



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciências e Engenharia – Câmpus de Itapeva

LUIZ MOTTA CRISTO

Calibração indireta de erros geométricos em torneamento cilíndrico associada a técnicas de ferramentas de qualidade: uma contribuição para a qualidade de fabricação

Itapeva - SP
2023

LUIZ MOTTA CRISTO

Calibração indireta de erros geométricos em torneamento cilíndrico associada a técnicas de ferramentas de qualidade: uma contribuição para a qualidade de fabricação

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Conselho de Curso de Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Câmpus de Itapeva, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Galvão de Morais

Itapeva - SP
2023

C933c Cristo, Luiz Motta
Calibração indireta de erros geométricos em torneamento cilíndrico associada a técnicas de ferramentas da qualidade : uma contribuição para a qualidade de fabricação / Luiz Motta Cristo. -- Itapeva, 2023
89 f.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva
Orientador: César Augusto Galvão de Moraes

1. Erros geométricos. 2. Torno horizontal. 3. Ferramentas da qualidade. 4. Calibração indireta. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciências e Engenharia - Câmpus de Itapeva

LUIZ MOTTA CRISTO

**CALIBRAÇÃO INDIRETA DE ERROS GEOMÉTRICOS EM
TORNEAMENTO CILÍNDRICO ASSOCIADA A TÉCNICAS DE
FERRAMENTAS DE QUALIDADE:
uma contribuição para a qualidade de fabricação**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Cesar Augusto Galvão de Moraes
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

2º Examinador: Prof.^a Dr.^a Marília da Silva Bertolini
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

3º Examinador: Prof.^a Dr.^a Gláucia Aparecida Prates
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 21/06/2023.

Aos meus pais e a minha namorada Milene
pelo carinho e apoio incansável.

AGRADECIMENTOS

Ao professor César Augusto Galvão de Moraes, pela orientação, paciência, apoio e conhecimentos transmitidos para a conclusão deste trabalho.

À minha namorada por todo o carinho, força, companheirismo, incentivo, apoio, amizade e amor.

Aos meus amigos, Gustavo, José e Cauê, pelo apoio e amizade.

Aos meus pais pelo amor, apoio, compreensão e incentivo de vocês.

“I’m still standing after all this time”
(Elton John).

RESUMO

Os processos convencionais de usinagem são um dos principais métodos para fabricação de peças em diversos setores da indústria. No entanto, como todo processo, existem variações no processo de fabricação oriundas de diversas fontes. Entre elas, erros geométricos podem representar entre 40% e 70% de todos os erros de uma máquina ferramenta. Sendo assim, é preciso controlar esse tipo de erro para que as tolerâncias estabelecidas para a fabricação de uma peça não sejam ultrapassadas. Diante do exposto, esse trabalho tem como objetivo investigar o erro geométrico de posicionamento na direção transversal ao longo das guias do carro longitudinal da máquina ferramenta estudada através da obtenção de dados quantitativos a fim de mensurar o desvio e, com isso, utilizar as ferramentas da qualidade 5S, Fluxograma, Folha de Verificação, Histograma, Análise de Pareto e Diagrama de Ishikawa para padronizar, identificar fatores influenciadores e observar a distribuição dos erros e, com isso, identificar as regiões com os maiores erros e propor métodos de compensação para o erro encontrado. Para isto, foi utilizado como objeto de estudo um torno horizontal mecânico e, como equipamentos para obtenção dos dados, uma coluna de medição, um apalpador indutivo, um suporte magnético com braços hidráulicos articulados e um artefato de aço 1045 com tratamento térmico de oxidação negra e faces de medição retificadas. Com esses equipamentos, foram realizadas as medições na direção longitudinal do barramento, em três posições transversais diferentes, a fim de simular condições diferentes de usinagem de peças com comprimentos e diâmetros. Com os dados das medições, é necessário eliminar o desalinhamento do artefato com faces retificadas para obter os valores do erro de posicionamento na direção transversal das guias do carro longitudinal. Uma vez conhecido esse erro, as ferramentas da qualidade são aplicadas e, com as compensações propostas a partir de seus resultados, identificamos os melhores resultados para cada aplicação. Com o estudo feito, foi identificado que o método que apresentou os melhores resultados de compensação foi a partir dos dados obtidos através do Histograma. Além disso, foi determinado a importância das ferramentas da qualidade para este trabalho, uma vez que, através delas foi possível padronizar e organizar o fluxo de montagem dos equipamentos de medição para evitar variações, pôde ser identificado a incidência dos erros dentro de determinados intervalos e, a partir disso, conhecer as medidas longitudinais com os maiores erros transversais e propor compensações baseado nos valores encontrados. Por fim, também foi identificado os fatores externos que podem ter influenciado na coleta de dados.

Palavras-chave: erros geométricos; torno horizontal; ferramentas da qualidade; calibração indireta.

ABSTRACT

Conventional machining processes are one of the main methods for manufacturing parts in many sectors of industry. However, like any process, there are variations in the manufacturing process from various sources. Among them, geometric errors can represent between 40% and 70% of all errors in a machine tool. Thus, it is necessary to control this type of error so that the tolerances established for the manufacture of a part are not exceeded. Given the above, this work aims to investigate the geometric error of positioning in the transverse direction along the guides of the longitudinal carriage of the machine tool studied by obtaining quantitative data in order to measure the deviation and thus use the quality tools 5S, Flowchart, Check Sheet, Histogram, Pareto Analysis and Ishikawa Diagram to standardize, identify influencing factors and observe the distribution of errors and thus identify the regions with the largest errors and propose methods of compensation for the error found. For this, it was used as study object a mechanical horizontal lathe and, as equipments to obtain the data, a measuring column, a inductive probe, one magnetic support with articulated hydraulic arms and a 1045 steel artifact with black oxidation and rectified measuring faces. With this equipment, measurements were taken in the longitudinal direction of the busbar, in three different transverse positions, in order to simulate different machining conditions of parts with different lengths and diameters. With the data from the measurements, it is necessary to eliminate the misalignment of the artifact with ground faces to obtain the values of the positioning error in the transverse direction of the longitudinal slide guides. Once this error is known, the quality tools are applied and, with the compensations proposed from their results, we identify the best results for each application. With the study done, it was identified that the method that presented the best compensation results was from the data obtained through the Histogram. Moreover, it was determined the importance of the quality tools for this work, since through them it was possible to standardize and organize the assembly flow of the measuring equipment to avoid variations, it was possible to identify the incidence of errors within certain intervals and, from this, to know the longitudinal measurements with the largest transverse errors and propose compensations based on the values found. Finally, it was also identified the external factors that may have influenced data collection.

Keywords: geometric errors; horizontal lathe; quality tools; indirect calibration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Configurações da máquina ferramenta de 5 eixos tipo RTTR | 17 |
| Figura 2 – Localização e funções dos sensores | 20 |
| Figura 3 – Distribuição dos pontos de medição | 20 |
| Figura 4 – Erros térmicos nos quinze pontos de medição | 21 |
| Figura 5 – Exemplo de folha de verificação | 28 |
| Figura 6 – Formatos comuns de histogramas | 30 |
| Figura 7 – Formatos comuns de histogramas | 31 |
| Figura 8 – Exemplo de Diagrama de Ishikawa | 33 |
| Figura 9 – Organograma para classificação de itens de acordo com sua necessidade | 35 |
| Figura 10 – Torno horizontal mecânico Veker TVK-2060ECO | 37 |
| Figura 11 – Sentidos de Ida e Volta adotados | 38 |
| Figura 12 – Equipamentos utilizados | 40 |
| Figura 13 – Sistemas coordenado adotado para o torno horizontal mecânico Veker TVK-2060ECO | 41 |
| Figura 14 – Coordenadas transversais (x) utilizadas | 41 |
| Figura 15 – Fotografia da configuração adotada para os instrumentos de medição no torno horizontal | 42 |
| Figura 16 – Software MarCom Professional | 43 |
| Figura 17 – Perfil das medições para a posição transversal T1 (x = 0,00 mm) | 46 |
| Figura 18 – Perfil das medições para a posição transversal T2 (x = -150,00 mm) | 47 |
| Figura 19 – Perfil das medições para a posição transversal T3 (x = -300,00 mm) | 47 |
| Figura 20 – Remoção do desalinhamento para o carro transversal em T1 (x = 0,00 mm) | 48 |
| Figura 21 – Remoção do desalinhamento para o carro transversal em T2 (x = -150,00 mm) | 49 |
| Figura 22 – Remoção do desalinhamento para o carro transversal em T3 (x = -300,00 mm) | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 23 – Perfil do artefato de aço 1045 com oxidação negra e faces de medição retificadas | 50 |
| Figura 24 – Erro da guia do carro principal posicionado em T1 ($x = 0,00$ mm) | 51 |
| Figura 25 – Erro da guia do carro principal posicionado em T2 ($x = -150,00$ mm) | 52 |
| Figura 26 – Erro da guia do carro principal posicionado em T3 ($x = -300,00$ mm) | 52 |
| Figura 27 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado visualmente para posição T1 ($x = 0,00$ mm) | 54 |
| Figura 28 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado visualmente para posição T2 ($x = -150,00$ mm) | 54 |
| Figura 29 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado visualmente para posição T3 ($x = -300,00$ mm) | 55 |
| Figura 30 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado pelas médias da ida e volta para posição T1 ($x = 0,00$ mm) | 56 |
| Figura 31 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado pelas médias da ida e volta para posição T2 ($x = -150,00$ mm)... | 56 |
| Figura 32 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado pelas médias da ida e volta para posição T3 ($x = -300,00$) | 57 |
| Figura 33 – Equipamentos e peças a serem montados organizados sob a mesa | 58 |
| Figura 34 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados folha de verificação T1 ($x = 0,00$ mm) | 59 |
| Figura 35 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados folha de verificação T2 ($x = -150,00$ mm) | 60 |
| Figura 36 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados folha de verificação T3 ($x = -300,00$ mm) | 60 |
| Figura 37 – Histogramas para medições realizadas em posições diferentes do carro transversal | 62 |
| Figura 38 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do histograma para a posição T1 ($x = 0,00$ mm) | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 39 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do histograma para a posição T2 (x = -150,00 mm) | 64 |
| Figura 40 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do histograma para a posição T3 (x = -300,00 mm) | 64 |
| Figura 41 – Histograma para o conjunto de valores de todas as medições ... | 65 |
| Figura 42 – Diagrama de Ishikawa das divergências nos erros medidos nas guias do carro longitudinal | 66 |
| Figura 43 – Local de folga na fixação entre o braço hidráulico e a base magnética | 67 |
| Figura 44 – Manivela de regulagem transversal do torno mecânico horizontal | 68 |
| Figura 45 – Diagrama de Pareto para T1 (x = 0,00 mm) | 70 |
| Figura 46 – Diagrama de Pareto para T2 (x = -150,00 mm) | 70 |
| Figura 47 – Diagrama de Pareto para T3 (x = -300,00 mm) | 71 |
| Figura 48 – Diagrama de Pareto para T1, T2 e T3 | 71 |
| Figura 49 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do diagrama de Pareto para posição T1 (x = 0,00 mm) | 72 |
| Figura 50 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do diagrama de Pareto para posição T2 (x = -150,00 mm) | 73 |
| Figura 51 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do diagrama de Pareto para posição T3 (x = -300,00 mm) | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Nomenclatura das posições longitudinais | 39 |
| Tabela 2 – Folha de verificação | 58 |
| Tabela 3 – Dados considerados para os histogramas | 61 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|--|
| PIGE | Erro geométrico independente de posição |
| PDGE | Erro geométrico dependente de posição |
| EMD | Decomposição de modo empírico |
| FKM | Modelo cinemático direto |
| IKM | Modelo cinemático inverso |
| CNC | Controle numérico computadorizado |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| NBR | Norma Brasileira |
| ISO | International Organization Standardization |
| QFD | Desdobramento da função qualidade |
| FMEA | Modos de falhas e seus efeitos |
| NC | Número de classes |
| N | Total de dados coletados |
| AC | Amplitude das classes |
| X_{max} | Maior valor dos dados coletados |
| X_{min} | Menor valor dos dados coletados |
| 5S | Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke |
| PEPS | Primeiro a entrar, primeiro a sair |
| L1 | Posição longitudinal 0 mm |
| L2 | Posição longitudinal 50 mm |
| L3 | Posição longitudinal 100 mm |
| L4 | Posição longitudinal 150 mm |
| L5 | Posição longitudinal 200 mm |
| L6 | Posição longitudinal 250 mm |
| L7 | Posição longitudinal 300 mm |
| L8 | Posição longitudinal 350 mm |
| L9 | Posição longitudinal 400 mm |
| L10 | Posição longitudinal 450 mm |
| L11 | Posição longitudinal 500 mm |
| L12 | Posição longitudinal 550 mm |
| L13 | Posição longitudinal 600 mm |

| | |
|-----|-----------------------------|
| L14 | Posição longitudinal 650 mm |
| T1 | Posição transversal 0 mm |
| T2 | Posição transversal -150 mm |
| T3 | Posição transversal -300 mm |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----|---------------------|
| mm | Milímetro |
| °C | Graus celsius |
| Y | Eixo longitudinal Y |
| X | Eixo transversal X |
| % | Porcentagem |
| ° | Graus |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 | OBJETIVOS | 14 |
| 2.1. | Objetivo Principal | 14 |
| 2.2. | Objetivos Específicos | 14 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 3.1. | Fontes de Erros em Máquinas Ferramentas | 15 |
| 3.1.1. | Erros geométricos | 15 |
| 3.1.1.1. | Erros cinemáticos | 18 |
| 3.1.1.2. | Erros térmicos | 18 |
| 3.1.1.3. | Erros dinâmicos | 21 |
| 3.2. | Classificação de Erros Quanto ao Comportamento | 22 |
| 3.2.1. | Erros sistemáticos | 22 |
| 3.2.1.1. | Erros de histerese | 22 |
| 3.2.2. | Erros aleatórios | 23 |
| 3.3. | Qualidade | 23 |
| 3.3.1. | Gestão da Qualidade | 25 |
| 3.3.2. | Ferramentas da Qualidade | 26 |
| 3.3.2.1. | Folha de verificação ou tabela de contagem | 27 |
| 3.3.2.2. | Histograma | 28 |
| 3.3.2.3. | Estratificação | 31 |
| 3.3.2.4. | Diagrama de Ishikawa | 31 |
| 3.3.2.5. | Diagrama ou Análise de Pareto | 33 |
| 3.3.2.6. | Metodologia 5S | 34 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 37 |
| 4.1. | Aquisição de dados | 37 |
| 4.2. | Aplicação de ferramentas para compensação do erro | 44 |
| 5 | RESULTADOS | 46 |
| 5.1. | Remoção do Desalinhamento | 48 |
| 5.2. | Remoção do Perfil do Artefato Retificado | 50 |
| 5.3. | Aplicação das Ferramentas da Qualidade | 57 |
| 5.3.1. | Metodologia 5S | 57 |
| 5.3.2. | Folha de Verificação | 58 |
| 5.3.3. | Histograma | 61 |
| 5.3.4. | Diagrama de Ishikawa | 65 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.3.5. | Análise de Pareto | 69 |
| 5.3.6. | Discussão sobre os métodos de compensação de erros propostos..... | 74 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 76 |

1 INTRODUÇÃO

Para a fabricação de uma peça que tenha uma utilização satisfatória dentro de sua função, se faz necessário o cumprimento das especificações estabelecidas pelo projeto. Porém, como todos os processos sofrem variações, isso significa que devem ser definidos limites de tolerância a fim de estabelecer a variação máxima dimensional, geométrica e de rugosidade que uma peça possa apresentar após os processos de fabricação e ainda cumprir sua função satisfatoriamente.

Em processos de torneamento cilíndrico, tais variações ocorrem devido a erros da máquina ferramenta provenientes de diversos fatores que alteram a geometria da estrutura da máquina, de forma que ocorram erros no posicionamento relativo entre a peça usinada e a ferramenta de corte. Em outras palavras, erros geométricos de um torno mecânico podem ocorrer devido a fatores cinemáticos, térmicos e dinâmicos. Sendo assim, fatores como mudanças de temperatura do ambiente, condições de trabalho, vibrações etc., podem modificar as dimensões da máquina ferramenta e, por consequência, gerar produtos com desvios de tamanho, geométricos e de rugosidade que, dependendo das tolerâncias definidas, podem não ser utilizáveis ou ser necessário retrabalho.

Ferramentas da qualidade, como a metodologia 5S, fluxogramas, folha de verificação, histogramas, diagrama de Ishikawa e análise de Pareto, são geralmente aplicadas para auxiliar a manutenção da qualidade do produto e de processos produtivos, assim como aplicação de tecnologias para a inspeção de não conformidades de produtos e processos. Muitos estudos são realizados para melhoria da qualidade, no entanto, as áreas de conhecimento são inseridas de forma fragmentada, ora aplicando apenas conceitos da ferramenta da qualidade e ora aplicando ferramentas técnicas para calibração e inspeção dos erros. Desta forma, é justificada a elaboração desse trabalho, que busca promover a aplicação de um método que alia essas duas áreas de conhecimento.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho foi propor métodos e ferramentas da qualidade, para auxiliar na identificação e interpretação dos erros geométricos, transversais a guia principal de um torno horizontal, de forma que possibilite o conhecimento da influência dos erros transversais em operações de torneamento cilíndrico e, assim, permita a tomada de decisão sobre a realização de manutenções e aplicações de técnicas para a melhoria da qualidade da produção.

2.2. Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Remoção do erro de desalinhamento da instrumentação utilizada na coleta de dados, proveniente da fixação do artefato de aço 1045 com oxidação negra e faces de medição retificadas, e o erro geométrico do artefato em relação ao erro geométrico da guia principal do torno horizontal;
- Obter o erro geométrico em diferentes posições transversais e longitudinais do plano de trabalho principal de um processo de torneamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma máquina ferramenta foi utilizada como objeto de estudo neste trabalho. De acordo com Gomes *et al.* (2002), máquinas ferramentas podem ser definidas como equipamentos com capacidade de recortar, furar ou deformar materiais. Também é comentado por Stoeterau (2004) que, um dos requisitos de uma máquina ferramenta no processo produtivo é fabricar peças dentro das tolerâncias estabelecidas e com boa qualidade superficial, apesar do nível de qualificação do operador.

Para o desenvolvimento deste trabalho, devem ser apresentados alguns conceitos relacionados a máquinas ferramentas e qualidade:

3.1. Fontes de Erros em Máquinas Ferramentas

Segundo Schwenke *et al.* (2008), entender as fontes de erros de máquinas ferramentas, seus efeitos e como compensar é de grande importância para que o equipamento apresente uma exatidão e repetibilidade elevada nas tarefas que irá realizar, uma vez que os erros podem mudar a geometria dos componentes e de seu laço estrutural, podendo ocasionar uma diferença entre a posição nominal e real dos componentes da máquina. Isso ocorre em razão das máquinas ferramentas não são totalmente rígidas (ROOKER *et al.*, 2022).

Assim, segundo Rooker *et al.* (2022), fatores como variação de temperatura, condições de trabalho do equipamento, quebras, calibrações indevidas e erros de forma e tamanho dos componentes do aparelho acabam afetando a precisão e exatidão do dispositivo. Consequentemente, sempre haverá algum grau de erro relacionado à máquina ferramenta.

3.1.1. Erros geométricos

Os erros geométricos são as fontes que mais afetam máquinas ferramentas de alta precisão, resultando em algo entre 40% e 70% dos erros dos equipamentos (CHEN *et al.*, 2021), fazendo com que os eixos de movimento se desviem da trajetória ideal. Tais erros acontecem por causa de imperfeições nos componentes da máquina

que podem ser causadas durante a fabricação, montagem ou por fatores que são submetidos como, por exemplo, variações de temperatura e vibrações.

Schwenke *et al.* (2008) propõe que para analisar erros geométricos de uma máquina ferramenta é necessário saber a geometria do equipamento e o propósito da avaliação, além da escolha de um método direto ou indireto para detectar os erros. Através do método direto se consegue analisar apenas um erro, dado que é possível mensurar os erros mecânicos de um eixo independentemente de outros presentes no sistema. Já no método indireto é avaliado uma sobreposição de erros.

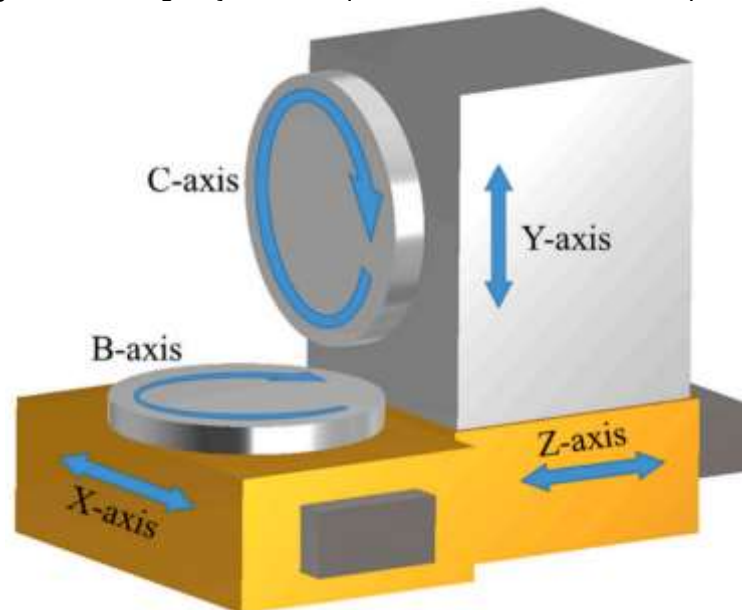
Ainda é afirmado por Chen *et al.* (2021) que os erros geométricos de pares cinemáticos podem ser classificados de duas maneiras diferentes quanto a sua dependência da posição. Portanto temos os erros geométricos independentes de posição e os erros geométricos dependentes de posição ou, suas siglas em inglês, PIGE e PDGE, respectivamente. No erro geométrico independente de posição (PIGE) os valores dos erros não mudam em virtude de ser independente da posição do par cinemático e é ocasionado geralmente por erros de montagem da máquina. Já o erro geométrico dependente de posição (PDGE) ocorre devido aos defeitos das peças do equipamento e se modificam de acordo com o movimento do par cinemático.

Para efeito de exemplo, uma máquina ferramenta de três eixos possui 21 tipos de erros característicos referentes ao equipamento, sendo seis deles de cada eixo, três de ortogonalidade, nove erros angulares e três erros de posição (ZHANG *et al.*, 1988). Sabendo disso, Praniewicz *et al.* (2019), discutindo sobre a máquina ferramenta de três eixos, classificou os erros angulares devido a falta de ortogonalidade dos eixos da máquina como erros independentes de posição (PIGEs), posto que tais erros estão relacionados com a ortogonalidade entre os eixos, dessa forma a fabricação do dispositivo apresenta uma influência ativa sobre tais desvios. Já os demais erros foram classificados como erros dependentes de posição (PDGEs), já que a qualidade dos componentes e os fatores os quais são submetidos são de grande importância para os erros atrelados a eles.

Chen *et al.* (2021) conduziu um estudo sobre a compensação de erros geométricos em máquinas ferramentas de ultra precisão com 5 eixos do tipo RTTTR (Figura 1). Nesse experimento, para realizar a compensação foi seguido os passos: Calcular os erros independentes e dependentes de posição (PIGE e PDGE) das medidas de posições coletadas através de uma decomposição de modo empírico (EMD) e o método de Xiang para análise comparativa. Em seguida, com os erros

independentes e dependentes de posição calculados se aplica a correção necessária da ferramenta de acordo com os erros. Por fim é verificado os resultados dos perfis de superfície sem compensação, com compensação dos erros independentes de posição (PIGEs) e com compensação dos erros independentes e dependentes de posição (PIGEs e PDGEs).

Figura 1 – Configuração da máquina ferramenta de 5 eixos tipo RTTR



Fonte: Chen *et al.* (2021)

Xia *et al.* (2020) estudou a compensação de erros geométricos baseados em modelos cinemáticos inversos simplificados aplicados a máquinas ferramentas retificadoras de engrenagens. Para executar a compensação primeiramente são integrados os módulos de erros geométricos dos eixos de movimento e, assim, é estabelecido um modelo cinemático direto (FKM). A partir disso, o modelo cinemático inverso (IKM) é usado nos cálculos das expressões analíticas dos comandos de movimento compensados e, uma vez conhecendo essas expressões, elas são derivadas e aplicadas através da identificação de elementos de erros relacionados ao perfil dos dentes da engrenagem.

Vale ressaltar que erros cinemáticos, térmicos e dinâmicos podem ser considerados como uma subclassificação dos erros geométricos.

3.1.1.1. Erros cinemáticos

Os erros cinemáticos ocorrem devido a variações não programadas tanto da geometria e das dimensões dos componentes usados na máquina ferramenta quanto às posições que se encontram fora do local exato esperado no laço estrutural ou eixo, e também nos erros no sistema de medição da máquina (SCHWENKE *et al.*, 2008).

Para compensar os erros cinemáticos que acabam provocando um desvio entre a posição teórica e a posição real dos componentes da máquina ferramenta, existem algumas metodologias que podem ser abordadas. Segundo Zuo *et al.* (2013), pode-se compensar erros cinemáticos através de dados coletados por uma máquina de medição coordenada. Porém, por se tratar de uma metodologia que usa ferramentas separadas da máquina ferramenta, pode ser gerados erros na coleta de dados, sendo que pode haver um desvio na posição em que a ferramenta é colocada nos diferentes experimentos realizados.

Por outro lado, existem outros métodos de compensação de erros que possuem uma confiabilidade maior. É de grande importância decidir um meio preciso de comparar a peça feita com o projeto teórico da peça para que se possa alcançar um produto final com grande exatidão (ZUO *et al.*, 2013).

Erros cinemáticos podem ser compensados com grande exatidão através de softwares de controle da máquina ferramenta, que baseado em um modelo matemático, pode criar os vetores de erros correspondentes aos movimentos realizados pela máquina ferramenta. Portanto, a compensação ocorre através da correlação por software do caminho nominal programado com o vetor erro, delimitando um novo caminho com o erro mitigado (ZUO *et al.*, 2013).

Luo *et al.* (2021) propôs um método para a calibração cinemática de robôs paralelos de usinagem com cinco eixos através de soluções cinemáticas diretas e processos de modelagem de erro baseados em medições de posições. A calibração dos erros cinemáticos é, geralmente, realizada em quatro passos: modelagem do erro, medição, identificação dos parâmetros e compensação.

3.1.1.2. Erros térmicos

Durante o uso de uma máquina ferramenta, devido as condições de trabalho a qual é submetida, o equipamento passa por deformações causadas devido as

variações de temperatura, uma vez que calor será causado devido a fricção das partes, do funcionamento do motor, entre outras fontes de calor. Isso faz com que haja uma variação entre a posição nominal e real da máquina e do objeto a ser trabalhado e, por consequência, acaba gerando um erro que afeta na exatidão e repetibilidade da máquina ferramenta (WEI *et al.*, 2022).

Foi constatado por Putz *et al.* (2019) que 75% dos erros geométricos ocorrem por influência térmica. Além disso, os erros térmicos são identificados e considerados de grande importância tanto na estrutura da máquina, quanto na ferramenta e na peça a ser trabalhada.

Mareš *et al.* (2020) propõe que os erros térmicos podem ser solucionados, geralmente, de três maneiras: Projetar a estrutura da máquina ferramenta para que tenha baixa sensibilidade ao fluxo de calor, controlar a temperatura da máquina ferramenta e do ambiente através do uso de líquidos de arrefecimento ou fontes externas de calor e compensação dos erros térmicos. A compensação do erro pode ser feita de forma direta ou indireta através do uso de softwares.

Para compensar o erro de forma direta, é medido a variação térmica da ponta da ferramenta em um intervalo de tempo e, assim, é sobreposto na posição correta. Sabendo disso, esse método possui o problema de requerer constante interrupção do processo para que as medições sejam feitas e compensadas. Já o método indireto através do uso de software utiliza o sistema de controle da máquina ferramenta para ativamente compensar os erros térmicos através de modelos matemáticos. Esse método é um dos mais utilizados para a mitigação dos erros térmicos, devido não ser de grande complexidade para implementação e possui boa relação custo-benefício.

