



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia, Câmpus de Bauru

JULIANA SANTIAGO BALDAN

**ANÁLISE METROLÓGICA DA QUALIDADE EM PROCESSOS DE
TORNEAMENTO: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE
CALIBRAÇÃO INDIRETA E SEPARAÇÃO DE ERROS**

Bauru - SP
2023

JULIANA SANTIAGO BALDAN

**ANÁLISE METROLÓGICA DA QUALIDADE EM PROCESSOS DE
TORNEAMENTO: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE
CALIBRAÇÃO INDIRETA E SEPARAÇÃO DE ERROS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia, Câmpus de Bauru.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Galvão de Moraes

Bauru - SP
2023

Baldan, Juliana Santiago
B175a Análise Geométrica da Qualidade em Processos de
Torneamento : Um Estudo Comparativo Entre Calibração
Indireta e Separação de Erros / Juliana Santiago
Baldan. -- , 2023
82 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru,
Orientador: César Augusto Galvão de Moraes

1. Qualidade. 2. Tornos mecânicos. 3.
Calibração. 4. Erros geométricos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.
Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JULIANA SANTIAGO BALDAN, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 01 dias do mês de dezembro do ano de 2023, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro de Pós-graduação da FEB, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de JULIANA SANTIAGO BALDAN, intitulada **ANÁLISE METROLÓGICA DA QUALIDADE EM PROCESSOS DE TORNEAMENTO: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CALIBRAÇÃO INDIRETA E SEPARAÇÃO DE ERROS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. CÉSAR AUGUSTO GALVÃO DE MORAIS (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Coordenadoria de Curso de Engenharia de Produção / Instituto de Ciência e Engenharia Campus de Itapeva Unesp, Prof. Dr. ENZO BARBERIO MARIANO (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Presencial) do(a) Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos. Após a exposição pela mestrandia e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. CÉSAR AUGUSTO GALVÃO DE MORAIS

Dedico aos meus pais, Laudicéio e Sueli, ao meu irmão André e ao meu namorado Álvaro, pois sem eles este trabalho e muitos dos meus sonhos não se realizariam.

AGRADECIMENTOS

Ao professor César Augusto Galvão de Moraes pelos conhecimentos transmitidos, pela orientação durante toda a graduação e pós-graduação e pela amizade.

À UNESP, em especial os Campi de Bauru e de Itapeva, pela colaboração, estrutura e disponibilização do material necessário para o desenvolvimento deste trabalho e tantas outras oportunidades fornecidas.

Aos meus pais, Laudicéio e Sueli, meu irmão André e ao meu namorado Álvaro pelo apoio incondicional, amor e incentivo.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte desta etapa importante de minha vida.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

Muito Obrigada!

RESUMO

A constante evolução dos processos produtivos e a crescente globalização têm impulsionado a fabricação de produtos mais eficientes e de qualidade superior. Nesse contexto, o controle de produtos e processos torna-se fundamental nos ambientes industriais. A usinagem tem a peculiaridade de ser um processo envolvendo um elevado número de variáveis, sendo quase impossível prever o desempenho no corte de materiais metálicos. A imprevisibilidade da usinagem se deve ao fato de ser um processo em que a única restrição é oferecida pela ferramenta de corte. Diante disso, o objetivo principal deste estudo é analisar e comparar os métodos de Calibração Indireta e Separação de Erros no contexto da usinagem por torneamento. O erro transversal foi medido em diversas posições ao longo de um artefato metálico, sendo possível distinguir o desvio do artefato do desvio do carro do torno. A partir dos resultados obtidos foi possível validar ambos os métodos empregados e constatar a presença de erros transversais em todo curso de medição, o que pode ser prejudicial ao equipamento e para a qualidade dos produtos fabricados neste processo.

Palavras-chave: Qualidade. Erros Geométricos. Torno mecânico. Calibração Indireta. Separação por Reversão.

ABSTRACT

The constant evolution of production processes and the increasing globalization have driven the manufacturing of more efficient and higher-quality products. In this context, product and process control becomes crucial in industrial environments. Machining has the peculiarity of being a process involving a high number of variables, making it nearly impossible to predict the performance in cutting metallic materials. The unpredictability of machining is due to the fact that it is a process where the only constraint is imposed by the cutting tool. In light of this, the main objective of this study is to analyze and compare the methods of Indirect Calibration and Error Separation in the context of turning machining. The transverse error was measured at various positions along a metallic artifact, making it possible to distinguish the deviation of the artifact from the deviation of the lathe carriage. Based on the results obtained, it was possible to validate both employed methods and observe the presence of transverse errors throughout the measurement course, which can be detrimental to the equipment and the quality of products manufactured in this process.

Keywords: Quality. Geometric Errors. Lathe. Indirect Calibration. Separation by Reversal.

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGAS

ANOVA	Análise De Variância
b	Coeficiente linear da reta
$B(\theta)$	Dimensão da esfera
CNC	Controle Numérico Computadorizado
F	Valor F
H_i	Histerese
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
Ida	Movimento do carro à direita
LaTb	Identificação do ponto longitudinal a e transversal b
LVDT	Transdutor De Deslocamento Variável Linear
m	Coeficiente angular da reta de ajuste
$M(X)$	Perfil de retitude do mecanismo de deslizamento da máquina
MMC	Máquina de Medir por Coordenadas
n	Número total de amostras
PDGE	Erros Geométricos Dependentes de Posição
PIGE	Erros Geométricos Independentes de Posição
q	Número de dados de cada amostra
R	Braço de Abbe
$R(\Theta)$	Movimento radial do fuso
$S(X)$	Desvio do artefato
s^2	Variância amostral para todas as médias
s_i^2	Variância amostral para cada grupo de resultados
$\bar{s}^2$	Média das variâncias para cada grupo
Volta	Movimento do carro à esquerda
$\bar{X}$	Média das médias
$\bar{X}_i$	Média de cada amostra
$\bar{\bar{X}}$	Parcela sistemática de erros

x_i	Deslocamento do carro longitudinal do torno
y'_i	Valor coletado
y_i	Valor estimado

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Torneamento externo e interno circular	19
Figura 2 - Esquema simplificado de um torno	19
Figura 3 - Principais operações realizadas em um torno	20
Figura 4 – Erros cinemáticos de um carro em um sistema com guias	23
Figura 5 - MTA instalado em uma máquina-ferramenta de cinco eixos	25
Figura 6 - Setup experimental	25
Figura 7 - Exemplo hipotético de uma curva de calibração de erros em máquinas ..	27
Figura 8 - Bobinas e núcleo de um apalpador do tipo LVDT	28
Figura 9 - Posições nula e extremas do apalpador do tipo LVDT	29
Figura 10 - Erro de Abbe em um paquímetro	29
Figura 11 - Eixo do micrômetro coincidente com o eixo de medição	30
Figura 12 - Padrão tetraédrico.....	32
Figura 13 - Barra de furos	32
Figura 14 - Reversão do artefato linear.....	33
Figura 15 - Reversão da esfera.....	34
Figura 16 - Fluxograma 1 ilustrando parte da metodologia aplicada.....	36
Figura 17 - Fluxograma 2 ilustrando parte da metodologia aplicada.....	37
Figura 18 - Estruturação da etapa experimental	38
Figura 19 - Especificações do artefato metálico utilizado.....	38
Figura 20 - Fixação do artefato de aço entre ponta e contra-ponta.....	39
Figura 21 – Deslocamento do carro transversal de (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm	39
Figura 22 - Posição do LVDT anterior a reversão para (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm	40
Figura 23 - Pontos de coleta de dados.....	41
Figura 24 - Medição do artefato com a MMC	41
Figura 25 - Posição do LVDT após a reversão para (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm	42
Figura 26 - Perfil de dados experimentais e reta de ajuste para a MMC.....	46
Figura 27 - Desvio corrigido da MMC após a aplicação do método dos mínimos quadrados	47
Figura 28 - Perfil de dados experimentais e reta de ajuste para as posições transversais de (a) 0 mm (b) 125 mm e (c) 250 mm – método de Calibração Indireta	47
Figura 29 - Desvio corrigido após a aplicação do método dos mínimos quadrados para as posições transversais de (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm - método de Calibração Indireta	47

Figura 30 - Erro transversal do carro longitudinal do torno para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm, movimento de ida - método de Calibração Indireta	48
Figura 31 - Erro transversal do carro longitudinal do torno para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm, movimento de volta - método de Calibração Indireta	49
Figura 32 - Boxplot para a posição transversal de 0 mm – método de Calibração Indireta	50
Figura 33 - Boxplot para a posição transversal de 125 mm – método de Calibração Indireta	51
Figura 34 - Boxplot para a posição transversal de 250 mm – método de Calibração Indireta	53
Figura 35 - Perfil de dados experimentais e reta de ajuste para as posições transversais de (a) 0 mm anterior a reversão e (b) após a reversão, (c) 125 mm anterior a reversão e (d) após a reversão e (e) 250 mm anterior a reversão e (f) após a reversão	57
Figura 36 – Desvio corrigido após a aplicação do método dos mínimos quadrados para as posições transversais de (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm - método de Separação por Reversão	57
Figura 37 - Erro transversal do carro longitudinal do torno para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm, movimento de ida - método de Separação por Reversão.....	58
Figura 38 – Erro transversal do carro longitudinal do torno para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm, movimento de volta - método de Separação por Reversão	58
Figura 39 - Perfil de retitude do artefato para as posições transversais de (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm – método de Separação por Reversão	59
Figura 40 - Boxplot para a posição transversal de 0 mm – método de Reversão	60
Figura 41 - Boxplot para a posição transversal de 125 mm – método de Reversão	62
Figura 42 - Boxplot para a posição transversal de 250 mm – método de Reversão	63
Figura 43 - Avaliação de Tukey para a posição longitudinal de 50 mm – método de Reversão	65
Figura 44 – Avaliação de Tukey para a posição longitudinal de 200 mm – método de Reversão	66
Figura 45 - Avaliação de Tukey para a posição longitudinal de 375 mm – método de Reversão	67
Figura 46 - Avaliação de Tukey para a posição longitudinal de 550 mm – método de Reversão	68
Figura 47 - Avaliação de Tukey para a posição longitudinal de 700 mm – método de Reversão	69
Figura 48 - Perfil de retitude do artefato obtido através dos métodos de Calibração Indireta e Separação por Reversão.....	70

Figura 49 - Erro transversal do carro longitudinal para as posições de (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm pelos métodos de Calibração Indireta e Separação por Reversão 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - ANOVA para a posição transversal de 0 mm – método de Calibração Indireta	49
Tabela 2 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 0 mm – método de Calibração Indireta	50
Tabela 3 - ANOVA para a posição transversal de 125 mm – método de Calibração Indireta	51
Tabela 4 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 125 mm – método de Calibração Indireta.....	52
Tabela 5 - ANOVA para a posição transversal de 250 mm – método de Calibração Indireta	52
Tabela 6 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 250 mm – método de Calibração Indireta.....	53
Tabela 7 - ANOVA para a posição longitudinal de 50 mm – método de Calibração Indireta	54
Tabela 8 - ANOVA para a posição longitudinal de 200 mm – método de Calibração Indireta	54
Tabela 9 - ANOVA para a posição longitudinal de 375 mm – método de Calibração Indireta	54
Tabela 10 - ANOVA para a posição longitudinal de 550 mm – método de Calibração Indireta	55
Tabela 11 - ANOVA para a posição longitudinal de 700 mm – método de Calibração Indireta	55
Tabela 12 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição longitudinal de 700 mm – método de Calibração Indireta.....	55
Tabela 13 - ANOVA para a posição transversal de 0 mm – método de Reversão....	60
Tabela 14 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 0 mm – método de Reversão	60
Tabela 15 - ANOVA para a posição transversal de 125 mm – método de Reversão	61
Tabela 16 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 125 mm – método de Reversão	62
Tabela 17 - ANOVA para a posição transversal de 250 mm – método de Reversão	63
Tabela 18 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 250 mm – método de Reversão	63
Tabela 19 - ANOVA para a posição longitudinal de 50 mm – método de Reversão .	64
Tabela 20 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição longitudinal de 50 mm – método de Reversão	64
Tabela 21 - ANOVA para a posição longitudinal de 200 mm – método de Reversão	65

