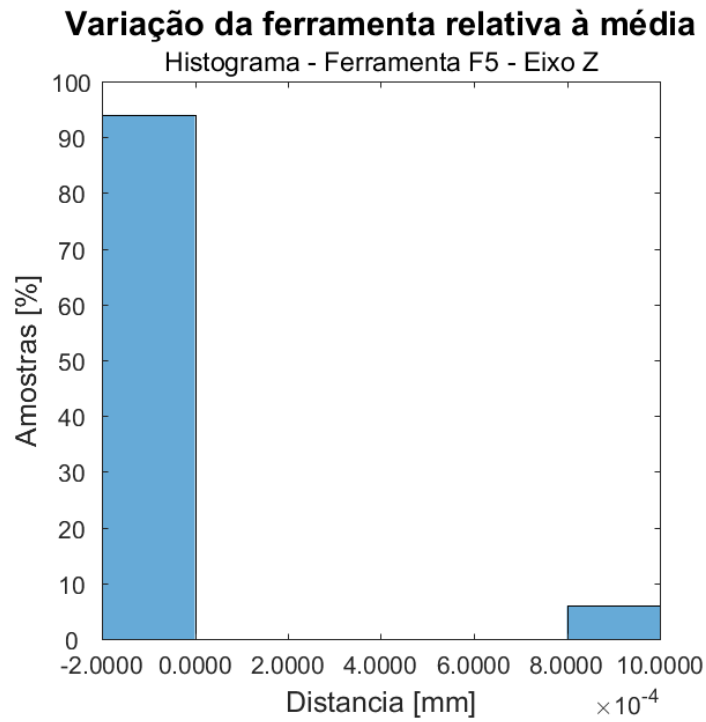
Fonte: o autor

Figura 44 – Ferramenta 5: eixo Z – distancia x valor médio (dispersão)



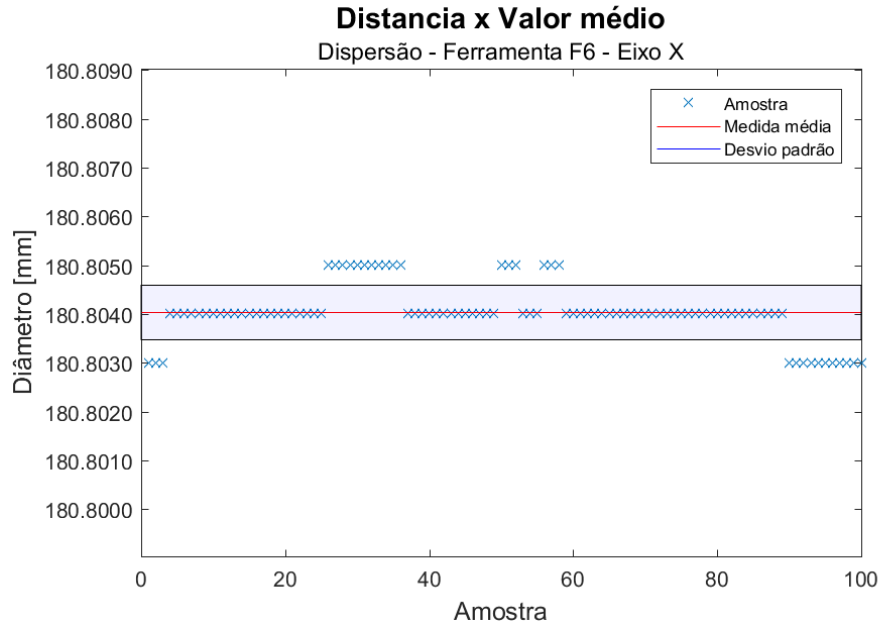
Fonte: o autor

Figura 45 – Ferramenta 5: eixo Z – variação da ferramenta relativa à média (histograma)



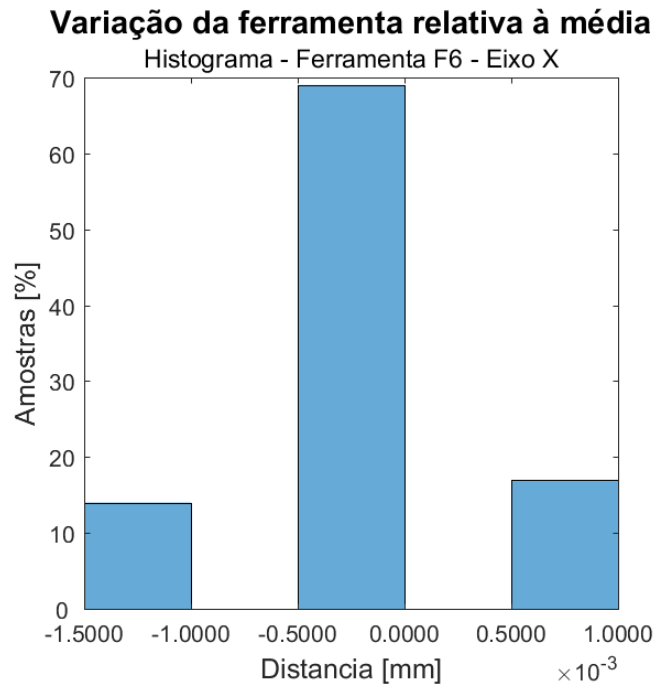
Fonte: o autor

Figura 46 – Ferramenta 6: eixo X – distancia x valor médio (dispersão)



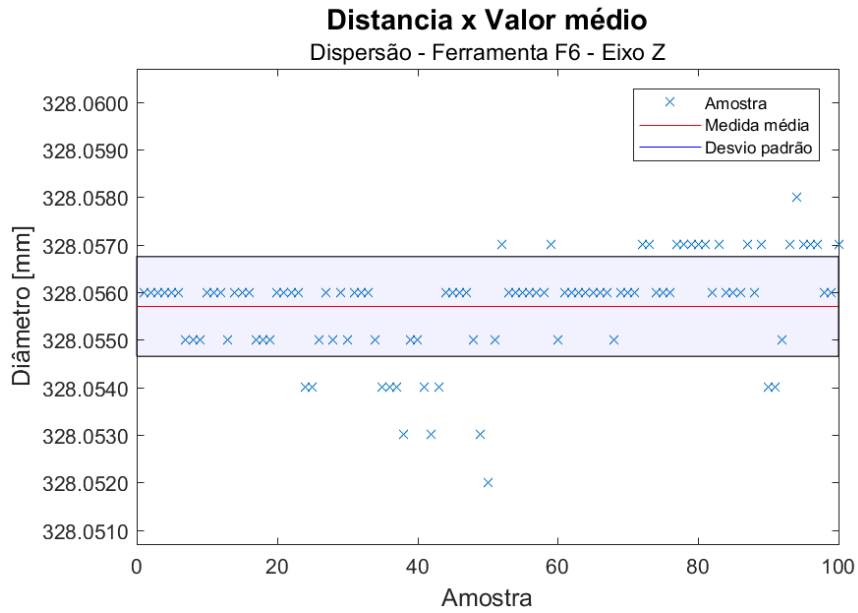
Fonte: o autor

Figura 47 – Ferramenta 6: eixo X – variação da ferramenta relativa à média (histograma)



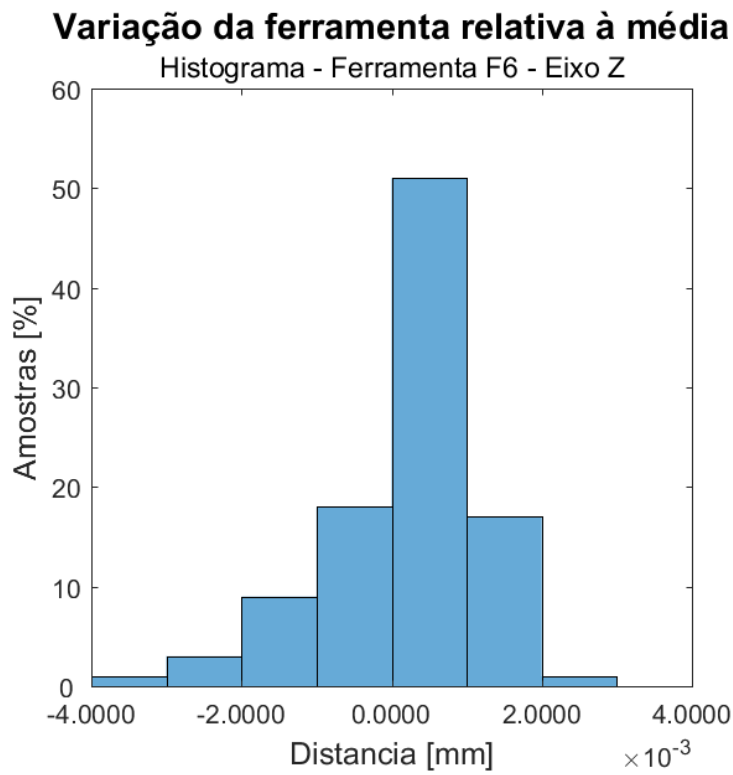
Fonte: o autor

Figura 48 – Ferramenta 6: eixo Z – distancia x valor médio (dispersão)



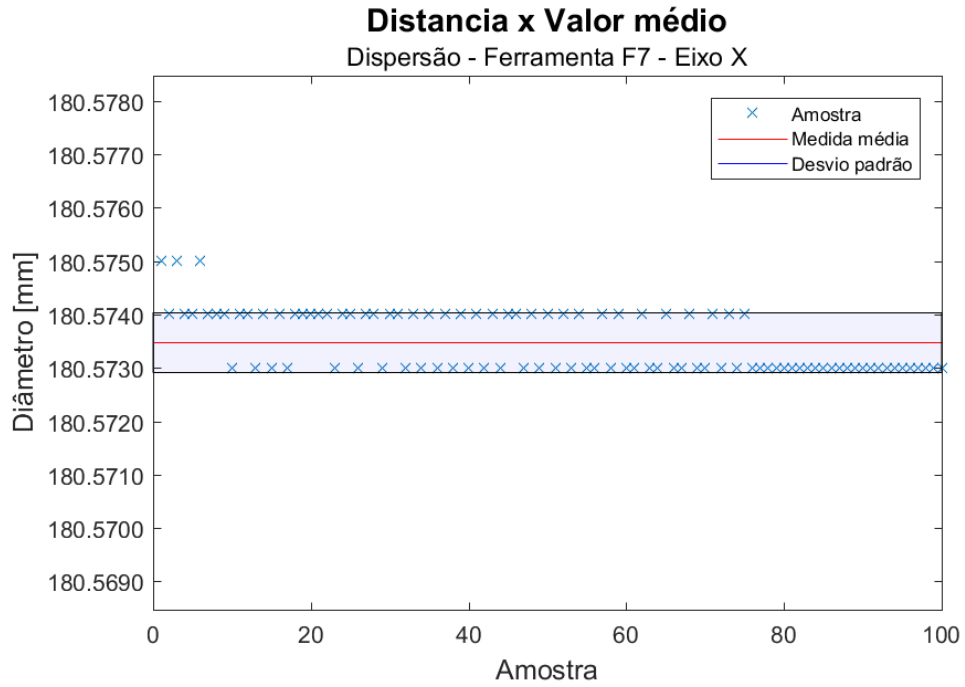
Fonte: o autor

Figura 49 – Ferramenta 6: eixo Z – variação da ferramenta relativa à média (histograma)



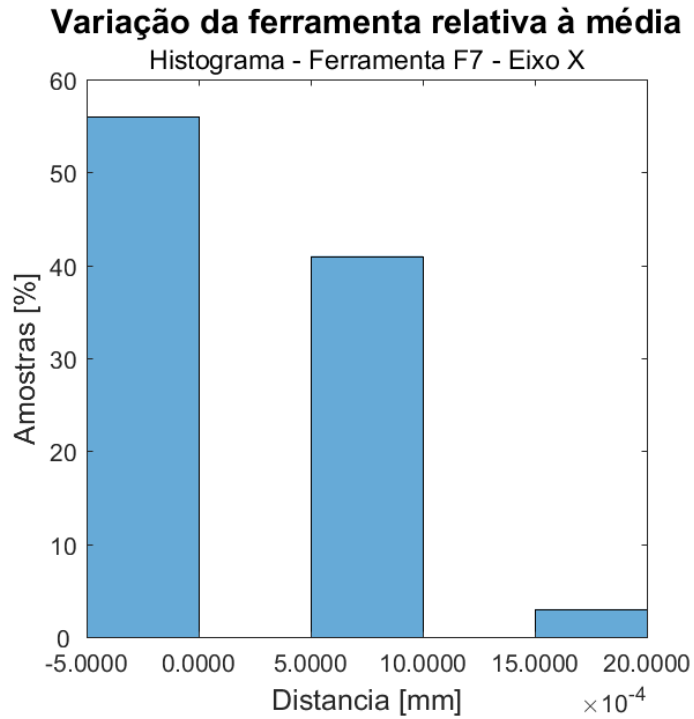
Fonte: o autor

Figura 50 – Ferramenta 7: eixo X – distancia x valor médio (dispersão)



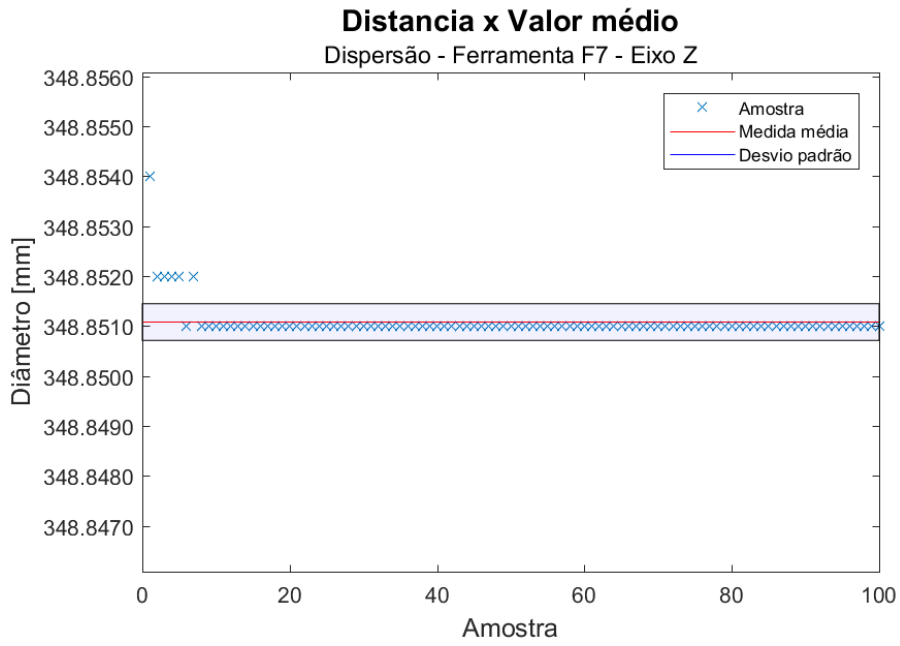
Fonte: o autor

Figura 51 – Ferramenta 7: eixo X – variação da ferramenta relativa à média (histograma)