Foram realizados experimentos por Wei *et al.* (2022) sobre a compensação de erros térmicos em mesas de trabalho de máquinas ferramentas controladas por controle numérico computadorizado (CNC). Para esse estudo foram utilizados um dispositivo de aquisição coordenado para a coleta de dados da distorção térmica e um dispositivo de aquisição de temperatura para a aquisição de valores de temperaturas em locais diferentes do eixo e da carenagem da máquina ferramenta de três eixos controlada por controle numérico computadorizado (CNC), onde foram dispostos dez sensores em locais diferentes do equipamento, conforme mostrado na Figura 2. Desses dez sensores, cinco foram utilizados para medir o calor do motor, quatro foram usados para medir o calor do eixo e o sensor da carenagem foi utilizado para medição da temperatura do ambiente.

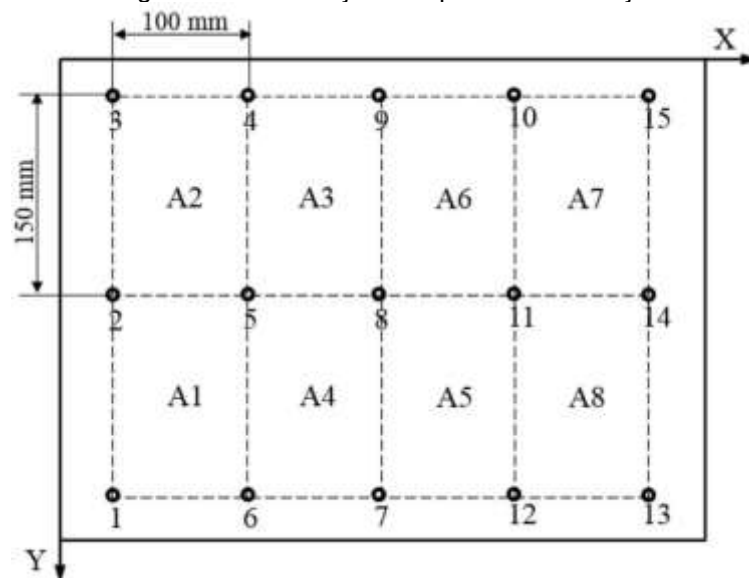
Figura 2 – Localização e funções dos sensores

| Sensores | Posição | Função |
|--------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| T1, T2, T3, T4, T5 | Rolamento dianteiro do eixo | Medir o aquecimento do motor |
| T6, T9 | Caixa do eixo | Medir o aquecimento do eixo |
| T7, T8 | Motor do eixo | Medir o aquecimento do eixo |
| T10 | Carenagem da máquina | Medir a temperatura do ambiente |

Fonte: Wei *et al.* (2022)

O estudo conduzido por Wei *et al.* (2022) foi voltado para a distorção térmica no eixo Z, posto que a expansão térmica do eixo é o principal fator que afeta a acurácia da máquina ferramenta. Para as medições, foram definidos quinze pontos na mesa de trabalho equidistantes em 100 mm no eixo X e 150 mm no eixo Z (Figura 3). Como a temperatura muda com o tempo, definir muitos pontos de medições pode causar variações indesejadas nas medições, uma vez que o tempo necessário para realizar as leituras de temperatura será expressivo.

Figura 3 – Distribuição dos pontos de medição

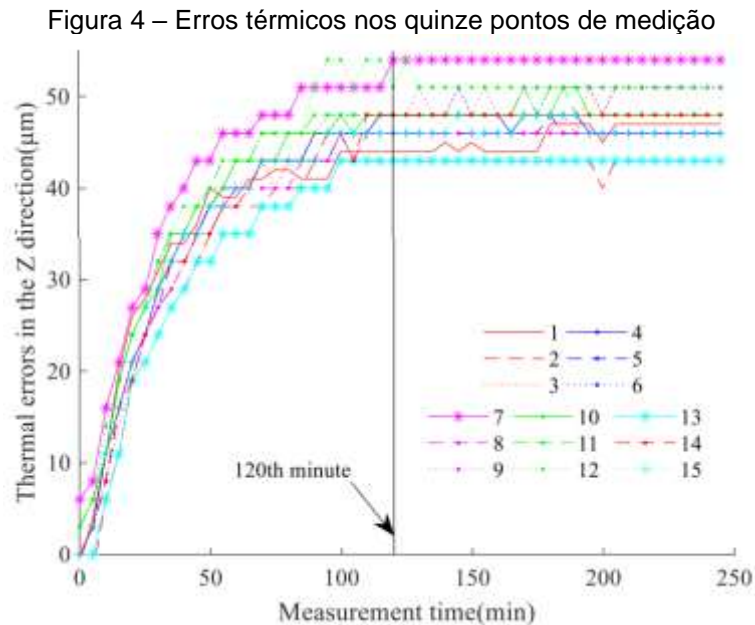


Fonte: Wei *et al.* (2022)

Sabendo disso, para se obter a distorção térmica da máquina ferramenta é calculado o desvio do valor coordenado. Para o estudo realizado por Wei (2022), os dados de distorção térmica são considerados os erros térmicos.

Foram observados na direção do eixo Z desvios crescentes nos pontos definidos da mesa de trabalho devido a variação progressiva e temperatura. Porém, a partir do 120º minuto os erros térmicos medidos pelos sensores se mantiveram sem alterações ou com baixa alteração até o final do estudo, apesar do contínuo

crescimento da temperatura (Figura 4). Esse fenômeno pode ser explicado uma vez que a ferramenta entra num estado térmico estável após o 120º minuto, fazendo com que os erros se mantenham estáveis apesar do aumento de temperatura.



Fonte: Wei *et al.* (2022)

Com os dados coletados, a compensação do erro se deu através do método sub-regional onde, através dessa metodologia, é estabelecido um modelo de compensação para cada região da mesa de trabalho da máquina ferramenta. O método sub-regional é realizado através das medições dos erros térmicos nos pontos definidos e a média dos erros dos pontos que compõem uma região é o modelo sub-regional da superfície definida. Após a construção do modelo, os parâmetros são inseridos no compensador de erros térmicos para que a origem do sistema coordenado da máquina ferramenta seja ajustado continuamente e, assim, mitigue o erro térmico e trabalhe peças de forma mais acurada.

3.1.1.3. Erros dinâmicos

Forças dinâmicas, como vibrações, segundo Schwenke *et al.* (2008), acabam fazendo com que ocorram deformações no laço estrutural da máquina ferramenta. No caso de erros gerados por vibração, acaba havendo dificuldade em compensar o erro em consequência de que determinar a amplitude, frequência e ângulo da fase da vibração é de grande complexidade.

Ademais, é argumentado que rápidas variações de forças, acelerações e desacelerações podem afetar o laço estrutural da máquina ferramenta e motivar o aparecimento de um erro. Esse erro pode ser mitigado através da aplicação de forças, acelerações e desacelerações diferentes e mais apropriadas para a aplicação na qual está sendo submetida.

Wozniak e Jankowski (2017) estudaram a compensação de erros de sondas em máquinas ferramentas CNC através do método de velocidade de medição variável. As sondas, dispostas no lugar da ferramenta de torneamento ou de corte, são utilizadas em máquinas ferramentas comandadas por CNC com função de configurar a peça de trabalho automaticamente ou na medição coordenada da peça usinada. Portanto, erros relacionados a sonda podem indicar também a falta de exatidão na usinagem. Diante disso, foi proposto um método para compensar o erro a partir da programação de uma velocidade de medição variável para a componente da distância necessária para que a máquina ferramenta obtenha as coordenadas das medidas na superfície da peça trabalhada. Com a velocidade ideal selecionada para cada direção, o erro pode ser reduzido significativamente.

3.2. Classificação de Erros Quanto ao Comportamento

3.2.1. Erros sistemáticos

Erros são classificados como sistemáticos quando, ao se manter as mesmas condições de medição, a grandeza e sinal não se alteram (NAKAZATO, 2003). Como é constante ou varia previsivelmente, erros sistemáticos podem ser compensados, uma vez que existe a possibilidade de calibração e quantificação (MORAIS, 2015). Nakazato (2003) afirma que há subclassificações dos erros sistemáticos sendo, basicamente, os erros de histerese e erros cíclicos.

3.2.1.1. Erros de histerese

O erro de histerese pode ser definido como a variação das grandezas obtidas em sentidos opostos de deslocamento (MORAIS, 2015).

Outra maneira que pode ser definido esse tipo de erro é como o valor que se obtém através do cálculo da diferença entre os erros médios no sentido de ida e de volta da aproximação (HEMINGRAY *et al.*, 1971; DI GIACOMO, 1986, apud NAKAZATO, 2003).

3.2.1.2. Erros cíclicos

Erros cíclicos ocorrem repetitivamente dentro de um intervalo de tempo sob um deslocamento linear e geralmente condiz com as periodicidades naturais das escalas da máquina (NAKAZATO, 2003).

3.2.2. Erros aleatórios

De acordo com Giacomo (2004), os erros aleatórios surgem de influências não controladas, tanto internas quanto externas, e causam a ocorrência de erros não sistemáticos.

3.3. Qualidade

Para Toledo *et al.* (2013), qualidade pode ser definida como um atributo das coisas ou pessoas, possibilita a distinção ou diferenciação e determina a natureza do ser ou objeto. O autor também argumenta que qualidade é algo passível de subjetividade, uma vez que a percepção de qualidade dependerá da aplicação de um produto e, desse modo:

A definição de quais características podem representar a qualidade é subjetiva; a intensidade da associação das características com qualidade é subjetiva; a forma de mensuração e interpretação das características pode ser subjetiva; a própria característica pode ser subjetiva. (TOLEDO *et al.*, 2013).

Além da questão subjetiva, a qualidade pode ser avaliada em uma dimensão objetiva, se referindo à qualidade intrínseca do objeto relacionados às suas propriedades físicas que não podem ser refutadas independentemente do ponto de

vista adotado. O lado subjetivo, em contrapartida, está relacionado à percepção de um indivíduo sobre as características subjetivas e objetivas de algo e sua capacidade de abstrair e diferenciar em relação às características do produto (TOLEDO *et al.*, 2013).

As décadas de 1950 e 1960 foram marcadas pela intensificação de publicações feitas na área de controle da qualidade, onde diversos dos principais autores clássicos da área publicaram seus trabalhos, entre eles Deming, Feigenbaum, Juran e Ishikawa. Deming (1950, apud TOLEDO, 2013) definiu a qualidade de produto como “a máxima utilidade para o consumidor”. Já Feigenbaum (1951, apud TOLEDO, 2013), definiu “qualidade como o perfeito contentamento do usuário” e, em 1961, “qualidade como a maximização das aspirações do usuário.” (FEIGENBAUM, 1961, apud TOLEDO, 2013). Juran (1954, apud TOLEDO, 2013) propôs a qualidade como a satisfação das necessidades do cliente e, por fim, Ishikawa (1954, apud TOLEDO, 2013) argumentou que “qualidade efetiva é a que realmente traz satisfação ao consumidor.”

A partir da década de 1970, haviam três vertentes principais para definir a qualidade de um produto, sendo uma delas a de Juran (1991, apud TOLEDO, 2013) onde é argumentado por ele que a noção de qualidade de algo vem da adequação ao uso, em outras palavras, um produto de qualidade é aquele que atende as necessidades do usuário, ou seja, é algo relativo que não necessariamente precisa atingir a perfeição para atender as expectativas de uma parcela de clientes que tem necessidades, hábitos e usos distintos. Já a segunda vertente, trazida por Crosby (1994, apud TOLEDO, 2013), trata a qualidade como a conformação aos requisitos, portanto, é preciso que essas especificações sejam previamente definidas e, então, a qualidade do produto seria mensurada através de o quanto ele atende esses requisitos já definidos. Por último, a terceira vertente apresentada por Taguchi (1986, apud TOLEDO, 2013) associa a qualidade com a “perda, mensurável e imensurável, que um produto impõe a sociedade após o seu embarque (após deixar a empresa), com exceção das perdas causadas por sua função intrínseca”. Logo, o autor trata a qualidade como a perda monetária que a falta de um produto causa após sua venda.

Por fim, a norma ABNT NBR ISO 9000:2015 determina a qualidade de produtos e serviços de uma organização como a “[...] capacidade de satisfazer os clientes e pelo impacto pretendido e não pretendido nas partes interessadas pertinentes.” e alega que “A qualidade dos produtos e serviços inclui não apenas sua função e desempenho pretendidos, mas também seu valor percebido e o benefício para o

cliente.”, ou seja, a qualidade pode ser definida como a adequação das necessidades do cliente e da percepção de valor e benefício transmitido.

3.3.1. Gestão da Qualidade

Para que um produto, bem ou serviço obtenha a qualidade necessária e planejada é preciso que haja uma gestão da qualidade para que isso seja atingido. Sabendo disso, teorias e práticas da Gestão da Qualidade Total foram aprimoradas e evoluídas. A Gestão da Qualidade Total, ou em inglês “*Total Quality Management*”, tem como sua principal filosofia de gestão a melhoria contínua dos produtos e processos a fim de obter a satisfação dos clientes, em todas as fases da vida útil do produto, em relação à qualidade, custos, entrega, serviços etc. A abordagem de melhoria contínua leva em conta uma abordagem de melhoramentos incrementais, onde, a continuidade do processo de melhoria é mais importante do que o quanto será melhorado a cada passo (TOLEDO *et al.*, 2013).

Segundo Carvalho *et al.* (2012), a Gestão da Qualidade abrange um conjunto de atividades coordenadas com o objetivo de direcionar e controlar uma organização em relação à qualidade. Essas atividades incluem o planejamento, controle, garantia e busca contínua pela melhoria da qualidade.

Para Prazeres (1996, apud TOLEDO, 2013), a gestão da qualidade pode ser definida como:

Conjunto de todas as atividades de todas as funções gerenciais que determina a política da qualidade, objetivos e responsabilidades e os implementa através do planejamento da qualidade, garantia e controle da qualidade e melhorias contínuas da qualidade, como parte do sistema da qualidade Prazeres (1996, apud TOLEDO, 2013).

Já para Toledo (2001, apud TOLEDO, 2013), a gestão da qualidade pode ser definida como um conjunto de práticas e uma abordagem utilizada para que o produto obtenha a qualidade desejada de forma eficiente e eficaz.

Com isso, métodos e ferramentas da qualidade, como, por exemplo, o ciclo PDCA, FMEA, QFD etc, foram criadas e difundidas para auxiliar no processo de identificação de problemas, tomada de decisão e do monitoramento das melhorias.

3.3.2. Ferramentas da Qualidade

Como dito anteriormente, as ferramentas da qualidade foram criadas com o intuito de auxiliar no processo de identificação de problemas, tomada de decisão e no monitoramento das melhorias para, dessa forma, poder mitigar ou remover completamente fontes de problemas e obter uma produtividade e qualidade elevada.

Segundo Toledo *et al.* (2013), as ferramentas da qualidade podem ser classificadas como: Ferramentas e técnicas básicas da qualidade, ferramentas intermediárias da qualidade, ferramentas avançadas da qualidade e, por fim, ferramentas e métodos de planejamento da qualidade. Cada uma dessas categorias possui ferramentas e métodos para o auxílio e priorização dos problemas, portanto, na categoria “ferramentas e técnicas básicas da qualidade” podem ser encontradas ferramentas como a folha de verificação, histograma, diagrama de dispersão, diagrama de causa e efeito, diagrama, análise de Pareto etc. Em “ferramentas intermediárias da qualidade” estará presente técnicas de amostragem, inferência estatística e métodos não paramétricos. Já nas “ferramentas avançadas da qualidade” temos o método de Taguchi, projeto de experimentos e análises multivariadas. Por fim, em “ferramentas e métodos de planejamento da qualidade” teremos associados o desdobramento da função qualidade (QFD) e a análise de modos de falhas e seus efeitos (FMEA).

Isto posto, existem sete ferramentas básicas da qualidade, conhecidas como ferramentas para melhoria da qualidade, utilizadas para organizar dados, interpretá-los e potencializar o proveito de seu uso, uma vez que é definido um procedimento para a coleta de dados, apresentação e análise de dados. Estas ferramentas são: Folha de verificação ou tabelas de contagem, histograma, diagrama de dispersão-correlação, estratificação, diagrama de causa e efeito (diagrama de Ishikawa), análise de Pareto e gráficos de controle (TOLEDO *et al.*, 2013).

Ante o exposto, também existe a chamada sete novas ferramentas da qualidade que possuem como objetivo determinar as necessidades efetivas do cliente, definir o que é um serviço atraente para o cliente, descobrir problemas relacionados à qualidade do projeto e dos serviços, encontrar métodos de angariar novos clientes etc. Portanto, para que isso fosse feito foram seguidos os seguintes princípios: Organização de dados de linguagem, obtenção de ideias criativas, plano de enriquecimento de ideias e soluções, prevenção de omissões, pessoas com objetivos

claros, conseguir cooperação entre pessoas com objetivos claros e motivar as pessoas em posição contrária. Diante disso, também foram designados os princípios que os novos métodos deveriam ajudar as equipes de qualidade seguir, sendo eles: Prática de definição de problemas, ênfase no planejamento, ênfase no processo, estabelecimento de prioridades e ênfase em sistemas de orientação para tomada de decisão.

Logo, com tais orientações definidas, foram selecionados sete métodos oriundos de áreas de estudos como a pesquisa operacional, engenharia de valor etc, que poderiam ser utilizados em aplicações voltadas para a qualidade, projetos, manutenção e melhorias de processos, sendo eles: Diagrama de afinidades, diagrama de relações, diagrama de árvore, diagrama de matriz, diagrama de matriz de priorização, diagrama de processo decisório e diagrama de setas. A seguir estão apresentadas algumas ferramentas da qualidade relevantes para este trabalho.

3.3.2.1. Folha de verificação ou tabela de contagem

A folha de verificação ou tabela de contagem possui como objetivo registrar e agrupar dados e informações de um processo ou tarefa de maneira lógica e organizada. Essa ferramenta é composta pelo uso de formulários com a finalidade de agrupar e registrar dados de maneira simplificada para um posterior uso e análise (TOLEDO *et al.*, 2013).

Ainda segundo Toledo *et al.* (2013), para a elaboração de uma folha de verificação ou tabela de contagem é necessário seguir três passos:

1) Planejamento da coleta de dados: nessa etapa será definido o problema a ser resolvido e, com isso, deverá ser elaborado perguntas para, a partir das respostas, definir a forma adequada para realizar a tomada de decisão. Além disso, também é preciso selecionar as ferramentas a serem utilizadas para a análise dos dados coletados e decidir o tipo de dados a serem colhidos. Contudo, precisa-se atentar para as condições da coleta de dados, ou seja, precisa-se levar em consideração o tempo disponível, o conhecimento de quem coleta os dados, o foco de quem coleta os dados etc. Esses fatores devem ser considerados para que não haja distorções dos valores medidos. Por fim, precisa-se projetar o formulário de tal maneira que a anotação dos dados se faça de maneira simples, evitando erros de anotação, deve haver um espaço

para realizar observações, o formulário deve ser intuitivo e levar em conta o aspecto formal.

II) Coleta dos dados: o registro dos dados deve acontecer de maneira clara e fiel ao conteúdo real observado. Para isso, é fundamental um bom treinamento, em relação aos procedimentos e uso do instrumento, para o responsável pela coleta e tempo hábil para a medição e registro dos dados.

III) Análise dos dados: com os dados colhidos, precisa-se que as folhas sejam guardadas de forma organizada, respeitando alguma característica definida como, por exemplo, o evento observado ou a característica do objeto, e pessoal capacitado deve ser responsável por interpretar os registros feitos.

Um exemplo de Folha de Verificação pode ser visto a seguir na Figura 5:

Figura 5 – Exemplo de folha de verificação

| CAUSA VERIFICADA NO PERÍODO X. | | |
|--------------------------------|------------|-------|
| OCORRÊNCIA | FREQUÊNCIA | TOTAL |
| Falta de pessoal | | 10 |
| Falta de produtos | | 10 |
| Falta de planejamento | | 5 |
| Falta de equipamentos | | 7 |
| Total | | 32 |

Fonte: Ayres (2019).

3.3.2.2. Histograma

O histograma indica a frequência de um valor medido de uma variável, permitindo verificar a eficiência do processo e tirar conclusões sobre a dispersão e frequência dos valores, como comentado por Toledo *et al.* (2013). O autor ainda afirma que para a criação de um histograma, seis etapas devem ser seguidas:

- I) Coletar os dados;
- II) Ordenar os dados obtidos de forma crescente;
- III) Avaliar a amplitude total dos dados coletados;
- IV) Delimitar as classes, suas amplitudes e seus limites;

- V) Medir a frequência de cada valor ou classe;
- VI) Montar o histograma respeitando a escala, com as barras unidas e larguras iguais.

Como visto na etapa “IV” da criação do histograma, a delimitação de classes ocorre em situações onde as variáveis obtidas são contínuas ou de grande amplitude dos valores. Sendo assim, as classes devem ser, na maioria dos casos, divididas em amplitudes iguais (TOLEDO *et al.*, 2013).

O número de classes (NC) de um histograma pode ser calculado através da fórmula:

$$NC = 1 + \frac{\log N}{\log 2} \quad (1)$$

ou

$$NC = \sqrt{N} \quad (2)$$

Onde N é o total de dados coletados.

Assim como o número de classes, também é possível calcular a amplitude das classes (AC) através da fórmula:

$$AC = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{NC} \quad (3)$$

Onde X_{\max} é o maior valor dos dados coletados, enquanto X_{\min} é o menor valor.

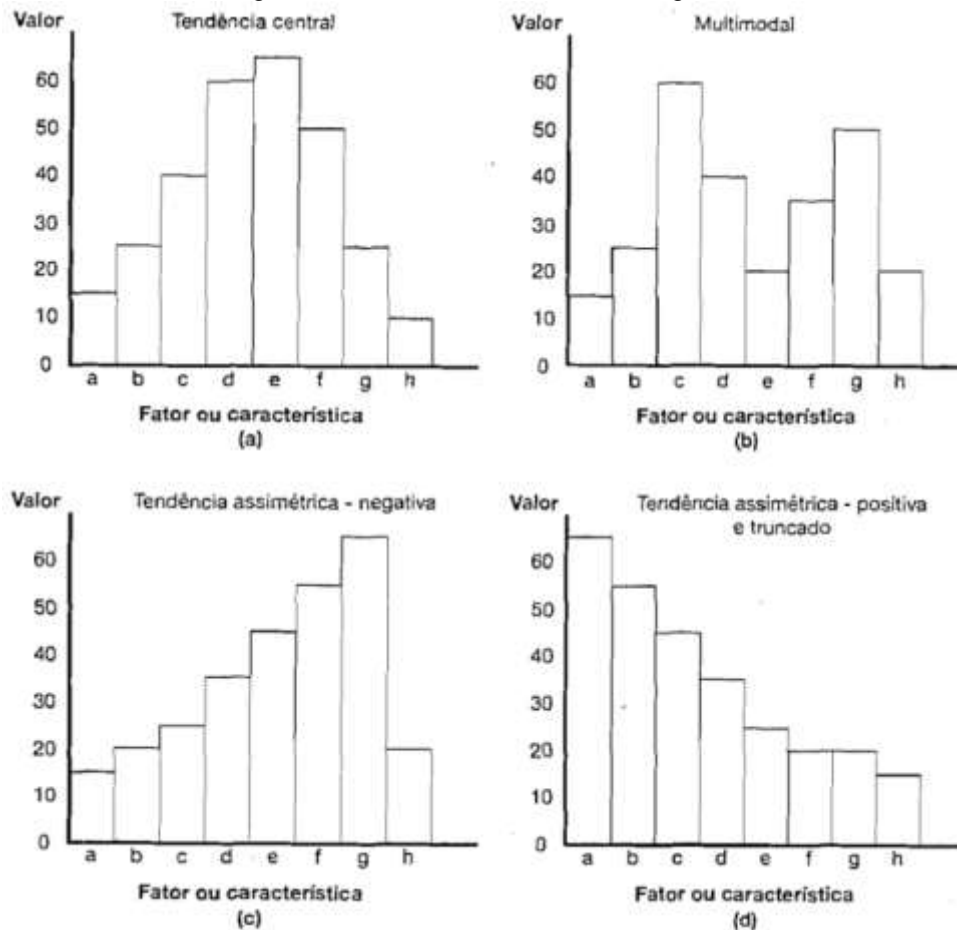
Diante disso, o histograma pode ser montado e pode assumir algumas características comuns, como: tendência central, multimodal, tendência assimétrica negativa e tendência assimétrica positiva e truncada, como observado na Figura 6 (TOLEDO *et al.*, 2013).

Como mostrado na Figura 6(a), os diagramas com tendência central mostram a maior frequência como sendo o valor médio, ou algo próximo ao valor médio, podendo assumir uma representação próximas a simétricas.

Já a Figura 6(b) representa um histograma multimodal, onde há a presença de mais do que um valor máximo, podendo ser chamado de histograma tipo pente ou

histograma tipo camelo. Esse histograma pode representar a presença de mais de uma população distinta, com características distintas, através da mistura de dados.

Figura 6 – Formatos comuns de histogramas

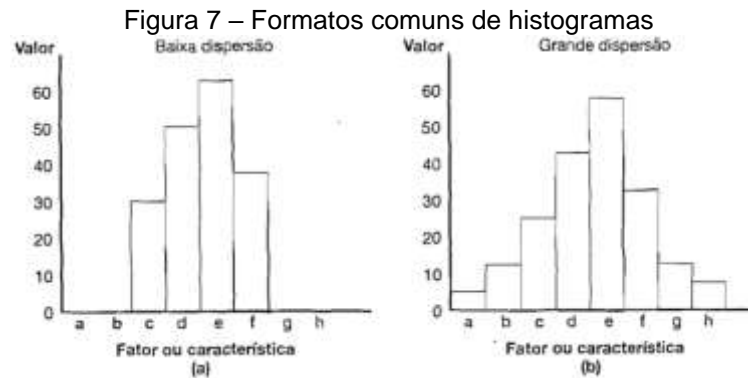


Fonte: Toledo *et al.* (2013)

O histograma representado pela Figura 6(c) representa um histograma com tendência assimétrica positiva e truncado, em outras palavras, possui uma característica assimétrica onde a maior frequência pode ser observada ao lado esquerdo do diagrama e há uma queda crescente ao avançar para a direita. Já a Figura 6(d) mostra uma característica de tendência assimétrica negativa, onde há uma assimetria da frequência das classes, havendo uma diminuição crescente das frequências para a direita.

Além das características mencionadas acima, os histogramas podem possuir uma dispersão elevada ou pequena. Isso significa que, um histograma com grande dispersão (Figura 7(b)) representa dados com características não uniformes e com grande amplitude de variação, enquanto um histograma com pequena dispersão

(Figura 7(a)) mostra dados uniformes e com poucas variações, assim, tendo uma pequena amplitude de dados (TOLEDO *et al.*, 2013).



Fonte: Toledo *et al.* (2013)

3.3.2.3. Estratificação

A estratificação é utilizada na construção de de histogramas, diagrama de Pareto e diagramas de dispersão-correlação e consiste basicamente em dividir um conjunto de dados em grupos significativos (TOLEDO *et al.*, 2013).

3.3.2.4. Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa foi concebido em 1943 por Kaoru Ishikawa, um engenheiro japonês. Sua estrutura, semelhante a uma espinha de peixe, possui um eixo principal que representa o fluxo básico de informações, e as espinhas convergentes simbolizam as contribuições secundárias para o processo em análise. Esse diagrama proporciona uma visualização clara das principais causas que levam a uma ação, resultado ou situação específica, enquanto as causas menos significativas estão ligadas às principais. Essa ferramenta oferece uma compreensão aprofundada da relação entre as causas e os efeitos decorrentes delas (CARVALHO *et al.*, 2012).