Tabela 22 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição longitudinal de 200 mm – método de Reversão	65
Tabela 23 - ANOVA para a posição longitudinal de 375 mm – método de Reversão	66
Tabela 24 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição longitudinal de 375 mm – método de Reversão	66
Tabela 25 - ANOVA para a posição longitudinal de 550 mm – método de Reversão	67
Tabela 26 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição longitudinal de 550 mm – método de Reversão	67
Tabela 27 - ANOVA para a posição longitudinal de 700 mm – método de Reversão	68
Tabela 28 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição longitudinal de 700 mm – método de Reversão	68
Tabela 29 - Resultado ANOVA para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm	71
Tabela 30 - Resultado ANOVA para as posições longitudinais de 50 mm, 200 mm, 375 mm, 550 mm e 700 mm.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Processo de torneamento.....	19
2.2	Erros Geométricos	20
2.2.1	Erros termomecânicos	21
2.2.2	Esforços devido ao peso próprio.....	21
2.2.3	Erros dinâmicos	22
2.2.4	Software de controle de movimento.....	22
2.2.5	Erros cinemáticos.....	22
2.2.6	Classificação dos erros quanto ao comportamento	26
2.3	Apalpadores de medição	27
2.4	Transgressão ao Princípio de Abbe.....	29
2.5	Métodos de medição de erros geométricos.....	31
2.5.1	Método de Calibração Indireta	32
2.5.2	Separação de Erros	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	Medição dos desvios.....	38
3.2	Calibração Indireta	40
3.3	Separação por Reversão.....	42
3.4	Tratamento dos dados e aplicação dos Métodos Estatísticos	42
3.4.1	Método dos Mínimos Quadrados	42
3.4.2	Teste de Hipóteses e ANOVA.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1	Calibração Indireta	46
4.1.1	Medição do artefato com a MMC	46
4.1.2	Medição do artefato com o LVDT fixado no carro longitudinal.....	47
4.1.3	Aplicação de método de Calibração Indireta.....	48
4.1.4	ANOVA e Teste de Tukey.....	49

4.2	Separação por Reversão.....	56
4.2.1	Remoção do desalinhamento – Método dos Mínimos Quadrados.....	56
4.2.2	Dados obtidos após remoção do desalinhamento	57
4.2.3	Aplicação do método de Separação por Reversão	58
4.2.4	ANOVA e Teste de Tukey.....	59
4.3	Comparação entre os métodos de Calibração Indireta e Separação por Reversão	69
4.3.1	Perfil de retitude do artefato	69
4.3.2	Erro transversal do carro do torno	70
4.3.3	ANOVA	71
5	CONCLUSÕES.....	72
	REFERÊNCIAS.....	74
	APÊNDICE A – TESTES DE NORMALIDADE.....	80

1 INTRODUÇÃO

Uma máquina-ferramenta é um equipamento estacionário que, impulsionado por uma fonte de energia externa, não dependente de força humana ou animal, realiza alterações na forma de materiais sólidos, como metais, ou em materiais alternativos, como madeira, por meio de processos que envolvem deformação plástica ou corte de natureza mecânica, abrasiva, eletrofísica, eletroquímica ou fotônica, resultando na remoção de material (ABIMAQ, 2006).

O campo da metrologia de máquinas-ferramenta tem forte contribuição na produção industrial. A denominação de máquinas-ferramenta inclui diferentes tipos de máquinas de produção, como tornos, furadeiras e fresadoras com Controle Numérico Computadorizado (CNC) ou manuais. O entendimento dos erros destas máquinas é muito importante para melhoria de desempenho e capacidade, o que reflete diretamente na precisão dos seus produtos (ELMELEGY e ZAHWI, 2023)

Máquinas utilizadas em fabricação mecânica apresentam erros de posicionamento no deslocamento de seus componentes que podem influenciar nos resultados obtidos de sua operação. Em muitas máquinas de fabricação ou medição existem sistemas de controle de deslocamentos de seus componentes, estes sistemas geram informações que podem determinar a dimensão e geometria de uma peça em processos fabricação ou inspeção.

Os deslocamentos obtidos em medições são estimativas do valor verdadeiro, sujeitos à influência de vários fatores que afetam o processo, tais como variações associadas ao operador, ao instrumento de medição, condições ambientais e outros (NIST TECHNICAL NOTE, 2015). A discrepância entre o valor de deslocamento obtido para uma grandeza e um valor de referência é conhecida como erro de medição (VIM, 2007). Em muitos casos, o valor verdadeiro é desconhecido, e, portanto, o erro de medição é calculado como a diferença entre o resultado da medição e o valor obtido por meio da calibração.

Segundo Cabezas e Szilágyi (2020) os principais erros relacionados às máquinas-ferramenta são erros conhecidos como erros geométricos, devido a movimentações indevidas, como erros de translação e erros de rotação, além de erros térmicos. Os erros geométricos e erros térmicos representam a maior

proporção da fonte de erros em máquinas-ferramenta (mais de 60%) (CABEZAS e SZILÁGYI, 2020; LIU, et al., 2020 e FU, et al., 2019).

A usinagem se destaca por ser um processo prático que lida com uma grande quantidade de variáveis. De acordo com Shaw (*apud* MACHADO et al., 2015), prever o desempenho na usinagem de materiais metálicos é uma tarefa desafiadora. A imprevisibilidade inerente à usinagem decorre do fato de que este é o único processo de deformação plástica onde a única limitação significativa é imposta pela ferramenta de corte (MACHADO, et al., 2015).

O método de calibração indireta é o método tradicional e uma alternativa é o método de separação de erros. O método de calibração indireta precisa de um artefato calibrado para fazer a compensação das leituras, já o método de separação de erros não precisa que o artefato esteja calibrado, ele por si só já faz a calibração do artefato e do próprio erro da máquina ou sistema de medição. O método de calibração indireta é mais simples e de fácil compreensão, no entanto, exige um número maior de operações no processo. Já o método de separação de erros permite reduzir medições, visto que não é necessário calibrar o artefato previamente, no entanto, pode envolver uma quantidade maior de incertezas, estes são um desafio para a área.

A justificação para a aplicação do método de separação de erros em máquinas-ferramenta convencionais é discernível, considerando que a calibração indireta da máquina demanda um dispêndio significativo de tempo, devido à necessidade prévia de calibrar o artefato. Ademais, os custos associados a este procedimento são substancialmente afetados, uma vez que esse artefato deve ser submetido a uma calibração em uma máquina de inspeção de elevada precisão e repetibilidade, frequentemente realizada em centros de pesquisa ou laboratórios certificados.

Adicionalmente, respalda-se a elaboração deste estudo pela escassez de investigações com potencial aplicação em ambientes industriais. Isso decorre do caráter complexo das aplicações envolvidas e do custo elevado associado à aquisição dos instrumentos empregados. O método proposto possui o mérito de poder beneficiar tanto grandes, médias quanto pequenas empresas que enfrentam obstáculos para adquirir equipamentos de alta tecnologia ou que carecem do conhecimento necessário para aplicar métodos mais intrincados. Logo, o método proposto viabiliza que empresas com essas particularidades possam conquistar

maior presença no mercado de usinagem por torneamento em comparação com seus concorrentes.

Diante das considerações apresentadas, o objetivo principal deste estudo é analisar e comparar os métodos de Calibração Indireta e Separação de Erros no contexto da usinagem por torneamento. Esta análise visa contribuir significativamente para empresas que incorporam o processo de usinagem por torneamento em suas operações de fabricação, proporcionando métodos eficazes de calibração para os erros geométricos relevantes no plano preferencial de usinagem. A intenção é avaliar a qualidade e o desempenho metrológico das máquinas empregadas, considerando as particularidades de cada método.

Para um melhor entendimento, uma breve descrição dos capítulos deste trabalho encontra-se na sequência.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o processo de torneamento, erros em máquinas-ferramenta, métodos de medição e sobre a estatística aplicada ao trabalho.

No capítulo 3 são descritos detalhadamente os procedimentos experimentais utilizados para o desenvolvimento do estudo bem como as metodologias utilizadas.

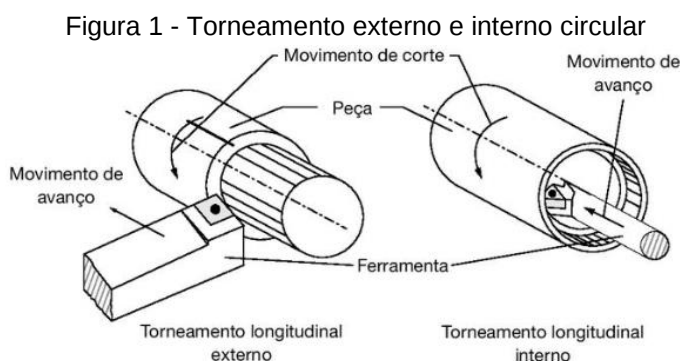
Os resultados obtidos e a discussão a respeito deles são apresentados no capítulo 4, enquanto o capítulo 5 discorre sobre as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo apresenta conceitos importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Processo de torneamento

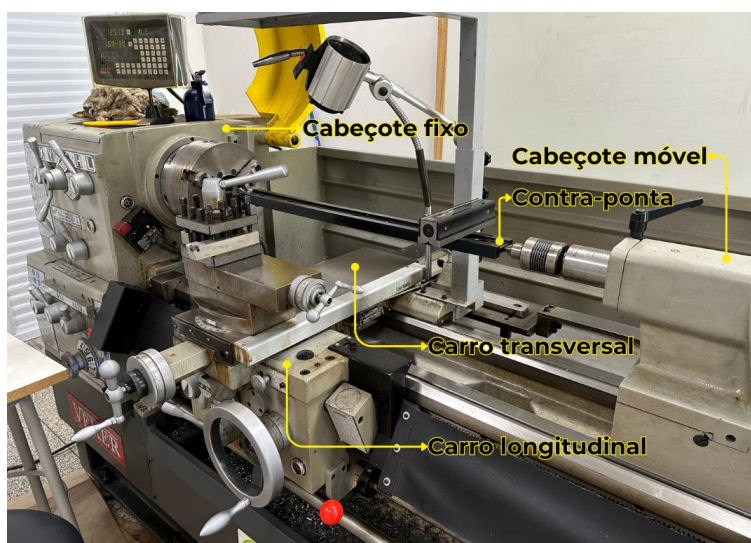
Torneamento é um processo de fabricação que consiste em dar forma às peças, geralmente de formato cilíndrico, e, utilizando a máquina-ferramenta e as ferramentas de corte, transformar a matéria bruta em uma peça útil (FRACARO, 2017). Nesse processo, a ferramenta de corte desloca-se por meio de avanço manual ou automático, paralela ou com profundidade relativa à superfície da peça, exemplificado na Figura 1.



Fonte: Fracaro, 2017

A Figura 2 apresenta um esquema simplificado de um torno, nesta imagem é possível observar o cabeçote fixo, contra-ponta, carro transversal, carro-longitudinal e o cabeçote móvel.

Figura 2 - Esquema simplificado de um torno

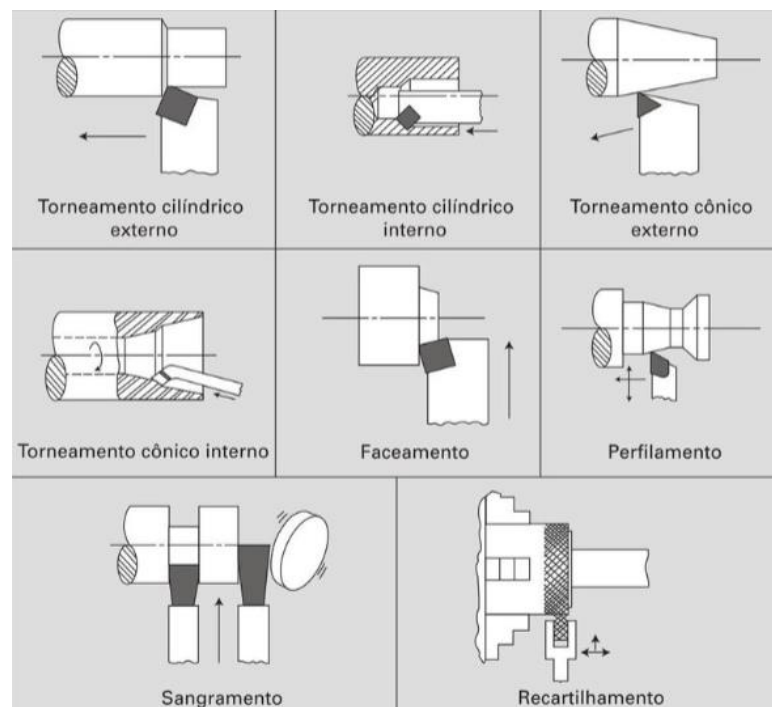


Fonte: autoria própria

Machado et al. (2015) apresenta as principais operações realizadas no torno, Figura 3, são elas:

- Torneamento cilíndrico externo;
- Torneamento cilíndrico interno;
- Torneamento cônico externo;
- Torneamento cônico interno;
- Faceamento;
- Perfilamento;
- Sangramento;
- Recartilhamento.

Figura 3 - Principais operações realizadas em um torno



Fonte: Machado, et al., 2015

2.2 Erros Geométricos

Estudos sobre erros de posicionamento em máquinas ferramentas são análogos aos estudos de erros de posicionamento em máquinas de medições por coordenadas. É comum estes estudos fazerem referências a estes tipos de máquinas (FU et al., 2014; SCHWENKE et al, 2008; ZHANG, 1989).