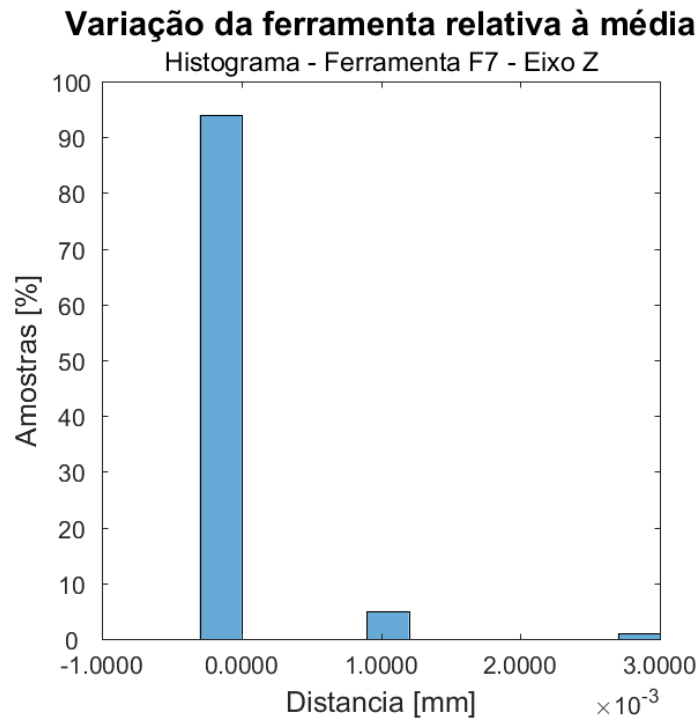
Fonte: o autor

Figura 52 – Ferramenta 7: eixo Z – distancia x valor médio (dispersão)



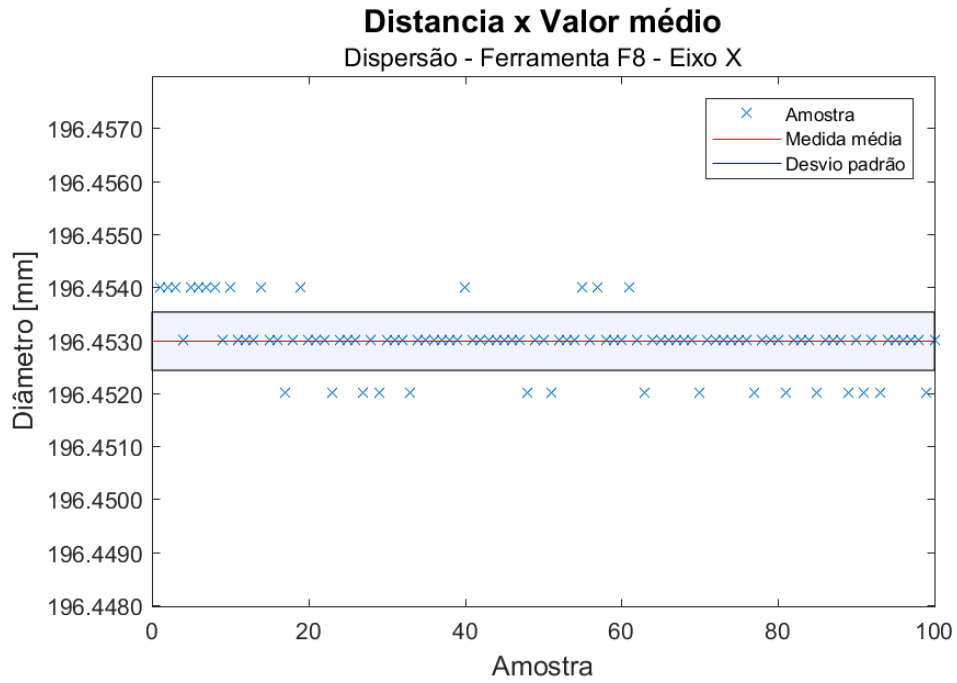
Fonte: o autor

Figura 53 – Ferramenta 7: eixo Z – variação da ferramenta relativa à média (histograma)



Fonte: o autor

Figura 54 – Ferramenta 8: eixo X – distancia x valor médio (dispersão)



Fonte: o autor

Figura 55 – Ferramenta 8: eixo X – variação da ferramenta relativa à média (histograma)

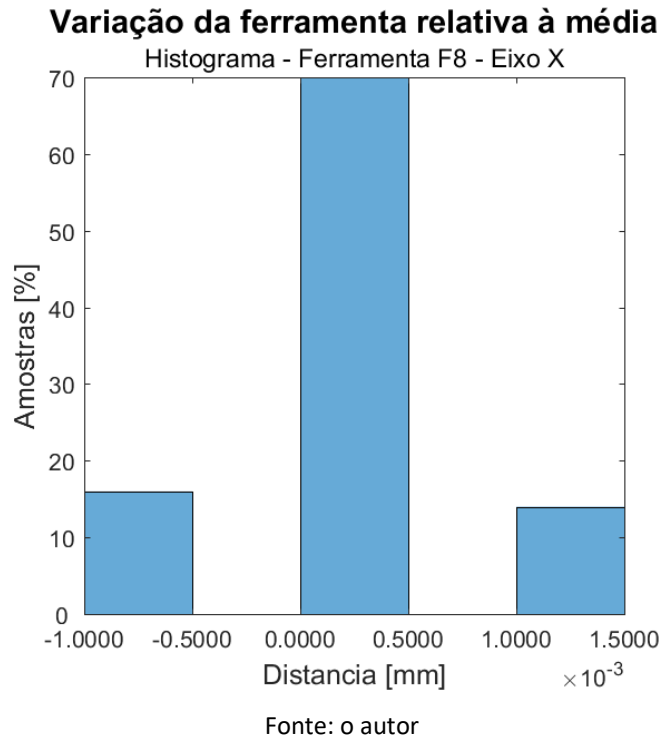


Figura 56 – Ferramenta 8: eixo Z – distancia x valor médio (dispersão)

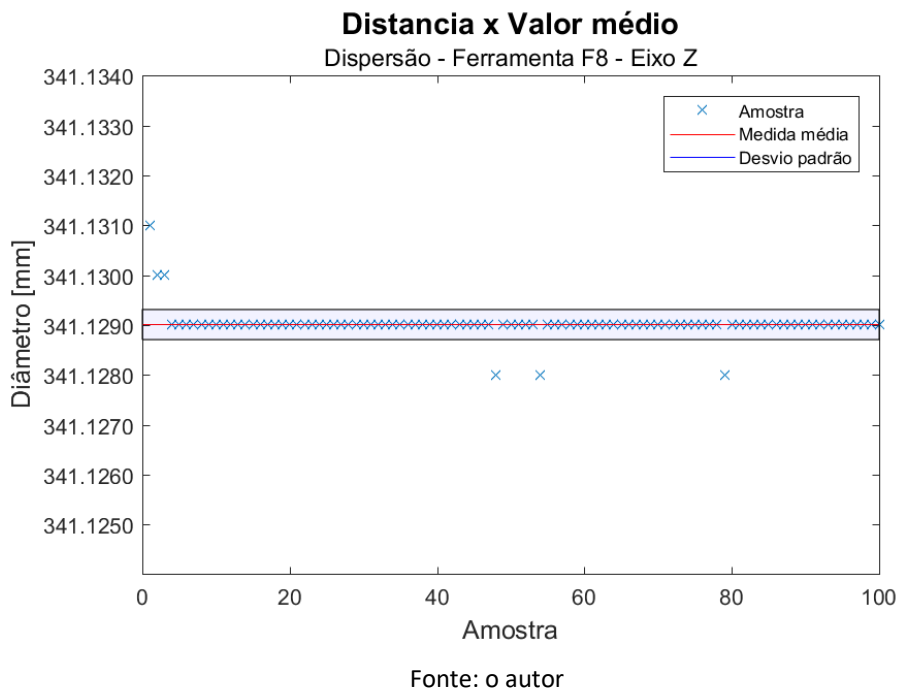
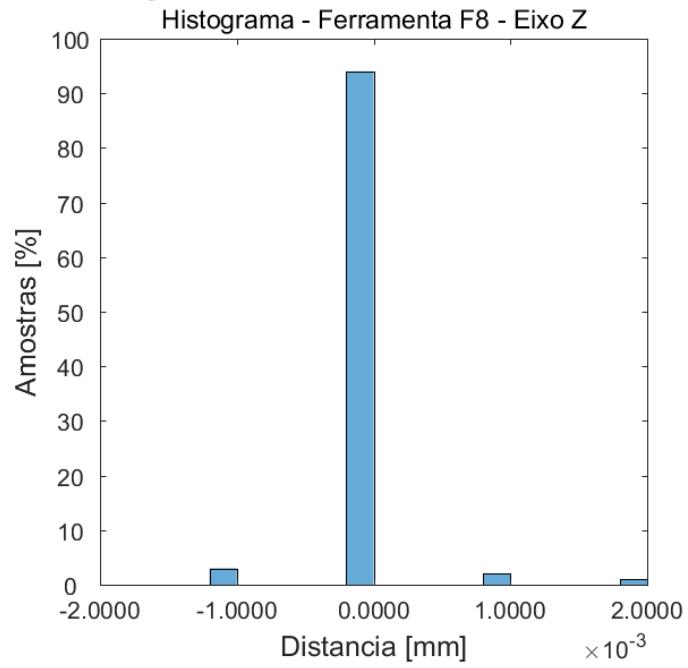


Figura 57 – Ferramenta 8: eixo Z – variação da ferramenta relativa à média (histograma)

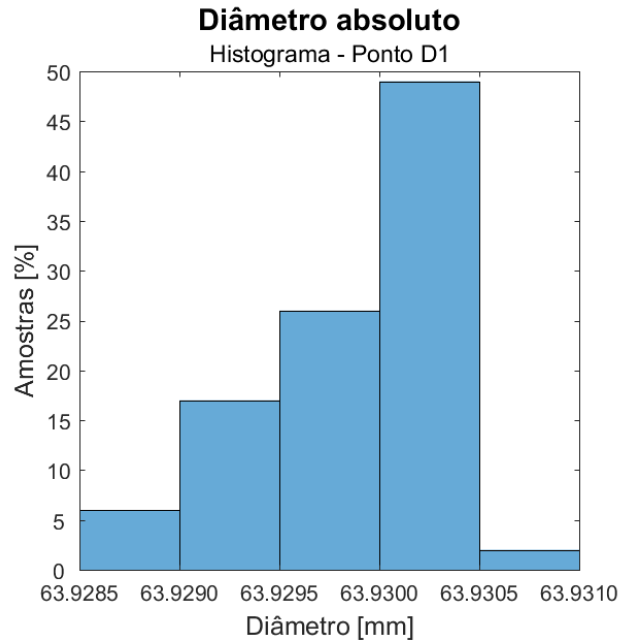
Varição da ferramenta relativa à média



Fonte: o autor

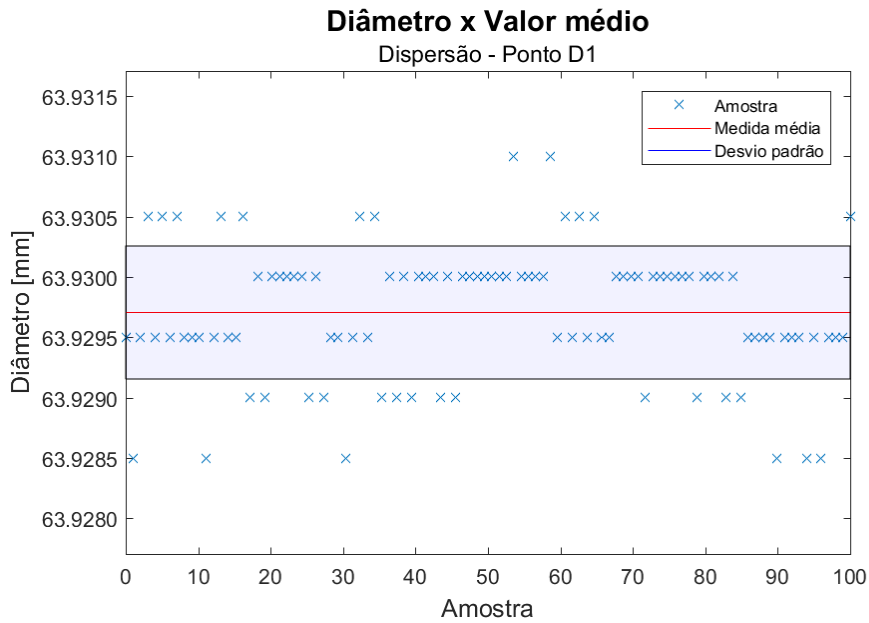
Anexo 3 – Dados obtidos pelo *toolsetter* na medição dos diâmetros da peça

Figura 58: Diâmetro 1: diâmetro absoluto (histograma)