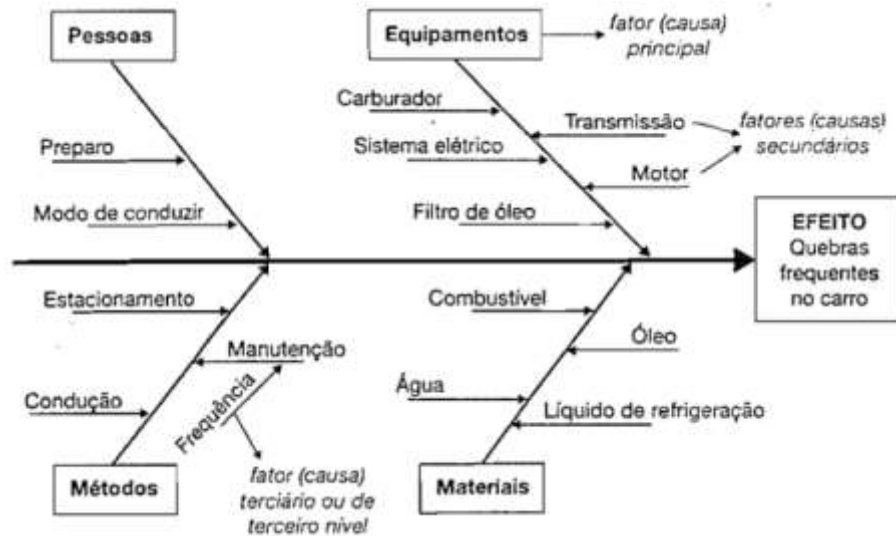
De acordo com Toledo *et al.* (2013), para a construção de um diagrama de Ishikawa, existem oito passos que devem ser preferencialmente seguidos, sendo eles:

- I) Identificar o problema a ser eliminado;

- II) Dispor, na parte direita do diagrama, o efeito do problema e apontar uma seta horizontal para ele;
- III) Estabelecer as causas principais do erro;
- IV) Separar as causas principais como “galhos” e ramificações da seta horizontal;
- V) Estabelecer as sub-causas relacionadas as causas principais;
- VI) Separar as sub-causas nos respectivos “galhos” das causas principais relacionadas a elas;
- VII) Conferir o diagrama, analisando se todas as causas foram identificadas, se são relevantes para o caso e, também, buscar a opinião de outras pessoas envolvidas;
- VIII) Escolher as causas mais prováveis e separá-las por ordem de influência sobre o efeito. Dessa forma, será possível chegar a conclusões e soluções para eliminar o problema identificado.

Além das etapas mencionadas para a construção de um diagrama de Ishikawa, também é importante que na elaboração do diagrama as causas principais sejam discutidas e identificadas por um grupo de pessoas, podendo utilizar a técnica de brainstorming. Com as causas principais e o efeito definido pelo grupo, sendo apenas dados mensuráveis, é necessário que todas as informações escritas no diagrama sejam diretas, evitando dar espaço para a subjetividade. É importante lembrar que as causas escolhidas devem ser fatores que sejam possíveis de trabalhar em cima, ou seja, fatores que não se há controle não devem ser levados em consideração. Por fim, os diagramas de Ishikawa são suscetíveis a mudanças, podendo ser melhorados constantemente enquanto são utilizados. A Figura 1 seguir (Figura 8) mostra um exemplo de diagrama de Ishikawa.

Figura 8 – Exemplo de Diagrama de Ishikawa



Fonte: Toledo *et al.* (2013)

3.3.2.5. Diagrama ou Análise de Pareto

Conforme Toledo *et al.* (2013), o diagrama de Pareto, também conhecido como Diagrama ABC ou Diagrama 20-80, auxilia na escolha da prioridade, de maneira gráfica, de quais problemas identificados devem ser trabalhados a partir dos dados previamente coletados sobre determinado efeito. Essa ferramenta parte do princípio de que 20% das causas são responsáveis por 80% dos efeitos, portanto, é relevante identificar e atuar sobre tais causas “vitais”.

Para identificar as causas “vitais” e diferenciá-las das causas “triviais”, Toledo *et al.* (2013) expõe as etapas necessárias para a montagem do Diagrama de Pareto:

- I) Estipular o problema ou efeito a ser investigado;
- II) Estudar as causas e como mensurar o problema;
- III) Registrar a unidade de medida de cada grandeza atrelada aos fatores do problema;
- IV) Organizar os fatores em ordem decrescente de acordo com sua magnitude;
- V) Calcular a magnitude total do conjunto de fatores;
- VI) Definir a porcentagem de cada fator sobre o valor total e a porcentagem acumulada;
- VII) Em um gráfico, com eixos verticais e horizontais, o eixo vertical esquerdo representará a escala de frequência de cada fator, em números absolutos de

ocorrências, enquanto o eixo vertical direito será usado para mensurar a frequência acumulada dos fatores, em uma escala percentual. Já no eixo horizontal será disposto os fatores do problema em ordem decrescente de número de ocorrências;

VIII) No gráfico, serão feitas barras para cada fator com tamanhos diferentes de acordo com sua magnitude, utilizando como escala o eixo vertical esquerdo;

IX) Para a porcentagem acumulada, será traçado um gráfico linear seguindo a escala do eixo vertical direito;

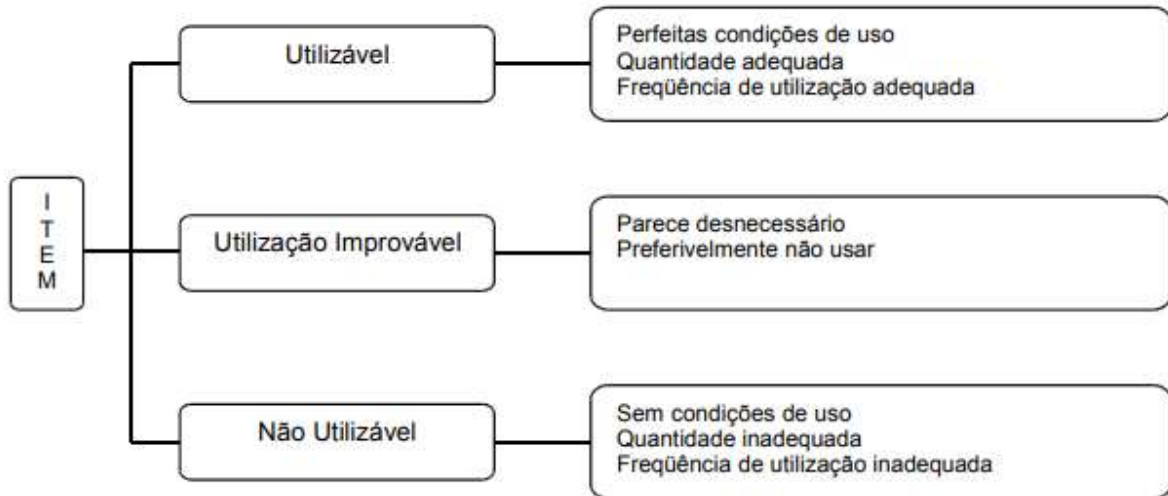
X) Escrever no diagrama observações importantes.

3.3.2.6. Metodologia 5S

Como escrito por Campos *et al.* (2005) a metodologia 5S, originária do Japão, foi criada com o objetivo de organizar o ambiente de trabalho através da manutenção do necessário, da limpeza, padronização e disciplina. Ele busca mudar valores em três dimensões: física, intelectual e social. Para que haja a mudança organizacional, é necessário o engajamento e vontade de mudar, especialmente da alta gerência. O 5S é composto por cinco princípios: senso de utilização, senso de ordenação, senso de limpeza, senso de asseio e senso de autodisciplina. Além disso, o método exige economia, responsabilidade, repetição de bons hábitos e persistência para a transformação de valores.

Ainda segundo o autor (Campos *et al.*, 2005) o senso de utilização envolve manter na área de trabalho apenas o que é necessário, usando recursos com bom senso e equilíbrio. É importante identificar materiais, equipamentos, ferramentas, informações e dados desnecessários e descartá-los ou dar-lhes a devida destinação. Além de eliminar desperdícios de coisas materiais e tarefas desnecessárias, é preciso identificar as causas do excesso para que medidas preventivas possam ser tomadas. Isso é conhecido como “bloqueio das causas” na terminologia da Qualidade. Campos *et al.* (2005) ainda mostra um esquema para classificar um item de acordo com sua utilização, como exposto na Figura 9.

Figura 9 – Organograma para classificação de itens de acordo com sua necessidade



Fonte: Campos *et al.* (2005)

Já o senso de ordenação consiste em estabelecer critérios e locais apropriados para armazenamento e fluxo de informações, objetivando a rapidez e segurança. É importante não apenas arrumar, mas também adotar uma metodologia de sistematização. Algumas ações a serem tomadas incluem reorganizar a área de trabalho, classificar objetos e armazená-los de acordo com sua classificação, etiquetar objetos, utilizar quadros de aviso, praticar o sistema PEPS (primeiro a entrar, primeiro a sair) e elaborar mapas de risco. A sistematização do ambiente de trabalho proporciona gerenciamento eficaz, aumenta a produtividade, reduz custos e acidentes, economiza tempo e busca a máxima eficiência do sistema (Campos *et al.*, 2005).

Em relação ao senso de limpeza, Campos *et al.* (2005) afirma envolver a manutenção do ambiente de trabalho limpo e livre de sujeira, tanto física como de informações desorganizadas. Ainda é dito que a filosofia principal é a prevenção de sujeira, identificando e eliminando suas causas e não apenas a limpeza. A limpeza sistemática segue três níveis (macro, individual e micro) e é importante para identificar e eliminar as causas da sujeira. Medidas importantes para a manutenção da limpeza incluem educação, eliminação das causas da sujeira, comunicação clara e a compreensão de que não sujar é mais importante que limpar. A implementação desse senso traz benefícios como, por exemplo, a melhoria do ambiente de trabalho, detecção de falhas de equipamento, redução de custos e aumento da autoestima no trabalho.

O quarto senso, o senso de higiene, saúde e integridade, é alcançado, segundo Campos *et al.* (2005), com a prática dos sentidos anteriores. Ainda é dito pelo autor que consiste em garantir um ambiente saudável, com boas condições sanitárias, higiene pessoal, comunicação clara, ética no trabalho e relações interpessoais saudáveis. A implementação deste senso requer a valorização da aparência pessoal e da empresa, evitando todas as formas de poluição, cuidando da saúde dos colaboradores e mantendo o controle visual. A empresa pode obter resultados como, por exemplo, a melhoria da qualidade de vida no trabalho, nos relacionamentos interpessoais, na produtividade, entre outros. O senso de higiene, saúde e integridade busca condições favoráveis à integridade física e mental dos trabalhadores.

O quinto e último senso, o de autodisciplina, educação e compromisso, visa corrigir comportamentos inadequados e moldar hábitos envolvendo mudanças de valores e cultura organizacional. Implementá-lo exige ações como não acobertar erros, elaborar normas claras, educar e melhorar a comunicação. Este senso traz benefícios como melhoria do relacionamento interpessoal, aprimoramento pessoal e empresarial, cumprimento de normas e padrões, desenvolvimento de cenários favoráveis à administração participativa e introdução de políticas da qualidade da empresa. É o senso de maior acuidade no 5S por trabalhar a dimensão social e trazer consequências de maior respeito mútuo e comprometimento na empresa (Campos *et al.*, 2005).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A execução deste trabalho ocorreu, basicamente, em duas etapas distintas:

4.1. Aquisição de dados

Para atingir os objetivos propostos, foi utilizado como objeto de estudo o torno horizontal mecânico TVK-2060ECO da fabricante Veker (Figura 10) a fim de chegar em dados quantitativos referentes ao erro geométrico das guias do carro longitudinal do equipamento.

Figura 10 – Torno horizontal mecânico Veker TVK-2060ECO

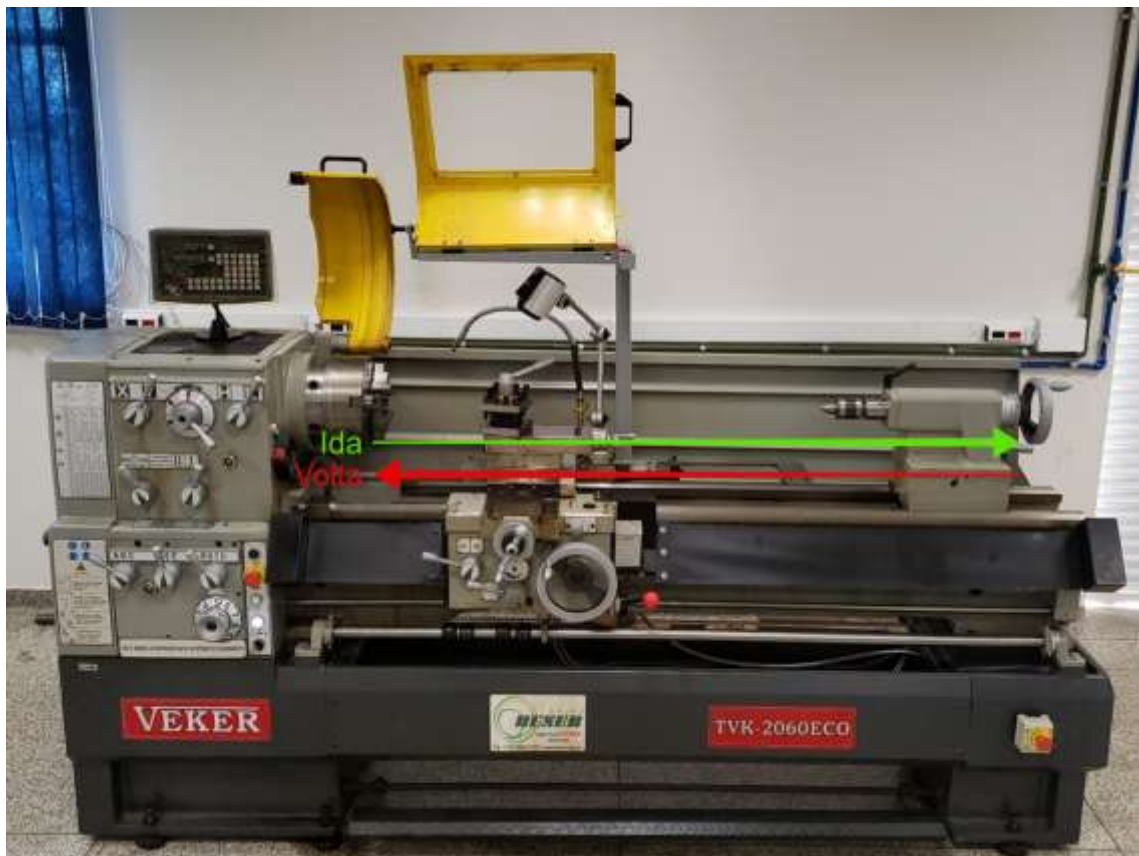


Fonte: Autoria própria.

A quantificação dos erros geométricos presentes na guia do carro longitudinal da máquina ferramenta ocorreu através das medições de variação do deslocamento transversal, comparando um ponto ao ponto inicial. Sabendo disso, foram determinados pontos distintos em um intervalo de 50 mm em 50 mm, variando de 0 mm até 650 mm, para as medições dessa diferença. Ademais, vale ressaltar que as

medições foram divididas em duas partes: Ida e volta. Na ida, onde era iniciado as medições, os dados foram coletados de forma crescente em relação ao comprimento do artefato retificado (0 mm à 650 mm). Já na volta os dados foram adquiridos de forma decrescente (650 mm à 0 mm). Quando o apalpador atingia a medição final da ponta da barra (650 mm), era avançado em cerca de 10 mm e recuado de volta a posição anterior o instrumento a fim de recolher duas medições diferentes do desvio e iniciar as medições da volta no sentido decrescente. A imagem a seguir (Figura 11) mostra os sentidos de “ida” e “volta” adotados para o torno horizontal mecânico utilizado.

Figura 11 – Sentidos de Ida e Volta adotados



Fonte: Autoria própria

Também, para cada ponto longitudinal medido foi dada uma nomenclatura para simplificar sua identificação. As nomenclaturas dadas para cada posição podem ser vistas na tabela a seguir (Tabela 1):

Tabela 1 – Nomenclatura das posições longitudinais

| Nomeclatura | Posição longitudinal (mm) |
|-------------|---------------------------|
| L1 | 0 |
| L2 | 50 |
| L3 | 100 |
| L4 | 150 |
| L5 | 200 |
| L6 | 250 |
| L7 | 300 |
| L8 | 350 |
| L9 | 400 |
| L10 | 450 |
| L11 | 500 |
| L12 | 550 |
| L13 | 600 |
| L14 | 650 |

Fonte: Autoria própria.

Os equipamentos utilizados no recolhimento de dados foram:

- 1 Apalpador indutivo Mahr P2004 M com resolução de 0,0001 mm e curso de medição ± 2 mm;
- 1 Coluna de medição Mahr Milimar S1840 M com resolução de 0,0001 mm;
- 1 Artefato de aço 1045 com tratamento térmico de oxidação negra e faces de medição retificadas;
- Notebook Dell Inspiron 3583 com o software MarCom Professional instalado.

O apalpador indutivo é uma ferramenta a qual captura variações de um campo eletromagnético, sendo traduzido em variação de distância pela coluna de medição.

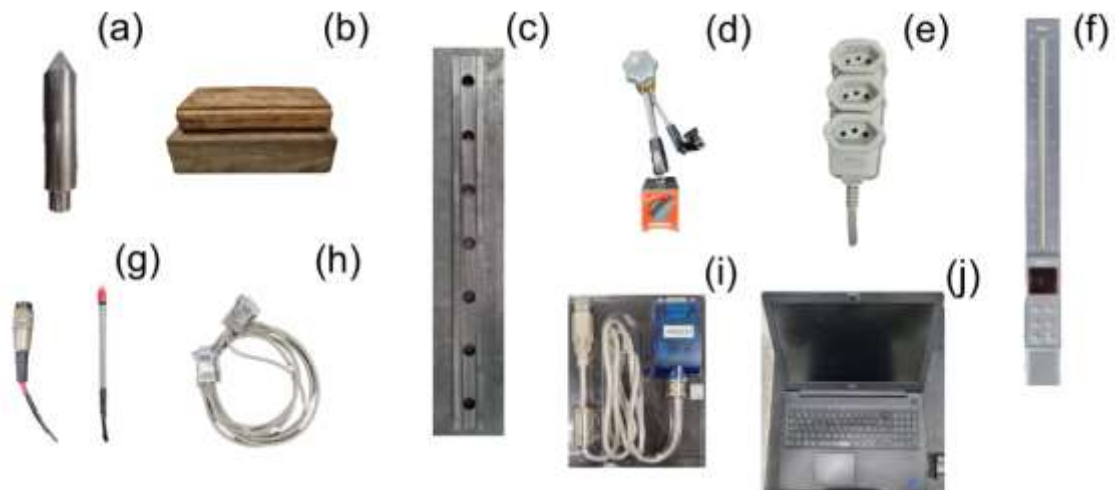
Além dos equipamentos utilizados diretamente para a medição dos desvios, outros equipamentos também foram usados indiretamente na coleta de dados, como auxílio na montagem dos equipamentos principais. Tais ferramentas foram:

- 1 Suporte magnético com braços hidráulicos articulados Digimess;
- 1 Ponta para fixação do artefato;
- 2 Dispositivos calços de fixação;
- 1 Cabo VGA;

- 1 Adaptador de VGA para USB-A;
- 1 Extensão de tomada.

Para a montagem dos equipamentos de medição, foi utilizada a metodologia 5S, que tem como objetivo organizar, padronizar e manter limpo o ambiente de trabalho. Ou seja, a montagem das ferramentas para todas as medições realizadas ocorreu seguindo uma ordem lógica com o objetivo de não ocorrer interrupções e desmontagens desnecessárias, assim como não contaminar as peças eletrônicas com óleo proveniente do torno horizontal e das peças utilizadas para o auxílio das medições. Primeiramente foram montadas as peças banhadas a óleo, assim, a ponta de fixação do artefato, o artefato de aço 1045 com oxidação negra e faces de medição retificadas e o suporte magnético articulado com braços hidráulicos foram os primeiros componentes a serem preparados para os experimentos. Em seguida, com as mãos lavadas, o restante do equipamento é montado para ser utilizado. O fluxograma detalhado da montagem dos instrumentos pode ser visto conforme o APÊNDICE K. A Figura 1 seguir (Figura 12) mostra os equipamentos utilizados:

Figura 12 – Equipamentos utilizados



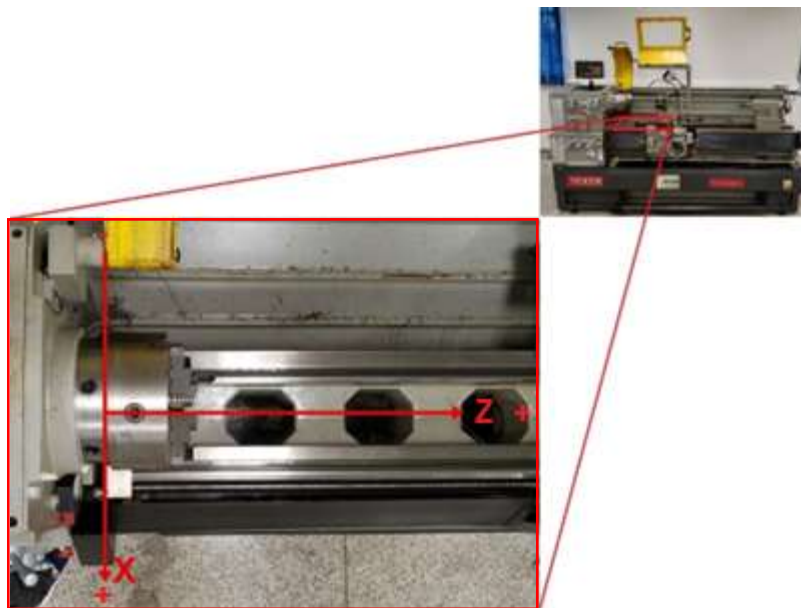
Legenda: (a) Ponta para fixação do artefato; (b) Dispositivos calços de fixação; (c) Artefato de aço 1045 com oxidação negra e faces de medição retificadas; (d) Suporte magnético com braços hidráulicos articulados Digimess; (e) Extensão de tomada; (f) Coluna de medição Mahr Milimar S1840 M; (g) Apalpador indutivo Mahr P2004 M; (h) Cabo VGA; (i) Adaptador de VGA para USB-A; (j)

Notebook Dell Inspiron 3583.

Fonte: Autoria própria.

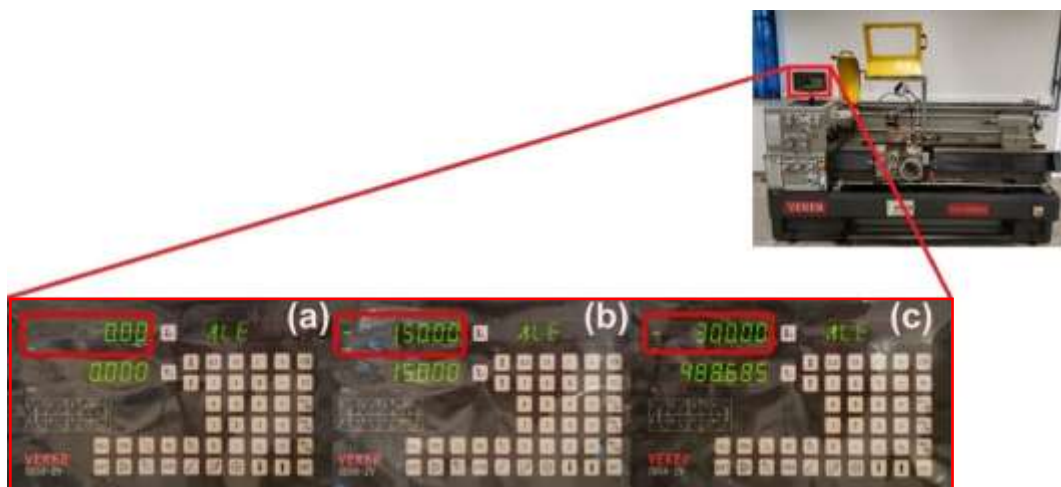
Com o procedimento definido como padrão e definindo um sistema coordenado para a máquina ferramenta, onde determinou-se que o eixo coordenado “X” é referente ao movimento transversal e o eixo “Z” se refere ao movimento longitudinal do carro principal da máquina ferramenta (Figura 13), repetiu-se para todas as medições realizadas com o carro transversal nas posições definidas em $x=0$ mm, -150 mm e -300 mm, como pode ser visto na Figura 14.

Figura 13 – Sistema coordenado adotado para o torno horizontal mecânico Veker TVK-2060ECO



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 14 – Coordenadas transversais (x) utilizadas.



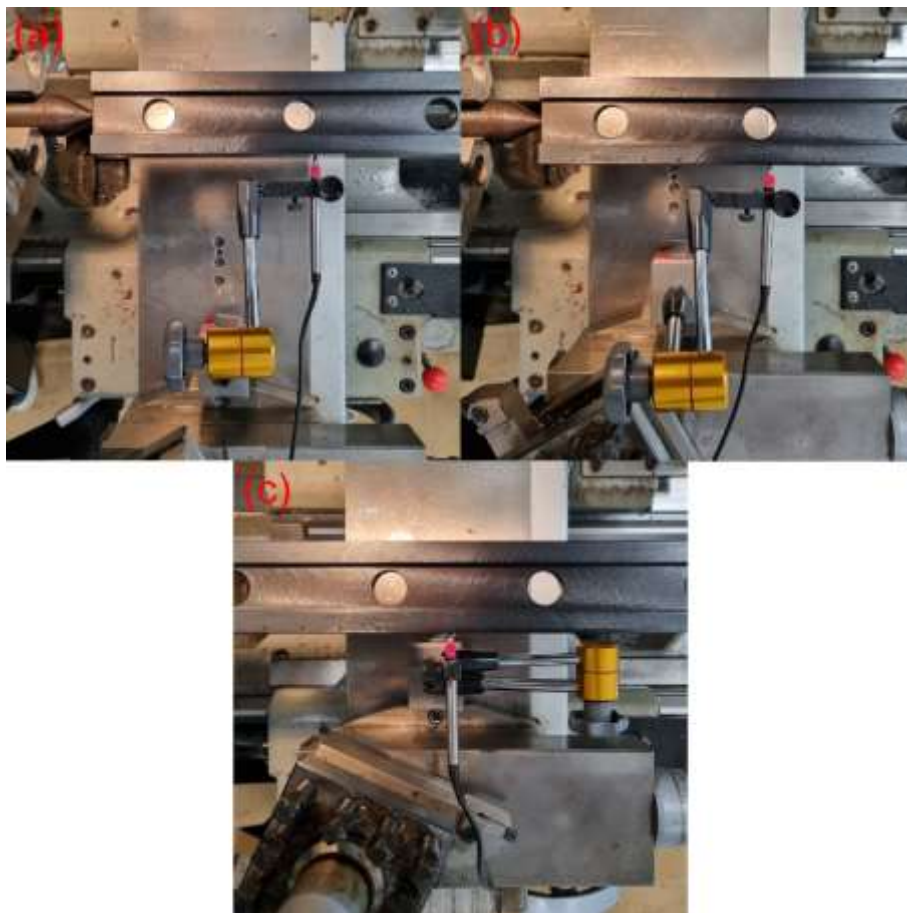
Legenda: (a) T1; (b) T2; (c) T3.

Fonte: Autoria própria (2022)

A escolha das posições do carro transversal em $x=0$ mm, -150 mm e -300 mm, que chamaremos de T1, T2 e T3, respectivamente, ocorreram pois foram as localizações encontradas mais distantes, médias e próximas possíveis, respectivamente, em que é viável o apalpador realizar as medições com o auxílio do suporte magnético com braços hidráulicos articulados. Sabendo disso, as medições foram realizadas nessas três configurações diferentes com a finalidade de simular condições do carro transversal diferentes para usinagem de peças com diâmetros diferentes e verificar como isso irá afetar o erro da guia do carro longitudinal.

A seguir é apresentado a Figura 15 que mostra a vista superior da montagem da ponta de fixação, do artefato com faces de medições retificadas, do suporte magnético com braços hidráulicos articulados e do apalpador indutivo para as posições transversais T1, T2 e T3.

Figura 15 – Fotografia da configuração adotada para os instrumentos de medição no torno horizontal.