Segundo Schwenke (2008) as principais fontes de erro que afetam a exatidão são:

1. Erros termomecânicos;

2. Esforços devido ao peso próprio;
3. Erros dinâmicos;
4. Software de controle de movimento;
5. Erros cinemáticos

Em instrumentos e máquinas de precisão, a exatidão final é resultado da interação de diversos fatores. Cada um desses fatores contribui para a precisão global, influenciada pelos desvios decorrentes dos efeitos mencionados anteriormente (SCHWENKE, 2008).

2.2.1 Erros termomecânicos

Devido à presença de fontes de calor/frio internas e externas em máquinas-ferramentas e diferenças de coeficientes de expansão dos materiais da peça de máquina, a distorção térmica resultante do laço estrutural da máquina geralmente domina a precisão de uma tarefa executada (SCHWENKE, 2008).

As diferenças no coeficiente de expansão podem levar a tensões térmicas, condições térmicas alteradas podem causar erros de localização e de componentes das máquinas (SCHWENKE, 2008).

2.2.2 Esforços devido ao peso próprio

Se uma máquina exibir falta de rigidez na estrutura, os erros de localização e os erros dos componentes mudam devido a forças internas ou externas. Em alguns casos, o peso e a posição da peça de trabalho ou carro de movimentação da máquina, ou forças de medição podem ter uma influência significativa na precisão da máquina devido à rigidez finita do laço estrutural (MULTIBA, et al., 2017). Schellekens et al. (1993) e Spaan (1995) mostraram que esses erros podem ser significativos quando comparados aos erros geométricos de uma máquina operatriz ou Máquina de Medir por Coordenadas (MMC). Por exemplo, se as guias retas se deformarem devido ao peso do carro em movimento, o carro mostrará uma falta de retitude e um erro pitch. Isso é chamado de "comportamento quase-rígido".

Teleshevskii, Pimushkin e Sokolov (2019) estudaram sobre migração do ponto de equilíbrio no sistema multi-coordenado sob uma carga estática, a experiência mostrou que, mesmo que pequenos, os erros da máquina-ferramenta, com ou sem carga, podem diferir significativamente, devido a fatores como folgas nos componentes da máquina-ferramenta que mudam na aplicação de carga. E

concluíram que ao medir os erros da máquina-ferramenta, é conveniente aplicar uma carga de modo a obter um modelo que corresponda mais de perto as condições de operação.

2.2.3 Erros dinâmicos

A trajetória a ser percorrida por uma máquina é influenciada pelo comportamento dinâmico de sua estrutura. Nesse contexto, é fundamental levar em consideração forças variáveis, como as resultantes da usinagem, medição, acelerações ou desacelerações, em vez de simples forças quase estáticas. Vibrações podem levar a deformações na estrutura da máquina em questão, e muitas vezes é desafiador compensar essas deformações. Isso ocorre devido à amplitude muitas vezes desconhecida e, especialmente, ao ângulo de fase das frequências vibratórias, o que contribui para a incerteza na posição da ferramenta ou sonda em relação à peça de trabalho (SCHWENKE, 2008).

2.2.4 Software de controle de movimento

Para executar os cálculos matemáticos complexos necessários para a tomada de decisões em tempo real baseada em metrologia, um poderoso software de metrologia precisa ser integrado ao sistema de fabricação. Como se espera que o sistema funcione sozinho sem interação humana, ele também precisa funcionar de forma autônoma dentro do processo de fabricação. Entretanto, os softwares empregados atualmente são insuficientes para fins de metrologia. (MUTILBA et al., 2017).

O efeito do software de controle no erro geométrico da máquina-ferramenta pode ser considerável. Portanto, diferentes velocidades e acelerações podem ser aplicadas para um caminho de movimento conhecido para tornar os erros de software de controle distinguíveis. O processo de medição é geralmente executado em pequenas velocidades de alimentação, então, as forças dinâmicas geralmente não são consideradas (SCHWENKE et al., 2008; MUTILBA et al., 2017).

2.2.5 Erros cinemáticos

Erros cinemáticos são resultantes de imperfeições na geometria e nas dimensões dos componentes da máquina, bem como da configuração do laço

estrutural da máquina, desalinhamentos nos eixos e imprecisões nos sistemas de medição da máquina (MULTIBA et al., 2017).

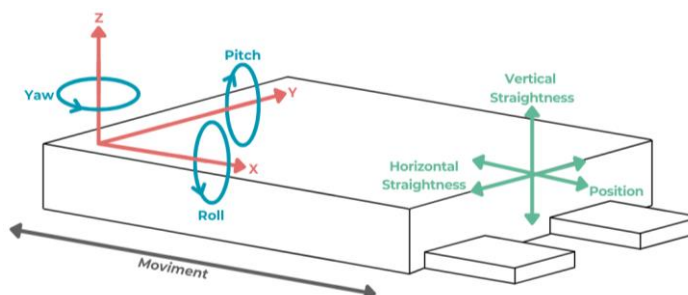
De acordo com as normas ANSI e ASME (1991), o termo 'laço estrutural' refere-se a um conjunto de componentes mecânicos que mantêm relações de posicionamento entre objetos. Esse conceito está diretamente relacionado com os erros de posicionamento da máquina, que resultam dos movimentos de seus componentes durante a operação.

Em máquinas usadas para a fabricação, cada movimento de um eixo possui seis graus de liberdade, compostos por três translações e três rotações. No entanto, na maioria dos casos, apenas um grau de liberdade é desejado, seja ele um movimento linear ou de rotação do eixo.

O erro geométrico pode ser melhorado através do ajuste dos aspectos de projeto, fabricação e técnicas de montagem (LI, et al., 2021).

De acordo com várias fontes, incluindo Di Giacomo (1986), Kunzmann, Ni e Wäldele (1995), Schwenke et al. (2008) e Di Giacomo e Morais (2015), os erros cinemáticos em cada eixo de uma máquina estão relacionados aos graus de liberdade de um corpo rígido. Esses erros consistem em três movimentos indesejados de translação, incluindo um de escala ou posição propriamente dito e dois de retilidade, que são perpendiculares ao eixo de movimento, além de erros de rotação em cada eixo, conhecidos como *roll*, *yaw* e *pitch*. A Figura 4 oferece uma representação visual desses erros, em que o eixo x corresponde ao eixo de movimento.

Figura 4 – Erros cinemáticos de um carro em um sistema com guias



Fonte: adaptado de Ferraz, 2005

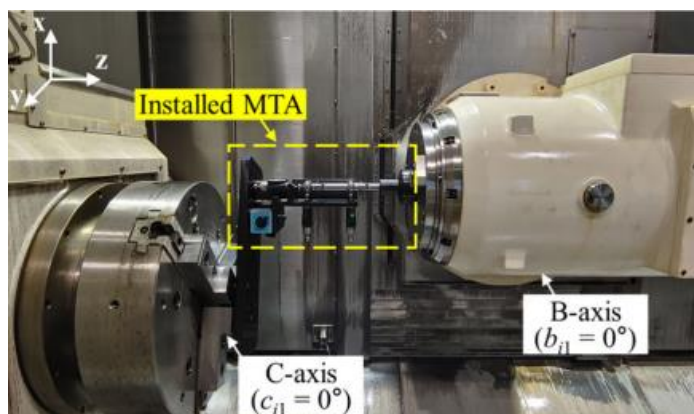
Os erros geométricos dos eixos rotativos são fontes de erro cruciais de uma máquina-ferramenta. Os erros de rotação impactam de maneira importante a precisão da usinagem, comprometendo a exatidão projetada da máquina-ferramenta (FAN e ZHANG, 2020).

Diversos estudos recentes, como os de Miller et al. (2017), Huang et al. (2020), Li et al. (2021), Tai e Liu (2022) e Jia et al. (2022), abordaram a análise dos erros geométricos em sistemas de eixos lineares. Por exemplo, Liu, Lai e Luo (2019) apresentaram um sistema que empregou um interferômetro Renishaw XL80 para medir os erros cinemáticos em seis graus de liberdade de uma guia linear de máquina-ferramenta. Este sistema permitiu a medição de erros, incluindo pitch, yaw, retitude horizontal e retitude vertical, com desvios resultantes de $\pm 0,5$ arcseg, $\pm 3,6$ arcseg, $\pm 2,1$ μm e $\pm 2,3$ μm , respectivamente. Além disso, foram determinados os desvios máximos de repetibilidade para *pitch*, *yaw*, *roll*, retitude horizontal, retitude vertical e erros de posicionamento, que totalizaram 0,4 arcseg, 0,2 arcseg, 4,2 arcseg, 1,5 μm , 0,3 μm e 3 μm , respectivamente.

No contexto de eixos rotativos, os erros do componente são categorizados em um movimento de erro axial, dois movimentos de erro radial, dois movimentos de erro de inclinação e o erro de posicionamento angular, conforme destacado por MUTILBA et al. (2017). Além disso, os erros geométricos relacionados a eixos rotativos podem ser subdivididos em dois grupos: erros geométricos independentes de posição (PIGE) e erros geométricos dependentes de posição (PDGE), conforme discutido por Xia et al. (2017).

Vários estudos recentes, incluindo os de Jiang e Cripps (2017), Guo et al. (2017), Yang et al. (2018), Liu et al. (2018) e Jiang et al. (2020), exploraram o conceito de PIGE. Yang e Lee (2021) introduziram um protótipo de "analisador de máquina-ferramenta" composto por um conjunto de cinco sensores de deslocamento e um sistema de esfera dupla com duas estruturas de centralização, projetado para a identificação de 13 PIGEs em máquinas-ferramenta de cinco eixos. Esses 13 PIGEs incluíam erros decorrentes da falta de ortogonalidade nos três eixos lineares, bem como erros associados à falta de ortogonalidade e deslocamento no eixo de rotação/inclinação e no eixo do fuso. O uso desse analisador resultou na redução dos erros lineares e angulares, com desvios máximos, mínimos e valores PV no teste circular de 109 μm , 55 μm e 55 μm , respectivamente, sem compensação para os erros transmitidos pelos PIGEs, e de 38 μm , 5 μm e 33 μm , respectivamente, com compensação.

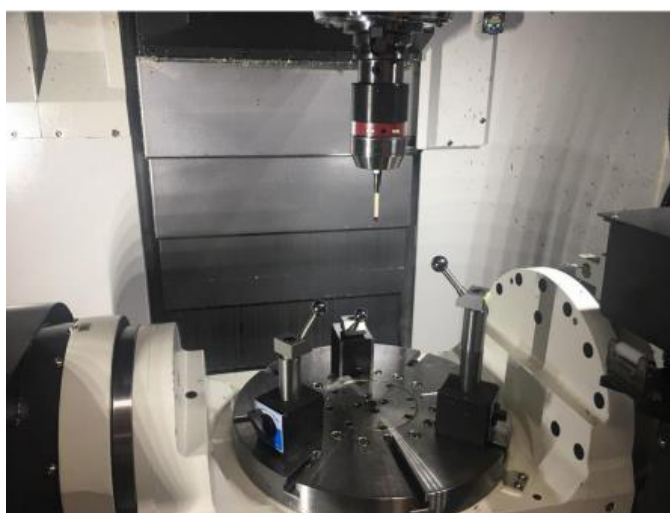
Figura 5 - MTA instalado em uma máquina-ferramenta de cinco eixos



Fonte: Yang e Lee, 2021

No que diz respeito à precisão de usinagem em máquinas-ferramenta de cinco eixos, é importante observar que tanto os PIGEs quanto os PDGEs em eixos rotativos exercem influência. Chen et al. (2019) observaram que, até o momento da pesquisa, não existiam sistemas comerciais disponíveis para a identificação de PDGEs em eixos rotativos de máquinas-ferramenta de cinco eixos. Assim, o estudo propôs um método de medição *on-machine* para identificar e compensar os PDGEs em tais sistemas. Este método envolveu a medição da peça na própria máquina, utilizando um apalpador *touch-trigger* e três esferas instaladas no fuso e na mesa rotativa basculante, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Setup experimental



Fonte: Chen et al., 2019

Ao aplicar o método de medição proposto, foram identificados numericamente 12 PDGEs com base em um algoritmo de medição construído com um modelo de erro cinemático e um método de mínimos quadrados. Após a implementação deste método, os PDGEs dos eixos rotativos foram quantitativamente

compensados pelo controlador comercial, resultando na redução dos erros lineares e angulares de 37,81 μm e 10,23 mdeg para 0,9 μm e 0,26 mdeg, respectivamente (CHEN et al., 2019).