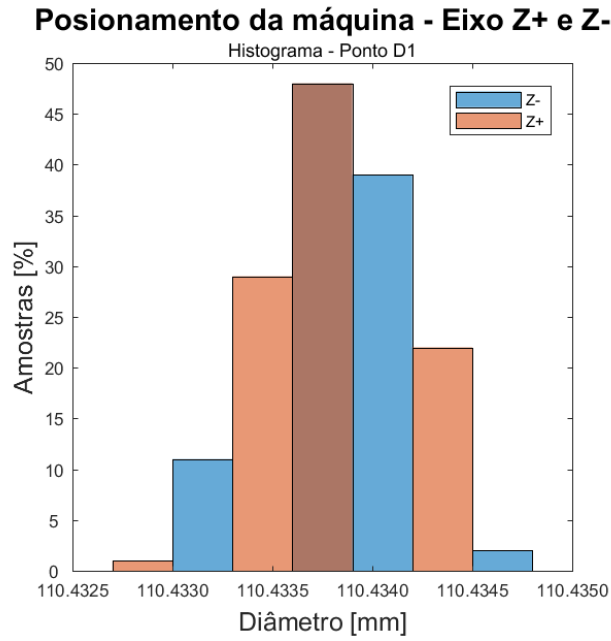
Fonte: o autor

Figura 59: Diâmetro 1: valor médio (dispersão)



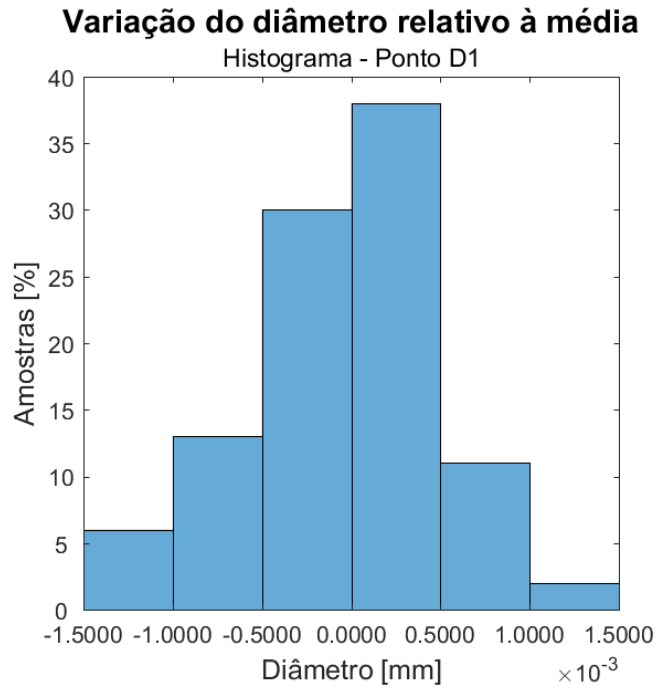
Fonte: o autor

Figura 60: Diâmetro 1: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)



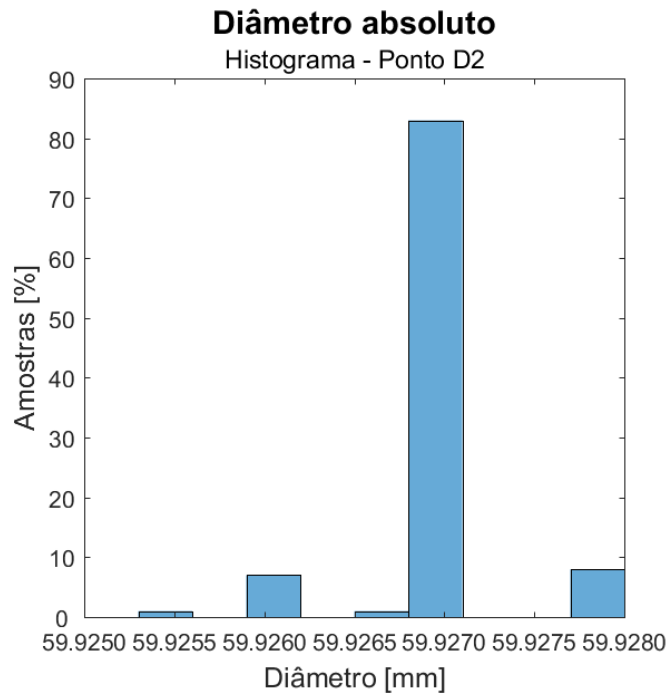
Fonte: o autor

Figura 61: Diâmetro 1: variação do diâmetro relativo à média (histograma)



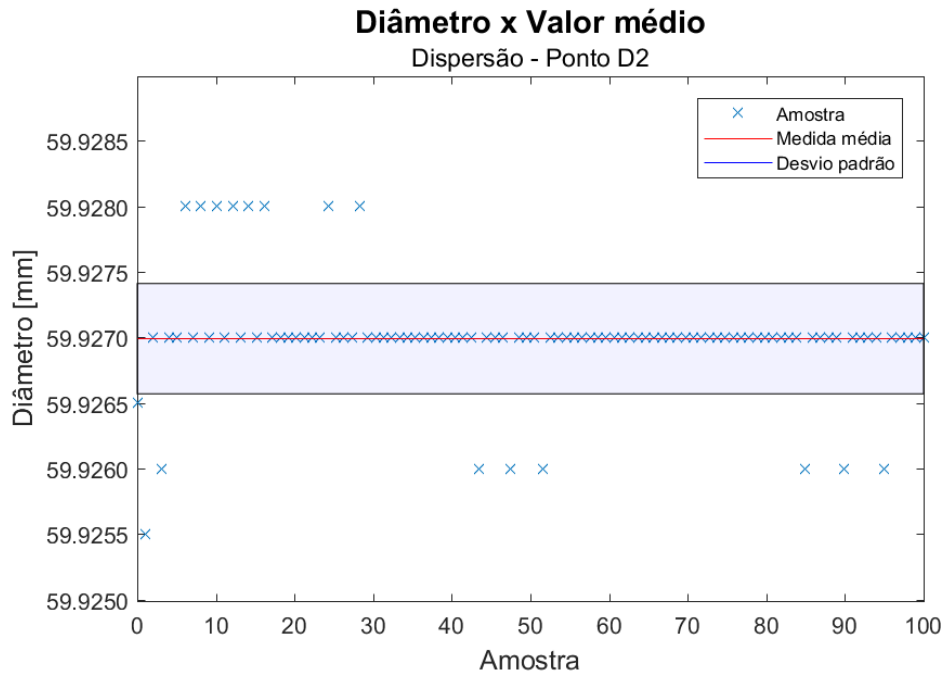
Fonte: o autor

Figura 62: Diâmetro 2: diâmetro absoluto (histograma)



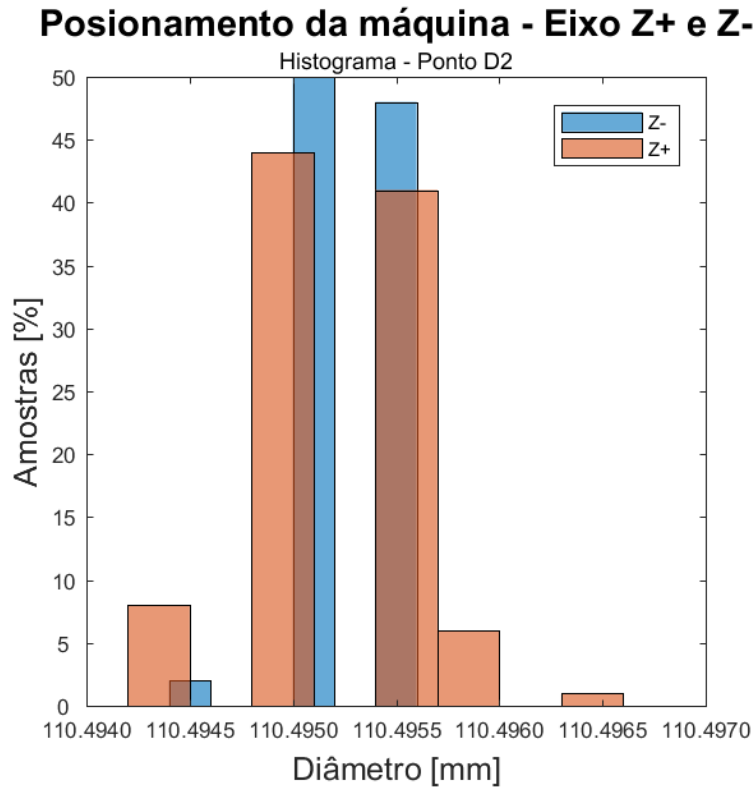
Fonte: o autor

Figura 63: Diâmetro 2: valor médio (dispersão)



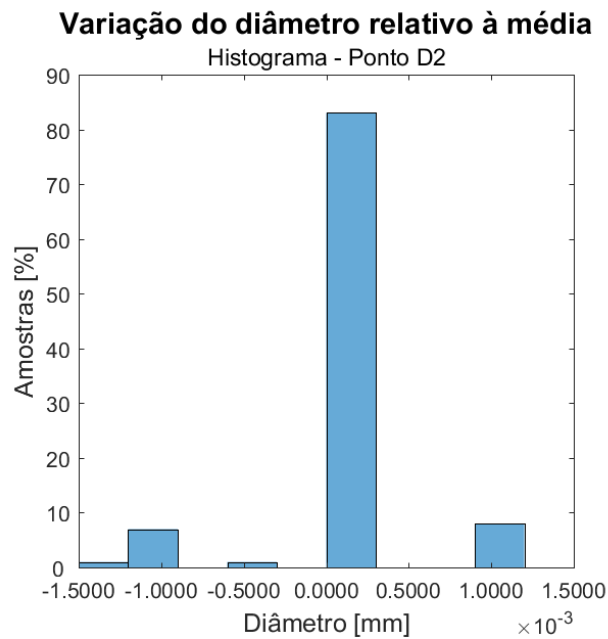
Fonte: o autor

Figura 64: Diâmetro 2: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)



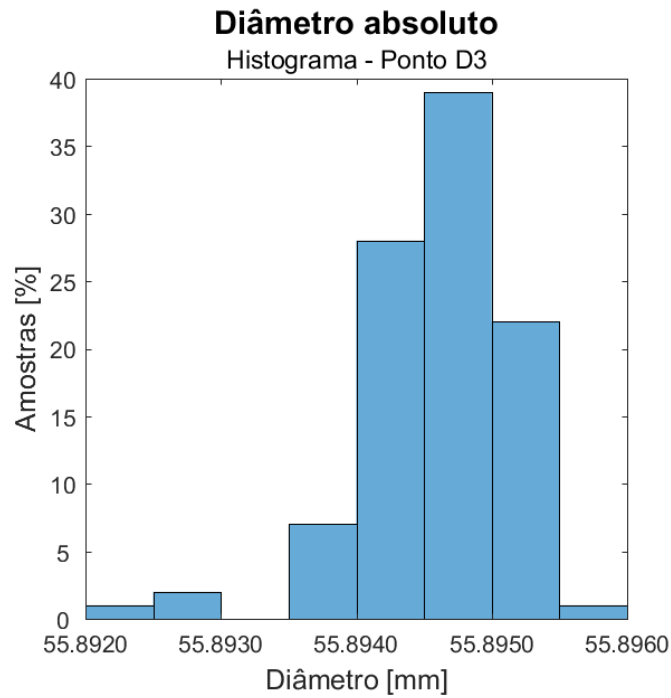
Fonte: o autor

Figura 65: Diâmetro 2: variação do diâmetro relativo à média (histograma)



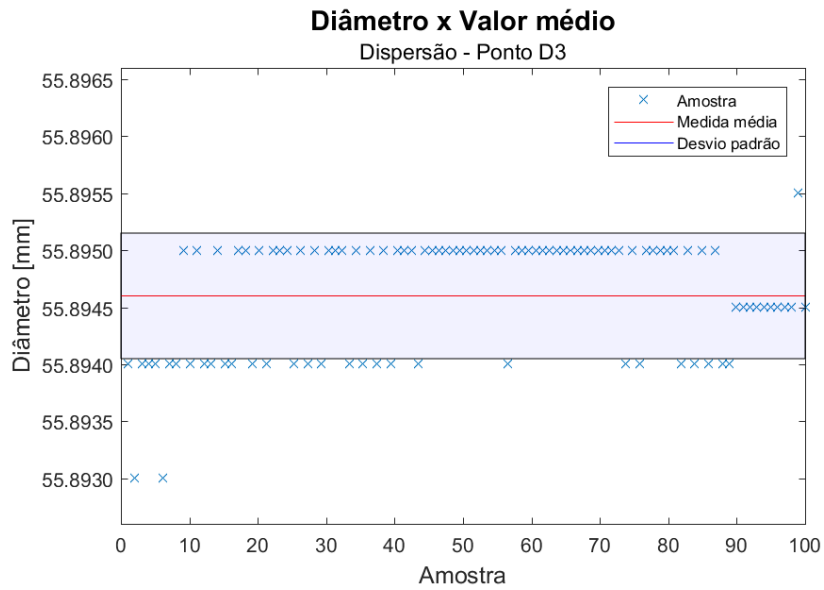
Fonte: o autor

Figura 66: Diâmetro 3: diâmetro absoluto (histograma)



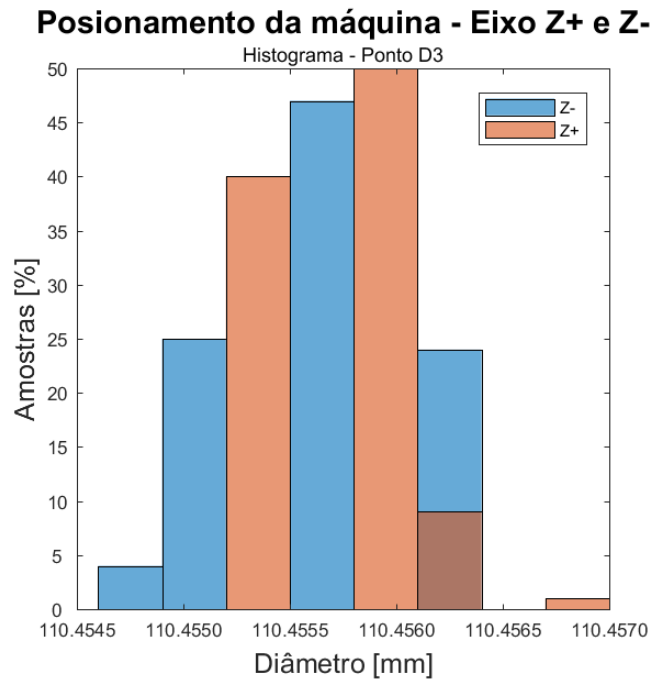
Fonte: o autor

Figura 67: Diâmetro 3: valor médio (dispersão)