Legenda: (a) Posição transversal T1 ($x = 0,00$ mm); (b) Posição transversal T2 ($x = -150,00$ mm); (c) Posição transversal T3 ($x = -300,00$ mm).

Fonte: Autoria própria (2022)

encontrado na direção transversal do barramento do torno horizontal, sem a interferência de outros erros.

4.2. Aplicação de ferramentas para compensação do erro

Com o erro na direção transversal do barramento do torno horizontal conhecido, podem ser propostos métodos para verificar sua incidência e compensá-los. Para isso, foram utilizadas cinco metodologias diferentes. Em todos os métodos, o valor encontrado foi adicionado aos valores do erro para a compensação.

A primeira compensação proposta foi através do método visual que consistiu em observar e determinar de forma empírica, através de gráficos, um valor para compensar o erro de posicionamento na direção transversal encontrado.

A segunda metodologia de compensação proposta foi através do cálculo individual da média para o sentido de ida e volta do erro encontrado e da adição do valor obtido aos valores do erro.

Utilizando os dados obtidos através das ferramentas da qualidade Folha de Verificação, Histograma e Diagrama de Pareto, o método de compensação proposto empregando as três ferramentas seguiu a mesma lógica. Os dados foram divididos em classes e a média da classe de maior incidência foi adicionada aos valores obtidos do erro para compensação.

Vale ressaltar que a folha de verificação foi utilizada para agrupar e categorizar, de forma simplificada, os dados obtidos por classes de amplitudes iguais. Para isso, foram criadas seis classes diferentes variando de -0,0300 mm até 0,0000 mm e, para cada posição transversal, foram marcados os erros obtidos dentro de seus intervalos correspondentes. Isso foi feito para facilitar a visualização da incidência dos erros dentro das classes determinadas.

O histograma foi utilizado com uma finalidade semelhante à folha de verificação. Agrupar e categorizar de forma simplificada os dados obtidos para facilitar a visualização da incidência dos erros dentro das classes determinadas. Procurou-se criar um histograma para cada posição do carro longitudinal utilizada para as medições e outro histograma apresentando os dados de todas as medidas em conjunto. Para isso, foi seguido o passo a passo exposto por Toledo *et al.* (2013), onde, após a coleta de dados, os valores obtidos foram ordenados de maneira crescente, avaliou-se a amplitude dos erros referentes as guias do carro principal,

sendo essa a diferença entre o maior e o menor valor medido. Através da Equação 2 e a Equação 3 foram calculados o número de classes (N_c) e a amplitude das classes (A_c), respectivamente, presentes em cada histograma.

A análise de Pareto, além ter sido utilizada para visualizar a incidência dos erros de acordo com classes determinadas, também foi utilizada para testar a hipótese de que 80% dos desvios medidos estão dentro de um intervalo com amplitude de 20% da variação total dos erros encontrados. Para isso, foi calculada a amplitude total dos erros e foram divididas em cinco classes, cada um representando 20% do intervalo total dos erros. Foram montados, então, quatro gráficos, sendo para as posições transversais T1, T2, T3 e para o conjunto de dados de todas as posições transversais utilizadas.

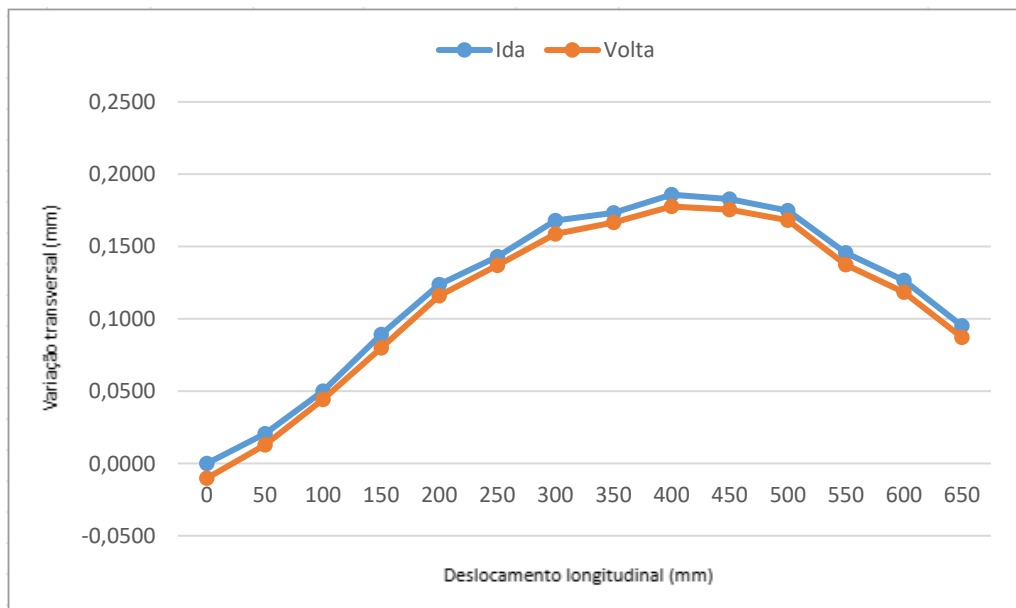
5 RESULTADOS

Para quantificar o erro presente na guia do carro longitudinal do torno mecânico horizontal estudado, primeiramente foram feitas dez medições para cada uma das três posições transversais definidas e, dessa forma, verificou-se a variação dimensional transversal ao longo da guia com o auxílio de um artefato com faces retificadas e mensurando os dados nos dois sentidos possíveis da guia principal. Cada medição foi realizada com o carro transversal da máquina ferramenta em uma posição diferente a fim de simular condições diferentes de usinagem de peças de diâmetros diferentes, para simular uma usinagem de um objeto com um diâmetro grande, médio e pequeno, respectivamente.

Isso posto, as medições foram realizadas e, com o auxílio de um notebook com o software de aquisição de dados instalado, os dados de média e desvio padrão adquiridos da variação transversal ao longo do comprimento longitudinal do artefato com faces de medição retificadas foram dispostos em tabelas (APÊNDICE A, APÊNDICE B, APÊNDICE C).

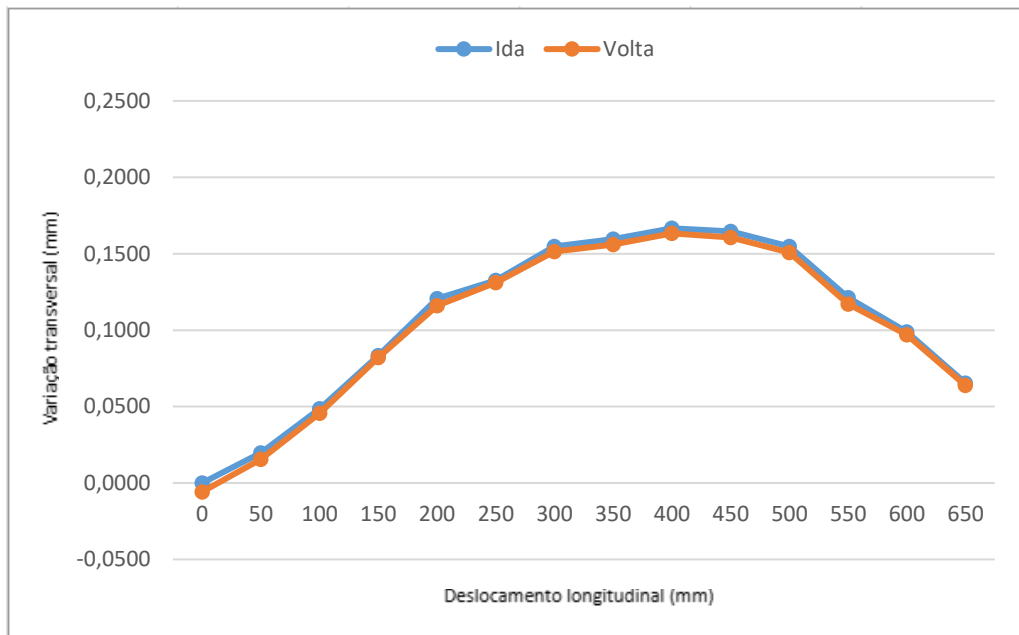
A partir da tabela de valores obtida como resultado das medições, foram traçados gráficos que mostram o perfil dos desvios transversais para cada posição transversal utilizada (Figura 17, 18 e 19). Vale ressaltar que os erros de desalinhamento e retitude do artefato ainda não foram retirados dos dados.

Figura 17 – Perfil das medições para posição transversal T1 ($x = 0,00$ mm)



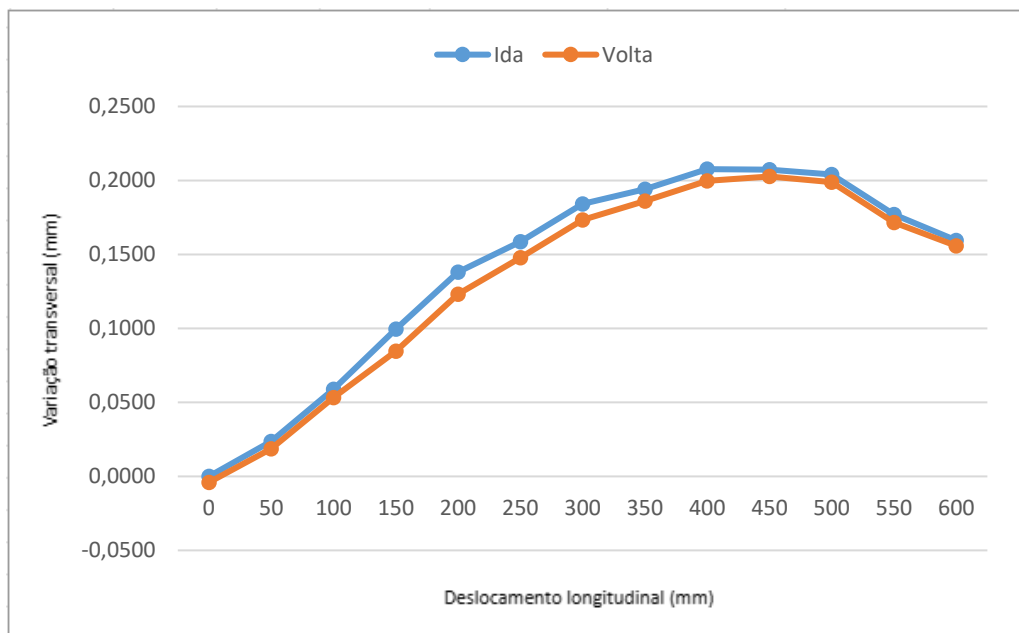
Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Perfil das medições para posição transversal T2 ($x = -150,00$ mm)



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Perfil das medições para posição transversal T3 ($x = -300,00$ mm)



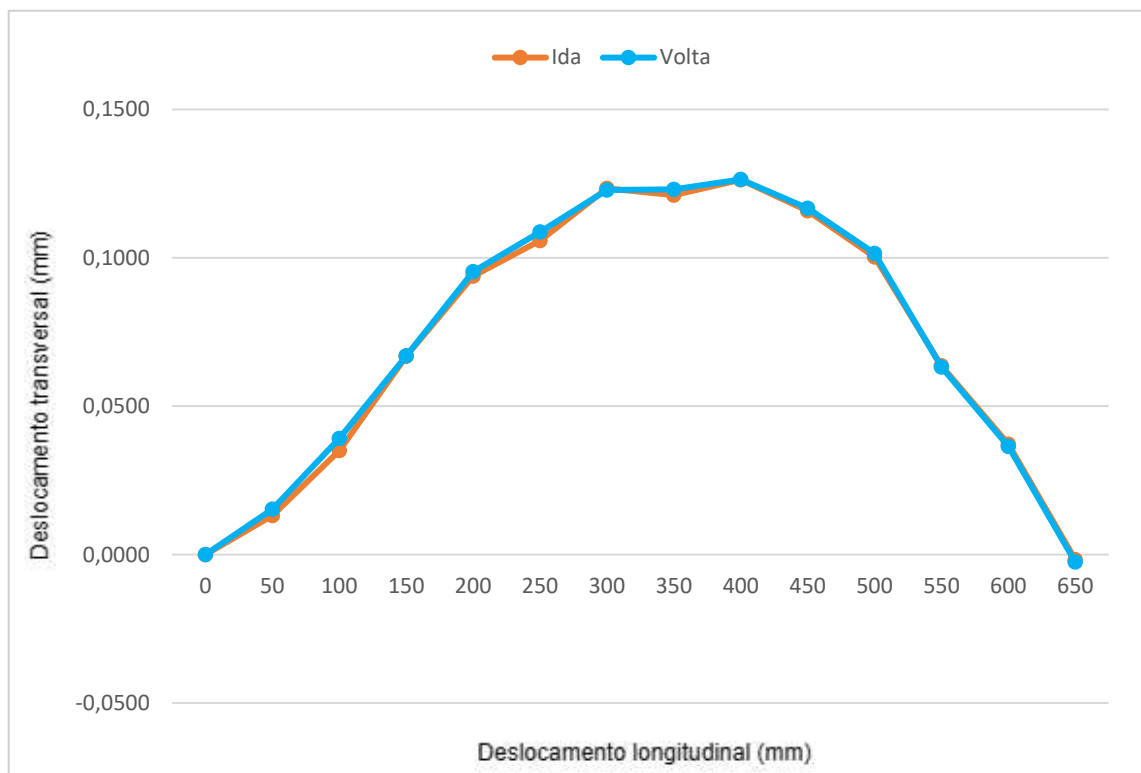
Fonte: Autoria própria.

Como pode ser visto nos gráficos acima (Figura 17, 3 e 4) as medições para as três posições transversais apresentaram um perfil semelhante entre a ida e a volta. Contudo, existe uma variação entre as medições de ida e volta, o que sugere um erro de histerese proveniente da característica da máquina estudada.

5.1. Remoção do Desalinhamento

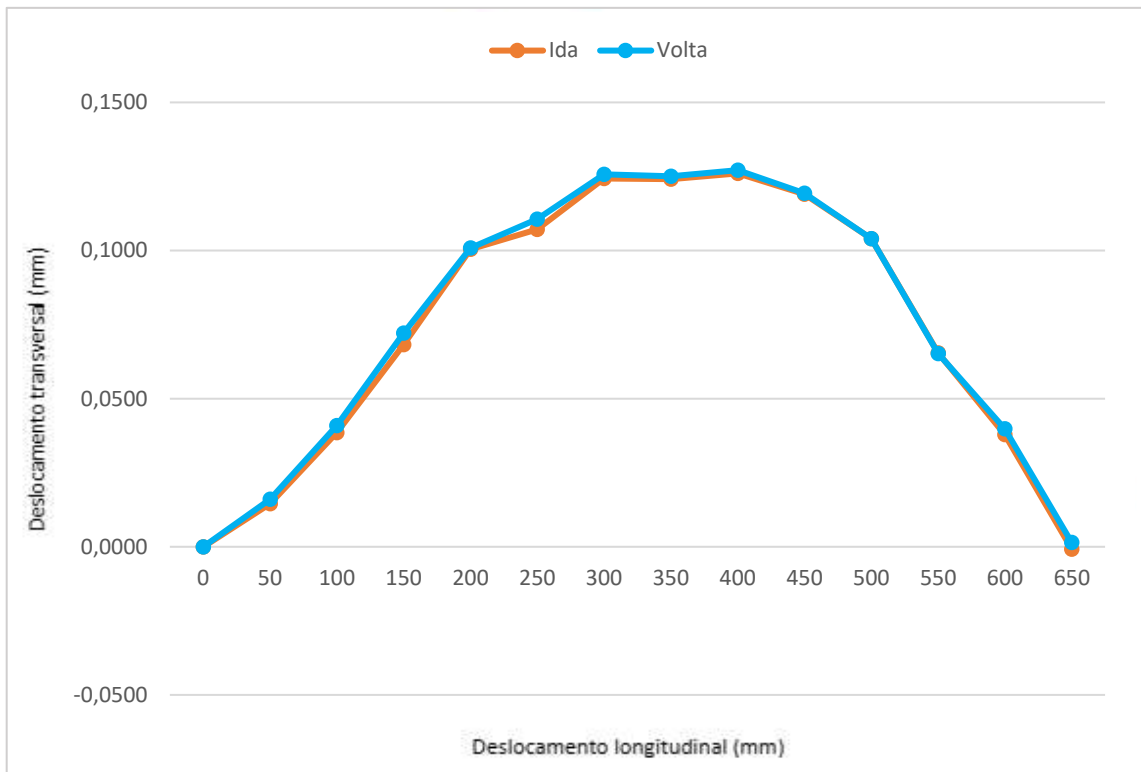
Com os valores medidos, foi aplicado o método dos mínimos quadrados para a retirada do erro de desalinhamento proveniente da fixação imperfeita do artefato retificado na máquina ferramenta utilizada como objeto de estudo. Os valores obtidos com a remoção do desalinhamento da fixação podem ser vistos no apêndice (APÊNDICE D, APÊNDICE E e APÊNDICE F), assim como os gráficos do deslocamento transversal versus longitudinal que mostra o perfil da guia do carro longitudinal juntamente o perfil do artefato retificado (Figura 20, 21 e 22).

Figura 20 – Remoção do desalinhamento para o carro transversal em T1 ($x = 0,00$ mm)



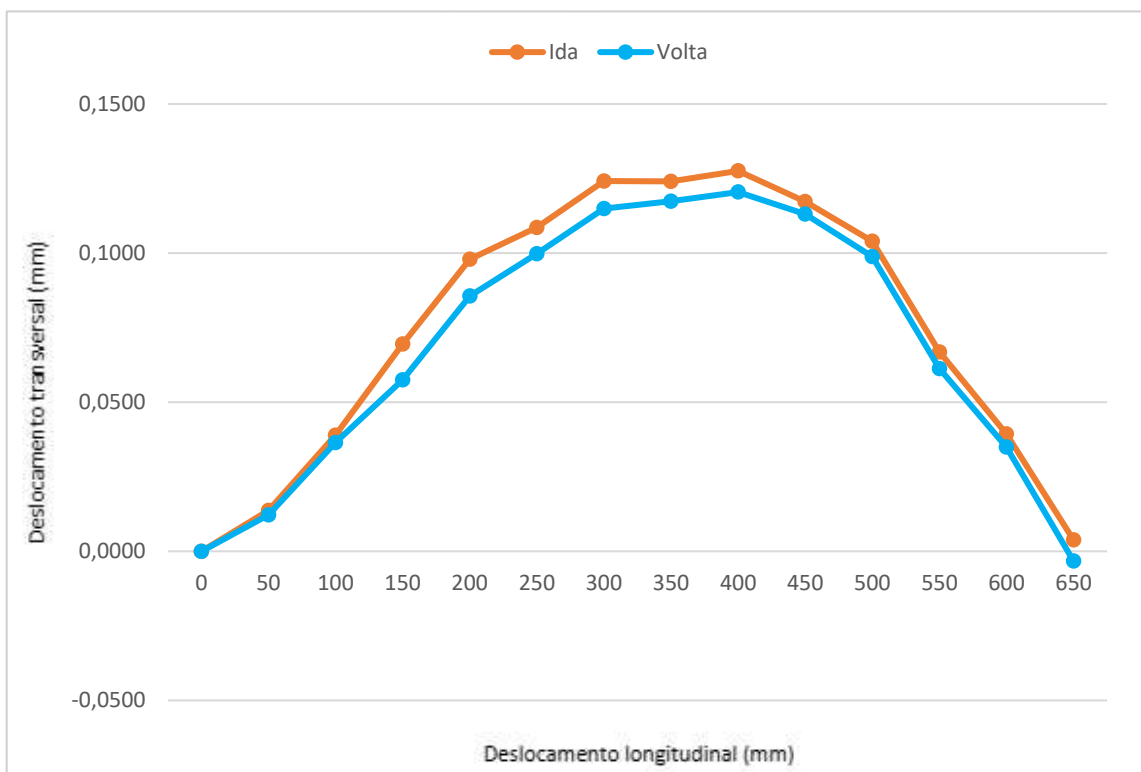
Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Remoção do desalinhamento para o carro transversal em T2 ($x = -150,00 \text{ mm}$)



Fonte: Autoria própria.

Figura 22 – Remoção do desalinhamento para o carro transversal em T3 ($x = -300,00 \text{ mm}$)



Fonte: Autoria própria.

5.2. Remoção do Perfil do Artefato Retificado

Removido o erro de desalinhamento, o perfil do artefato retificado pode ser subtraído também dos dados e, dessa maneira, será eliminado o erro de retitude do artefato e se adquirirá somente a soma dos erros geométricos transversais presentes do carro longitudinal do torno horizontal mecânico estudado. O Figura 23 mostra o perfil medido em máquina de medir por coordenadas para o artefato.

Figura 23 – Perfil do artefato de aço 1045 com oxidação negra e faces de medição retificadas



Fonte: Autoria própria.

Com o conhecimento do perfil do artefato e do desalinhamento da instrumentação utilizada, é possível identificar apenas os erros geométricos transversais do carro longitudinal da máquina ferramenta.

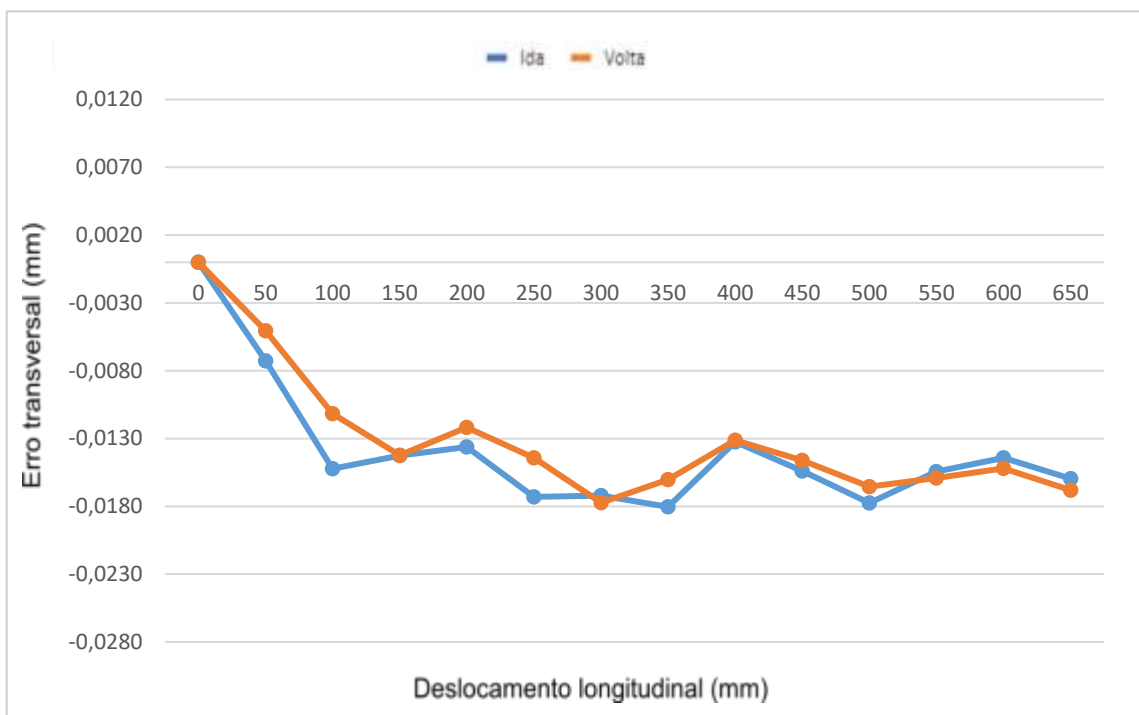
A quantificação do erro longitudinal ocorreu por meio da diferença entre os dados da remoção do desalinhamento e os dados do perfil do artefato. Assim, os resultados do erro da guia longitudinal pode ser vista no apêndice (APÊNDICE G, APÊNDICE H, APÊNDICE I).

Além das tabelas que mostram os dados obtidos do erro geométrico de posição na direção transversal, gráficos também estão apresentados a fim de facilitar a

visualização do erro, como pode ser visto na Figura 24, 25 e 26. Onde a linha azul representa o perfil do carro obtido com os dados coletados no sentido da ida e a linha laranja representa as medições feitas no sentido da volta.

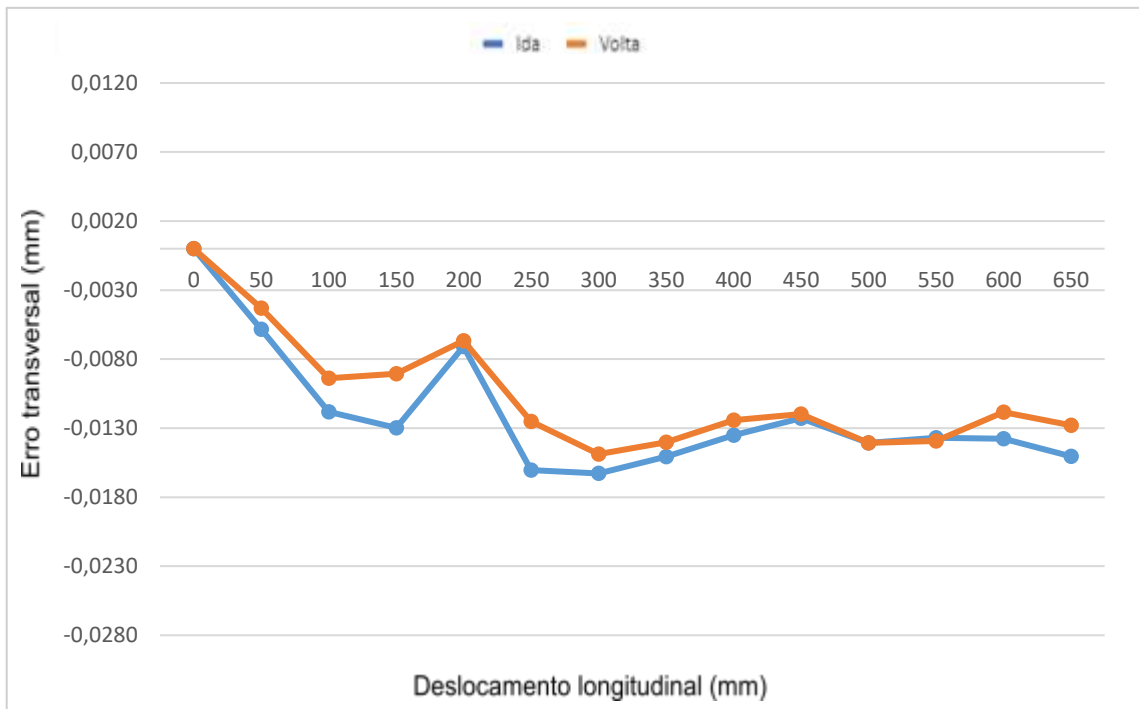
Nas Figura 24, 25 e 26, o erro de posicionamento na direção transversal passa a ter um valor significativo na posição longitudinal a partir de $z = 100,00$ mm e, dessa forma, não seria conveniente realizar as compensações antes dessa localização, uma vez que poderia acabar aumentando a amplitude do erro nesses pontos.