Vários estudos, como os conduzidos por Xia et al. (2017), Liu et al. (2018) e Deng et al. (2020), abordaram amplamente ambas as categorias de erros geométricos. No entanto, o estudo mais recente, liderado por Deng et al. (2020), introduziu uma inovadora abordagem para a identificação de erros geométricos. Esse método propõe a utilização de um interferômetro de rastreamento, levando em consideração a restrição de movimento do corpo rígido na técnica de multilateração. A incorporação dessa restrição permite a criação de um novo modelo de cálculo de coordenadas para os pontos de medição. O processo de identificação apresenta a capacidade de separar de forma distinta os PIGEs e os PDGEs, baseando-se em modelos preexistentes de erro geométrico.

O aspecto inovador desse método reside na consideração da restrição de movimento do corpo rígido, tornando a identificação mais robusta em relação a fatores aleatórios. O método foi submetido a simulações de Monte Carlo e experimentos de validação, que demonstraram com êxito a capacidade de separar e identificar os PIGEs e PDGEs no eixo rotativo. Além disso, após a compensação, o erro máximo de posicionamento angular foi reduzido em 84%.

2.2.6 Classificação dos erros quanto ao comportamento

Em uma mesma medição são encontrados erros de vários tipos, que podem ser agrupados em dois grandes grupos: erros sistemáticos e erros aleatórios (VUOLO, 1996). O primeiro trata daqueles que permanecem constantes ou variam de acordo com uma lei definida, quando é realizado um número considerável de medições feitas sob as mesmas circunstâncias (ARENCIBIA e RIBEIRO, 2009).

Erros sistemáticos, conforme explicado por Vuolo (1996), são consistentes e sempre resultam nos mesmos valores em todas as medições. Quando um erro sistemático está presente, os n resultados (y_i) serão idênticos, e a discrepância em relação ao valor verdadeiro (y_v) será constante.

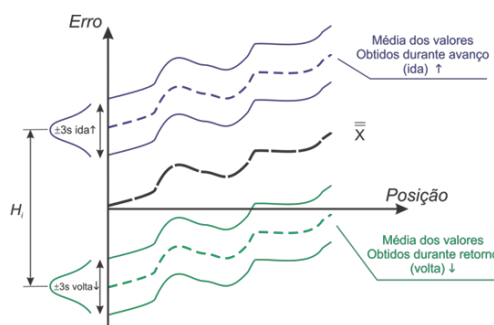
Já os erros aleatórios, como descrito por Arencibia e Ribeiro (2009), derivam de influências internas e externas não controladas, levando a erros não repetitivos. Normalmente, cada leitura difere das demais, fornecendo apenas uma

noção dos limites desses erros. Esses erros estão sempre presentes e são avaliados apenas estatisticamente.

A histerese, uma forma específica de erro sistemático, é definida como a diferença observada em diferentes posições de medição, por exemplo, quando o mensurando é avaliado nos sentidos opostos da coleta de dados, como no avanço e recuo de um carro em uma máquina. Esse tipo de erro pode ser minimizado ou eliminado com um projeto cuidadoso, bem como com o ajuste e montagem apropriados dos componentes que compõem o instrumento de medição (ARENCIBIA e RIBEIRO, 2009).

A ilustração contida na Figura 7 apresenta uma curva de calibração que desempenha um papel fundamental na análise do comportamento dos erros em sistemas mecânicos.

Figura 7 - Exemplo hipotético de uma curva de calibração de erros em máquinas



Fonte: Moraes, 2015

Nessa representação gráfica, os valores médios denotam os erros sistemáticos, enquanto a histerese é visualmente caracterizada como H_i . A presença do erro aleatório é evidenciada pela curva de distribuição que se manifesta em torno dos valores médios tanto no percurso de ida quanto no de volta. Adicionalmente, $\bar{\bar{X}}$ simboliza a parcela sistemática dos erros (MORAIS, 2015).

É importante notar que quando os valores médios no percurso de ida e volta possuem magnitudes iguais, mas sinais opostos, isso implica na anulação do erro sistemático, apesar de sua manifestação nos dois sentidos de deslocamento (MORAIS, 2015).

2.3 Apalpadores de medição

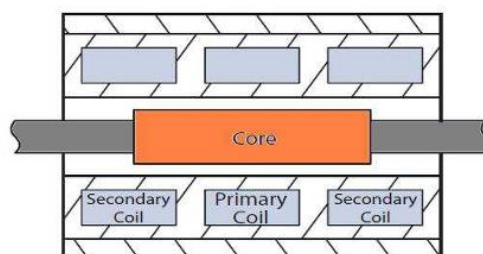
É o apalpador que provê a máquina com informação sobre a localização dos pontos de uma superfície de uma peça sob inspeção. Em função de suas

características, os apalpadores podem ser classificados como apalpador por contato ou sem contato (FERRAZ, 2005).

O apalpador do tipo Transdutor de Deslocamento Variável Linear (LVDT) foi desenvolvido pela primeira vez por Schaevitz em 1940 e desde então esse apalpador foi amplamente desenvolvido e aplicado em vários propósitos. Além disso, o LVDT foi modelado e analisado com a teoria do campo eletromagnético e seu desempenho é determinado pela geometria do transdutor, variação de excitação, corrente e frequência para determinar o desempenho proposto (JEFRIYANTO, et al., 2020).

O LVDT é um dispositivo eletromecânico que produz um sinal elétrico proporcional ao deslocamento de um núcleo móvel separado. Consiste em uma bobina primária (*primary coil*) e duas bobinas secundárias (*secondary coil*) simetricamente espaçadas em uma forma cilíndrica, como mostra a Figura 8. O núcleo ferromagnético (*core*) em forma de haste de movimento livre dentro do conjunto da bobina fornece um caminho para o fluxo magnético que liga as bobinas (TE CONNECTIVITY SENSORS, 2016).

Figura 8 - Bobinas e núcleo de um apalpador do tipo LVDT

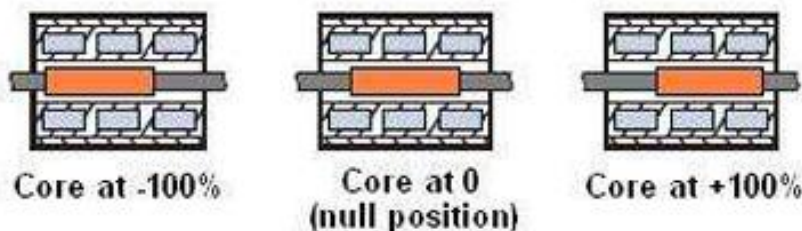


Fonte: TE Connectivity Sensors, 2016.

Quando a bobina primária é energizada por uma fonte externa, as tensões são induzidas nas duas bobinas secundárias. Essas bobinas secundárias são conectadas em série opostas, portanto, a saída líquida do transdutor é a diferença entre essas tensões que é zero quando o núcleo está no centro (posição nula). Quando o núcleo é afastado da posição nula, a tensão induzida na bobina secundária em direção à qual o núcleo é movido aumenta, enquanto a tensão induzida na bobina oposta diminui. Essa ação produz uma saída de tensão diferencial que varia linearmente com as mudanças na posição do núcleo. A fase deste sinal de saída muda abruptamente em 180° conforme o núcleo é movido de um lado do nulo para o outro. O núcleo deve estar sempre totalmente dentro do conjunto da bobina durante a operação do LVDT; caso contrário, ocorrerá não-

linearidade grosseira e as bobinas podem até superaquecer (TE CONNECTIVITY SENSORS, 2016). Isso é ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Posições nula e extremas do apalpador do tipo LVDT



Fonte: TE Connectivity Sensors, 2016.

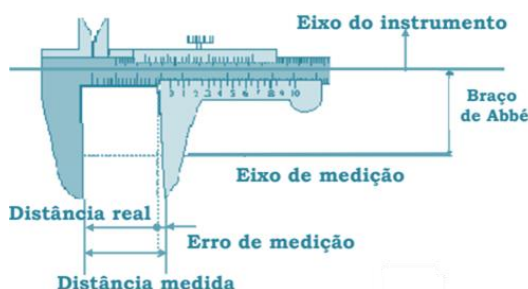
As principais fontes de erros que afetam a acurácia do sistema apalpador incluem desgaste dos apoios cinemáticos, flutuações na força aplicada, problemas eletrônicos, a direção de contato e imprecisões na esfericidade da ponta do apalpador, conforme discutido por Harvie (*apud* FERRAZ, 2005).

2.4 Transgressão ao Princípio de Abbe

De acordo com Zhang (1989), os erros do tipo Abbe surgem quando o eixo de deslocamento do transdutor ou da escala não está alinhado com os pontos em que a medição é realizada. Um exemplo ilustrativo desse erro é encontrado em um paquímetro, onde os pontos de contato do bico não coincidem com o eixo de deslocamento. Análogo a um torno mecânico, onde o erro de Abbe se tornaria evidente, uma vez que, ao realizar a medição de erros, os medidores utilizados deveriam estar posicionados de forma perpendicular ao eixo de movimento. A Figura 10 ilustra o erro de Abbe em um paquímetro.

Em um micrômetro convencional não há influência dos erros de Abbe, tendo em vista que este obedece ao princípio, pois os pontos de contato com o mensurando estão alinhados com o eixo de movimento da escala, como mostra a Figura 11 (ZHANG, 1989).

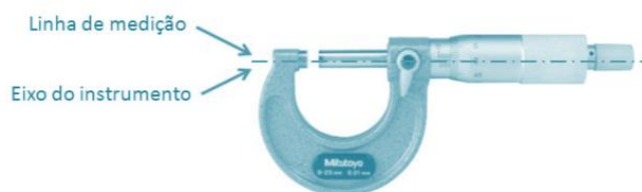
Figura 10 - Erro de Abbe em um paquímetro



Fonte: Adaptado de Marques, et al., 2018

O princípio de Abbe é chamado o primeiro princípio em metrologia por alguns estudiosos. A grande importância deste princípio na concepção de máquinas-ferramentas e nos métodos de medição foi comprovada pelas práticas de todo um centro, uma vez que o Prof. Ernst Karl Abbe propôs este princípio em 1890 (ZHANG, 1989).

Figura 11 - Eixo do micrômetro coincidente com o eixo de medição



Fonte: Adaptado de Souza e Arencibia, 2011

Para entender melhor o princípio de Abbe, Zhang (1989) parte da discussão de sua definição clássica de 1890. O princípio de Abbe diz:

1. Na medição de deslocamento, a referência deve estar alinhada com o deslocamento a ser medido ou com sua extensão.
2. No caso de a referência não estar alinhada com o deslocamento a ser medido, mas paralelamente a ela, a distância entre essas linhas paralelas é denominada Abbe offset R , ou braço de Abbe, como mostra a Figura 10.
3. No caso de estar em conformidade com o princípio de Abbe, o erro de movimento angular do dispositivo de medição causará apenas um erro de segunda ordem nas medições, o que é geralmente insignificante. Ao contrário, quando não está de acordo com o princípio de Abbe, no qual o desvio de Abbe $R \neq 0$, um erro de primeira ordem $\partial = R\Delta\psi$ será causado, sendo $\Delta\psi$ o erro de medição ilustrado na Figura 10. Este erro é chamado erro Abbe.

Em 1979, o principal metrologista do Laboratório Lawrence Livermore dos EUA, o Sr. J.B. Bryan propôs as seguintes declarações como princípio generalizado de Abbe:

O sistema de medição de deslocamento deve estar devidamente alinhado com o ponto funcional cujo deslocamento precisa ser medido. No caso de não ser possível alcançar um alinhamento direto, as guias que transmitem o deslocamento devem ser projetadas de modo a minimizar movimentos angulares indesejados, ou então, se houver tais movimentos, dados relacionados ao movimento angular devem

ser considerados no cálculo das variações resultantes do deslocamento (BRYAN *apud*. ZHANG, 1989).

O ponto efetivo de um sistema de medição da linearidade deve estar ao longo de uma linha perpendicular à direção do percurso da guia e passa pelo ponto funcional cuja linearidade deve ser medida (BRYAN *apud*. ZHANG, 1989).

A proposta de Bryan (1979) tornou o princípio do Abbe aplicável tanto para medições de deslocamento quanto de retitude (ZHANG, 1989).

2.5 Métodos de medição de erros geométricos

Atualmente, existem diferentes tecnologias e métodos de medição para identificar os erros geométricos de uma máquina-ferramenta (MUTILBA et al., 2017). Conforme afirmado por Schwenke et al. (2008), métodos diretos e indiretos podem ser distinguidos. Enquanto os métodos diretos permitem a medição de erros mecânicos para um único eixo da máquina sem o envolvimento de outro eixo, as medições indiretas requerem o movimento de vários eixos da máquina em caracterização.

Conforme apontado por Multiba et al. (2017) alguns exemplos de métodos diretos são:

- Métodos baseados em padrões, como bordas retas, escalas lineares, medidores de passos ou padrões ortogonais;
- Métodos baseados em laser ou dispositivos multidimensionais, como interferômetros ou barras telescópicas;
- Métodos baseados em gravidade que usam a direção do vetor de gravidade como uma referência metrológica.