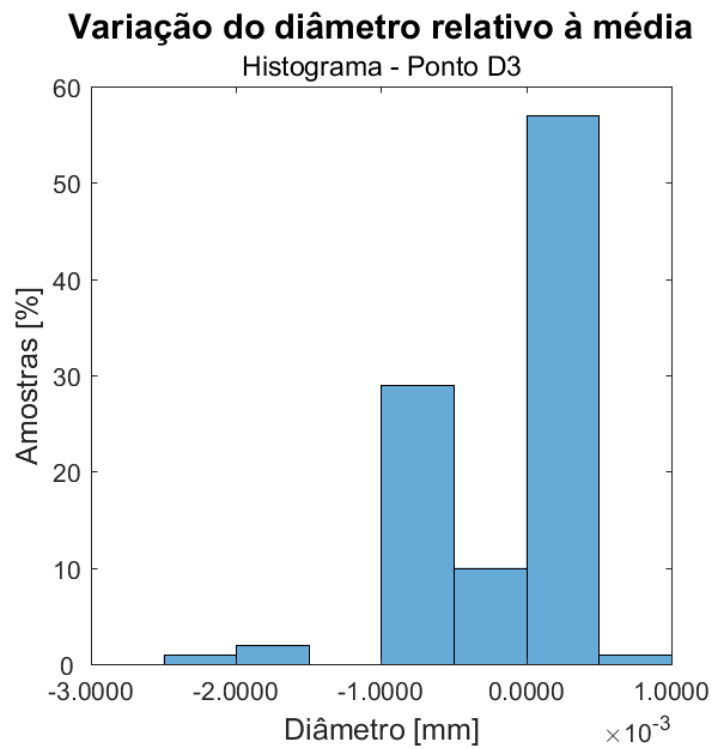
Fonte: o autor

Figura 68: Diâmetro 3: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)



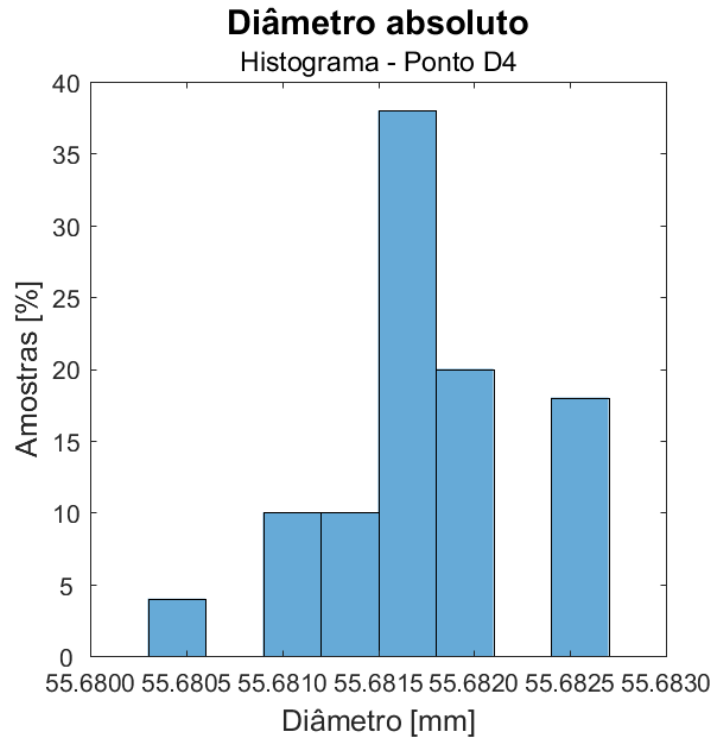
Fonte: o autor

Figura 69: Diâmetro 3: variação do diâmetro relativo à média (histograma)



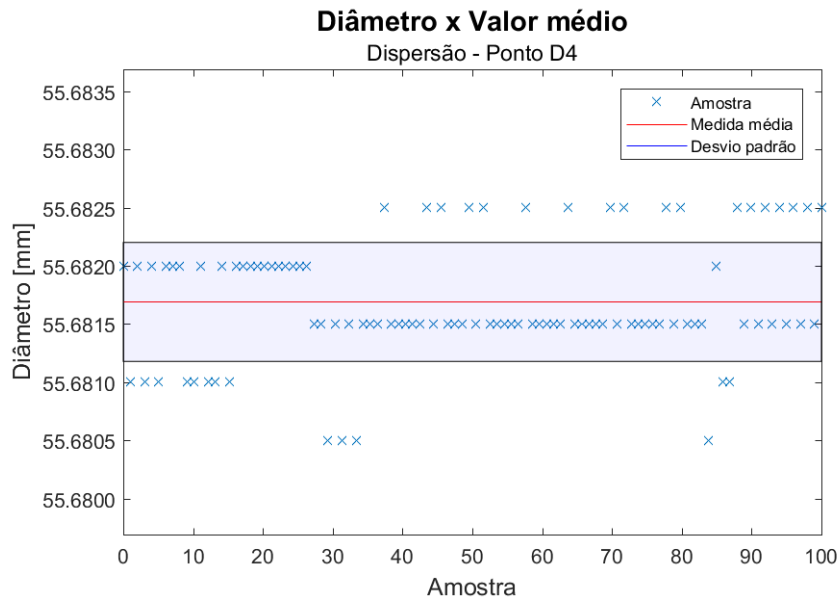
Fonte: o autor

Figura 70: Diâmetro 4: diâmetro absoluto (histograma)



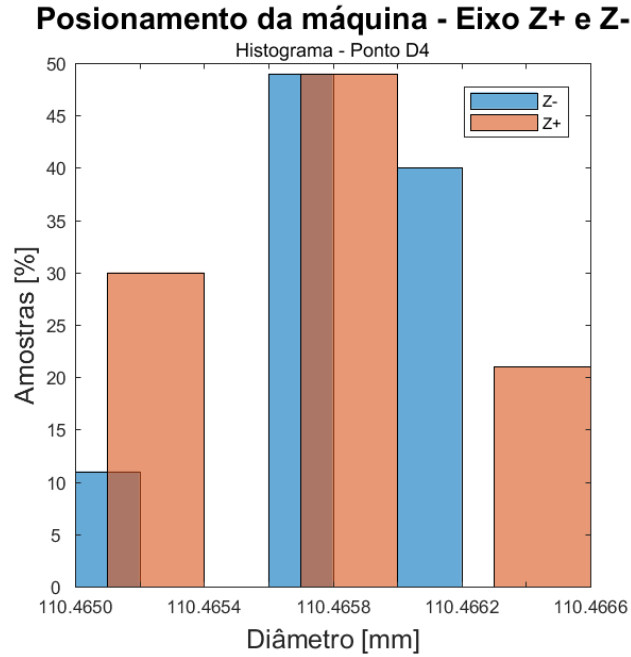
Fonte: o autor

Figura 71: Diâmetro 4: valor médio (dispersão)



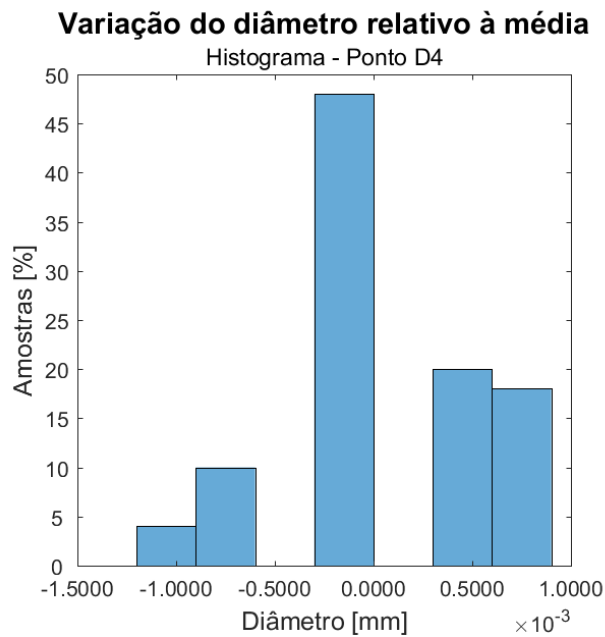
Fonte: o autor

Figura 72: Diâmetro 4: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)



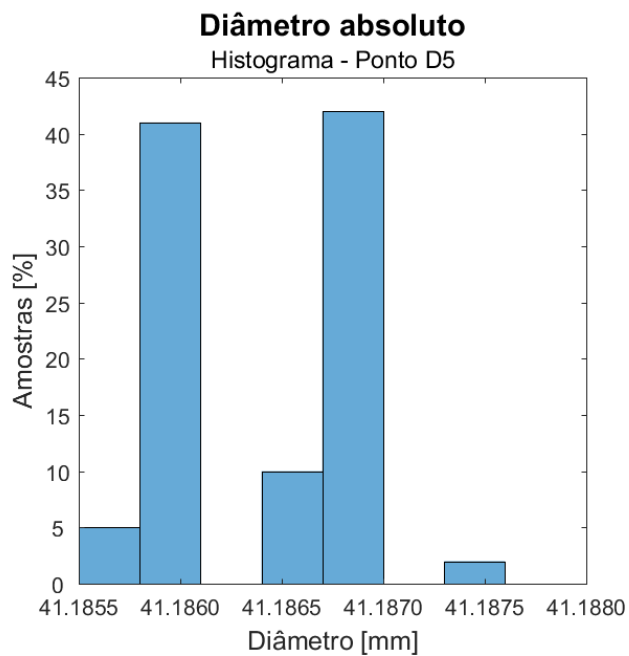
Fonte: o autor

Figura 73: Diâmetro 4: variação do diâmetro relativo à média (histograma)



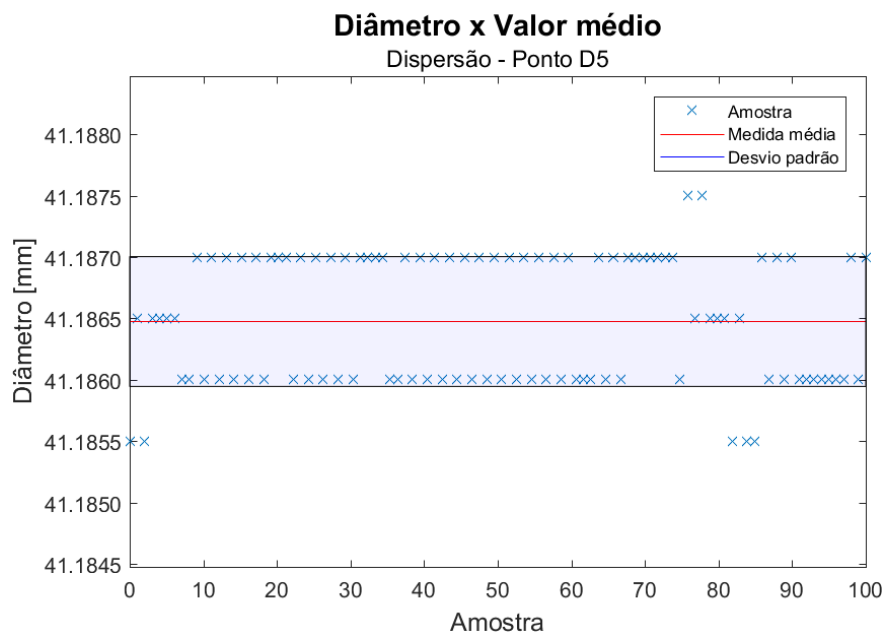
Fonte: o autor

Figura 74: Diâmetro 5: diâmetro absoluto-histograma



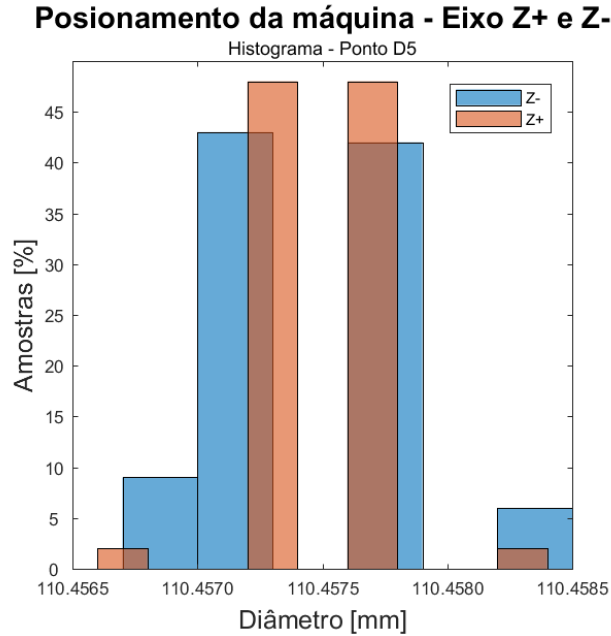
Fonte: o autor

Figura 75: Diâmetro 5: valor médio (dispersão)



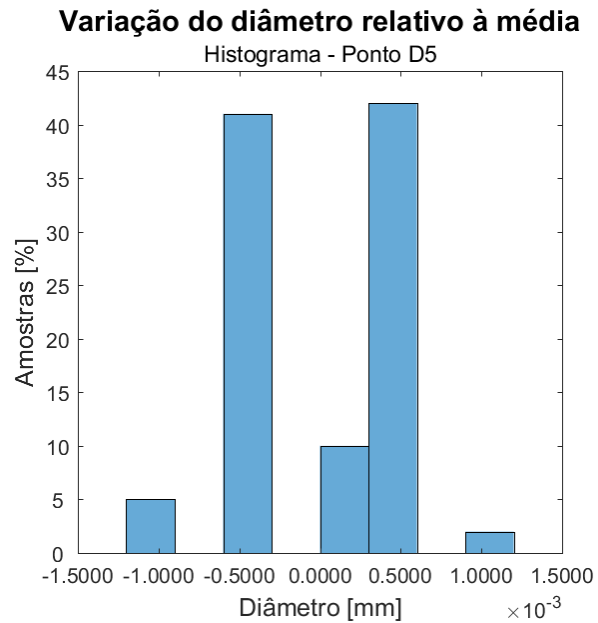
Fonte: o autor

Figura 76: Diâmetro 5: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)