Figura 24 – Erro da guia do carro principal posicionado em T1 ($x = 0,00$ mm)



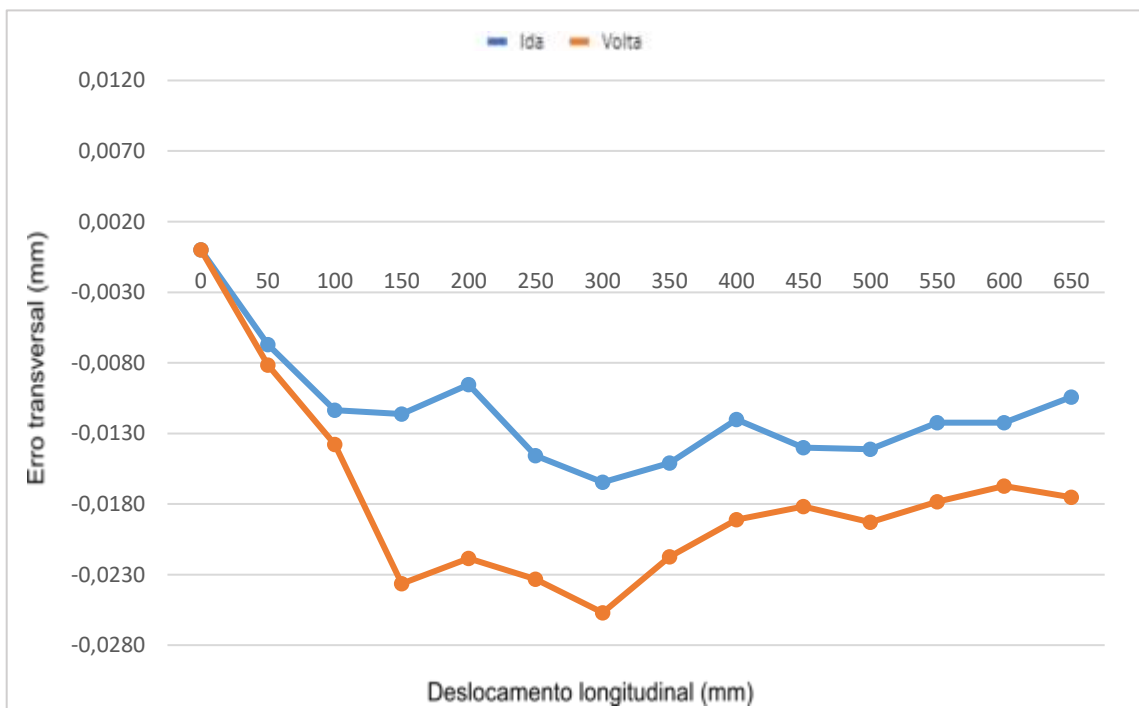
Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Erro da guia do carro principal posicionado em T2 ($x = -150,00$ mm).



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Erro da guia do carro principal posicionado em T3 ($x = -300,00$ mm).



Fonte: Autoria própria.

Através das Figura 24 e 25, que mostram o erro de posicionamento ao longo do deslocamento do carro principal nas posições transversais T1 e T2, é possível

verificar que a partir de $z = 100$ mm (L3) o erro transversal encontra-se entre $x = -0,0200$ mm e $x = -0,0100$ mm até a última medição na posição longitudinal $z = 650$ mm (L14).

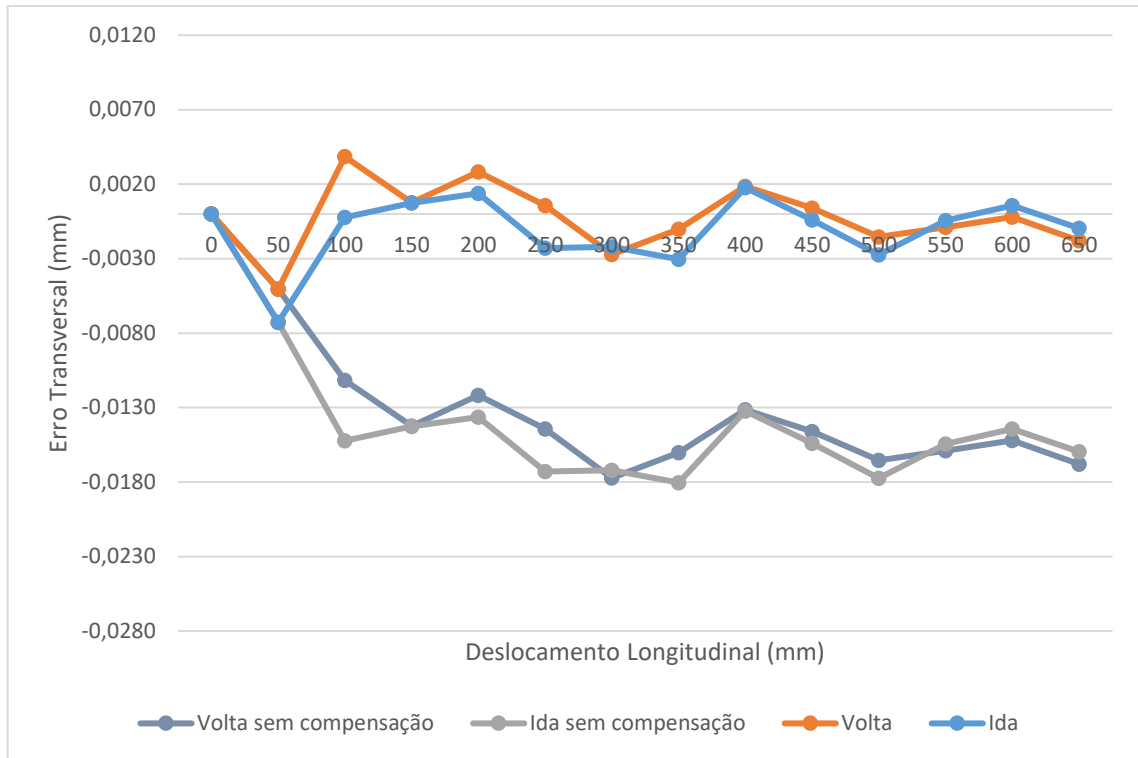
Com isso, ao realizar uma análise visual dos gráficos apresentados nas Figuras 24 e 25, pode ser estimado que os erros de posicionamento na direção transversal se encontram por volta de $x = -0,0150$ mm para a situação descrita, uma compensação pode ser feita durante o uso da máquina ferramenta. Em outras palavras, quando o torno horizontal mecânico for utilizado entre $z = 100$ mm e $z = 650$ mm pode ser adicionado $0,0150$ mm a posição do carro transversal para a compensação do erro encontrado.

Entretanto, esse método para compensação do erro de posicionamento na direção transversal não pode ser utilizado da mesma maneira no caso dos desvios encontrados para o deslocamento do carro principal na posição transversal T3. Como pode ser visto na Figura 26, a partir de $z = 150$ mm, os erros encontrados para a ida e para a volta apresentam um erro de histerese entre eles, que não deve ser desprezível. Essa variação é quase constante ao longo do deslocamento longitudinal.

A compensação para o erro, nesse caso, pode ocorrer de maneira semelhante ao proposto para as posições transversais T1 e T2, porém com a ressalva de que as compensações realizadas para ida e para a volta devem ser diferentes. Ou seja, enquanto para ida a compensação pode ser realizada adicionando por volta de $0,0100$ mm à posição transversal do carro, para volta é melhor ser adicionado $0,0200$ mm para o ajuste do erro de posicionamento na direção transversal.

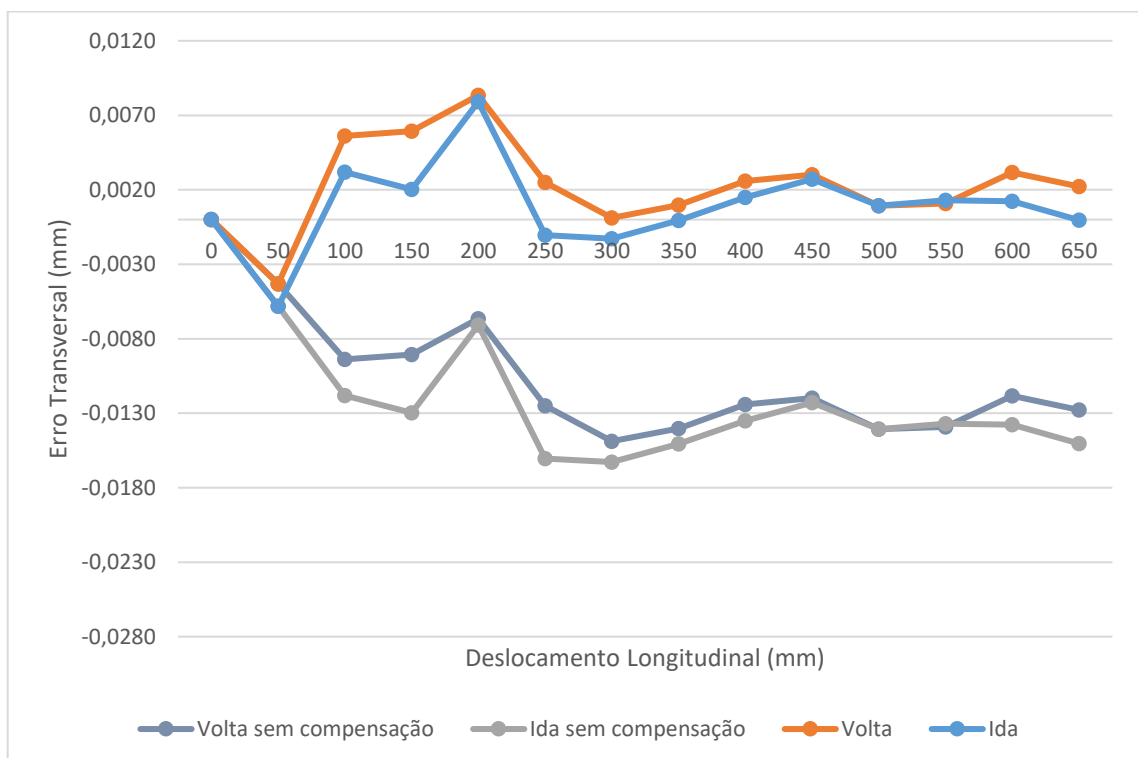
A seguir, são apresentados os gráficos (Figura 27, 28 e 29) dos perfis dos erros de posicionamento na direção transversal encontrados, para cada posição transversal estudada, seguindo a compensação proposta de $0,0150$ mm nas posições $z = 100$ mm à $z = 650$ mm para T1 e T2 e, para T3, uma compensação de $0,0200$ mm entre $z = 100$ mm e $z = 650$ mm.

Figura 27 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado visualmente para posição T1
($x = 0,00 \text{ mm}$)



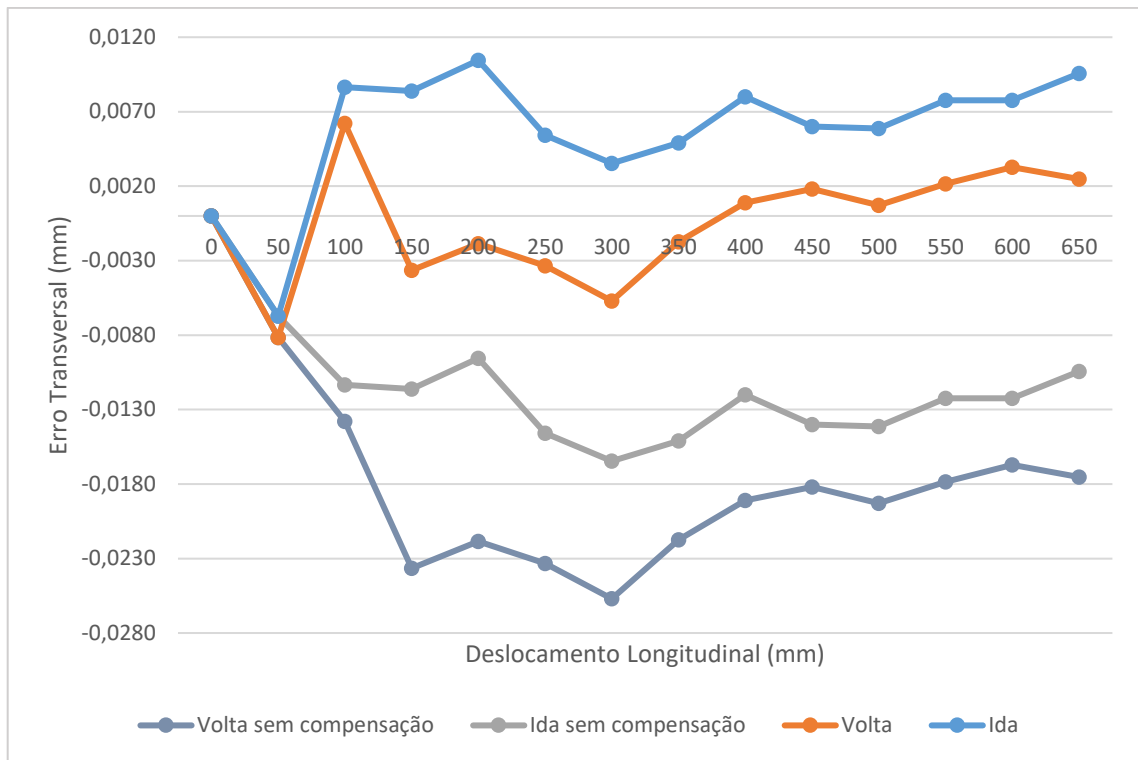
Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado visualmente para posição T2
($x = -150,00 \text{ mm}$)



Fonte: Autoria própria.

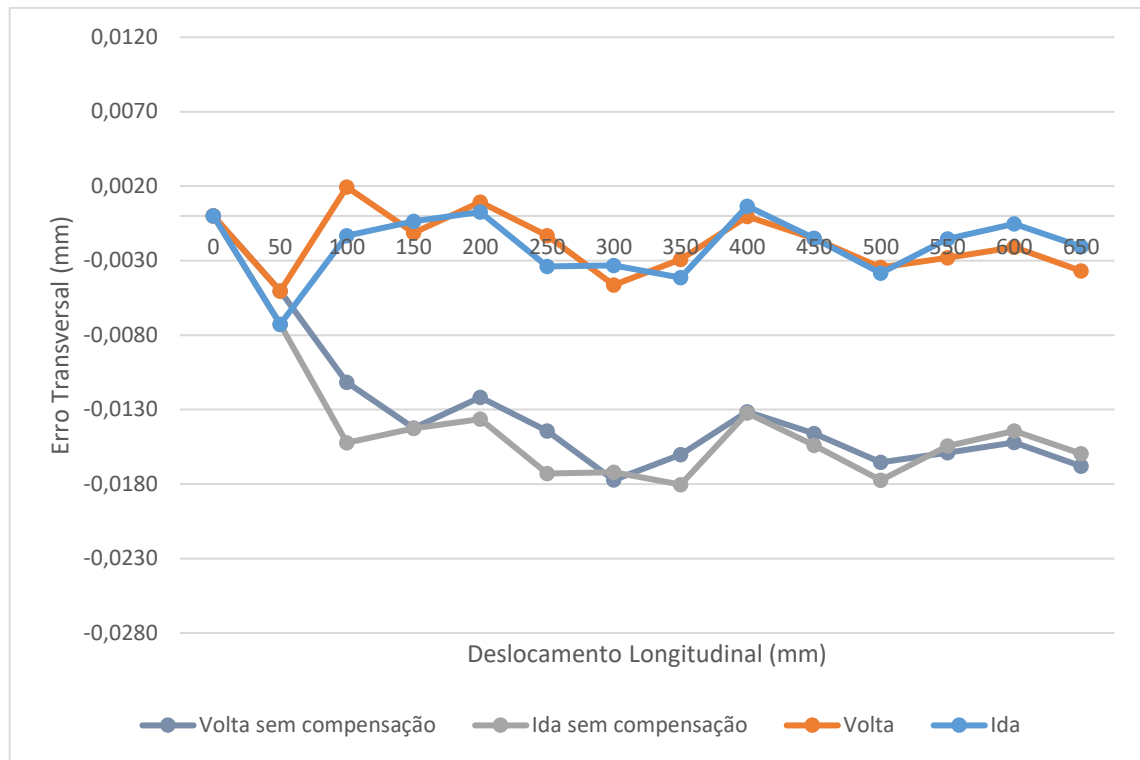
Figura 29 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado visualmente para posição T3
($x = -300,00$ mm)



Fonte: Autoria própria.

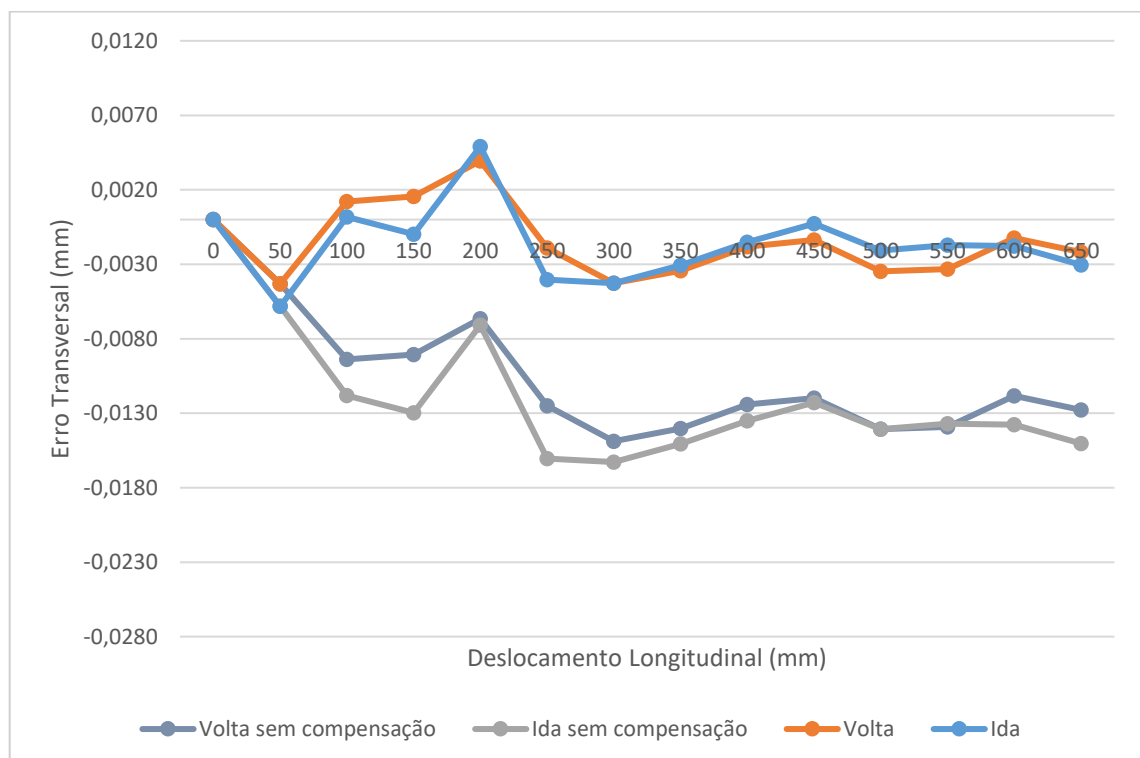
Além de realizar a compensação através do método visual proposto acima, outra maneira de se compensar o erro foi através da utilização dos valores médios de ida e volta dos apêndices G, H e I para as posições transversais T1, T2 e T3, respectivamente. Os gráficos dos erros compensados pelas médias podem ser visualizados nas Figuras 30, 31 e 32.

Figura 30 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado pelas médias da ida e volta para posição T1 ($x = 0,00$ mm)



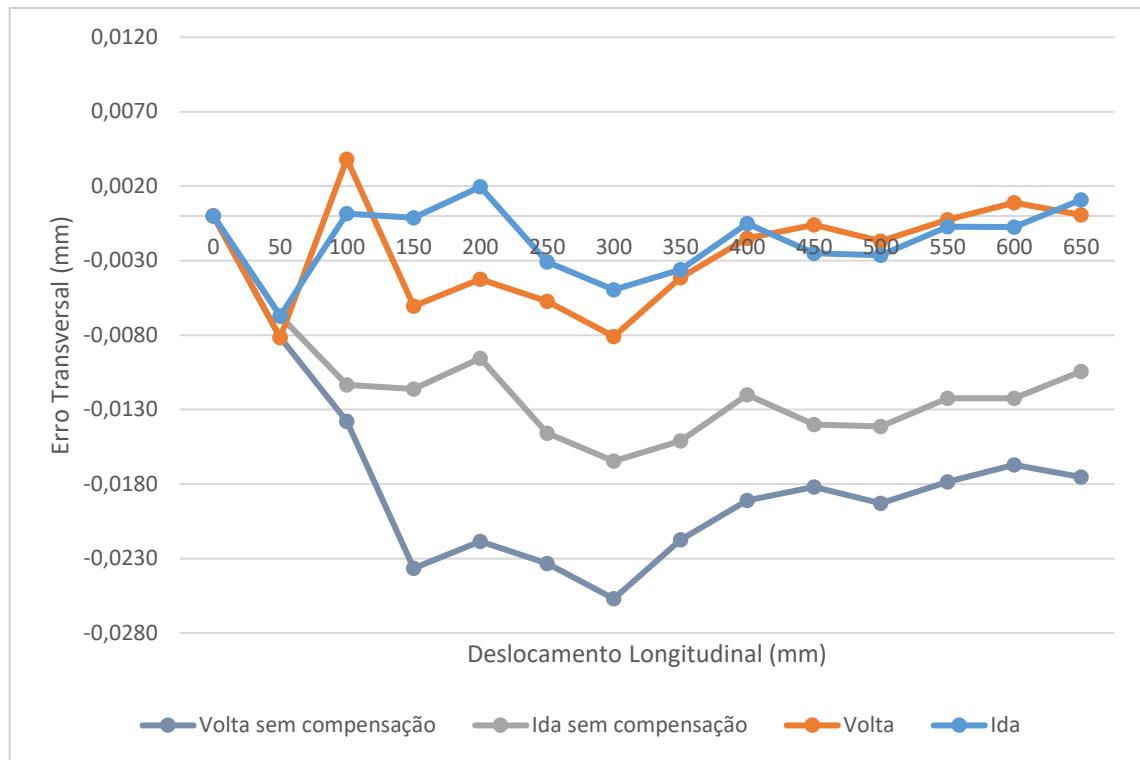
Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado pelas médias da ida e volta para posição T2 ($x = -150,00$ mm)



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado pelas médias da ida e volta para posição T3 (x = -300,00 mm)



Fonte: Autoria própria.

5.3. Aplicação das Ferramentas da Qualidade

Uma vez conhecido a soma do erro dos carros longitudinais, ferramentas da qualidade foram aplicadas com o intuito de auxiliar a identificação e interpretação dos efeitos dos erros geométricos encontrados e propor métodos para sustentar uma possível tomada de decisão com finalidade de controlar tais desvios.

5.3.1. Metodologia 5S

A utilização da metodologia 5S para realização do trabalho permitiu que o processo de montagem fosse padronizado, como mostra o fluxograma no apêndice K, e garantiu a repetibilidade do processo de modo a minimizar possíveis desvios de valores oriundos de uma montagem feita sem procedimentos estabelecidos.

Antes da montagem, os instrumentos eram dispostos sobre uma mesa (Figura 33) seguindo uma ordem lógica de tal maneira que sua organização auxiliasse no fluxo de montagem.

Figura 33 – Equipamentos e peças a serem montados organizados sob a mesa



Fonte: Autoria própria.

5.3.2. Folha de Verificação

A Tabela 2 apresenta os resultados sobre a quantidade de incidência de erros em determinadas faixas de valores.

Tabela 2 – Folha de verificação

| | Posição do carro transversal (mm) | | | Total |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------|-----------|
| | -300,00 | -150,00 | 0,00 | |
| -0,0300 mm a -0,0250 mm | I | | | 1 |
| -0,0250 mm a -0,0200 mm | IIII | | | 4 |
| -0,0200 mm a -0,0150 mm | IIII III | III | IIII IIIII IIII | 25 |
| -0,0150 mm a -0,0100 mm | IIII IIIII | IIII IIIII IIIII II | IIII IIIII | 37 |
| -0,0100 mm a -0,0050 mm | III | IIII | II | 10 |
| -0,0050 mm a 0,0000 mm | II | III | II | 7 |
| Total | 28 | 28 | 28 | 84 |

Fonte: Autoria própria.

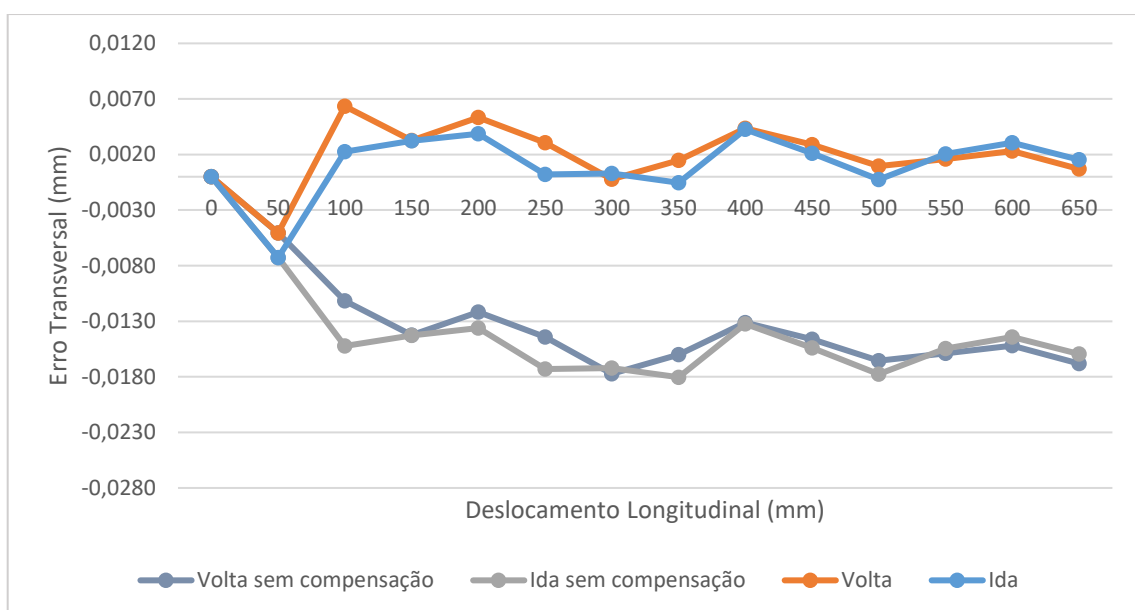
Através da folha de verificação, é percebido que aproximadamente 44% dos erros encontrados em todas as posições transversais medidas estão entre $x = -0,0150$ mm e $x = -0,0100$ mm. Portanto, caso um único ajuste deva ser feito para compensar todos os erros e melhorar a exatidão da máquina ferramenta, a melhor opção é realizar a compensação dentro dessa faixa do erro de posicionamento na direção transversal, visto que é a faixa com maior incidência dos erros analisados.

De forma análoga, pode ser estudado a incidência dos erros para cada uma das posições transversais, de forma individual. Assim, pode ser visto que cerca de 36% dos erros para a posição T3 e 61% dos erros para T2 são encontrados no intervalo entre $x = -0,0150$ mm e $-0,0100$ mm. Enquanto que, para a posição T1, 50% dos erros encontram-se entre $x = -0,0200$ mm e $-0,0150$ mm.

Portanto, conhecendo o intervalo com maior incidência de erros de posicionamento na direção transversal para cada uma das posições transversais estudadas, pode haver a mitigação dos desvios através de uma compensação dentro desses intervalos, melhorando significativamente a exatidão do processo produtivo.

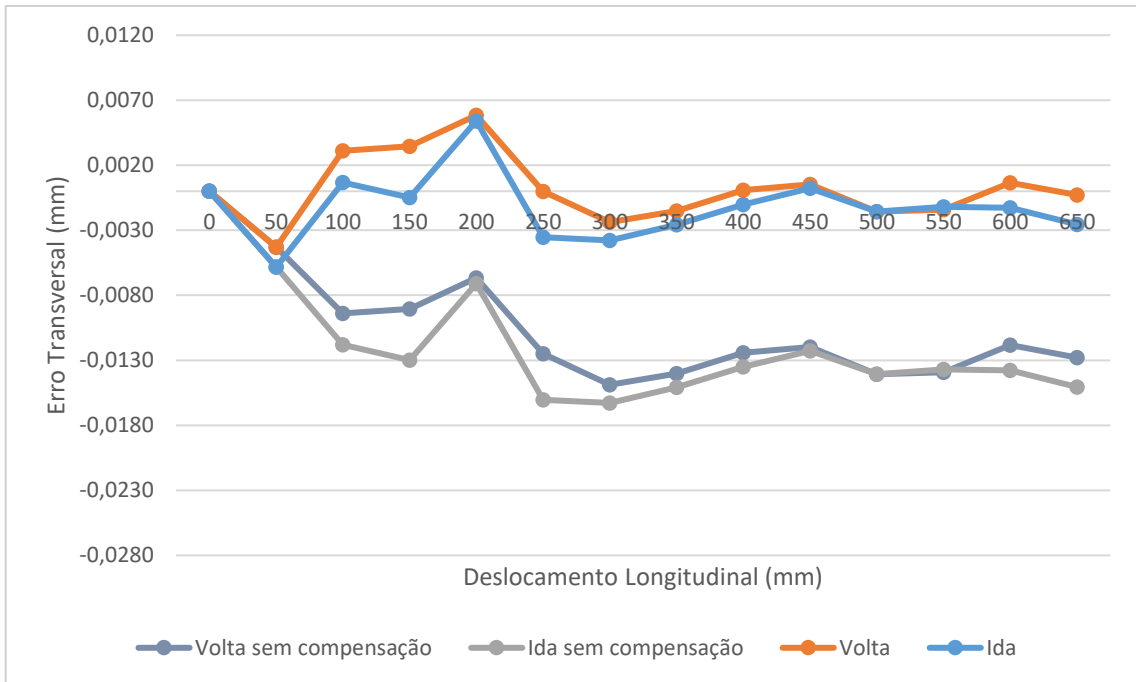
Com os dados da folha de verificação (Tabela 8), podem ser traçados gráficos (Figura 34, 35 e 36) dos erros de posicionamento na direção transversal encontrados para cada posição transversal estudada compensados pela média do intervalo com maior incidência encontrada para as posições T1, T2 e T3.