Em estudos recentes, têm sido amplamente utilizados métodos de calibração de erros geométricos baseados em laser, conforme relatado por diversos autores, incluindo Chen, Lin e Liu (2017), Liu et al. (2018), Hsieh et al. (2019), Tai e Liu (2022), Jia et al. (2022) e Maruyama, Ibaraki e Sakata (2022).

Quanto aos exemplos de métodos indiretos, podem ser categorizados em duas abordagens: eixos lineares e rotativos. No caso dos eixos lineares, técnicas como testes circulares, teste diagonal, medição de artefatos, links passivos e interferômetro de rastreamento têm sido aplicadas. Por exemplo, Jiang e Cripps (2017) e Yang e Lee (2021) utilizaram o método de testes circulares, enquanto Deng et al. (2020) empregaram o interferômetro de rastreamento.

Para os eixos rotativos, métodos como *ball bar*, *r-teste*, medição de artefatos e testes de usinagem (MUTILBA et al., 2017) têm sido empregados. Notavelmente, nos últimos 6 anos, o método do *ball bar* tem sido amplamente explorado em estudos, como os conduzidos por Xia et al. (2017), Liu W. et al. (2018), Liu Y. et al. (2018), Chen, Zhang e Yuan (2022) e Kvgic et al. (2022).

2.5.1 Método de Calibração Indireta

A principal característica da Calibração Indireta é a avaliação dos erros da máquina utilizando padrões pré-qualificados e normalizados. Através dos anos, foram desenvolvidos e colocados para uso, diferentes padrões para calibração de máquinas, sendo que os artefatos utilizados possuem as mais diversas formas, desde as mais simples, como a barra de furos até estruturas mais complexas como o padrão tetraédrico, ilustrado na Figura 12 (FERRAZ, 2005 e ZIRONDI, 2002).

Figura 12 - Padrão tetraédrico



Fonte: Ferraz, 2005

Zirondi (2002) propôs um modelo de sintetização de erros aplicado em uma Máquina de Medir do tipo ponte móvel que envolveu a realização de ensaios planejados e executados utilizando barras de furos, ilustrada na Figura 13, e um esquadro mecânico. Concluindo que a utilização desses instrumentos atende aos requisitos de rastreabilidade e que, devido a facilidade de fabricação e calibração do artefato, o seu custo é menor que com outros artefatos, além de ser mais fácil de ser manuseado e posicionado.

Figura 13 - Barra de furos



Fonte: Zirondi, 2002

2.5.2 Separação de Erros

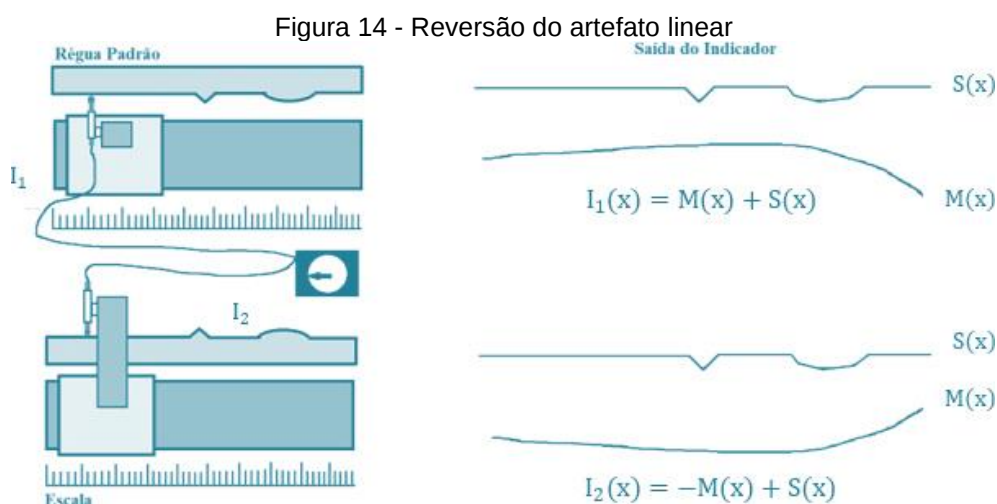
A separação de erros é uma abordagem que visa eliminar erros em uma característica medida, sem a necessidade de calibração. Através da separação de erros, é possível obter informações sobre o sistema de medição e as características da peça, empregando métodos matemáticos para a eliminação desses erros. Para isso, são requeridas medições redundantes, como explicado por Morais (2015).

Trabalhos publicados envolvendo separação de erros são relacionados tanto a sistemas rotativos quanto a sistemas compostos por guias lineares. Autores como Lin, Keller e Stein (2020), Kong et al. (2022) e Xiong (2022) avaliaram sistemas rotativos, enquanto o estudo de Liu (2020) está relacionado a sistemas com deslocamentos lineares, utilizando o método clássico de reversão linear.

2.5.2.1 Método de Separação por Reversão linear

Geralmente, o método de Separação por Reversão inclui duas etapas de medição no total. Na primeira etapa, a sonda é montada na frente do artefato, no que é arbitrariamente chamado de varredura normal. Na segunda etapa, o artefato é primeiro rotacionado 180° e em seguida, a sonda é instalada atrás deste. Essa medida é chamada de varredura reversa (LIU, et al., 2020).

A Figura 14 representa as montagens dos sistemas de medição para a reversão do artefato e o comportamento das saídas do indicador, com os perfis de erro de retitude do carro e do artefato.



Fonte: Adaptado de Evans, Hocken e Estler (1996)

Evans, Hocken e Estler (1996) nomearam o perfil da retitude do mecanismo de deslizamento da máquina por $M(x)$ e o desvio do artefato por $S(x)$.

Assim, os indicadores de saída para as duas posições de medição são descritos pelas Equações 1 e 2.

$$I_1(x) = M(x) + S(x) \quad \text{Equação 1}$$

$$I_2(x) = -M(x) + S(x) \quad \text{Equação 2}$$

Reagrupando os termos das Equações 1 e 2, pode-se isolar os erros de retitude do carro do torno e do artefato, chegando-se nas Equações 3 e 4.

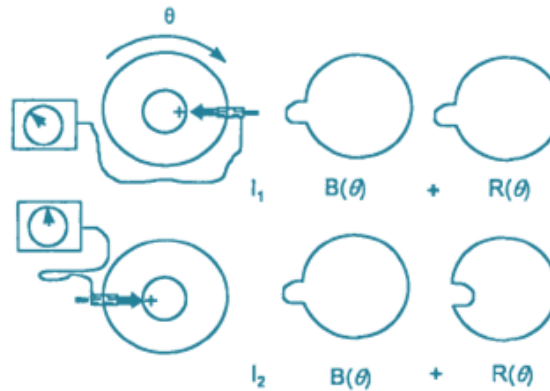
$$M(x) = \frac{I_1(x) - I_2(x)}{2} \quad \text{Equação 3}$$

$$S(x) = \frac{I_1(x) + I_2(x)}{2} \quad \text{Equação 4}$$

2.5.2.2 Reversão de esfera

Evans, Hocken e Estler (1996) afirmam que a reversão de esfera, introduzida por Donaldson, é exatamente análoga à reversão linear, onde o movimento radial do fuso é dado por $R(\theta)$ e a dimensão da esfera é dada por $B(\theta)$, ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Reversão da esfera



Fonte: Evans, Hocken e Estler (1996)

Supondo que a informação angular seja derivada da posição do fuso, a saída do indicador, $I_n(\theta)$ para as duas posições são:

$$I_1(\theta) = R(\theta) + B(\theta) \quad \text{Equação 5}$$

$$I_2(\theta) = -R(\theta) + B(\theta) \quad \text{Equação 6}$$

Reagrupando os termos das Equações 5 e 6, pode-se isolar os erros do movimento radial do fuso da dimensão da esfera, chegando-se nas Equações 7 e 8.

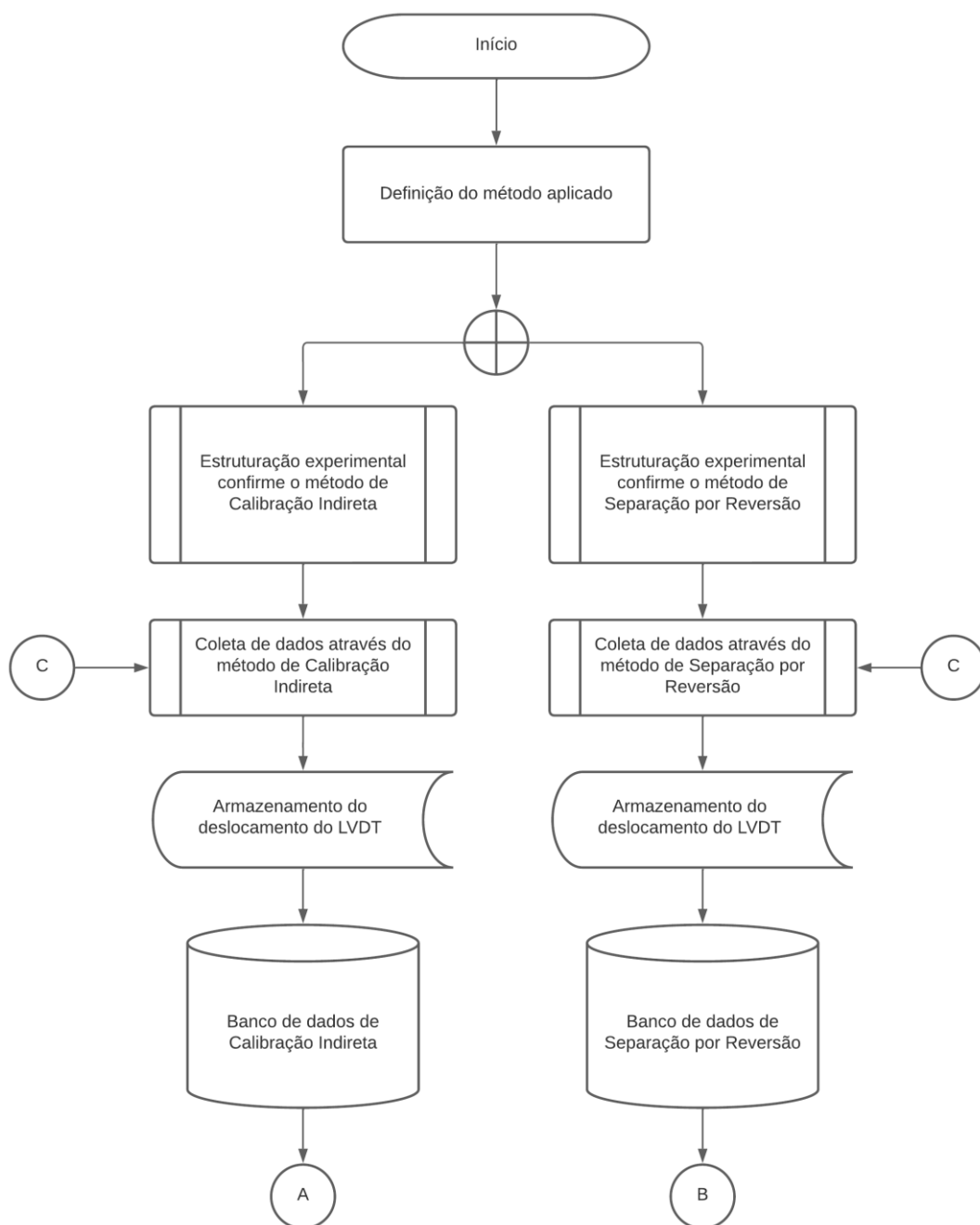
$$R(\theta) = \frac{I_1(\theta) - I_2(\theta)}{2} \quad \text{Equação 7}$$

$$B(\theta) = \frac{I_1(\theta) + I_2(\theta)}{2} \quad \text{Equação 8}$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