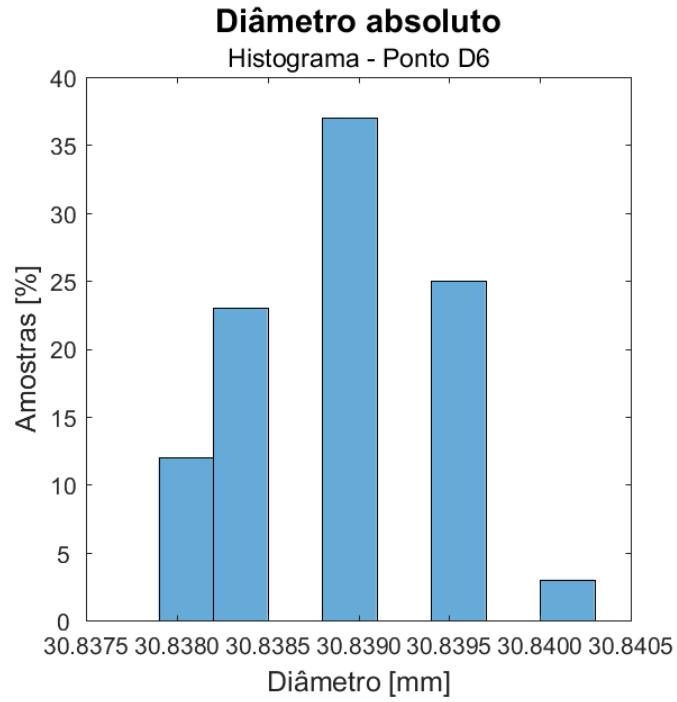
Fonte: o autor

Figura 77: Diâmetro 5: variação do diâmetro relativo à média (histograma)



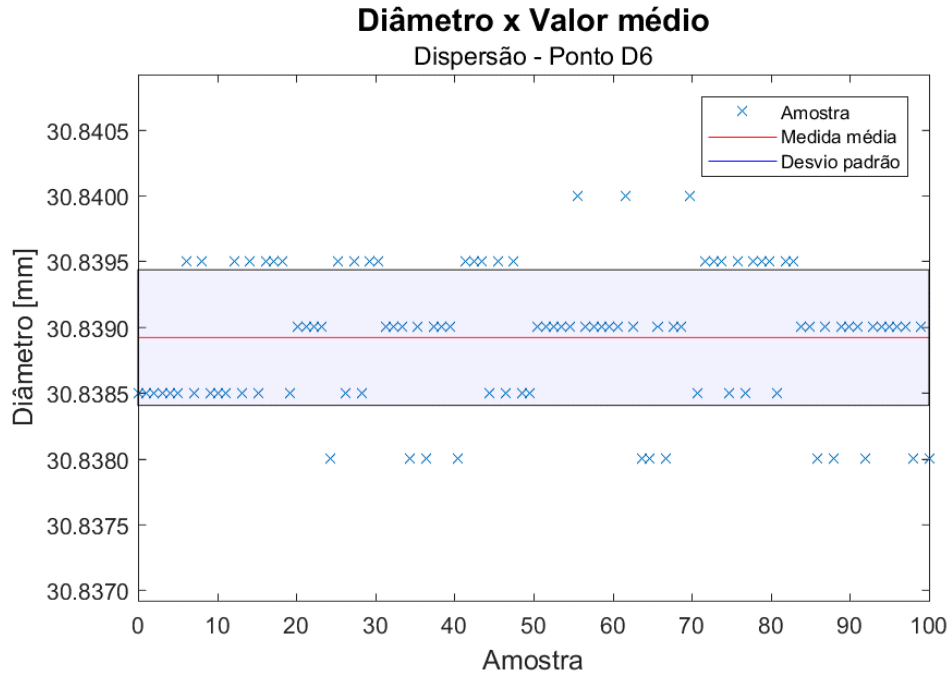
Fonte: o autor

Figura 78: Diâmetro 6: diâmetro absoluto-histograma



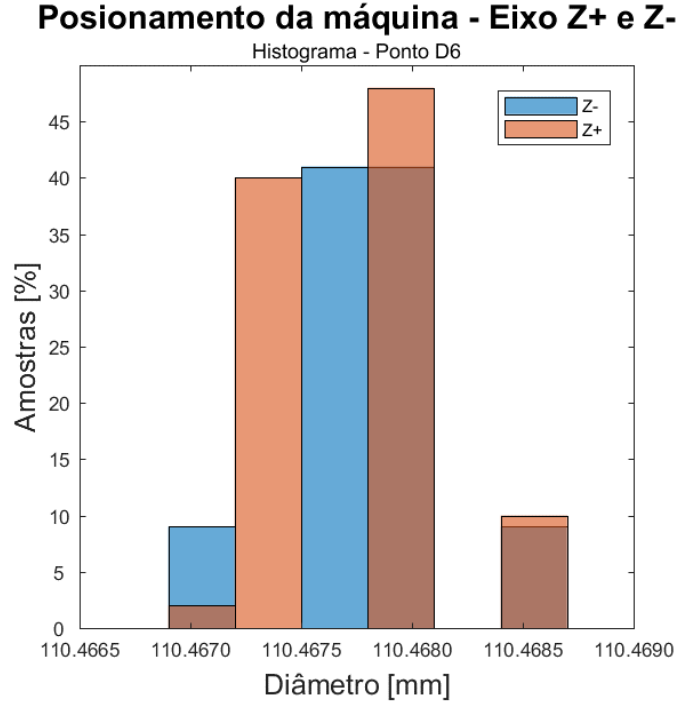
Fonte: o autor

Figura 79: Diâmetro 6: valor médio (dispersão)



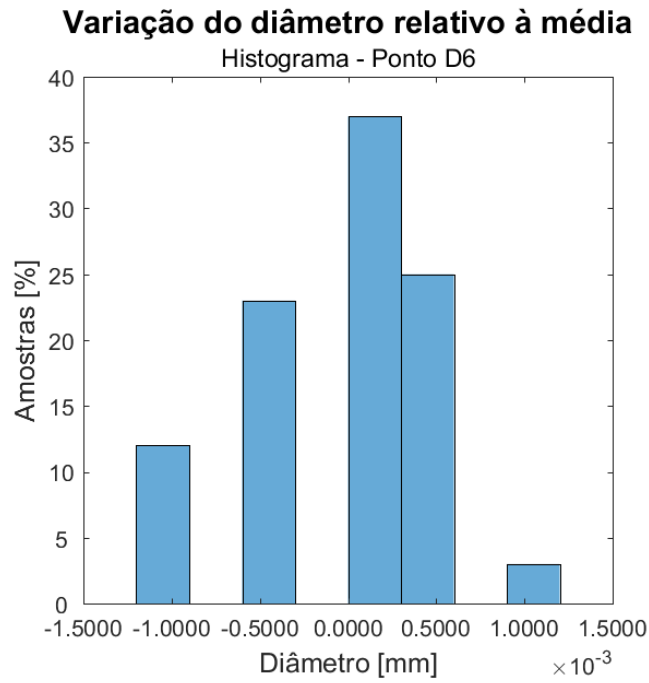
Fonte: o autor

Figura 80: Diâmetro 6: posicionamento da máquina - Eixo Z+ e Z- (histograma)



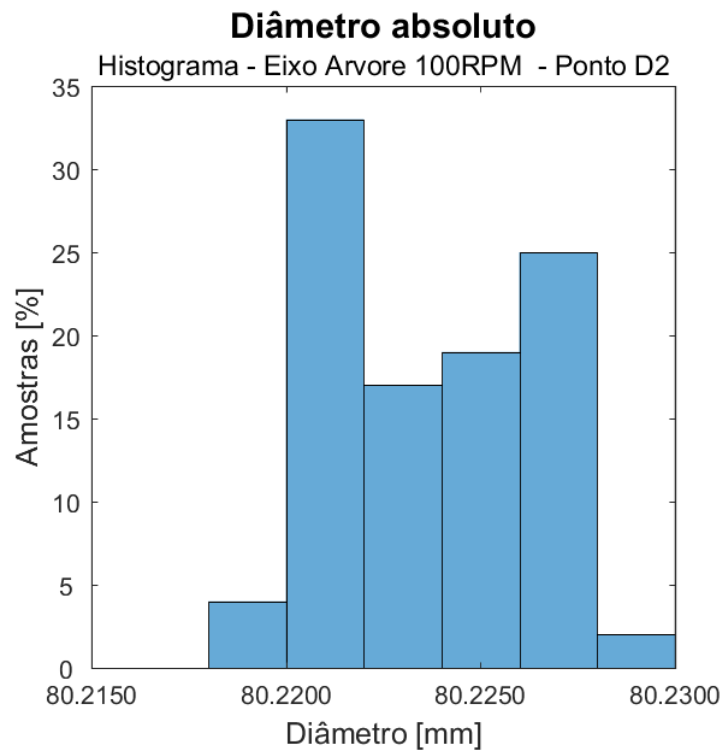
Fonte: o autor

Figura 81: Diâmetro 6: variação do diâmetro relativo à média (histograma)



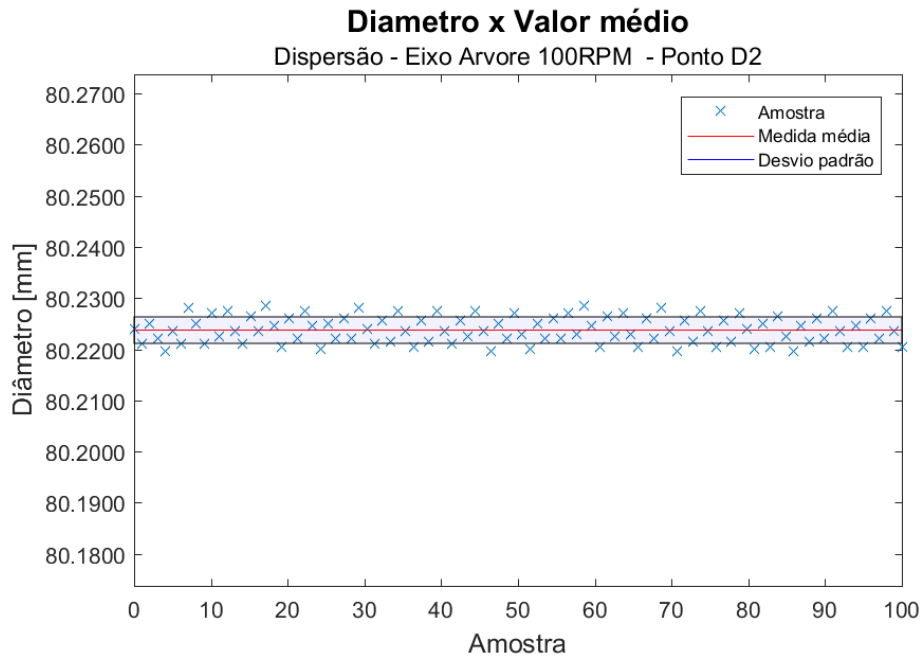
Fonte: o autor

Figura 82: Diâmetro 2: diâmetro absoluto (histograma) eixo árvore 100 RPM



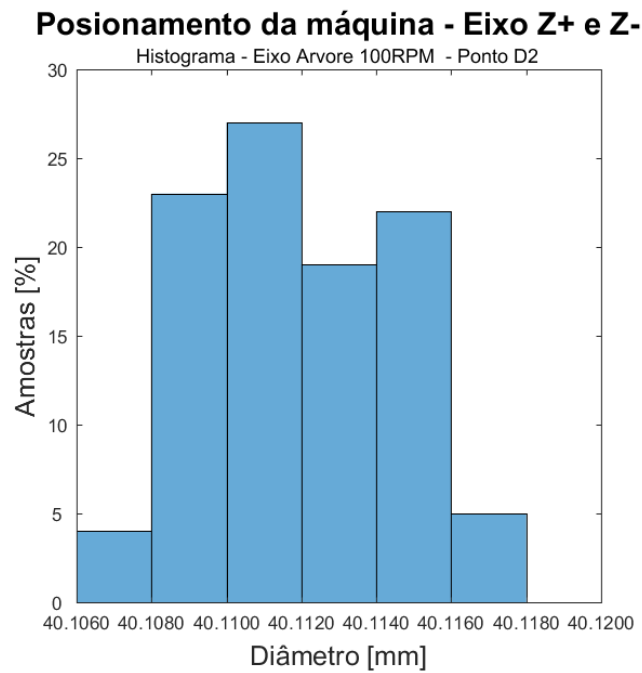
Fonte: o autor

Figura 83: Diâmetro 2: diâmetro x valor médio (dispersão) eixo árvore 100 RPM



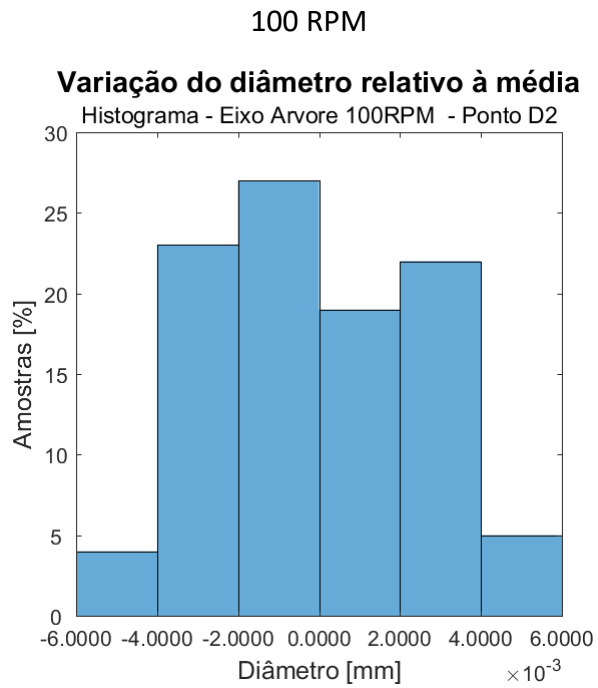
Fonte: o autor

Figura 84: Diâmetro 2: posicionamento da máquina - eixo Z+ e Z- (histograma) eixo árvore 100 RPM