Figura 34 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados folha de verificação para posição T1 ($x = 0,00$ mm)



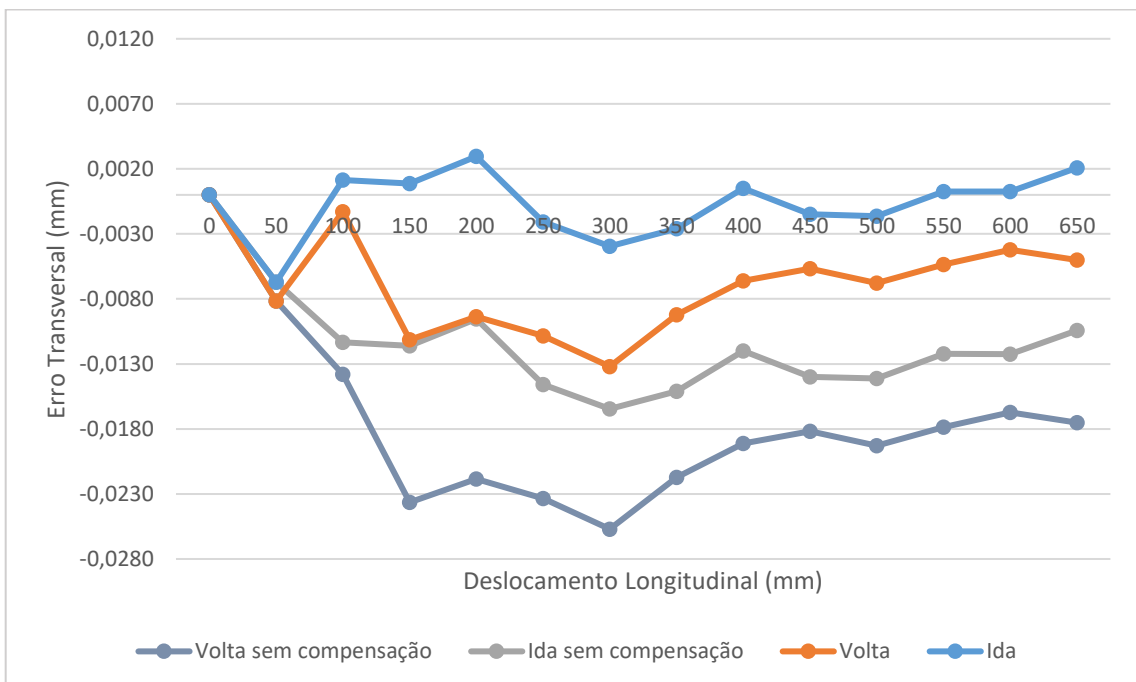
Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados da folha de verificação para posição T2 ($x = -150,00$ mm)



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados folha de verificação para posição T3 ($x = -300,00$ mm)



Fonte: Autoria própria.

5.3.3. Histograma

Foi buscado avaliar a frequência e dispersão dos valores obtidos através de um histograma a fim de observar e buscar conclusões referente ao comportamento do erro.

Procurou-se criar um histograma para cada posição do carro longitudinal utilizada para as medições e outro histograma apresentando os dados de todas as medidas em conjunto. Para isso, foi seguido o passo a passo exposto por Toledo *et al.* (2013), onde, após a coleta de dados, os valores obtidos foram ordenados de maneira crescente, avaliou-se a amplitude dos erros referentes as guias do carro principal, sendo essa a diferença entre o maior e o menor valor medido. Através da Equação 2 e a Equação 3 foram calculados o número de classes (N_c) e a amplitude das classes (A_c), respectivamente, presentes em cada histograma. A Tabela 3 mostra os valores da amplitude, número de classes e amplitude das classes consideradas em cada histograma.

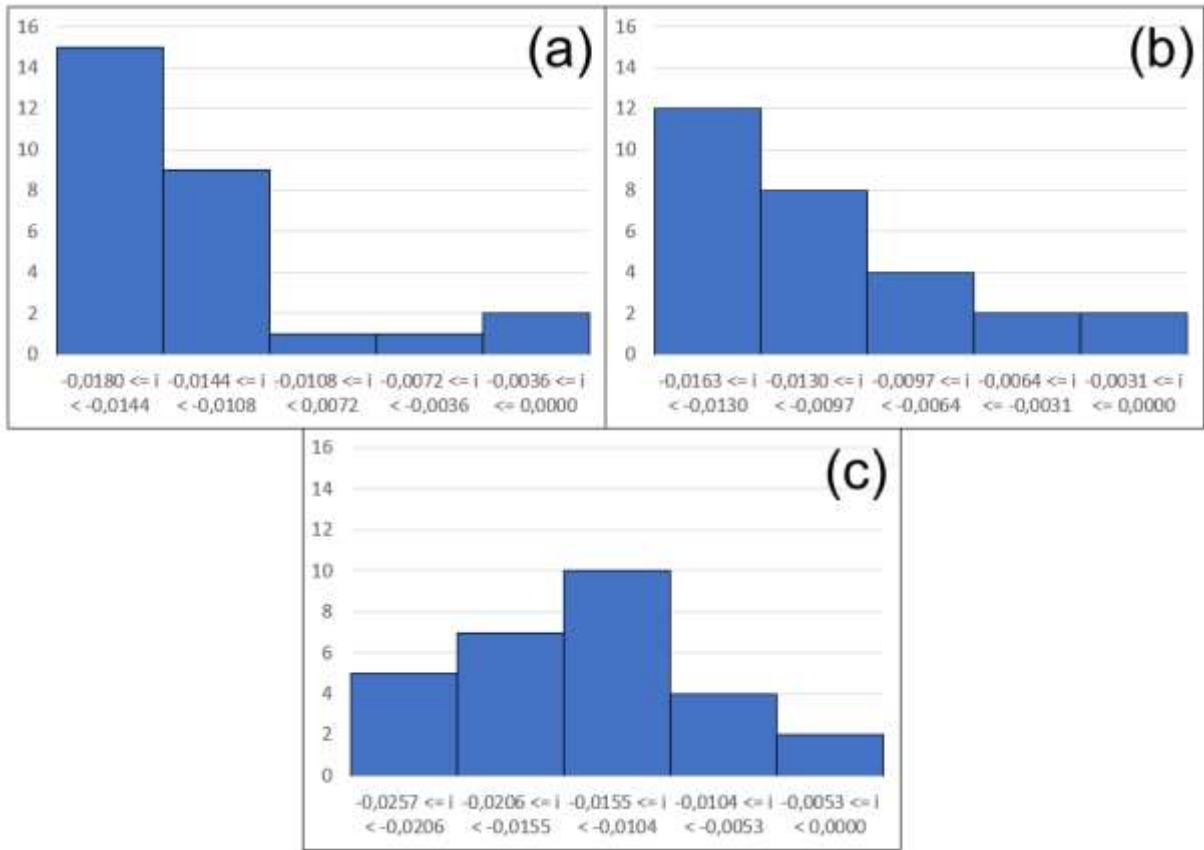
Com os cálculos necessários realizados, mediu-se a frequência de cada classe dentro dos valores de erro obtidos e foi montado os histogramas para cada posição do carro transversal utilizado, assim como para o conjunto de todos os dados obtidos, independentemente da posição transversal. A Figura 37 mostra os histogramas montados para as posições transversais T1, T2 e T3.

Tabela 3 – Dados considerados para os histogramas

| | Posição do carro transversal (mm) | | | Conjunto de todas as posições |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---------|--------|-------------------------------|
| | -300,00 | -150,00 | 0,00 | |
| Amplitude | 0,0180 | 0,0163 | 0,0257 | 0,0257 |
| Número de classes (NC) | 5 | 5 | 5 | 9 |
| Amplitude das classes (AC) | 0,0036 | 0,0033 | 0,0051 | 0,0028 |

Fonte: Autoria própria.

Figura 37 – Histogramas para medições realizadas em posições diferentes do carro transversal



Legenda: (a) T1 (x = 0,00 mm); (b) T2 (x = -150,00 mm); (c) T3 (x = -300,00 mm).

Fonte: Autoria própria.

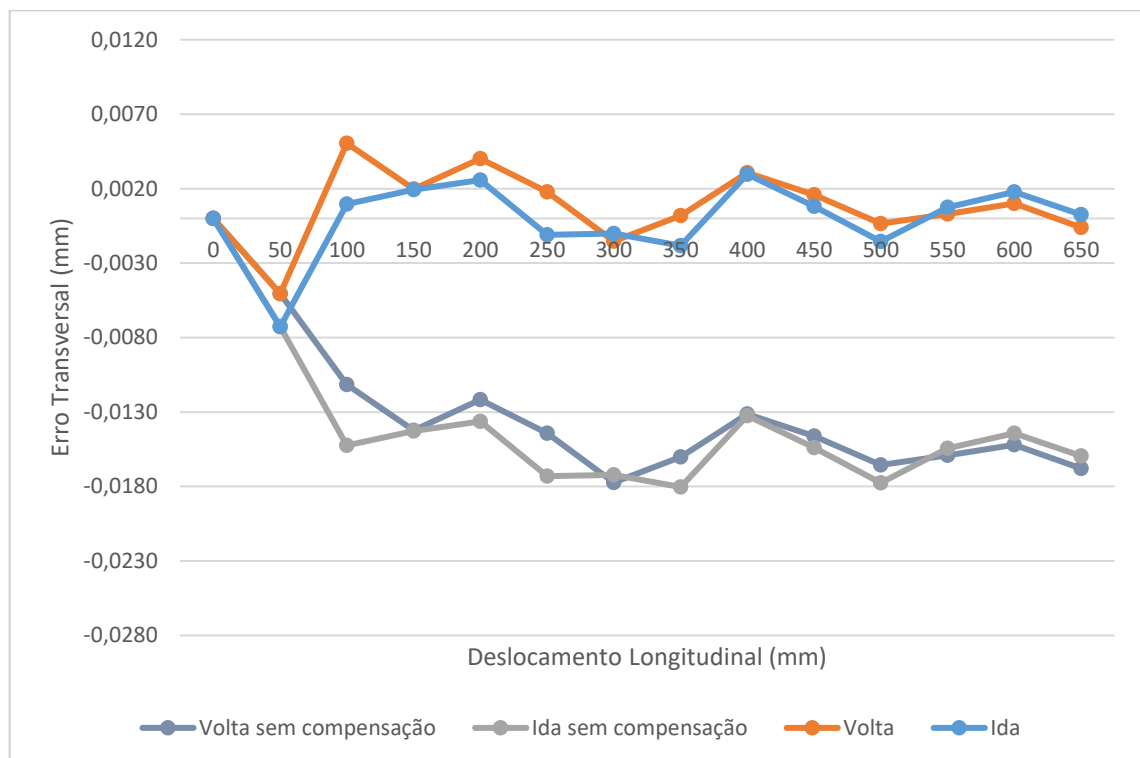
É notado uma tendência assimétrica positiva nos histogramas para as posições transversais em T1 e T2 (Figura 37(a) e Figura 37(b), respectivamente), enquanto para a posição transversal T3 (Figura 37(c)). Sendo assim, é possível concluir que para as posições transversais T1 e T2 o erro do carro longitudinal e transversal é, em sua maioria, na faixa de -0,0180 mm a -0,0144 mm e -0,0163 mm a -0,0130 mm respectivamente.

Para a posição transversal T3, a maior parte das medições realizadas mostraram erros em uma faixa entre -0,0155 mm e -0,0104 mm. Por outro lado, é notado a presença de uma faixa de valores de erro maiores que as observadas nos outros histogramas anteriores, superando -0,0180 mm e atingindo um erro máximo de -0,0257 mm.

Uma vez conhecendo a classe onde há a maior frequência de erros para cada uma das posições transversais, é possível realizar uma compensação dos desvios de posicionamento encontrados. Isso pode ser feito através da adição da média entre o

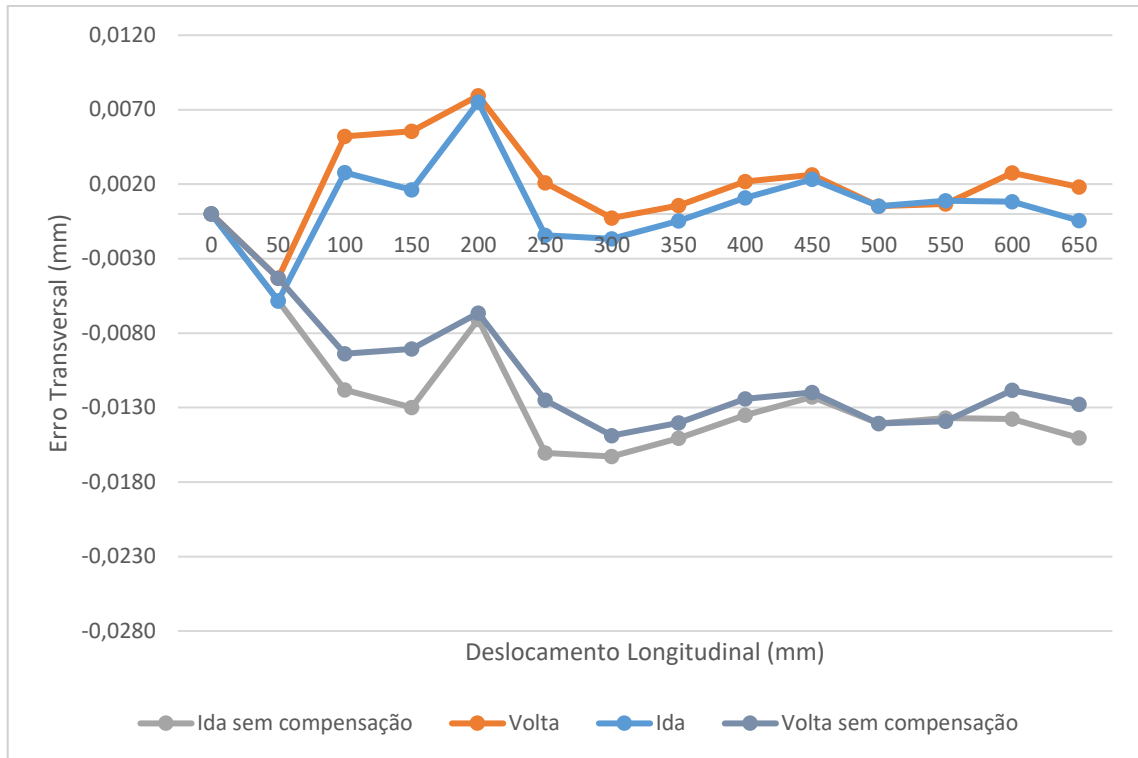
mínimo e máximo da classe de maior incidência à posição transversal da máquina ferramenta durante a usinagem. Ou seja, para as posições transversais T1, T2 e T3, os erros podem ser compensados acrescentando, respectivamente, 0,0162 mm, 0,0146 mm e 0,0104 mm à posição transversal da máquina ferramenta. A seguir são apresentados os gráficos (Figura 38, 39 e 40) dos erros de posicionamento na direção transversal, já compensados.

Figura 38 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do histograma para posição T1 ($x = 0,00$ mm)



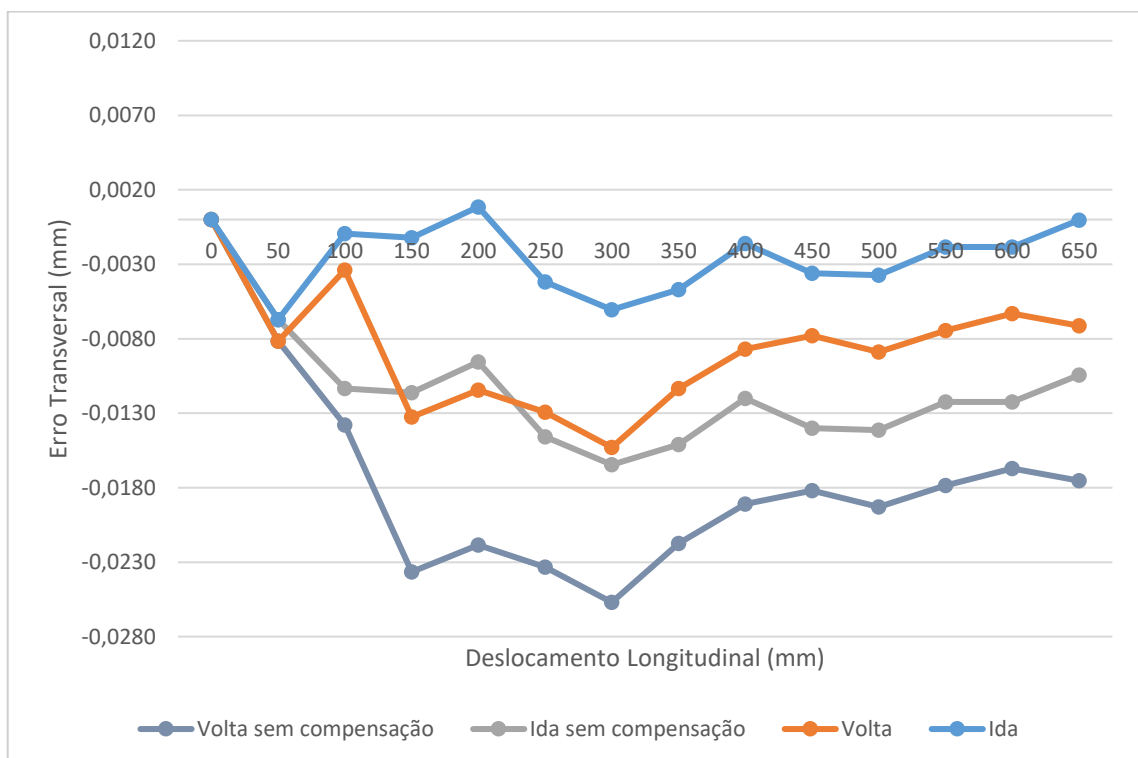
Fonte: Autoria própria.

Figura 39 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do histograma para posição T2 ($x = -150,00$ mm)



Fonte: Autoria própria.

Figura 40 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do histograma para posição T3 ($x = -300,00$ mm)

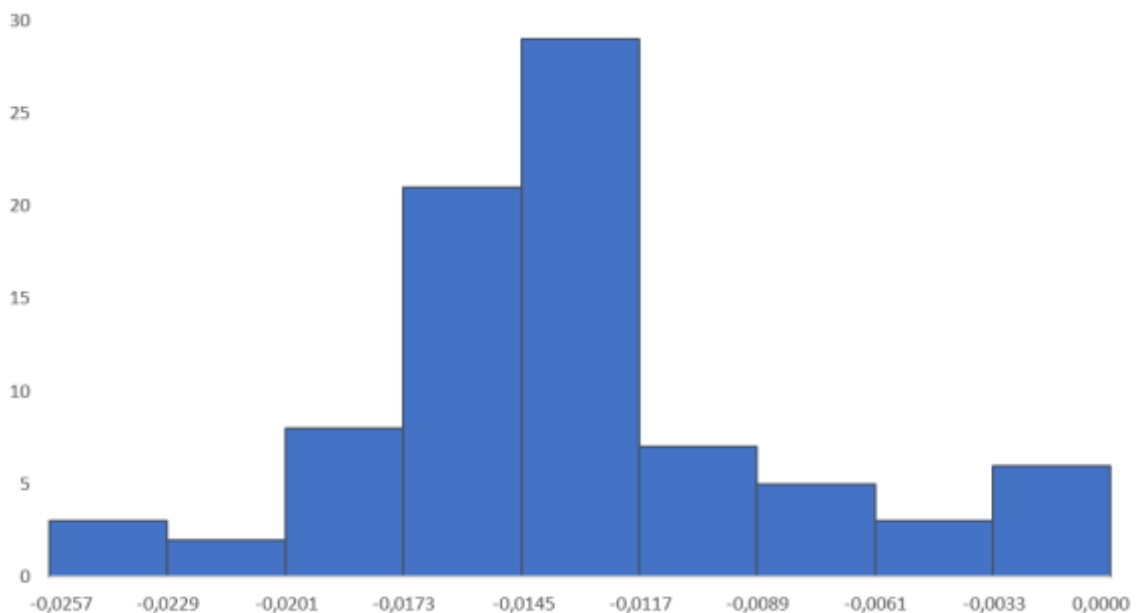


Fonte: Autoria própria.

Como pode ser visto, os erros em L1 e L2 não foram compensados pois, como visto nas Figuras 24, 25 e 26, o erro de posicionamento na direção transversal passa a ter valores mais uniformes na posição longitudinal a partir de L3 até L14 e, dessa forma, não seria conveniente realizar as compensações antes dessa localização, uma vez que poderia acabar aumentando a amplitude do erro nesses pontos.

O histograma com os dados dos erros das guias principais de todas as posições transversais medidas (Figura 41) mostra uma tendência central e conformidade em relação aos histogramas vistos na Figura 37, uma vez que 50 de 84 (59,52%) dos erros encontram-se dentro da faixa de -0,0173 mm a -0,0117 mm.

Figura 41 – Histograma para o conjunto de valores de todas as medições



Fonte: Autoria própria.

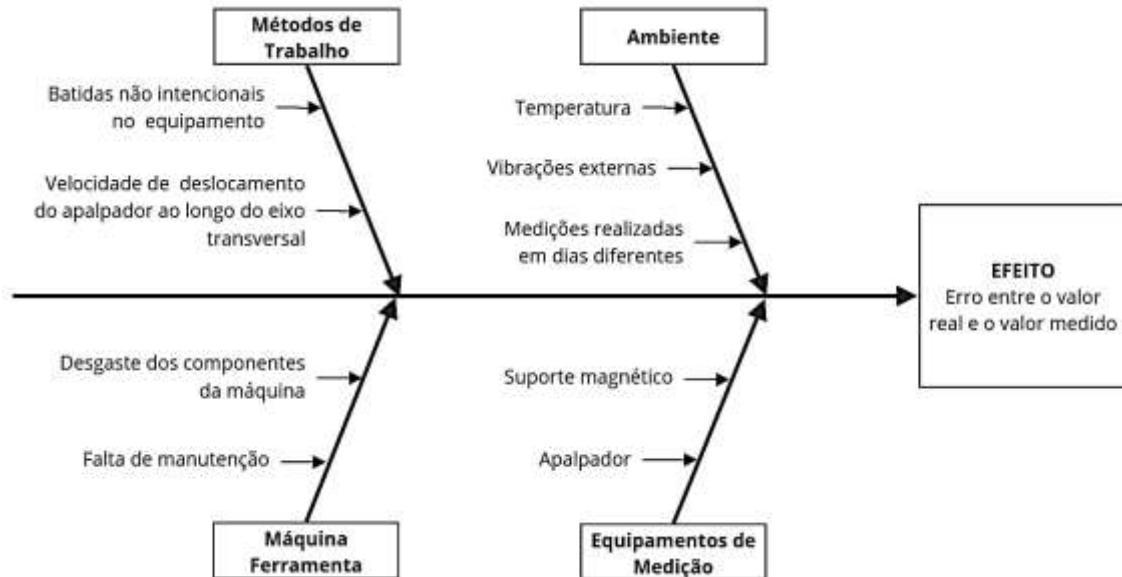
5.3.4. Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa, conhecido também como diagrama de causa e efeito, foi utilizado com o objetivo de encontrar possíveis causas tanto para o erro presente nas guias do carro transversal quanto para identificar as causas de possíveis divergências dos valores coletados referentes aos erros da guia do carro principal.

No caso de possíveis erros de medições e falhas no procedimento experimental encontrados na coleta de dados do erro da guia do carro longitudinal, o diagrama de Ishikawa com as possíveis causas e sub-causas pode ser visualizado na Figura 42.

Sendo assim, foram identificadas quatro causas e sete sub-causas que podem estar relacionadas a possíveis desvios nas medições feitas e imperfeições no processo experimental.

Figura 42 – Diagrama de Ishikawa das divergências nos erros medidos nas guias do carro longitudinal



Fonte: Autoria própria.

Sendo assim, foram classificadas as causas por ordem de influência sobre o efeito:

1. Suporte magnético;
2. Batidas não intencionais no equipamento;
3. Medições realizadas em dias diferentes;
4. Apalpador;
5. Temperatura;
6. Velocidade de deslocamento do apalpador ao longo do eixo transversal;

A principal fonte de erro identificada durante as medições do erro que poderia acabar gerando uma diferença entre os valores medidos e o valor real foi o suporte magnético, onde fora visualizado uma folga na fixação entre o braço hidráulico e a base magnética (Figura 43), fazendo com que o apalpador se deslocasse longitudinalmente em relação ao artefato de medição de forma não intencional, inutilizando as medições realizadas. Pode-se levantar a hipótese de tal erro ter

ocorrido de maneira não perceptível a olho nu ou de forma que acabara não sendo percebida pelo operador.

Figura 43 – Local de folga na fixação entre o braço hidráulico e a base magnética



Fonte: Autoria própria.

Em segundo lugar, batidas não intencionais no equipamento, em especial na manivela de regulação transversal do carro (Figura 44), pode ocasionar erros nos valores medidos. Nas medições realizadas foram identificados momentos em que o operador alterou a posição longitudinal do carro com batidas do corpo contra o torno horizontal mecânico, fazendo-se necessário repetir a coleta de dados. Além dos momentos em que foi percebido as batidas, pode ter havido problemas onde tal erro pode ter ocorrido e não foi identificado, causando um desvio dos valores coletados em relação aos valores reais. Tal acidente poderia ser evitado com a mudança de posição da manivela ou com a presença de uma trava para a manivela.

Figura 44 – Manivela de regulagem transversal do torno mecânico horizontal



Fonte: Autoria própria.

Outro fator que pode interferir na coleta do erro é a periodicidade de medição. No caso das medições realizadas neste estudo, os dados foram coletados em dias distintos para cada posição longitudinal a qual foram medidas, sendo assim, fatores como mudança de temperatura, variação de umidade e até desgaste do equipamento, caso tenham sido utilizados para outros fins entre as medições realizadas, podem acabar alterando a exatidão dos valores adquiridos.

O apalpador, por se tratar de um instrumento de precisão sensível a impactos, pode apresentar erros não desejados nas medições realizadas pelo equipamento caso já tenha sido batido, amassado ou danificado de alguma maneira. Portanto, é recomendado utilizar um apalpador cujo histórico seja conhecido, a fim de evitar um erro indetectável nas medições feitas por ele. Além disso, também é necessário moderação na força aplicada na sua fixação à base magnética, uma vez que isso poderá gerar deformações em sua superfície externa que, por consequência, irá danificá-lo e causar medições erradas.

A temperatura pode ter causado divergências nos erros medidos uma vez que, além da temperatura mudar a cada dia em que foram coletados os dados, pode ter havido variações de temperatura em um mesmo dia de medição. Para padronização

do processo de medição do erro, o ar-condicionado do laboratório foi ligado em 22 °C a fim de garantir uma uniformidade na temperatura do ambiente, porém foi notado durante as medições que a temperatura do ar-condicionado não era uniforme, variando de 21 °C até 23 °C (segundo o visor digital do aparelho) em momentos distintos da coleta de dados, o que pode contribuir para dilatação ou contração dos componentes do torno e instrumentos utilizados, ocasionando erro.