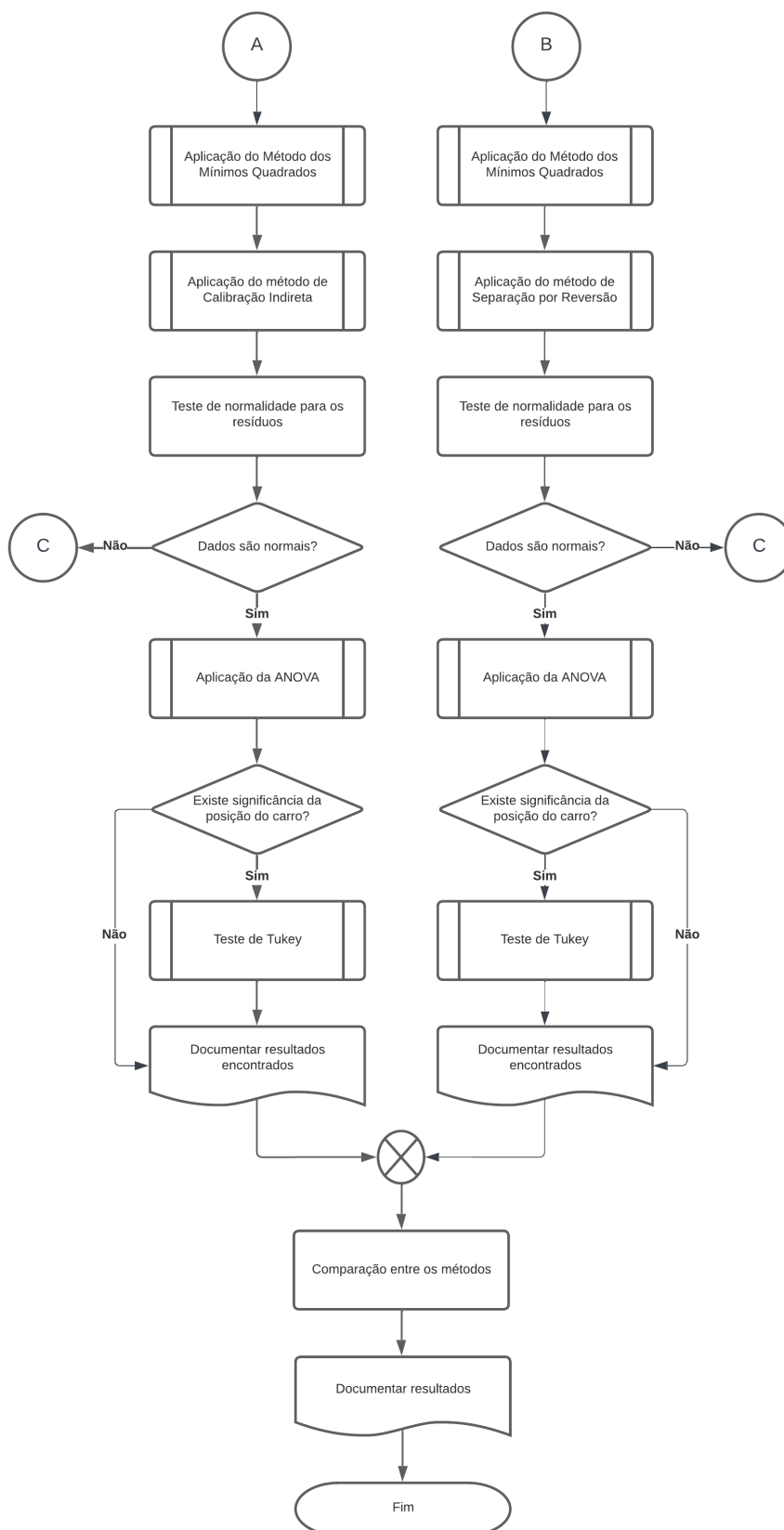
Esse capítulo discorre sobre como foi feita a estruturação experimental, seguida pela explicação de como foi realizada a coleta de dados para a aplicação dos métodos de Calibração Indireta e Separação por Reversão, finalizando com a explicação do tratamento experimental. As Figura 16 e Figura 17 apresentam os fluxogramas referentes a metodologia aplicada.

Figura 16 - Fluxograma 1 ilustrando parte da metodologia aplicada



Fonte: autoria própria

Figura 17 - Fluxograma 2 ilustrando parte da metodologia aplicada



Fonte: autoria própria

3.1 Medição dos desvios

Os materiais utilizados para execução dos experimentos foram: um torno mecânico universal VEKER TVK-2060ECO, um indicador digital de posição VEKER SDS6-2V, suporte magnético articulado, apalpador indutivo do tipo LVDT e coluna de medição Milimar com resolução de 0,0001 mm. Além disso, o *software* MarCom Professional foi instalado a um notebook para que os dados coletados fossem organizados automaticamente em uma planilha Excel. Na Figura 18 é possível observar como ficou estruturada a etapa experimental.

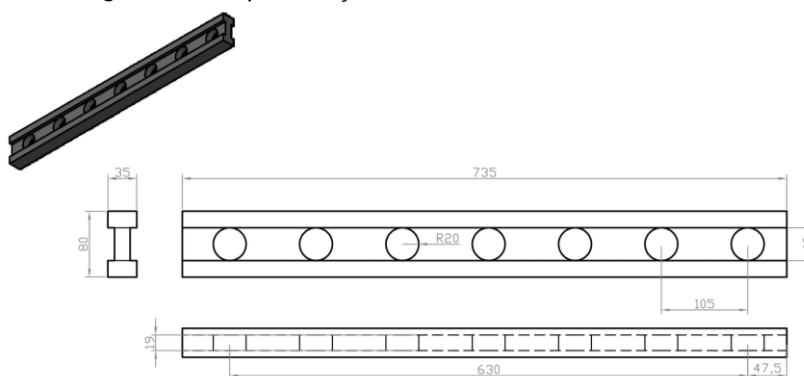
Figura 18 - Estruturação da etapa experimental



Fonte: autoria própria.

O artefato utilizado para medição foi uma barra de furos retificada com oxidação negra de 735 mm de comprimento, Figura 19, a barra tem seção transversal em formato de “H” a fim de minimizar as deformações quando estiver biapoiada.

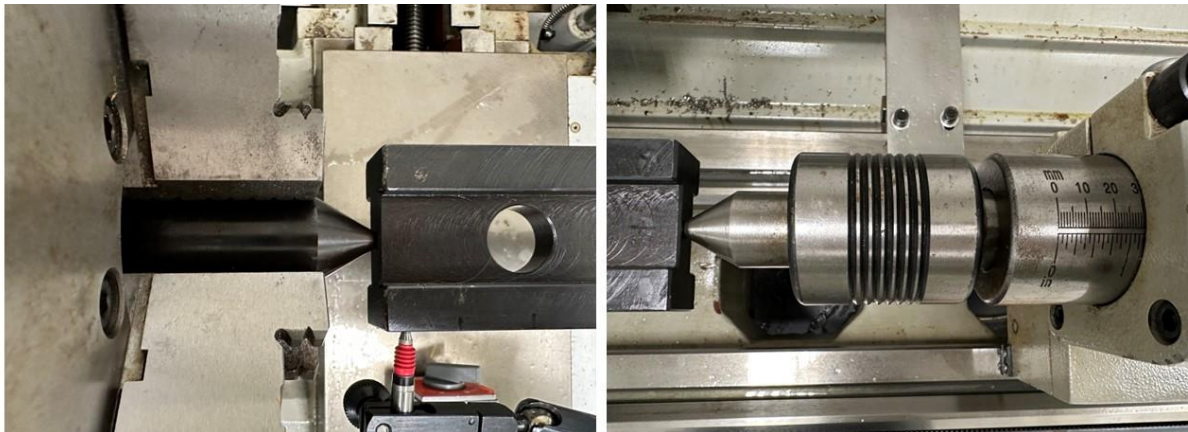
Figura 19 - Especificações do artefato metálico utilizado



Fonte: autoria própria

Como mostra a Figura 20, a ponta utilizada para fixação do artefato foi fixada entre as três castanhas da placa, em seguida a contra-ponta foi inserida no cabeçote móvel com o mangote estendido em 30 mm e a barra metálica com a face de medição demarcada foi fixada entre a ponta e contra-ponta.

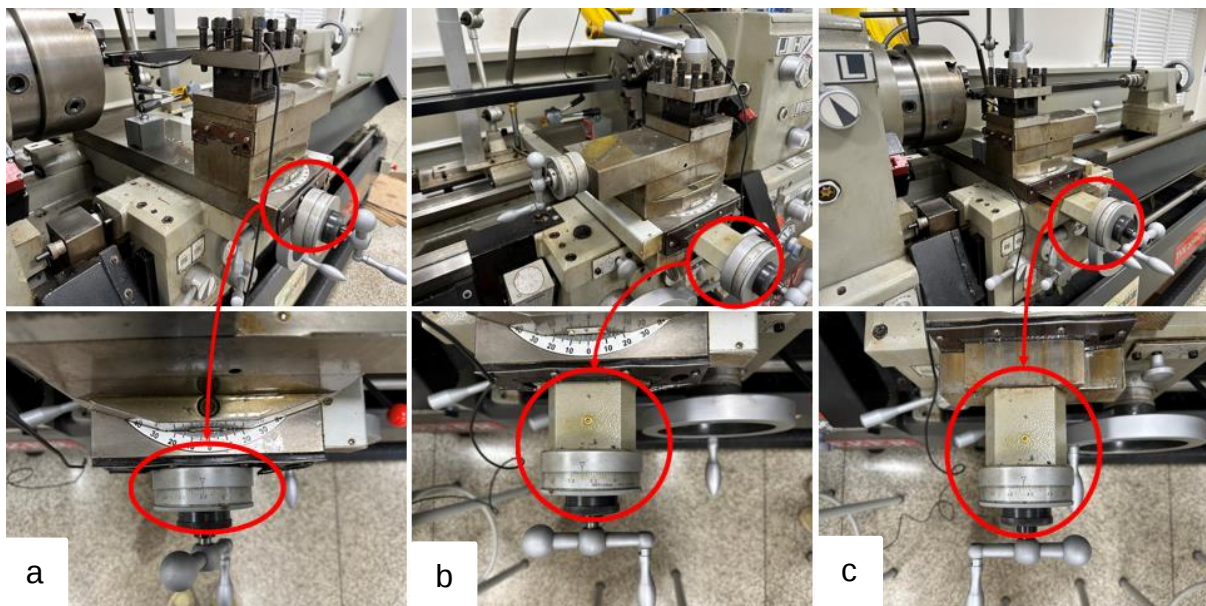
Figura 20 - Fixação do artefato de aço entre ponta e contra-ponta



Fonte: autoria própria

Posteriormente, o indicador digital de deslocamentos dos carros do torno foi ligado para acompanhar a posição do carro transversal. Como ilustra a Figura 21, o experimento foi feito para as posições de 0 mm, 125 mm e 250 mm do carro transversal, sendo 0 mm a posição mais distante da face da barra. Isso foi feito com o intuito de simular a usinagem de peças com diâmetros distintos.

Figura 21 – Deslocamento do carro transversal de (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm



Fonte: autoria própria.

Para garantir que o LVDT ficasse sempre na mesma posição, foi feita uma marcação central na lateral da barra, indicando onde o LVDT deveria ser posicionado. Sendo assim, a Figura 22 ilustra como foi feita a fixação da base magnética e do LVDT para cada posição do carro transversal.

A montagem do LVDT foi realizada com uma abordagem cuidadosamente planejada, visando à significativa redução da influência do braço de Abbe no sistema. Para atingir esse propósito, adotou-se uma configuração na qual o braço articulado do suporte magnético foi posicionado em sua posição mais recolhida possível. Essa escolha de montagem se baseou na compreensão de que, ao minimizar a extensão do braço articulado, a interferência do braço de Abbe foi substancialmente mitigada, garantindo uma maior precisão e confiabilidade nas medições realizadas pelo LVDT. Essa estratégia desempenha um papel fundamental na asseguuração da acurácia das medições obtidas, tornando-a uma prática indispensável na configuração e montagem de sistemas de medição sensíveis e precisos.

Figura 22 - Posição do LVDT anterior a reversão para (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm



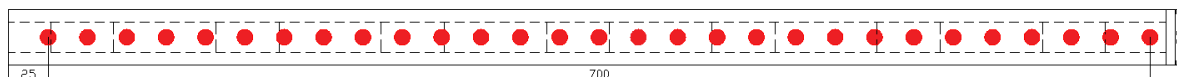
Fonte: autoria própria

Com a fixação do artefato e a montagem dos dispositivos e instrumentos de medição devidamente conectados, a medição foi iniciada. Primeiramente foi realizado o procedimento para análise por Calibração Indireta e posteriormente para a análise por Separação de Erros.

3.2 Calibração Indireta

Por se tratar da referência de medição, a leitura foi zerada no primeiro ponto. Em seguida, deslocou-se o carro longitudinal manualmente 25 mm no comprimento da barra e foi coletado o segundo ponto. Este procedimento foi realizado até completar o deslocamento de 725 mm, correspondente ao último ponto na direção de “ida”, movimento do carro à direita. A Figura 23 ilustra esses pontos.