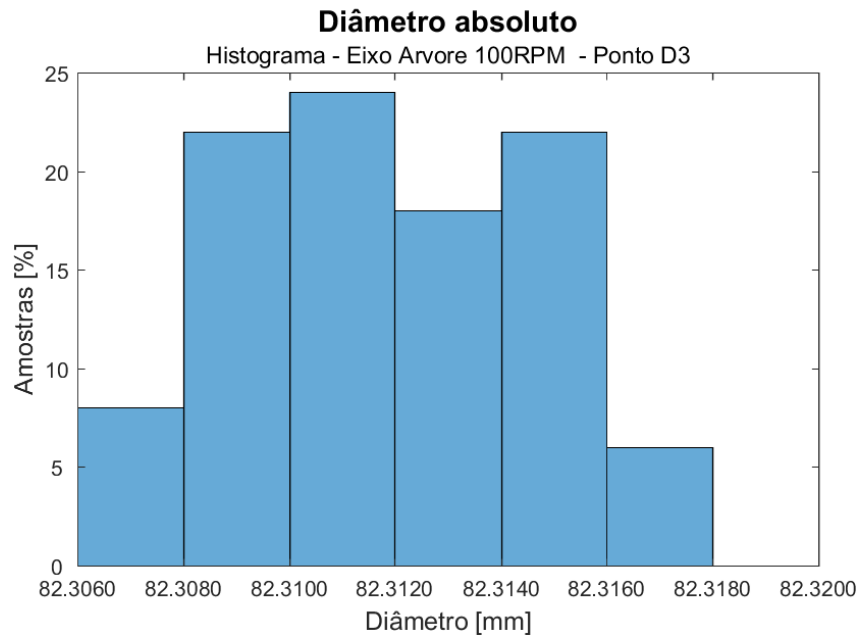
Fonte: o autor

Figura 85: Diâmetro 2: variação do diâmetro relativo à média (histograma) eixo árvore



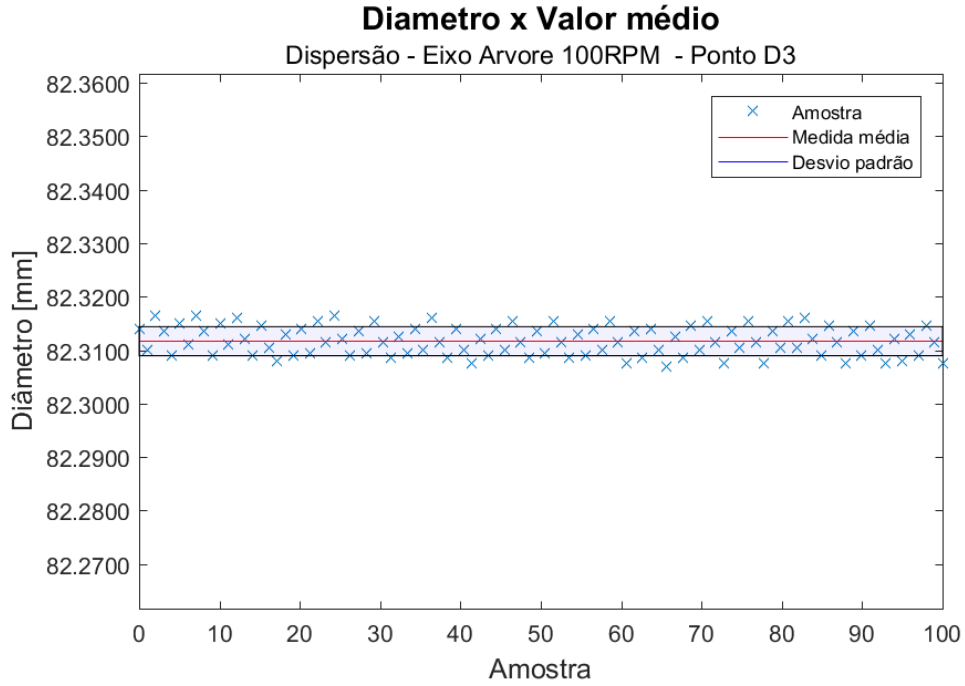
Fonte: o autor

Figura 86: Diâmetro 3: diâmetro absoluto (histograma) eixo árvore 100 RPM



Fonte: o autor

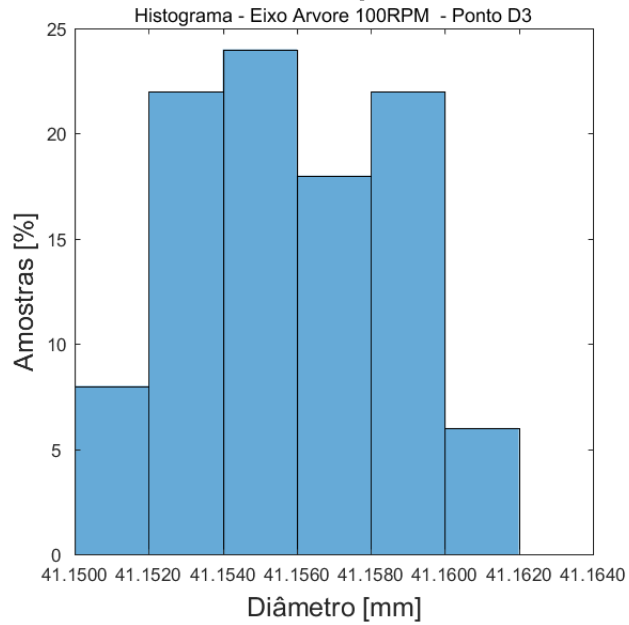
Figura 87: Diâmetro 3: diâmetro x valor médio (dispersão) eixo árvore 100 RPM



Fonte: o autor

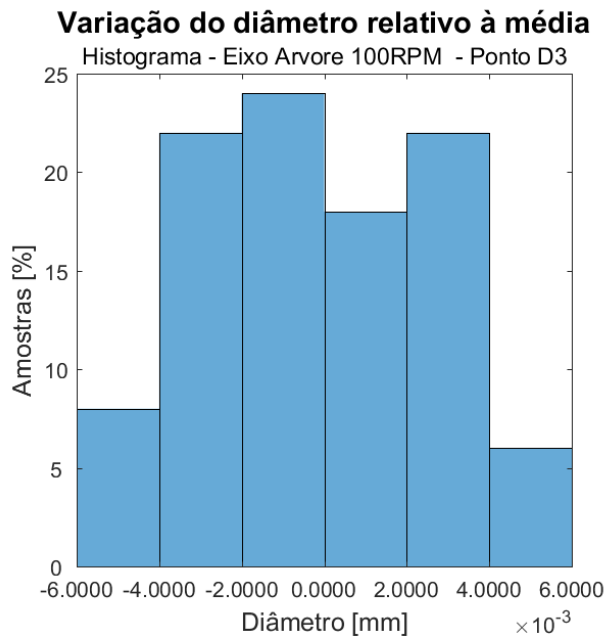
Figura 88: Diâmetro 3: posicionamento da máquina - eixo Z+ e Z- (histograma) eixo árvore 100 RPM

Posionamento da máquina - Eixo Z+ e Z-



Fonte: o autor

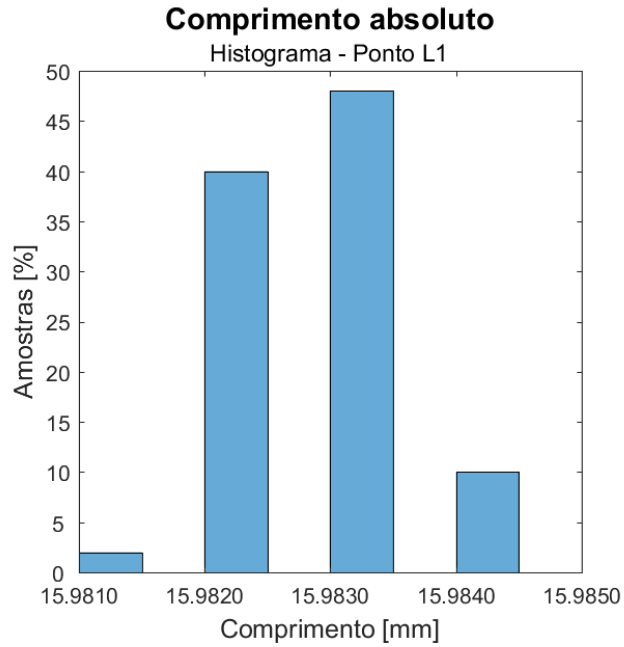
Figura 89: Diâmetro 3: variação do diâmetro relativo à média (histograma) eixo árvore
100 RPM



Fonte: o autor

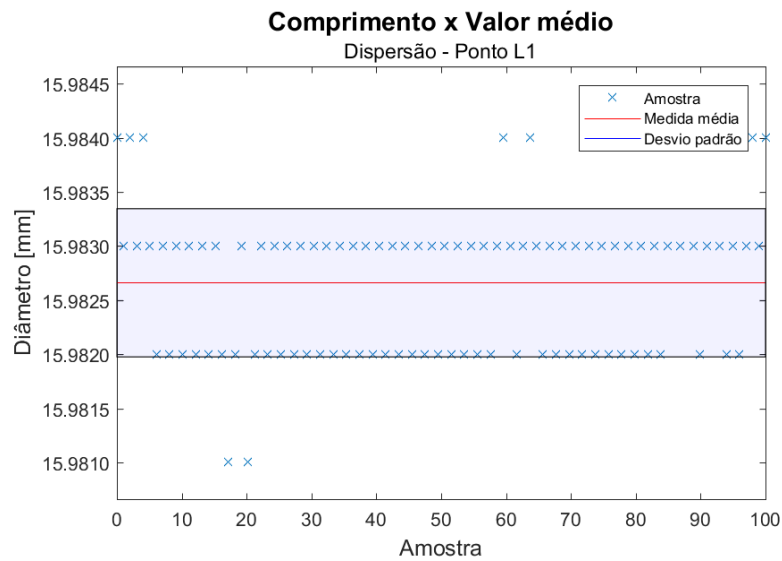
Anexo 4 – Dados obtidos pelo *toolsetter* na medição dos comprimentos da peça

Figura 90: Ponto L1: comprimento absoluto (histograma)



Fonte: o autor

Figura 91: Ponto L1: Comprimento x valor médio (dispersão)



Fonte: o autor

Figura 92: Ponto L1: variação do comprimento relativo à média (histograma)

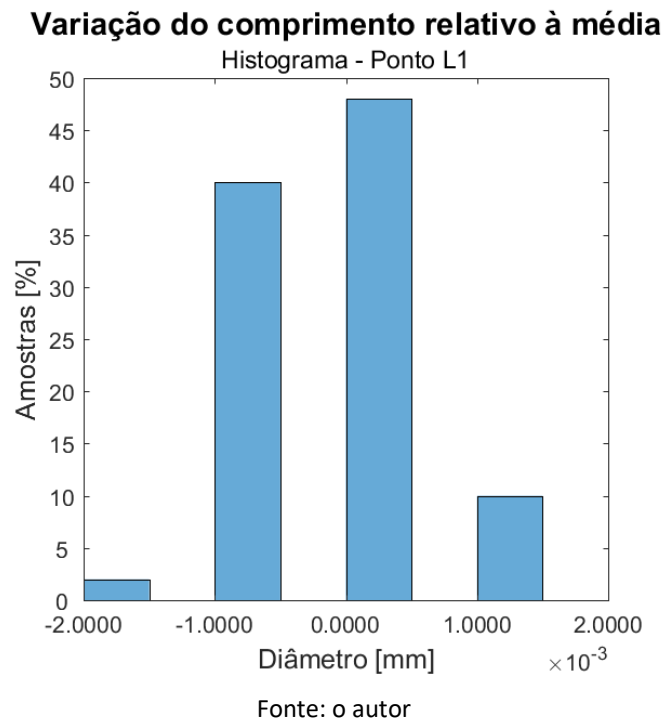


Figura 93: Ponto L2: comprimento absoluto (histograma)