Por fim, outro fator que pode influenciar as medições é a velocidade a qual o apalpador é deslocado em relação ao eixo transversal. Caso o instrumento seja deslocado rápido demais a leitura de posição realizada pela máquina ferramenta pode não acompanhar tal variação em um período tão pequeno de tempo e, por consequência, gerar um erro de posição do carro transversal, acusando que está em uma posição que não condiz com o estado atual.

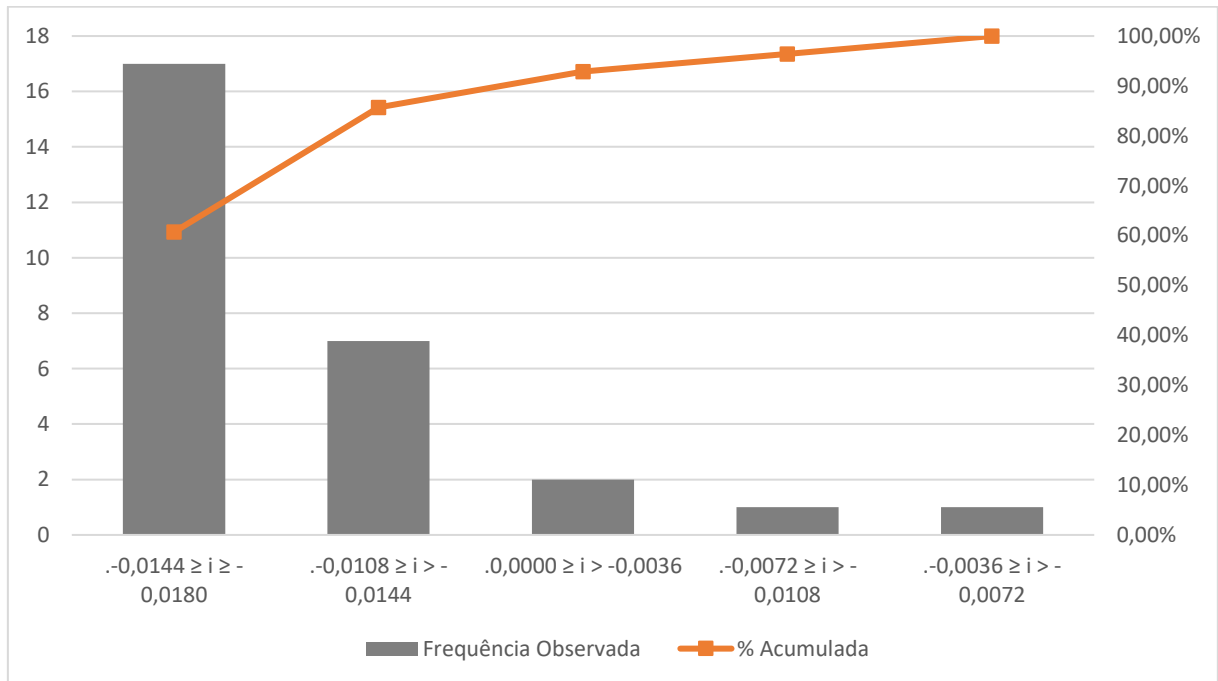
5.3.5. Análise de Pareto

A análise de Pareto tem como origem uma observação de seu autor, Vilfredo Pareto, onde foi levantado a ideia de 80/20, ou seja, 80% dos problemas tem origem em 20% das causas. O método foi utilizado foi aplicado para identificar a frequência acumulada dos desvios medidos a fim de verificar se a ideia proposta por Pareto poderia ser aplicada para os intervalos dos erros, ou seja, se 80% dos desvios medidos estão dentro de um intervalo com amplitude de 20% da variação total dos erros encontrados.

Para a montagem dos diagramas, foram utilizados os dados das medições realizadas para cada posição do carro transversal. Assim, calculou-se a amplitude dos erros e foram divididos em cinco classes (i), cada um representando 20% do intervalo total dos erros. Foram montados, então, quatro gráficos, sendo para as posições transversais T1, T2, T3 e para o conjunto de dados de todas as posições transversais utilizadas no estudo, onde, o eixo vertical esquerdo representa a escala de frequência dos intervalos de erro, o eixo vertical direito mostra, em percentual, a frequência acumulada das classes e o eixo horizontal dispõe os intervalos do erro em ordem decrescente em relação ao número de ocorrências observadas. As barras dos gráficos mostram o número observado de erros encontrados dentro de determinado intervalo e a linha vermelha mostra a frequência acumulada em porcentagem.

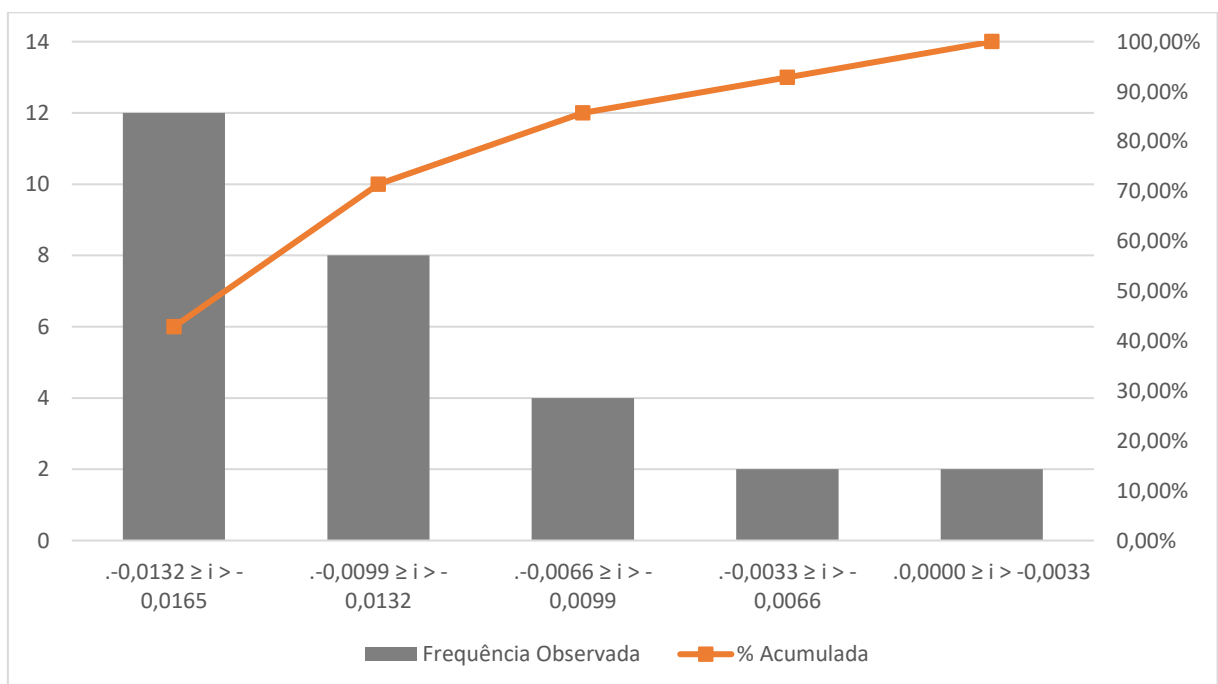
Os gráficos a seguir (Figura 45, 46, 47 e 48) mostram, respectivamente, o diagrama de Pareto para as medições feitas nas posições transversais T1, T2, T3 e para o conjunto de dados de todas as posições transversais:

Figura 45 – Diagrama de Pareto para T1 (x = 0,00 mm)



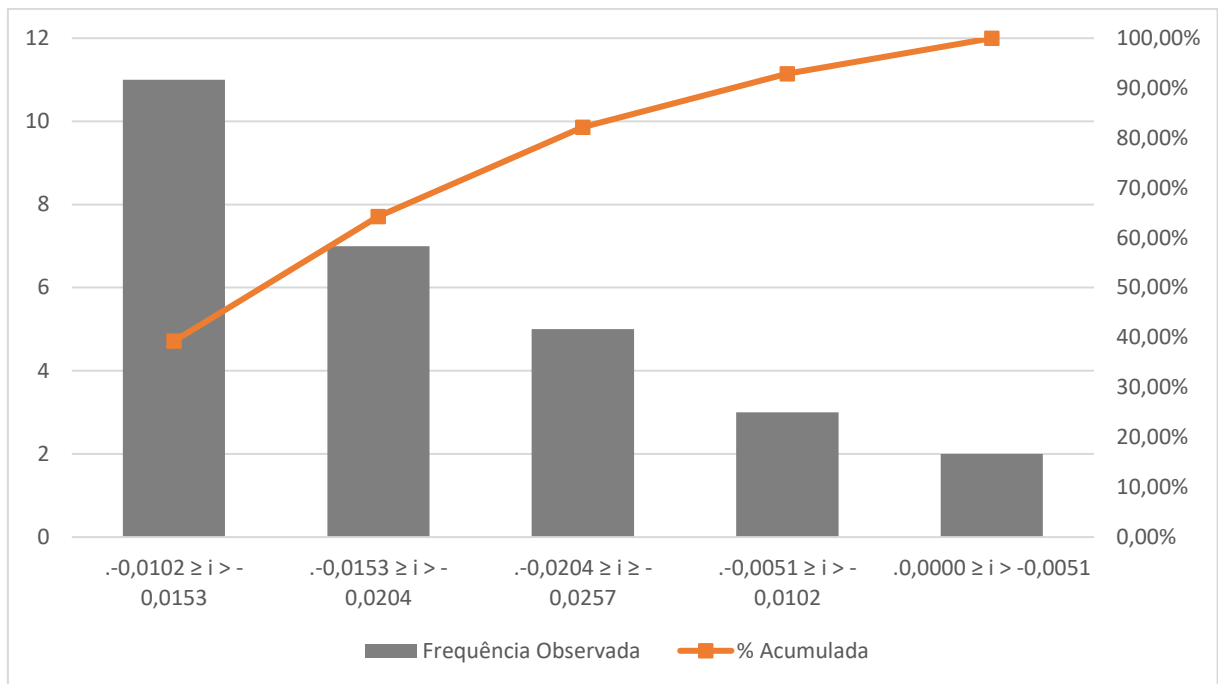
Fonte: Autoria própria.

Figura 46 – Diagrama de Pareto para T2 (x = -150,00 mm)



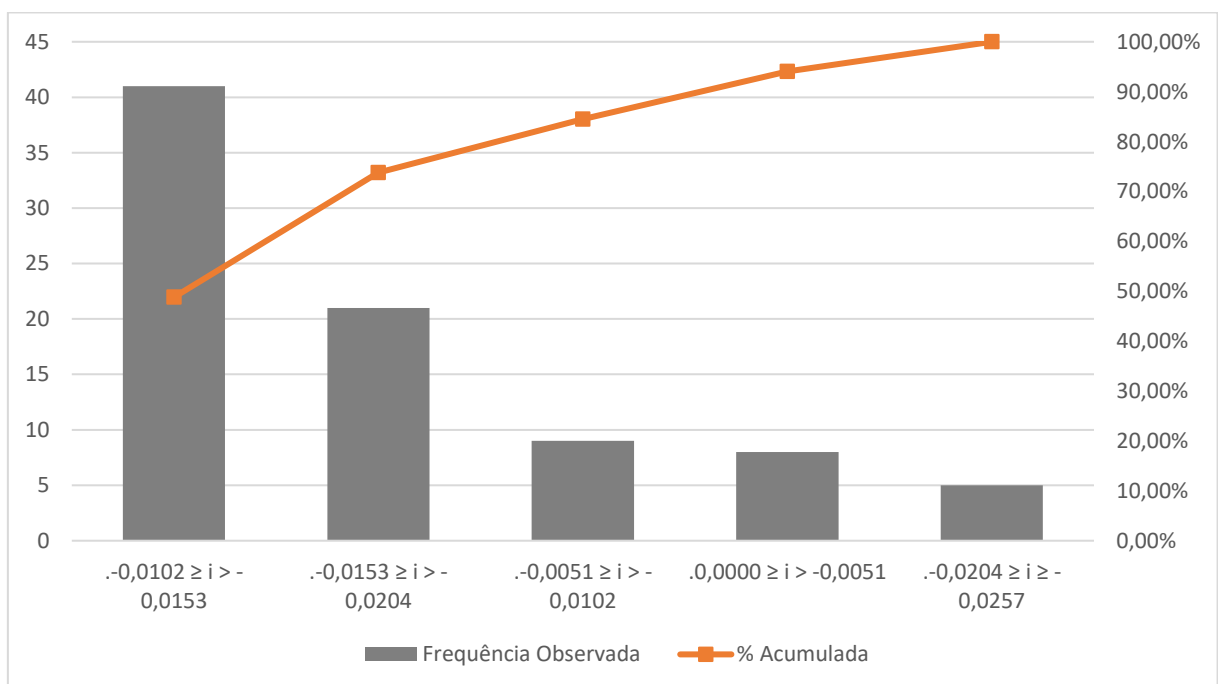
Fonte: Autoria própria.

Figura 47 – Diagrama de Pareto para T3 (x = -300,00 mm)



Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – Diagrama de Pareto para T1, T2 e T3



Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado nos gráficos mostrados (Figura 45, 46 e 47), apesar do gráfico para a posição T1 mais se aproximar, nenhum deles respeitam a hipótese do 80/20. Isso pode ocorrer uma vez que não foram levados em consideração as

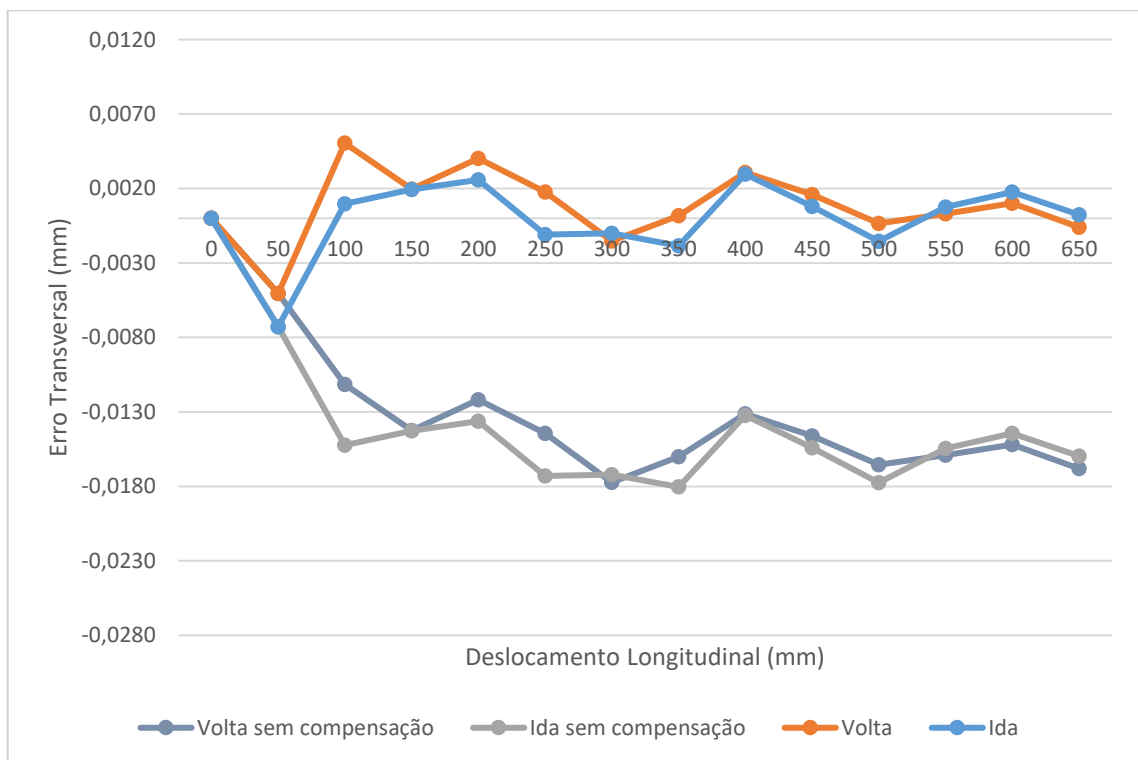
causas dos erros e sim sua amplitude. O diagrama de Pareto foi adaptado para que pudesse ser aplicado neste trabalho. Além disso, determinar a contribuição exata de cada erro é muito dispendiosa, pois é originado por diversas fontes. Isto demandaria instrumentações específicas, o que foge do escopo deste trabalho, que é apresentar um método prático de aplicação dos conceitos deste trabalho em ambiente industrial. Portanto, de maneira resumida, a ideia proposta por Vilfrido Pareto não se aplica em sua totalidade para a incidência de determinado intervalo de valores de erro.

Embora a aplicação do diagrama de Pareto seja uma adaptação para este trabalho, é possível distinguir através dos gráficos os intervalos de erro de maior incidência para cada posição transversal e, baseado nisso, propor uma compensação.

A compensação proposta a ser realizada é através da média do intervalo de maior frequência para cada posição transversal. Ou seja, uma compensação de 0,0162 mm para T1, 0,0148 mm para T2 e 0,0127 mm para T3.

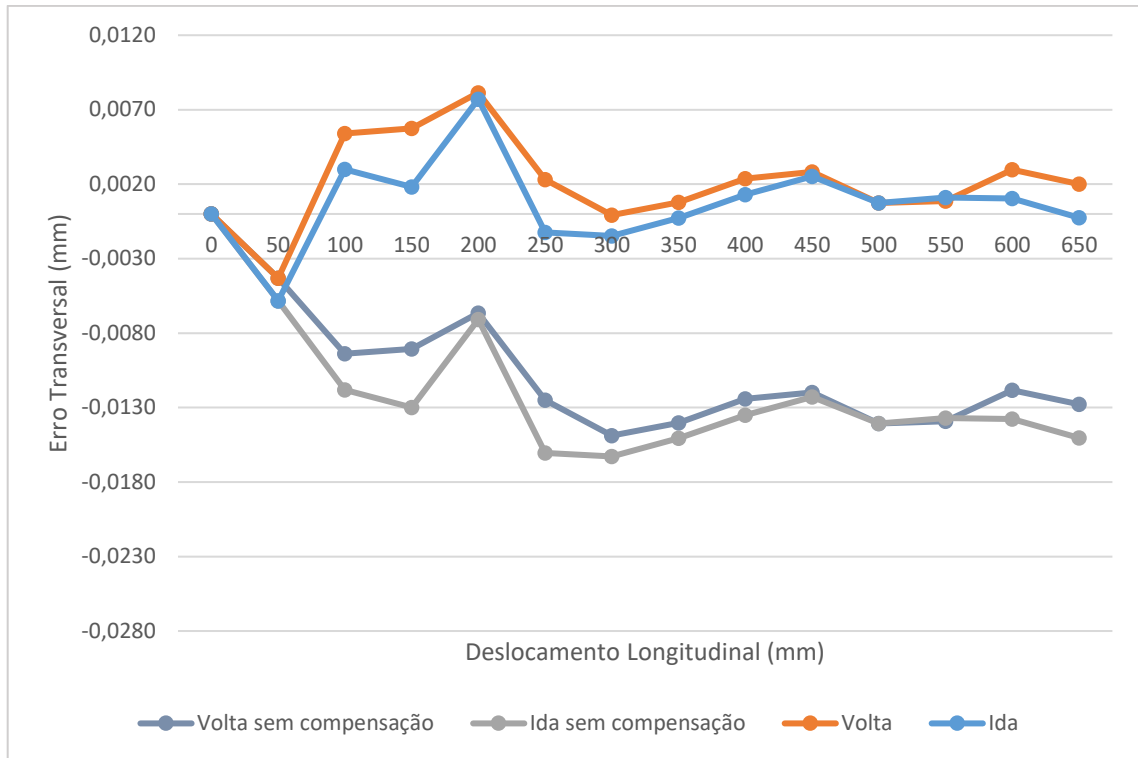
A seguir (Figura 49, 50 e 51) são apresentados os gráficos com as respectivas compensações:

Figura 49 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do diagrama de Pareto para posição T1 ($x = 0,00$ mm)



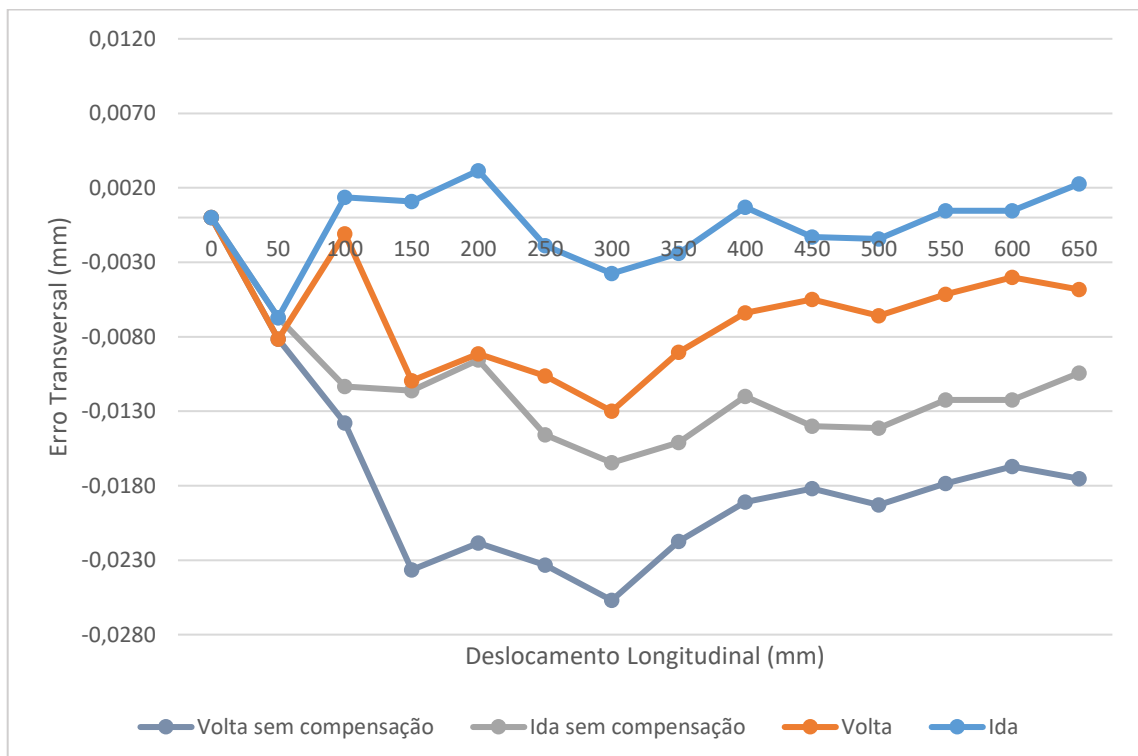
Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do diagrama de Pareto para posição T2 (x = -150,00 mm)



Fonte: Autoria própria.

Figura 51 – Erro de posicionamento na direção transversal compensado através dos dados do diagrama de Pareto para posição T3 (x = -300,00 mm)



Fonte: Autoria própria.

5.3.6. Discussão sobre os métodos de compensação de erros propostos

Através dos resultados obtidos na determinação do erro de posição na direção transversal e no uso das ferramentas da qualidade, foram estudados e propostos cinco tipos de compensação para os desvios encontrados nas posições transversais T1, T2 e T3. Para verificar qual dos métodos de compensação utilizados apresentaram os melhores resultados, foram calculados, para cada posição transversal e individualmente para ida e volta, os valores médios da amplitude média, máxima e mínima em relação ao eixo Z e a amplitude média, máxima e mínima entre as linhas de ida e volta (APÊNDICE J).

Através do APÊNDICE J, é possível verificar os resultados e chegar a uma conclusão do melhor método de compensação. Para isso, serão observados primeiro os valores médios da amplitude para ida, volta e a média entre as linhas de ida e volta e, em seguida, serão verificadas suas amplitudes máximas e mínimas para, assim, poder fundamentar uma resposta. Vale lembrar que, quanto mais próximo de zero, melhor.

Para a posição transversal T1, a compensação a partir do histograma e do diagrama de Pareto mostrou um melhor resultado para a amplitude média em relação ao eixo Z na ida, sendo -0,0001 mm o valor encontrado.

Porém, o método pela compensação visual trouxe o valor de -0,0002 mm para a amplitude média em relação ao eixo Z na volta, sendo esse o melhor valor. O segundo melhor valor acabou sendo 0,0008 mm obtido a partir do histograma e do diagrama de Pareto.

Já para a posição transversal T2, a compensação a partir do Histograma mostrou uma amplitude média em relação ao eixo Z para a ida de 0,0006 mm, enquanto o resultado 0,0002 mm foi mostrado para a volta pela compensação através dos dados da folha de verificação. Apesar dessas duas metodologias terem se mostrado bons resultados para a amplitude em relação ao eixo Z para ida e para volta, seus valores para os sentidos opostos se mostraram relativamente longes do eixo Z. 0,0020 mm e -0,0012 mm para o Histograma e a Folha de Verificação, respectivamente. Assim, os dois métodos foram igualmente satisfatórios, uma vez que suas amplitudes médias entre ida e volta são iguais (0,0014 mm).

Para a posição T3, houve um caso semelhante a T2, a compensação pelo diagrama de Pareto obteve um valor médio, em relação ao eixo Z, de -0,0006 mm

para a ida, porém, -0,0067 mm para volta. Enquanto foi obtido -0,0005 mm para volta e 0,0057 mm para ida pela compensação visual. O método que teve o melhor resultado geral, tanto para ida quanto para volta, foi a compensação pelas médias de ida e volta, sendo -0,0016 mm para ida e -0,0025 mm para a volta.

Analisando agora a amplitude média entre as linhas de ida e de volta, o melhor método para todas as posições transversais (T1, T2 e T3) foi a compensação pela média dos erros de ida e volta. Os valores do método encontrados para T1 e T2 foram de -0,0002 mm e, para T3, 0,0009 mm.

Apesar da compensação visual ter apresentado alguns resultados bons, é um tipo de compensação que pode ser descartado para uso, uma vez que, por se tratar de um método empírico, seu resultado dependerá exclusivamente da acuidade do ser humano que está aplicando o método. Portanto, a repetibilidade poderá ser baixa, uma vez que, como cada pessoa tem percepções diferentes, os resultados poderão ser diferentes para cada indivíduo.

6 CONCLUSÕES

Através do estudo realizado, o melhor método de compensação encontrado vai depender da posição transversal a ser usada e da aplicação a ser utilizada a máquina ferramenta. Com os resultados encontrados na seção 5.3.6., é possível afirmar que, para uma aplicação onde é desejado uma exatidão maior entre a posição transversal da ida e da volta, a compensação pela média dos erros de ida e volta foi a melhor metodologia encontrada para todas as posições transversais estudadas, uma vez que obteve as amplitudes médias entre ida e volta mais próximas de zero para todas as posições transversais estudadas.

Por outro lado, caso seja desejado realizar uma usinagem com tolerâncias dimensionais mais estreitas, o melhor método para T1 foi tanto a partir do Histograma quanto a partir do diagrama de Pareto, uma vez que foi obtido valores iguais para os dois. Para T2, a melhor compensação foi a partir da Folha de Verificação e, para T3, a compensação através da média dos erros de ida e volta mostraram os valores mais satisfatórios. Isso ocorreu pois, para cada uma de suas posições transversais, essas metodologias apresentaram os valores de amplitude em relação ao eixo Y, tanto para ida quanto para volta, mais próximos de zero.

Com os dados obtidos e discutidos, também vale a pena comentar o uso das ferramentas da qualidade neste trabalho e suas funções. Lembrando que as ferramentas utilizadas foram: 5S, fluxograma, folha de verificação, histograma, diagrama de Ishikawa e análise de Pareto.