Figura 23 - Pontos de coleta de dados

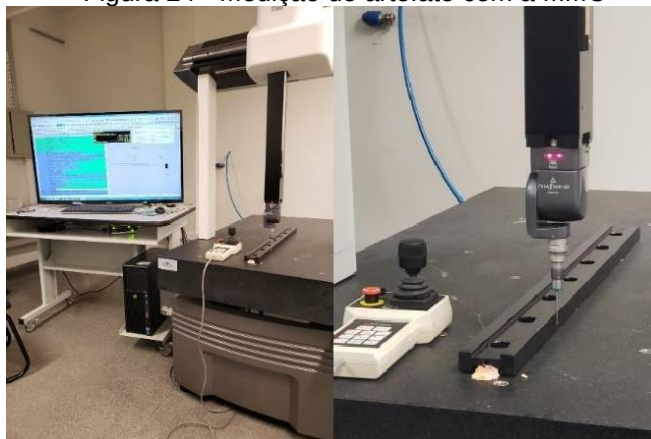


Fonte: autoria própria

Para redução dos desvios de folga do mecanismo de deslocamento, conhecido como *backlash*, o sentido do deslocamento era invertido após a movimentação extra de 7 mm, para então os pontos serem registrados novamente, dessa vez no sentido de “volta”, à esquerda. Com isso, foram realizados 10 ciclos para cada posição do carro transversal, sendo que cada ciclo é composto por 29 pontos no sentido de ida e mais 29 no sentido de volta. Com isso, cada ponto foi nomeado como LaTb, sendo a a identificação do ponto longitudinal, indo de 0 a 28 e b a identificação do ponto transversal, sendo 0, 125 ou 250.

Outro passo importante para a aplicação do método de Calibração Indireta foi a análise do artefato através da MMC (MMC) do tipo ponte móvel, de marca HEXAGON e resolução de 0,000001 mm. Essa coleta foi realizada no departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC – USP para o mesmo artefato utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 24 - Medição do artefato com a MMC



Fonte: Rocha, 2019

Os pontos foram coletados na superfície das faces do artefato com deslocamentos de 1 mm a partir do ponto inicial, em toda extensão do artefato e na mesma face medida com o LVDT no torno. A medição com a MMC foi repetida três vezes e a coleta dos pontos foi feita de modo automático. A Figura 24 ilustra a medição do artefato com a MMC.

3.3 Separação por Reversão

O procedimento realizado na Calibração Indireta foi repetido, concluindo uma etapa do método. No entanto, a Separação por Reversão exige mais uma etapa de coleta de dados, desta vez rotacionando o artefato em 180° em torno das pontas de fixação e reposicionando o suporte magnético e LVDT de forma que a mesma face continuasse sendo registrada, como observa-se na Figura 25. As medições foram repetidas 10 vezes para cada posição do carro transversal.

Figura 25 - Posição do LVDT após a reversão para (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm



Fonte: autoria própria.

3.4 Tratamento dos dados e aplicação dos Métodos Estatísticos

Os itens seguintes apresentam conceitos estatísticos que foram utilizados no desenvolvimento deste trabalho, iniciando pelo Método dos Mínimos Quadrados e passando para Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey.

3.4.1 Método dos Mínimos Quadrados

O tratamento dos dados experimentais coletados foi feito utilizando-se o Método dos Mínimos Quadrados para remover matematicamente o desalinhamento da montagem do artefato e, deste modo, analisar os valores de deslocamentos transversais ao barramento.

O Método dos Mínimos Quadrados é amplamente empregado na área da física e em diversas outras ciências experimentais como a principal técnica para ajustar parâmetros e dados experimentais (HELENE, 2006), esse método analisa o desvio entre os valores coletados experimentalmente para um ponto (y'_i) e o valor estimado (y_i) para esse ponto através de uma reta de ajuste. O desvio é dado pela Equação 9.

$$\text{Desvio} = y'_i - y_i \quad \text{Equação 9}$$

Considerando y_i a equação da reta de ajuste, chega-se na Equação 10.

$$y_i = mx_i + b \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

- m = coeficiente angular da reta de ajuste;
- b = coeficiente linear da reta, que intercepta o eixo y ;
- x_i = deslocamento do carro longitudinal do torno.

Para o desenvolvimento dos mínimos quadrados, é preciso então analisar o quadrado do desvio observado pela Equação 11.

$$\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2 = W \quad \text{Equação 11}$$

Substituindo 6 em 7, analisando as derivadas parciais de W em relação a cada um desses coeficientes e igualando a zero, chega-se nas Equações 12 e 13.

$$m = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y'_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y'_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad \text{Equação 12}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y'_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y'_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad \text{Equação 13}$$

3.4.2 Teste de Hipóteses e ANOVA

Experimentos desempenham um papel essencial no processo de tomada de decisão tanto na engenharia como no gerenciamento. Frequentemente, decisões são tomadas em resposta a problemas, e muitos desses problemas envolvem a necessidade de aceitar ou rejeitar uma afirmação específica. Essa afirmação é comumente referida como hipótese, e o processo de avaliação para chegar a uma solução é conhecido como teste de hipótese (HINES et al., 2013).

Segundo Quinsler (2022), o teste de hipótese é uma técnica utilizada para fazer uma inferência estatística, por meio dele é possível aceitar ou rejeitar uma hipótese estatística. Se a informação for consistente com a hipótese, conclui-se que a hipótese é verdadeira, caso contrário, esta hipótese é considerada falsa, estas duas possibilidades são chamadas de hipótese nula e hipótese alternativa (HINES et al., 2013).

A hipótese alternativa geralmente representa a questão que se busca responder ou a teoria a ser testada, enquanto a hipótese nula nega ou se opõe à hipótese alternativa, muitas vezes apresentando seu complemento lógico. Portanto, o teste de hipótese consiste em confrontar a hipótese nula com a hipótese alternativa (QUINSLER, 2022).

O teste de hipótese é aplicado para verificar a igualdade entre duas médias. Entretanto, quando há necessidade de comparar três ou mais médias, simultaneamente, a comparação de duas a duas seria um trabalho um pouco diferente. Com o intuito de solucionar esse problema, Fisher criou a denominada ANOVA, que permite realizar a comparação de médias de várias amostras (CASTANHEIRA, 2018).

Sendo assim, a hipótese nula (H_0) é que $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$ e a hipótese alternativa (H_1) afirma que as médias não são todas iguais. O primeiro passo para a análise de variância é calcular a média de cada amostra, o que pode ser chamado de $\bar{X}_i$ e, em seguida, determinar a média total $\bar{X}$ (média das médias).

A variância da amostra, para todas as médias, será obtida pela Equação 14, em que n é o número total de amostras:

$$S^2 = \frac{\sum(\bar{X}_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad \text{Equação 14}$$

O próximo passo é calcular, com a Equação 15, a variância amostral para cada grupo de resultados, em que q é o número de dados de cada amostra.

$$S_i^2 = \frac{\sum(X_i - \bar{X}_i)^2}{q - 1} \quad \text{Equação 15}$$

Então, a média dessas variâncias amostrais é definida através da Equação 16.

$$\bar{S}^2 = \frac{\sum S_i^2}{n} \quad \text{Equação 16}$$

Quanto maior foi S_i^2 , maior a probabilidade de $\bar{X}_i$ serem diferentes. Logo, quanto maior for $\bar{S}^2$, maior a chance de aceitar H_0 (CASTANHEIRA, 2018). Conhecendo a variância da amostra para todas as médias e a média das três variâncias amostrais, é possível calcular o valor F pela Equação 17.

$$F = \frac{q \cdot S^2}{\bar{S}^2} \quad \text{Equação 17}$$

Tradicionalmente, o valor F é utilizado para determinar qual hipótese deve ser aceita, porém alguns softwares utilizam o *p-valor*.

O modelo ANOVA pressupõe uma série de requisitos nominados de independência e normalidade. Para garantir o primeiro, é importante que, ao realizar o planejamento experimental, atentar-se para obtê-los de forma aleatória (PIANEZZER, 2020).

Para a análise dos resultados, foi aplicado um teste de hipóteses com a ANOVA, para verificar a influência da posição transversal nos resultados obtidos, e posteriormente analisar também a influência da posição longitudinal sobre os erros encontrados. Foi considerado um nível de 5% de significância (α), sendo as hipóteses:

- H_0 : a posição do carro não influencia os resultados;
- H_1 : a posição do carro influencia os resultados.

Importante observar que a hipótese alternativa mostra apenas se há uma média diferente das demais, não necessariamente diz que todas são diferentes (DOWNING e CLARK, 2003). Para identificar quais médias apresentam diferenças significativas e qual o melhor agrupamento entre elas, podem ser aplicados diversos tipos de testes, um deles é conhecido como Teste de Tukey, (OLIVEIRA, 2008).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo discute sobre os resultados obtidos com os métodos de Calibração Indireta e Separação por Reversão, além de realizar a comparação de ambos.

4.1 Calibração Indireta

Os itens a seguir apresentam os resultados obtidos a partir da aplicação do método de Calibração Indireta. Primeiramente são apresentados os resultados obtidos com a MMC, em seguida são apresentados os resultados da remoção de desalinhamento através dos Métodos dos Mínimos Quadrados.

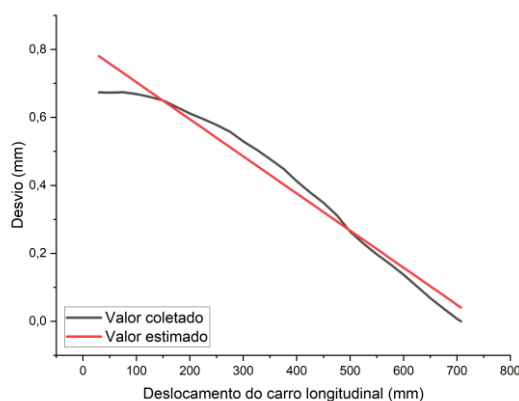
Posteriormente, estão os desvios obtidos após a remoção do desalinhamento para cada posição transversal do torno nos sentidos de ida e volta e os resultados obtidos para perfil de retitude do artefato e desvio do carro longitudinal após a aplicação do método de Calibração Indireta.

Por fim, são apresentados os resultados obtidos com a ANOVA e Teste de Tukey para verificar a influência da posição transversal e longitudinal do carro do torno sobre o desvio.

4.1.1 Medição do artefato com a MMC

A Figura 26 exibe o perfil do comportamento dos dados adquiridos por meio da MMC. Além disso, por meio da aplicação do Método dos Mínimos Quadrados, foi obtida a reta de ajuste que descreve a inclinação da instrumentação, proporcionando uma indicação precisa do desalinhamento da montagem do artefato em relação à direção de coleta de dados.

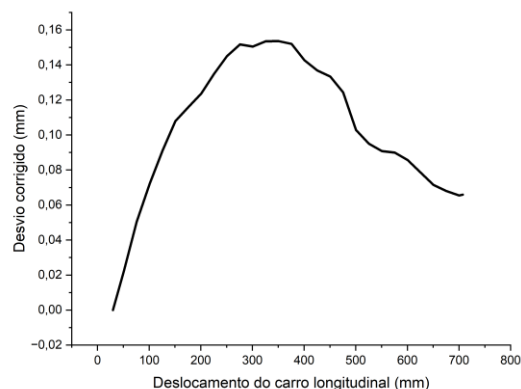
Figura 26 - Perfil de dados experimentais e reta de ajuste para a MMC



Fonte: autoria própria

Com a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados foi removido matematicamente o desalinhamento da montagem do artefato e o resultado é ilustrado na Figura 27, sendo este o erro de retitude do artefato utilizado.

Figura 27 - Desvio corrigido da MMC após a aplicação do método dos mínimos quadrados

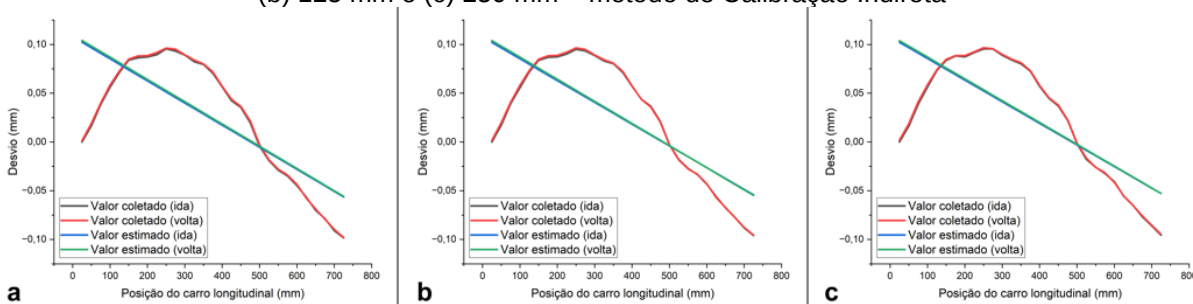


Fonte: autoria própria

4.1.2 Medição do artefato com o LVDT fixado no carro longitudinal

A Figura 28 apresenta, para todas as posições do carro transversal, o perfil de comportamento dos dados obtidos pelas medições e, aplicando-se o Método dos Mínimos Quadrados, também a reta de ajuste. Observando os perfis de ida e volta, nota-se uma pequena divergência, explicado pela histerese

Figura 28 - Perfil de dados experimentais e reta de ajuste para as posições transversais de (a) 0 mm (b) 125 mm e (c) 250 mm – método de Calibração Indireta

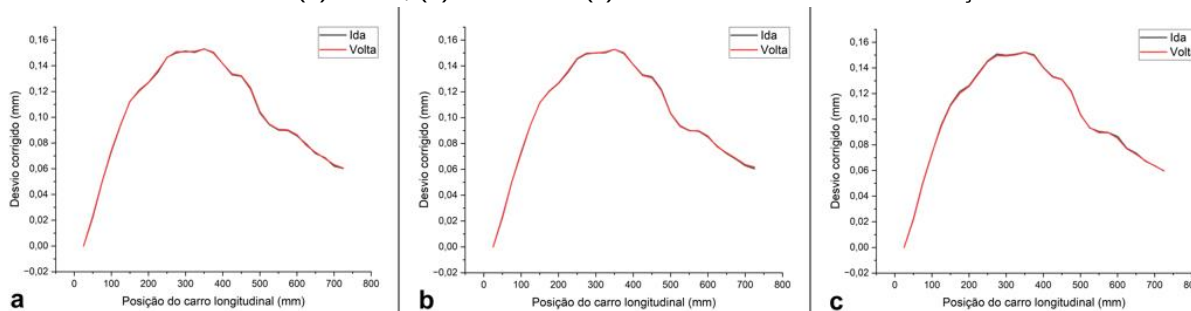


Fonte: autoria própria

Com a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados foi removido matematicamente o desalinhamento da montagem do artefato. A partir da Figura 29, percebe-se que os dados obtidos a cada ponto são muito semelhantes em todas as posições do carro transversal e nos sentidos de ida e volta. Porém, é importante ressaltar que os desvios apresentados aqui não representam puramente os erros geométricos do torno. O perfil ilustrado na Figura 29 é uma sobreposição dos erros de retitude do artefato em si com os erros de retitude do carro de deslocamento longitudinal do torno que incidem sobre a direção transversal.