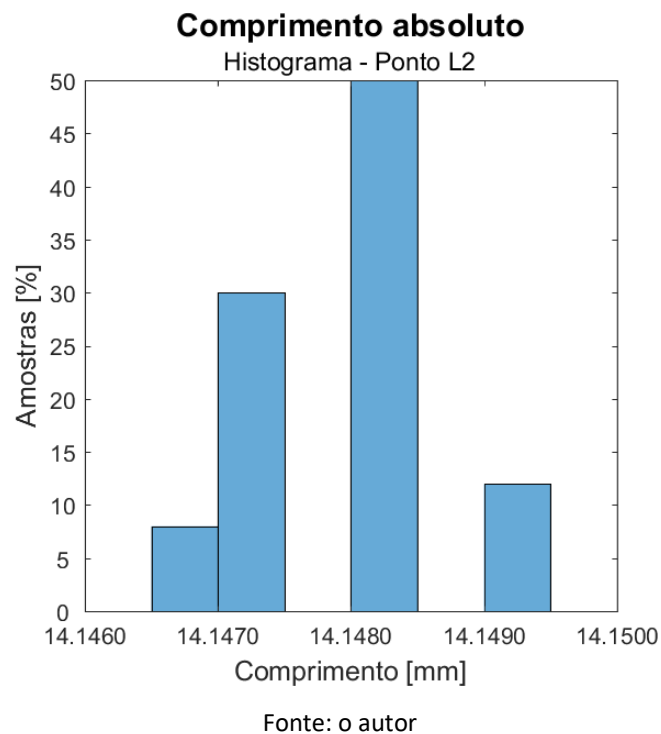
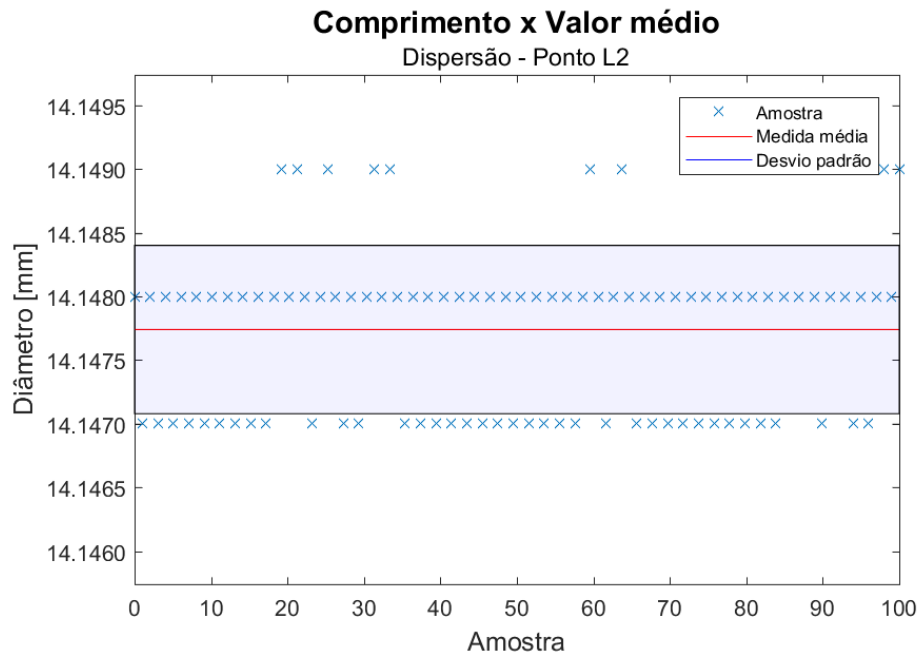
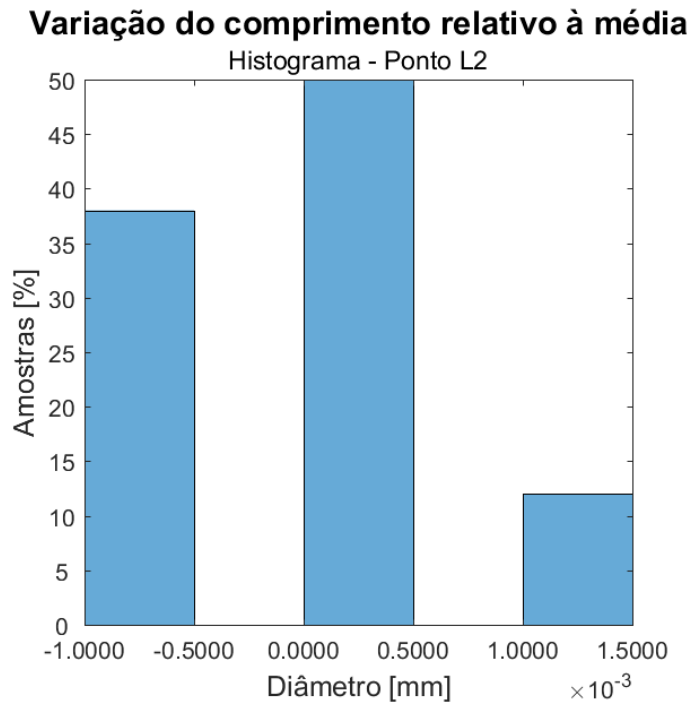


Figura 94: Ponto L2: Comprimento x valor médio (dispersão)



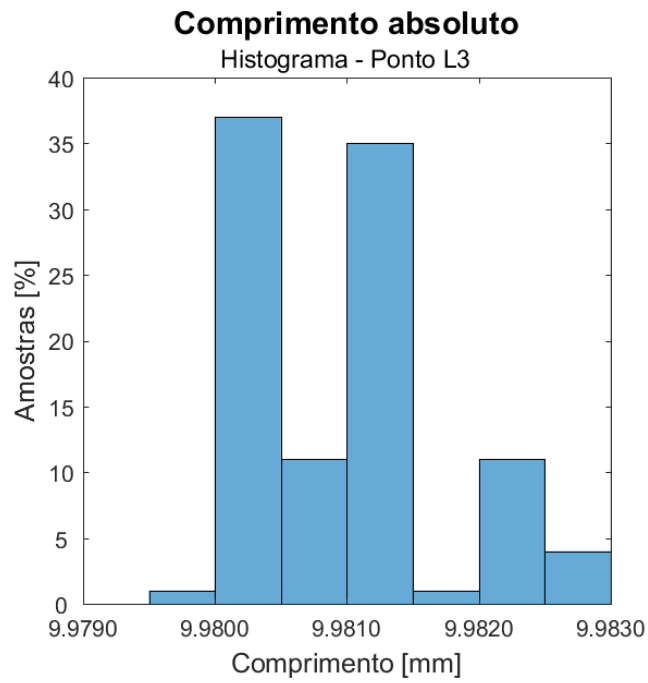
Fonte: o autor

Figura 95: Ponto L2: variação do comprimento relativo à média (histograma)



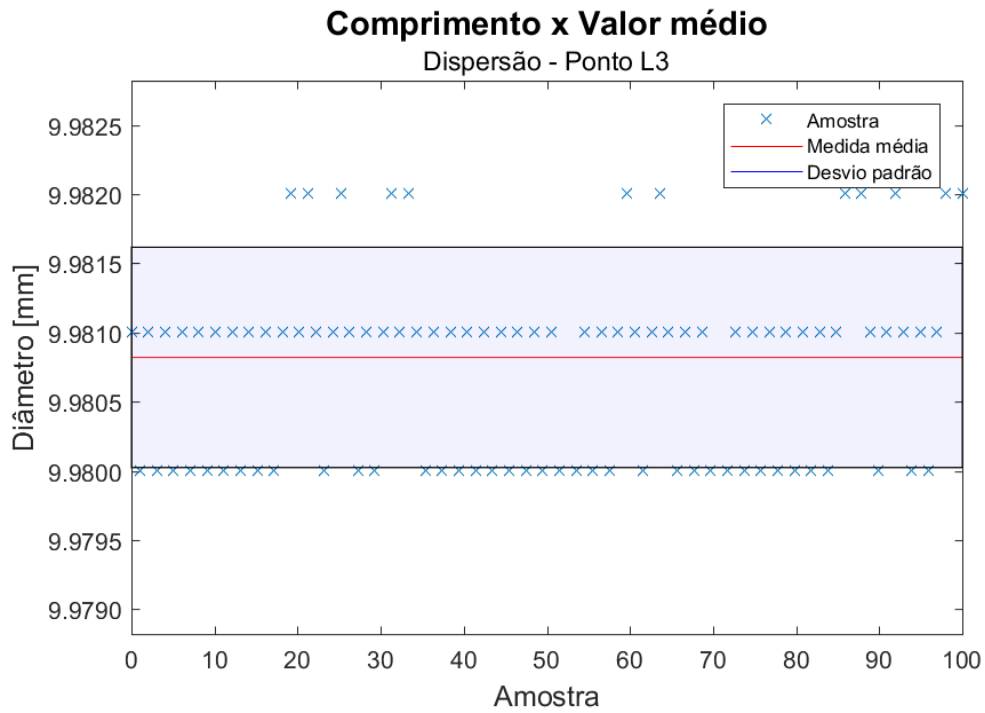
Fonte: o autor

Figura 96: Ponto L3: comprimento absoluto (histograma)



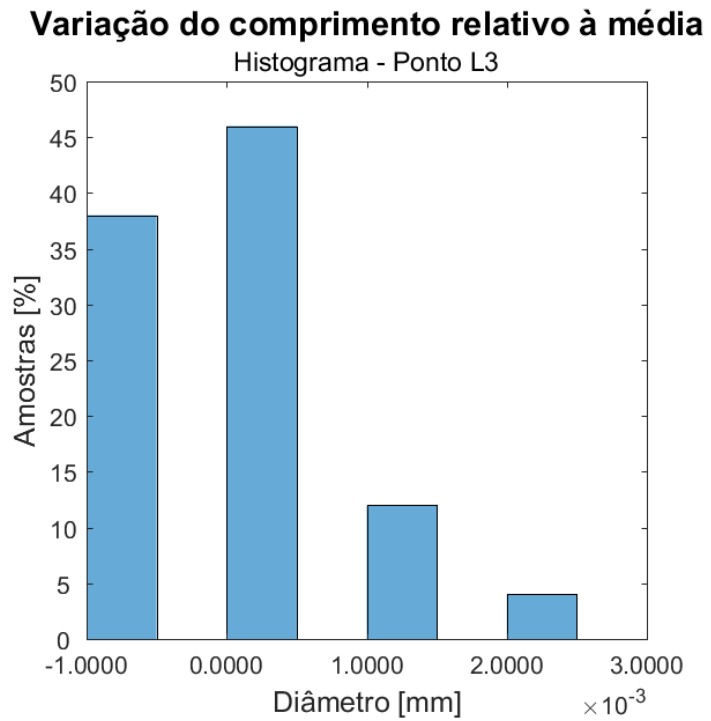
Fonte: o autor

Figura 97: Ponto L3: Comprimento x valor médio (dispersão)



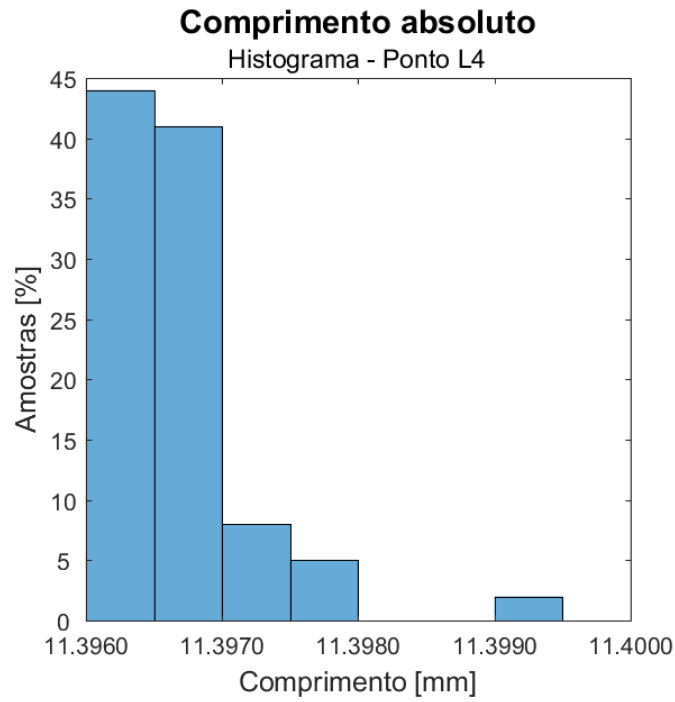
Fonte: o autor

Figura 98: Ponto L3: variação do comprimento relativo à média (histograma)



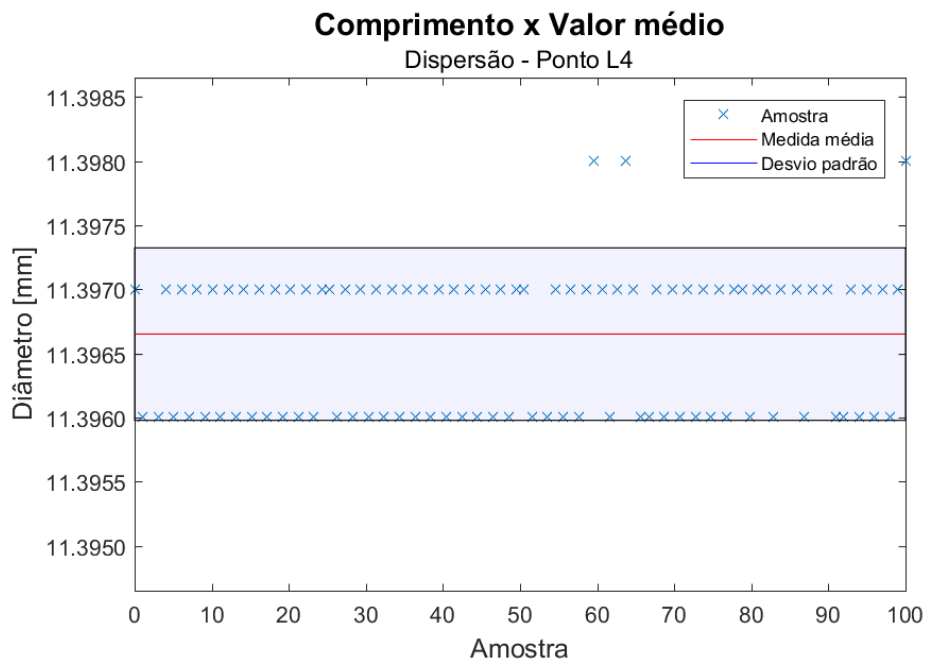
Fonte: o autor

Figura 99: Ponto L4: comprimento absoluto (histograma)



Fonte: o autor

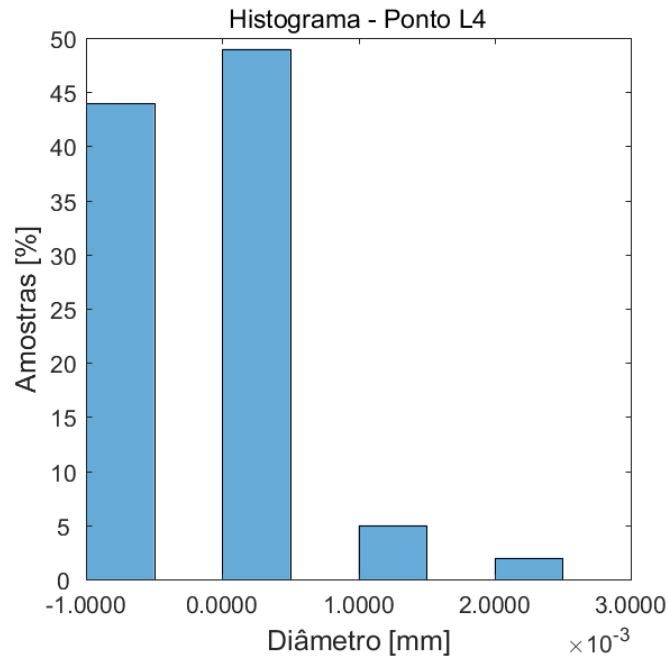
Figura 100: Ponto L4: Comprimento x valor médio (dispersão)