A ferramenta 5S, juntamente com o fluxograma, foi útil para padronizar, organizar o local de trabalho e eliminar a bagunça, o que possibilita um melhor fluxo na execução de atividades, sem necessidades de paradas para verificação das etapas que estão sendo executadas. Conseqüentemente, o método pode reduzir os erros humanos e melhorar a repetibilidade da medição dos erros e de uma possível calibração futura. Além disso, a implementação da metodologia 5S permitiu a identificação de áreas de melhoria do processo de montagem dos equipamentos de medição como, por exemplo, a separação da montagem entre os materiais banhados a óleo e os equipamentos secos, possibilitando o manejo dos instrumentos secos sem que fossem contaminados com óleo

Tanto as ferramentas Folha de Verificação, Histograma e Diagrama de Pareto serviram para propósitos parecidos. Estratificar o erro de posição na direção

transversal, de acordo com os critérios definidos para cada metodologia, e mostrar de forma visual a ocorrência dos erros dentro de determinados intervalos de grandeza. E, uma vez tendo esses dados, foi possível verificar possibilidades de compensação para os erros e comparar qual foi mais efetivo, como discutido anteriormente na conclusão.

Por último, o diagrama de Ishikawa serviu para identificar fatores contribuintes para os possíveis erros de medições, fora o próprio desvio da máquina ferramenta. Através da utilização dessa metodologia, pôde ser identificado pontos com influências negativas externas que podem ter causado incertezas na medição.

Os principais fatores externos que podem contribuir para erros ou falhas nas medições foram: batidas não intencionais na manivela de ajuste transversal do carro, folga no braço magnético, temperatura do ambiente e medições realizadas em dias diferentes. Os dois primeiros pontos citados puderam ser notados durante as medições, uma vez que foi perceptível o erro causado. Quando ocorreram, as medições foram reiniciadas. Já a temperatura da sala e as medições em dias diferentes, apesar de não ser perceptível sua atuação, é importante considerar sua influência, uma vez que, mesmo com ar-condicionado, a temperatura da sala não era mantida constante, sendo possível verificar variações de temperatura pelo visor do dispositivo e, também, não é conhecido a precisão e exatidão do equipamento. Por fim, como as medições de cada posição transversal foram realizadas em dias diferentes, com temperaturas, umidade e outras condições diferentes, é muito provável que isso possa interferir de alguma forma nos resultados medidos.

Com isso, é possível propor soluções para tais problemas encontrados. Para as batidas não intencionais, uma trava ou dispositivo de segurança poderia ser implementada a fim de evitar mudanças não intencionais. O fator da folga do braço magnético poderia ser eliminado ao adicionar uma etapa de verificação do aperto do braço à base no fluxograma de montagem dos equipamentos. Por último, os fatores relacionados a climatização do ambiente de trabalho são elementos mais difíceis de controlar, necessitando de uma sala e equipamentos especiais para o controle da temperatura, umidade etc. Então, para reduzir esses elementos, seria necessário um investimento monetário relativamente alto.

Sabendo de tudo o que foi escrito acima, é possível verificar a importância dos métodos citados para identificação do erro. Através do uso das ferramentas da qualidade, foi possível padronizar e organizar o fluxo de montagem dos equipamentos

de medição para evitar variações, pôde ser identificado a incidência dos erros dentro de determinados intervalos e, a partir disso, conhecer as medidas longitudinais com os maiores erros e propor compensações baseado nos valores encontrados. Por fim, foi identificado os fatores externos que podem ter influenciado na coleta de dados.

Através das ferramentas da qualidade aplicadas, uma pessoa pode definir e padronizar o melhor método para a coleta de dados, identificar fatores influenciadores e, ao obter os erros, entender seu comportamento, compensar seus desvios e determinar as melhores posições longitudinais para o uso da máquina ferramenta.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 9000: sistemas de gestão da qualidade: fundamentos e vocabulário. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

AYRES, M. A. C. Folha de verificação: aplicabilidade desta ferramenta no serviço de higienização hospitalar. **Revista humanidades e inovação**, [s.l.], v. 6, n. 13, p. 9 - 16, 2019.

CAMPOS, R. *et al.* A Ferramenta 5S e suas Implicações na Gestão da Qualidade Total. 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/268011854_A_Ferramenta_5S_e_suas_Implicacoes_na_Gestao_da_Qualidade_Total. Acesso em: 14 fev. 2023.

CARVALHO, M. *et al.* **Gestão da qualidade**: teoria e casos. 2. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. 430 p.

CHEN, Q. *et al.* Separation and compensation of geometric errors of rotary axis in 5-axis ultra-precision machine tool by empirical mode decomposition method. **Journal Of Manufacturing Processes**, [s.l.], v. 68, p. 1509-1523, ago. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.057>.

DI GIACOMO, B. *et al.* Estudo inicial dos erros cíclicos nas máquinas de medir a três coordenadas. **Revista Iberoamericana de ingenieria mecânica**, São Carlos, v. 9, ed. 3, p. 103-109, 8 out. 2004.

EVANS, C. J.; HOCKEN, R. J.; ESTLER, W. Tyler. Self-Calibration: reversal, redundancy, error separation, and absolute testing. **Cirp Annals**, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 617-634, 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60515-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60515-0).

GOMES, M. T. O. *et al.* A indústria de máquinas-ferramenta. **BNDES Setorial**, [s.l.], p. 52-59, 2002. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/3341/1/BS%2002%20A%20Ind%C3%BAstria%20de%20M%C3%A1quinas-Ferramenta_P.pdf. Acesso em: 29 jun. 2023.

LUO, X. *et al.* Kinematic calibration of a 5-axis parallel machining robot based on dimensionless error mapping matrix. **Robotics And Computer-Integrated**

Manufacturing, [s.l.], v. 70, p. 102115, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102115>.

MAREŠ, M. *et al.* Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece. **Precision Engineering**, [s.l.], v. 66, p. 21-30, nov. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.06.010>.

MORAIS, C. A. G. de. **Sistemas Redundantes de Medição para Separação de Erros em Máquinas de Medir por Coordenadas**. 2015. 107 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

NAKAZATO, M. K. **Estudo dos Erros Cíclicos nas Máquinas de Medir a Três Coordenadas**. 2003. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

PRANIEWICZ, M.; KURFESS, T. R.; SALDANA, C. Error qualification for multi-axis BC-type machine tools. **Journal Of Manufacturing Systems**, [s.l.], v. 52, p. 211-216, jul. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.03.004>.

PUTZ, M. *et al.* Thermal errors in milling: comparison of displacements of the machine tool, tool and workpiece. **Procedia Cirp**, [s.l.], v. 82, p. 389-394, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.168>.

ROOKER, T. *et al.* Error motion trajectory-driven diagnostics of kinematic and non-kinematic machine tool faults. **Mechanical Systems And Signal Processing**, [s.l.], v. 164, p. 108271, fev. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108271>.

SCHWENKE, H.; KNAPP, W.; HAITJEMA, H.; WECKENMANN, A.; SCHMITT, R.; DELBRESSINE, F.. Geometric error measurement and compensation of machines—An update. **Cirp Annals**, [s.l.], v. 57, n. 2, p. 660-675, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.008>.

STOETERAU, R. L. **Introdução ao projeto de máquina-ferramentas modernas**. Florianópolis: UFSC, 2004. 114 p.

TOLEDO, J. C. *et al.* **Qualidade: Gestão e Métodos**. 1. ed. São José, 2013. 371 p.

WEI, X. *et al.* Sub-regional thermal error compensation modeling for CNC machine tool worktables. **Precision Engineering**, [s.l.], v. 73, p. 313-325, jan. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.10.007>.

WOZNIAK, A.; JANKOWSKI, M.. Variable speed compensation method of errors of probes for CNC machine tools. **Precision Engineering**, [s.l.], v. 49, p. 316-321, jul. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.03.001>.

XIA, C. *et al.* Crucial geometric error compensation towards gear grinding accuracy enhancement based on simplified actual inverse kinematic model. **International Journal Of Mechanical Sciences**, [s.l.], v. 169, p. 105319, mar. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105319>.

ZHANG, G.; OUYANG, R.; LU, B.; HOCKEN, R.; VEALE, R.; DONMEZ, A.. A Displacement Method for Machine Geometry Calibration. **Cirp Annals**, [s.l.], v. 37, n. 1, p. 515-518, 1988. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)61690-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61690-4).

ZUO, X. *et al.* Integrated Geometric Error Compensation of Machining Processes on CNC Machine Tool. **Procedia Cirp**, [s.l.], v. 8, p. 135-140, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.078>.

APÊNDICE A – Dados de média e desvio padrão obtidos através das medições realizadas com o carro transversal em T1

| Ida (mm) | Média da variação (mm) | Desvio padrão da variação (mm) |
|-------------------|-----------------------------------|---|
| 0 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0206 | 0,0011 |
| 100 | 0,0500 | 0,0026 |
| 150 | 0,0892 | 0,0039 |
| 200 | 0,1237 | 0,0041 |
| 250 | 0,1431 | 0,0030 |
| 300 | 0,1680 | 0,0008 |
| 350 | 0,1732 | 0,0038 |
| 400 | 0,1859 | 0,0011 |
| 450 | 0,1829 | 0,0027 |
| 500 | 0,1748 | 0,0044 |
| 550 | 0,1456 | 0,0012 |
| 600 | 0,1265 | 0,0013 |
| 650 | 0,0951 | 0,0030 |
| 700 | 0,1111 | 0,0018 |
| Volta (mm) | | |
| 0 | -0,0102 | 0,0021 |
| 50 | 0,0128 | 0,0033 |
| 100 | 0,0443 | 0,0041 |
| 150 | 0,0798 | 0,0018 |
| 200 | 0,1159 | 0,0020 |
| 250 | 0,1369 | 0,0036 |
| 300 | 0,1587 | 0,0018 |
| 350 | 0,1667 | 0,0034 |
| 400 | 0,1777 | 0,0032 |
| 450 | 0,1756 | 0,0008 |
| 500 | 0,1682 | 0,0033 |
| 550 | 0,1375 | 0,0015 |
| 600 | 0,1184 | 0,0039 |
| 650 | 0,0871 | 0,0028 |
| 700 | 0,1112 | 0,0008 |

APÊNDICE B – Dados de média e desvio padrão obtidos através das medições realizadas com o carro transversal em T2

| Ida (mm) | Média da variação (mm) | Desvio padrão da variação (mm) |
|-------------------|-----------------------------------|---|
| 0 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0197 | 0,0009 |
| 100 | 0,0487 | 0,0015 |
| 150 | 0,0834 | 0,0028 |
| 200 | 0,1207 | 0,0027 |
| 250 | 0,1325 | 0,0021 |
| 300 | 0,1548 | 0,0018 |
| 350 | 0,1596 | 0,0017 |
| 400 | 0,1667 | 0,0024 |
| 450 | 0,1647 | 0,0018 |
| 500 | 0,1548 | 0,0018 |
| 550 | 0,1213 | 0,0021 |
| 600 | 0,0988 | 0,0023 |
| 650 | 0,0653 | 0,0029 |
| 700 | 0,0811 | 0,0017 |
| Volta (mm) | | |
| 0 | -0,0058 | 0,0035 |
| 50 | 0,0156 | 0,0021 |
| 100 | 0,0456 | 0,0034 |
| 150 | 0,0821 | 0,0032 |
| 200 | 0,1161 | 0,0019 |
| 250 | 0,1311 | 0,0020 |
| 300 | 0,1514 | 0,0022 |
| 350 | 0,1561 | 0,0030 |
| 400 | 0,1634 | 0,0022 |
| 450 | 0,1608 | 0,0020 |
| 500 | 0,1507 | 0,0027 |
| 550 | 0,1172 | 0,0021 |
| 600 | 0,0970 | 0,0027 |
| 650 | 0,0640 | 0,0027 |
| 700 | 0,0809 | 0,0019 |

APÊNDICE C – Dados de média e desvio padrão obtidos através das medições realizadas com o carro transversal em T3

| Ida (mm) | Média da variação (mm) | Desvio padrão da variação (mm) |
|-------------------|-----------------------------------|---|
| 0 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0197 | 0,0009 |
| 100 | 0,0487 | 0,0015 |
| 150 | 0,0834 | 0,0028 |
| 200 | 0,1207 | 0,0027 |
| 250 | 0,1325 | 0,0021 |
| 300 | 0,1548 | 0,0018 |
| 350 | 0,1596 | 0,0017 |
| 400 | 0,1667 | 0,0024 |
| 450 | 0,1647 | 0,0018 |
| 500 | 0,1548 | 0,0018 |
| 550 | 0,1213 | 0,0021 |
| 600 | 0,0988 | 0,0023 |
| 650 | 0,0653 | 0,0029 |
| 700 | 0,0811 | 0,0017 |
| Volta (mm) | | |
| 0 | -0,0058 | 0,0035 |
| 50 | 0,0156 | 0,0021 |
| 100 | 0,0456 | 0,0034 |
| 150 | 0,0821 | 0,0032 |
| 200 | 0,1161 | 0,0019 |
| 250 | 0,1311 | 0,0020 |
| 300 | 0,1514 | 0,0022 |
| 350 | 0,1561 | 0,0030 |
| 400 | 0,1634 | 0,0022 |
| 450 | 0,1608 | 0,0020 |
| 500 | 0,1507 | 0,0027 |
| 550 | 0,1172 | 0,0021 |
| 600 | 0,0970 | 0,0027 |
| 650 | 0,0640 | 0,0027 |
| 700 | 0,0809 | 0,0019 |

APÊNDICE D – Dados obtidos com a remoção do erro de desalinhamento proveniente da fixação imperfeita do artefato com o carro transversal em T1

| Ida (mm) | Valores médios da medição (mm) | Valores médios com remoção de desalinhamento (mm) |
|-------------------|--------------------------------|---|
| 0 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0206 | 0,0131 |
| 100 | 0,0500 | 0,0351 |
| 150 | 0,0892 | 0,0669 |
| 200 | 0,1237 | 0,0939 |
| 250 | 0,1431 | 0,1058 |
| 300 | 0,1680 | 0,1234 |
| 350 | 0,1732 | 0,1211 |
| 400 | 0,1859 | 0,1263 |
| 450 | 0,1829 | 0,1159 |
| 500 | 0,1748 | 0,1004 |
| 550 | 0,1456 | 0,0637 |
| 600 | 0,1265 | 0,0372 |
| 650 | 0,0951 | -0,0017 |
| Volta (mm) | | |
| 0 | -0,0102 | 0,0000 |
| 50 | 0,0128 | 0,0154 |
| 100 | 0,0443 | 0,0391 |
| 150 | 0,0798 | 0,0669 |
| 200 | 0,1159 | 0,0953 |
| 250 | 0,1369 | 0,1087 |
| 300 | 0,1587 | 0,1228 |
| 350 | 0,1667 | 0,1231 |
| 400 | 0,1777 | 0,1264 |
| 450 | 0,1756 | 0,1167 |
| 500 | 0,1682 | 0,1015 |
| 550 | 0,1375 | 0,0632 |
| 600 | 0,1184 | 0,0365 |
| 650 | 0,0871 | -0,0025 |

APÊNDICE E – Dados obtidos com a remoção do erro de desalinhamento proveniente da fixação imperfeita do artefato com o carro transversal em T2

| Ida (mm) | Valores médios da medição (mm) | Valores médios com remoção de desalinhamento (mm) |
|-------------------|--------------------------------|---|
| 0 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0197 | 0,0146 |
| 100 | 0,0487 | 0,0385 |
| 150 | 0,0834 | 0,0682 |
| 200 | 0,1207 | 0,1004 |
| 250 | 0,1325 | 0,1071 |
| 300 | 0,1548 | 0,1243 |
| 350 | 0,1596 | 0,1241 |
| 400 | 0,1667 | 0,1260 |
| 450 | 0,1647 | 0,1190 |
| 500 | 0,1548 | 0,1040 |
| 550 | 0,1213 | 0,0654 |
| 600 | 0,0988 | 0,0379 |
| 650 | 0,0653 | -0,0008 |
| Volta (mm) | | |
| 0 | -0,0058 | 0,0000 |
| 50 | 0,0156 | 0,0161 |
| 100 | 0,0456 | 0,0409 |
| 150 | 0,0821 | 0,0721 |
| 200 | 0,1161 | 0,1008 |
| 250 | 0,1311 | 0,1106 |
| 300 | 0,1514 | 0,1257 |
| 350 | 0,1561 | 0,1251 |
| 400 | 0,1634 | 0,1271 |
| 450 | 0,1608 | 0,1193 |
| 500 | 0,1507 | 0,1040 |
| 550 | 0,1172 | 0,0652 |
| 600 | 0,0970 | 0,0398 |
| 650 | 0,0640 | 0,0015 |

APÊNDICE F – Dados obtidos com a remoção do erro de desalinhamento proveniente da fixação imperfeita do artefato com o carro transversal em T3

| Ida (mm) | Valores médios da medição (mm) | Valores médios com remoção de desalinhamento (mm) |
|-------------------|--------------------------------|---|
| 0 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0237 | 0,0137 |
| 100 | 0,0590 | 0,0390 |
| 150 | 0,0996 | 0,0696 |
| 200 | 0,1380 | 0,0980 |
| 250 | 0,1586 | 0,1086 |
| 300 | 0,1842 | 0,1241 |
| 350 | 0,1941 | 0,1240 |
| 400 | 0,2076 | 0,1275 |
| 450 | 0,2074 | 0,1173 |
| 500 | 0,2041 | 0,1040 |
| 550 | 0,1770 | 0,0669 |
| 600 | 0,1595 | 0,0394 |
| 650 | 0,1340 | 0,0039 |
| Volta (mm) | | |
| 0 | -0,0041 | 0,0000 |
| 50 | 0,0186 | 0,0123 |
| 100 | 0,0533 | 0,0365 |
| 150 | 0,0847 | 0,0575 |
| 200 | 0,1232 | 0,0856 |
| 250 | 0,1478 | 0,0998 |
| 300 | 0,1733 | 0,1149 |
| 350 | 0,1862 | 0,1174 |
| 400 | 0,1996 | 0,1204 |
| 450 | 0,2027 | 0,1131 |
| 500 | 0,1988 | 0,0988 |
| 550 | 0,1717 | 0,0613 |
| 600 | 0,1558 | 0,0349 |
| 650 | 0,1280 | -0,0032 |

APÊNDICE G – Erro da guia do carro principal posicionado em T1

| Posição transversal T1 | | | |
|----------------------------|---|-------------------------|--|
| y _i (mm) Ida | x _i com remoção do desalinhamento (mm) | Perfil do artefato (mm) | Erro de posicionamento na direção transversal (mm) |
| 0 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0131 | 0,0204 | -0,0073 |
| 100 | 0,0351 | 0,0503 | -0,0152 |
| 150 | 0,0669 | 0,0812 | -0,0143 |
| 200 | 0,0939 | 0,1075 | -0,0136 |
| 250 | 0,1058 | 0,1231 | -0,0173 |
| 300 | 0,1234 | 0,1406 | -0,0172 |
| 350 | 0,1211 | 0,1391 | -0,0180 |
| 400 | 0,1263 | 0,1396 | -0,0132 |
| 450 | 0,1159 | 0,1313 | -0,0154 |
| 500 | 0,1004 | 0,1181 | -0,0177 |
| 550 | 0,0637 | 0,0791 | -0,0154 |
| 600 | 0,0372 | 0,0517 | -0,0144 |
| 650 | -0,0017 | 0,0143 | -0,0160 |
| Volta | | | |
| 0 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0154 | 0,0204 | -0,0050 |
| 100 | 0,0391 | 0,0503 | -0,0112 |
| 150 | 0,0669 | 0,0812 | -0,0142 |
| 200 | 0,0953 | 0,1075 | -0,0122 |
| 250 | 0,1087 | 0,1231 | -0,0144 |
| 300 | 0,1228 | 0,1406 | -0,0177 |
| 350 | 0,1231 | 0,1391 | -0,0160 |
| 400 | 0,1264 | 0,1396 | -0,0131 |
| 450 | 0,1167 | 0,1313 | -0,0146 |
| 500 | 0,1015 | 0,1181 | -0,0165 |
| 550 | 0,0632 | 0,0791 | -0,0159 |
| 600 | 0,0365 | 0,0517 | -0,0152 |
| 650 | -0,0025 | 0,0143 | -0,0168 |

APÊNDICE H – Erro da guia do carro principal posicionado em T2

| Posição transversal T2 | | | |
|----------------------------|--|-------------------------|---|
| y _i (mm) Ida | x _i com remoção do desalinhamento (mm) | Perfil do artefato (mm) | Erro de posicionamento na direção transversal (mm) |
| 0 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0146 | 0,0204 | -0,0058 |
| 100 | 0,0385 | 0,0503 | -0,0118 |
| 150 | 0,0682 | 0,0812 | -0,0130 |
| 200 | 0,1004 | 0,1075 | -0,0071 |
| 250 | 0,1071 | 0,1231 | -0,0160 |
| 300 | 0,1243 | 0,1406 | -0,0163 |
| 350 | 0,1241 | 0,1391 | -0,0151 |
| 400 | 0,1260 | 0,1396 | -0,0135 |
| 450 | 0,1190 | 0,1313 | -0,0123 |
| 500 | 0,1040 | 0,1181 | -0,0141 |
| 550 | 0,0654 | 0,0791 | -0,0137 |
| 600 | 0,0379 | 0,0517 | -0,0138 |
| 650 | -0,0008 | 0,0143 | -0,0150 |
| Volta | | | |
| 0 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0161 | 0,0204 | -0,0043 |
| 100 | 0,0409 | 0,0503 | -0,0094 |
| 150 | 0,0721 | 0,0812 | -0,0091 |
| 200 | 0,1008 | 0,1075 | -0,0067 |
| 250 | 0,1106 | 0,1231 | -0,0125 |
| 300 | 0,1257 | 0,1406 | -0,0149 |
| 350 | 0,1251 | 0,1391 | -0,0140 |
| 400 | 0,1271 | 0,1396 | -0,0124 |
| 450 | 0,1193 | 0,1313 | -0,0120 |
| 500 | 0,1040 | 0,1181 | -0,0141 |
| 550 | 0,0652 | 0,0791 | -0,0139 |
| 600 | 0,0398 | 0,0517 | -0,0118 |
| 650 | 0,0015 | 0,0143 | -0,0128 |

APÊNDICE I – Erro da guia do carro principal posicionado em T3.

| Carro principal em T3 | | | |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------|---|
| y _i (mm) Ida | remoção do desalinhamento | Perfil do artefato (mm) | Erro de posicionamento na direção transversal (mm) |
| 0 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0137 | 0,0204 | -0,0067 |
| 100 | 0,0390 | 0,0503 | -0,0113 |
| 150 | 0,0696 | 0,0812 | -0,0116 |
| 200 | 0,0980 | 0,1075 | -0,0095 |
| 250 | 0,1086 | 0,1231 | -0,0146 |
| 300 | 0,1241 | 0,1406 | -0,0165 |
| 350 | 0,1240 | 0,1391 | -0,0151 |
| 400 | 0,1275 | 0,1396 | -0,0120 |
| 450 | 0,1173 | 0,1313 | -0,0140 |
| 500 | 0,1040 | 0,1181 | -0,0141 |
| 550 | 0,0669 | 0,0791 | -0,0122 |
| 600 | 0,0394 | 0,0517 | -0,0122 |
| 650 | 0,0039 | 0,0143 | -0,0104 |
| Volta | | | |
| 0 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 50 | 0,0123 | 0,0204 | -0,0082 |
| 100 | 0,0365 | 0,0503 | -0,0138 |
| 150 | 0,0575 | 0,0812 | -0,0236 |
| 200 | 0,0856 | 0,1075 | -0,0219 |
| 250 | 0,0998 | 0,1231 | -0,0233 |
| 300 | 0,1149 | 0,1406 | -0,0257 |
| 350 | 0,1174 | 0,1391 | -0,0217 |
| 400 | 0,1204 | 0,1396 | -0,0191 |
| 450 | 0,1131 | 0,1313 | -0,0182 |
| 500 | 0,0988 | 0,1181 | -0,0193 |
| 550 | 0,0613 | 0,0791 | -0,0178 |
| 600 | 0,0349 | 0,0517 | -0,0167 |
| 650 | -0,0032 | 0,0143 | -0,0175 |

APÊNDICE J – Médias, máximos e mínimos das compensações para cada posição transversal.

| | Compensação visual | Compensação a partir da média dos erros de ida e volta | Compensação a partir da Folha de Verificação | Compensação a partir do Histograma | Compensação a partir do Diagrama de Pareto |
|--|--------------------|--|--|------------------------------------|--|
| Posição transversal T1 | | | | | |
| Amplitude média em relação ao eixo Z (ida) (mm) | -0,0011 | -0,0020 | 0,0011 | -0,0001 | -0,0001 |
| Amplitude média em relação ao eixo Z (volta) | -0,0002 | -0,0015 | 0,0019 | 0,0008 | 0,0008 |
| Amplitude máxima em relação ao eixo Z (ida) (mm) | 0,0018 | 0,0007 | 0,0043 | 0,0030 | 0,0030 |
| Amplitude máxima em relação ao eixo Z (volta) | 0,0038 | 0,0019 | 0,0063 | 0,0050 | 0,0050 |
| Amplitude mínima em relação ao eixo Z (ida) (mm) | -0,0073 | -0,0073 | -0,0073 | -0,0073 | -0,0073 |
| Amplitude mínima em relação ao eixo Z (volta) | -0,0050 | -0,0050 | -0,0050 | -0,0050 | -0,0050 |
| Amplitude média entre ida e volta (mm) | -0,0009 | -0,0002 | -0,0009 | -0,0009 | -0,0009 |
| Amplitude máxima entre ida e volta (mm) | 0,0008 | 0,0016 | 0,0008 | 0,0008 | 0,0008 |
| Amplitude mínima entre ida e volta (mm) | -0,0041 | -0,0033 | -0,0041 | -0,0041 | -0,0041 |
| Posição transversal T2 | | | | | |
| Amplitude média em relação ao eixo Z (ida) (mm) | 0,0009 | -0,0016 | -0,0012 | 0,0006 | 0,0007 |
| Amplitude média em relação ao eixo Z (volta) | 0,0023 | -0,0015 | 0,0002 | 0,0020 | 0,0021 |
| Amplitude máxima em relação ao eixo Z (ida) (mm) | 0,0079 | 0,0049 | 0,0054 | 0,0075 | 0,0077 |
| Amplitude máxima em relação ao eixo Z (volta) | 0,0083 | 0,0039 | 0,0058 | 0,0079 | 0,0081 |
| Amplitude mínima em relação ao eixo Z (ida) (mm) | -0,0058 | -0,0058 | -0,0058 | -0,0058 | -0,0058 |
| Amplitude mínima em relação ao eixo Z (volta) | -0,0043 | -0,0043 | -0,0043 | -0,0043 | -0,0043 |
| Amplitude média entre ida e volta (mm) | -0,0014 | -0,0002 | -0,0014 | -0,0014 | -0,0014 |
| Amplitude máxima entre ida e volta (mm) | 0,0002 | 0,0016 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 |
| Amplitude mínima entre ida e volta (mm) | -0,0039 | -0,0025 | -0,0039 | -0,0039 | -0,0039 |
| Posição transversal T3 | | | | | |
| Amplitude média em relação ao eixo Z (ida) (mm) | 0,0057 | -0,0016 | -0,0007 | -0,0025 | -0,0006 |
| Amplitude média em relação ao eixo Z (volta) | -0,0005 | -0,0025 | -0,0069 | -0,0087 | -0,0067 |
| Amplitude máxima em relação ao eixo Z (ida) (mm) | 0,0105 | 0,0020 | 0,0030 | 0,0005 | 0,0032 |
| Amplitude máxima em relação ao eixo Z (volta) | 0,0062 | 0,0038 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| Amplitude mínima em relação ao eixo Z (ida) (mm) | -0,0067 | -0,0067 | -0,0067 | -0,0067 | -0,0067 |
| Amplitude mínima em relação ao eixo Z (volta) | -0,0082 | -0,0082 | -0,0132 | -0,0153 | -0,0130 |
| Amplitude média entre ida e volta (mm) | 0,0062 | 0,0009 | 0,0062 | 0,0062 | 0,0062 |
| Amplitude máxima entre ida e volta (mm) | 0,0123 | 0,0062 | 0,0123 | 0,0123 | 0,0123 |
| Amplitude mínima entre ida e volta (mm) | 0,0000 | -0,0037 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

APÊNDICE K – Fluxograma de instalação dos equipamentos de medição