Fonte: o autor

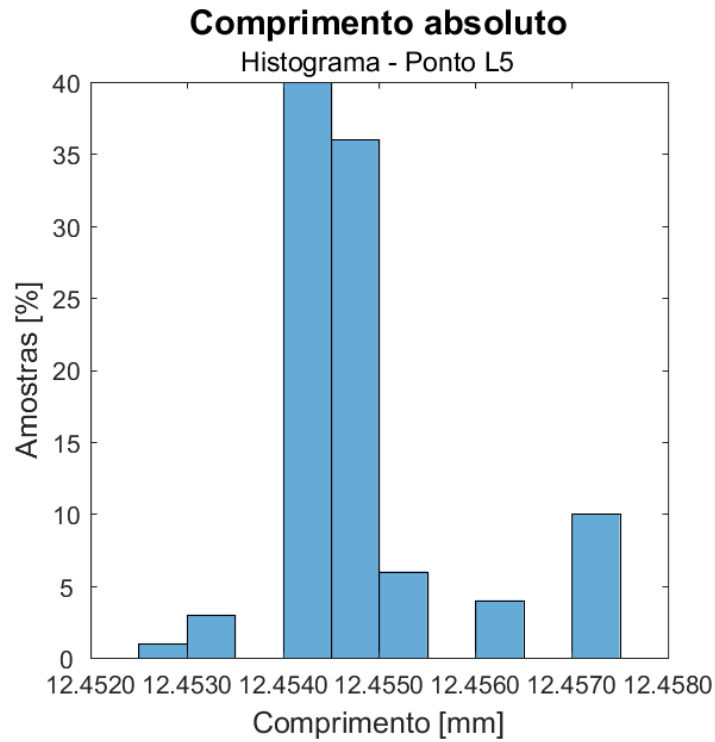
Figura 101: Ponto L4: variação do comprimento relativo à média (histograma)

Varição do comprimento relativo à média



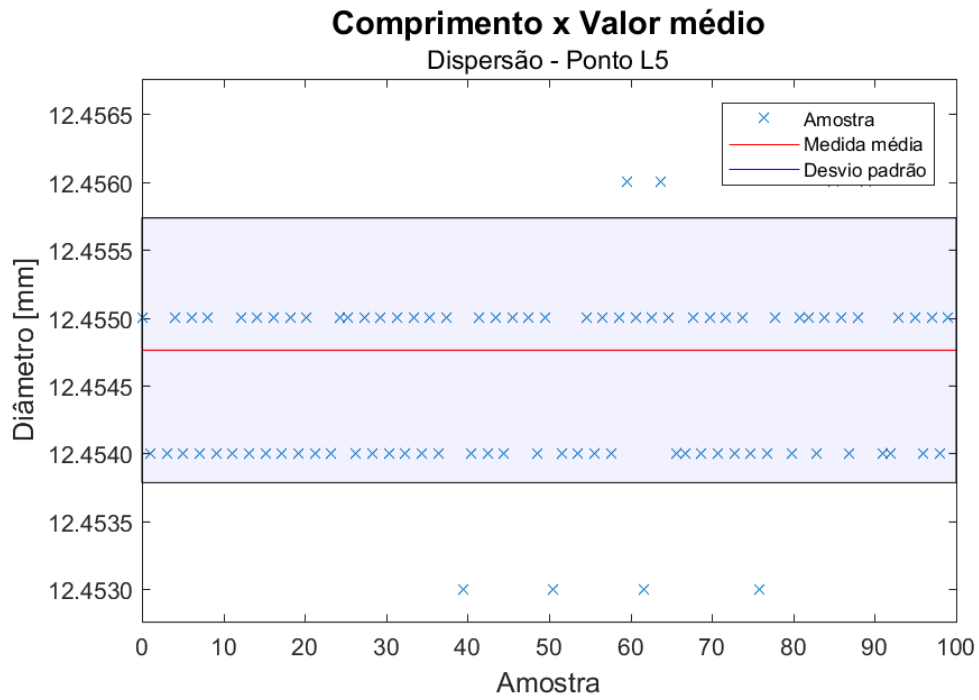
Fonte: o autor

Figura 102: Ponto L5: comprimento absoluto (histograma)



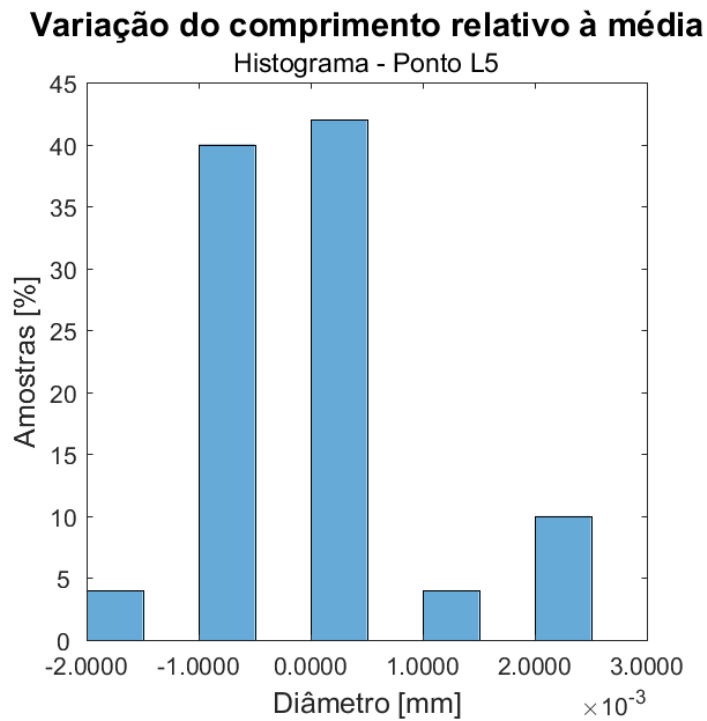
Fonte: o autor

Figura 103: Ponto L5: Comprimento x valor médio (dispersão)



Fonte: o autor

Figura 104: Ponto L5: variação do comprimento relativo à média (histograma)



Fonte: o autor

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARDUZZI, Jaqueline; VIEIRA JR, Milton.; BAPTISTA, Elesandro. A.; CORRER, Ivan. Perception of the Benefits of SMED Under the Point of View of Machining Services Providers. In **Dirección y Organización**, v. 62, p. 5-15, Jul. 2017.

BARDUZZI, Jaqueline. **Avaliação do uso de troca rápida de ferramentas em fornecedores de usinagem do estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Nove de Julho. São Paulo: 2016.

BATTISTI, Edinaura; NICOLETTO, Maiara; CORRER, Ivan; VIEIRA Jr., Milton; PEREIRA, Aline. C. L. da R. Estudo dos tempos de disponibilidade de máquinas ferramenta CNC e seus impactos financeiros, relacionados a operação de pré-ajustagem de ferramentas em empresas de usinagem. In **XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção - Contribuições da Engenharia de Produção para Melhores Práticas de Gestão e Modernização do Brasil**. João Pessoa: 03 a 06 de outubro de 2016. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_226_323_29809.pdf>> Acesso em 15/10/2021.

BEARD, Tom. **Setting Tools Makes Small Shop Sense**. 1998. Disponível em <<<https://www.mmsonline.com/articles/setting-tools-makes-small-shop-sense>>>. Acesso em 21/01/2022.

BERGAMIN, W. Roberto; APOLINÁRIO, Rafael de L.; CORRER, Ivan; VIEIRA JR., Milton; ZAGO, André M. Estudo dos ganhos de produtividade e redução de custos com o uso de sistemas de presetting automático a laser em máquinas CNC. In **XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção - Contribuições da Engenharia de Produção para Melhores Práticas de Gestão e Modernização do Brasil**. João Pessoa: 03 a 06 de outubro de 2016. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_226_323_29203.pdf>> Acesso em 15/10/2021.

CNI. **Competitividade Brasil 2019/2020**. Brasília: CNI, 2020. Disponível em: <<https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/ca/fc/cafc2274-9785-40db-934d-d1248a64dd94/competitividadebrasil_2019-2020_v1.pdf>> Acesso em 15/10/2021.

CORRÊA, Rafael A. **Tendências tecnológicas para máquinas ferramenta de alta velocidade - HSM/HSC**. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 2013

CORRER, Ivan; SIMÕES, Gabriela M.; VIEIRA JR., Milton; SIMON, Alexandre T. A pré-ajustagem de ferramentas e seu impacto na produção. In **Revista Ferramental**, janeiro/fevereiro 2018, pp. 18 a 25. Disponível em <<<https://issuu.com/revistaferramental8/docs/75>>>. Acesso em 26/10/2021.

CORRER, Ivan; VIEIRA JR., Milton; BERGAMIN, Wilson R.; APOLINÁRIO, Rafael de L.; BATTISTI, Edinaura. Ganho de produtividade e redução de custo em máquinas CNC a partir do uso de presetting a laser. In **Revista Ferramental** (meio eletrônico), 2018. Disponível em <<<https://www.revistaferramental.com.br/artigo/ganho-de-produtividade-e-reducao-de-custo-em-maquinas-cnc-partir-uso-presetting-a-laser/>>>. Acesso em 26/10/2021.

CORRER, Ivan. **Projeto e construção de um sistema de pré-ajustagem de ferramentas interno a laser para uso em máquinas-ferramenta CNC**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Bárbara d'Oeste: 2006.

COSTA, Francisco S. da; CORRER, Ivan; VIEIRA JR., Milton; BAPTISTA, Elesandro A. Produtividade e redução de perdas com o uso de toolsetter a laser. In **Revista Máquinas e Metais**, p. 56 a 61. Ed. Aranda, julho 2015. Disponível em <<https://www.researchgate.net/publication/309205351_Produtividade_e_reducao_de_perdas_com_uso_de_toolsetter_a_laser>> Acesso em 19/10/2021.

FERRAZ JR, Fábio. **Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e supervisão para o processo de torneamento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: 2002. Disponível em <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-18012005-191054/publico/dissertacao_fabioferrazjr.pdf>>. Acesso em 27/11/2021

GEOTECNO. **Projeto e construção de um sistema automático interno e a laser, de pré-ajustagem de ferramentas para uso em máquinas-ferramenta CNC**. Relatório de atividades da primeira fase de execução de Projeto PIPE/FAPESP. Santa Bárbara d'Oeste: março de 2008.

KOENIG, Bill. *Presettters provide head start on industry 4.0*. In **Manufacturing Engineering Magazine**, July 21, 2017. Disponível em: <<<https://production.eastconline.com/event/eastec-news/presettters-provide-head-start-on-industry-4.0/>>>. Acesso em 27/11/2021.

LIU, Chao; XU, Xun. *Cyber-physical machine tool: the era of machine tool 4.0*. In **Procedia CIRP**, 63, 2017, pp. 70-75. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.078>>> Acesso em 15/10/2021.

LOTT, Philipp; SCHLEIFENBAUMA, Henrich; MEINERSA, Wilhelm; WISSENBACHA, Konrad; HINKEB, Christian; BÜLTMANNC, Jan. *Design of an optical system for the in situ process monitoring of selective laser melting (SLM)*. In **Physics Procedia**, 12, pp. 683–690. 2011. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.085>>>. Acesso em 15/10/2021.

MOREY, Bruce. **Tool Presetters Take On Industry 4.0. Manufacturing Engineering**. 2019. Disponível em << <https://www.sme.org/technologies/articles/2019/june/tool-presetters-take-on-industry-4.0/>>>. Acesso em 15/10/2021.

PEDROSA, Adriano L.; MORAES, Nadime M.; RODRIGUEZ Jorge L. M.; NASCIMENTO, Manoel Henrique Reis do; FERNANDES FILHO, Silas F. Aplicação da ferramenta computacional Matlab para o problema do despacho econômico de energia elétrica usando algoritmo genético: estudo de caso. In **Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications**, Vol. 3, nº 10, Jun 2017, pp 179-184. Disponível em <<<https://itegam-jetia.org/journal/index.php/jetia/article/download/113/199/>>>. Acesso em 28/11/2021.

RAJKUMAR Ragunathan; LEE, Insup; SHA, Lui; STANKOVIC, John. **Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution**. 2010. Disponível em << https://www.researchgate.net/publication/221062579_441_Cyber-Physical_Systems_The_Next_Computing_Revolution>>. Acesso em 17/01/2022.

SIMON, Alexandre T.; MAESTRELLI, Nelson C.; AGOSTINHO, Oswaldo L. Influência das técnicas de pré-ajustagem de ferramentas na utilização de tecnologia CNC no Brasil. In **XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Curitiba: 23 a 25 de outubro de 2002. Disponível em << http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2002_TR16_0622.pdf>>. Acesso em 15/10/2021.

SLACK, Niger; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2009. 3ª ed.

SOUSA, André R. de. **Padrões corporificados e a tecnologia de medição por coordenadas inovando a qualificação geométrica de centros de usinagem**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: 2000. Disponível em << <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/79326>>>. Acesso em 28/11/2021.

VIEIRA JR., Milton. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção**. Material didático do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Piracicaba: 2019

VIEIRA JR., Milton; BAPTISTA, Elesandro A.; ARAKI, Luciana; SMITH, Scott; SCMITZ, Tony. The role of tool presetting in milling stability uncertainty. In *Procedia Manufacturing*, Volume 26, 2018, Pages 164-172. Disponível em

<<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918306930>>>. Acesso em 28/11/2021.

VIEIRA JR., Milton; CORRER, Ivan; SIMON, Alexandre T.; MARTIN, Ronaldo de O.; SANTOS, Taiana. A. F. dos. Estudo do nível de utilização de sistemas de pré-ajustagem de ferramentas de corte em máquinas CNC. In **Congresso Usinagem**. São Paulo: 2006. Disponível em << <https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2007/files/161041349.pdf>>>, Acesso em 20/10/2021.

XU, Xun. Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing. In **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 92, pp. 1-8. London (England): 2017. Disponível em <<<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0300-7>>>. Acesso em 29/11/2021.

ZOOLER, Christoph. **From Presetting to Tool Management**. 1998. Disponível em <<<https://www.ctemag.com/news/articles/presetting-tool-management>>>. Acesso em 21/01/2022.