Figura 29 - Desvio corrigido após a aplicação do método dos mínimos quadrados para as posições

transversais de (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm - método de Calibração Indireta



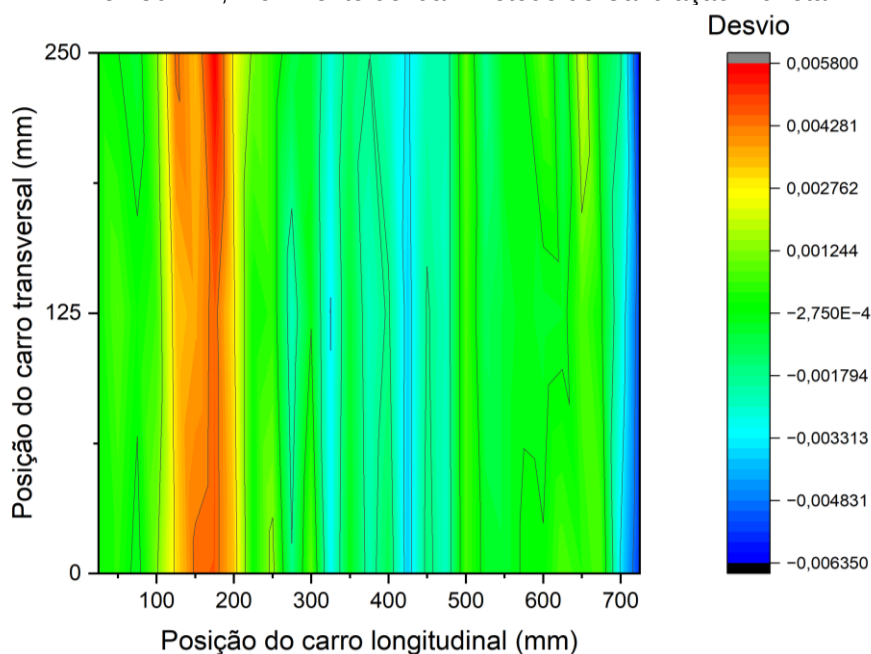
Fonte: autoria própria

4.1.3 Aplicação de método de Calibração Indireta

Para o erro transversal do carro longitudinal do torno, foram obtidos os resultados dispostos na Figura 30 e Figura 31.

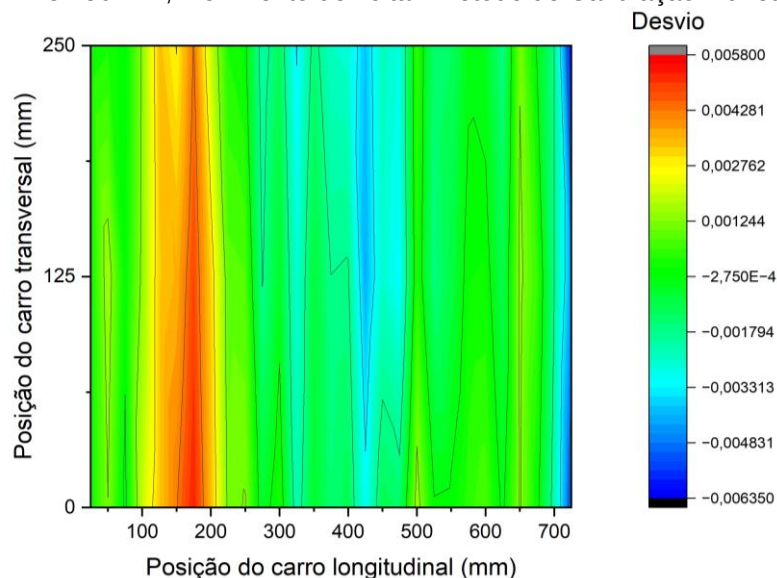
É possível observar como o desvio do carro está concentrado na região entre 100 mm e 200 mm do deslocamento longitudinal, mesmo para diferentes posições transversais, o que é um forte indício de que a posição longitudinal do carro do torno exerce influência sobre os erros. Em contrapartida percebe-se que os erros do carro pouco variam para as diferentes posições transversais do torno.

Figura 30 - Erro transversal do carro longitudinal do torno para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm, movimento de ida - método de Calibração Indireta



Fonte: autoria própria

Figura 31 - Erro transversal do carro longitudinal do torno para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm, movimento de volta - método de Calibração Indireta



Fonte: autoria própria

4.1.4 ANOVA e Teste de Tukey

Os itens a seguir tem o objetivo de verificar a influência da posição transversal e longitudinal do carro do torno sobre o desvio. Para isso, são apresentados os resultados obtidos para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm e posteriormente para os pontos longitudinais de 50 mm, 200 mm, 375 mm, 550 mm e 700 mm. Esses pontos foram escolhidos por estarem distribuídos nas extremidades e regiões centrais, representando bem o comprimento do artefato, como mostra a Figura 23.

4.1.4.1 Posição transversal do torno de 0 mm

O primeiro passo da análise foi realizar o teste de normalidade para os resíduos, utilizando os 10 ciclos do sentido de ida, constatou-se que os resultados seguem uma distribuição normal, como ilustra a Figura 1, Apêndice A.

Com $p\text{-value} > 0,05$, os dados apresentam uma normal. Sendo assim, os resultados da análise estatística para a posição transversal do torno de 0 mm estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - ANOVA para a posição transversal de 0 mm – método de Calibração Indireta

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	27	0,001513	0,000056	39,02	0,000
Erro	252	0,000362	0,000001		
Total	279	0,001875			

Fonte: autoria própria

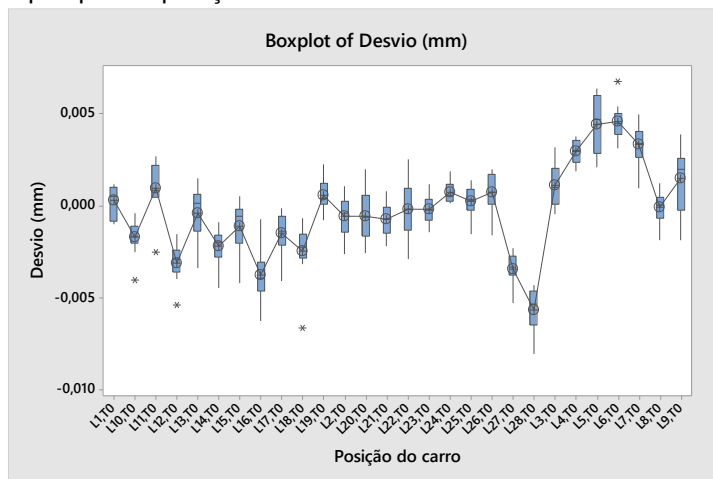
Por meio da ANOVA verificou-se ***p-value* $\leq 0,05$** , o que indica que, para a posição transversal de 0 mm, existe significância da posição longitudinal sobre os resultados dos desvios.

A Figura 32 representa a posição das médias e a variação de dados observados para cada posição longitudinal.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos pelo Teste de Tukey, após verificação da significância da posição longitudinal sobre os resultados dos desvios.

Através do agrupamento, o teste de Tukey evidencia quais pontos longitudinais não apresentam diferença significativa entre os resultados obtidos, onde valores acompanhados de mesma letra não diferem estatisticamente.

Figura 32 - Boxplot para a posição transversal de 0 mm – método de Calibração Indireta



Fonte: autoria própria

Tabela 2 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 0 mm – método de Calibração Indireta

Fatores	n	Média (mm)	Agrupamento									
L6,T0	10	0,004582	A									
L5,T0	10	0,004418	A									
L7,T0	10	0,003339	A	B								
L4,T0	10	0,002971	A	B	C							
L9,T0	10	0,001495		B	C	D						
L3,T0	10	0,001130		B	C	D	E					
L11,T0	10	0,000934				D	E					
L24,T0	10	0,000736				D	E	F				
L26,T0	10	0,000714				D	E	F				
L19,T0	10	0,000600				D	E	F				
L1,T0	10	0,000283				D	E	F	G			
L25,T0	10	0,000235				D	E	F	G	H		
L8,T0	10	-0,000102				D	E	F	G	H		
L22,T0	10	-0,000166				D	E	F	G	H		
L23,T0	10	-0,000183				D	E	F	G	H		
L13,T0	10	-0,000384				D	E	F	G	H	I	
L20,T0	10	-0,000539					E	F	G	H	I	J
L2,T0	10	-0,000553					E	F	G	H	I	J
L21,T0	10	-0,000716					E	F	G	H	I	J
L15,T0	10	-0,001097						F	G	H	I	J

L17,T0	10	-0,001496		G	H	I	J	K	
L10,T0	10	-0,001711			H	I	J	K	
L14,T0	10	-0,002188				I	J	K	L
L18,T0	10	-0,002480					J	K	L
L12,T0	10	-0,003099						K	L
L27,T0	10	-0,003421						K	L
L16,T0	10	-0,003780							L M
L28,T0	10	-0,005654							M

Fonte: autoria própria

4.1.4.2 Posição transversal do torno de 125 mm

Ao realizar o teste de normalidade para os resíduos, utilizando os 10 ciclos do sentido de ida, constatou-se que os resultados seguem uma distribuição normal, como ilustra a Figura 1, Apêndice A.

Sendo assim, os resultados da análise estatística para a posição transversal do torno de 125 mm estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - ANOVA para a posição transversal de 125 mm – método de Calibração Indireta

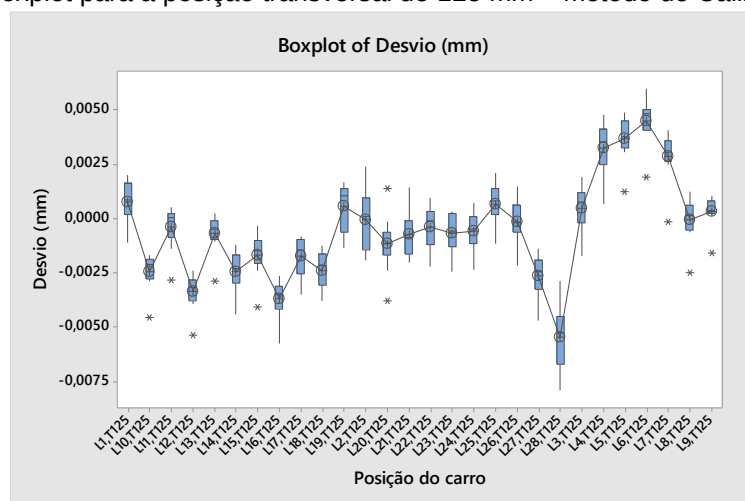
Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	27	0,001365	0,000051	46,25	0,000
Erro	252	0,000275	0,000001		
Total	279	0,001640			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se **p-value $\leq 0,05$** , o que indica que, para a posição transversal de 125 mm, existe significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

A Figura 33 representa a posição das médias e a variação de dados observados para cada posição longitudinal.

Figura 33 - Boxplot para a posição transversal de 125 mm – método de Calibração Indireta



Fonte: autoria própria

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos pelo Teste de Tukey, após verificação da significância da posição longitudinal sobre os resultados dos desvios.

Tabela 4 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 125 mm – método de Calibração Indireta

Fatores	n	Média (mm)	Agrupamento						
L6,T125	10	0,004528	A						
L5,T125	10	0,003694	A						
L4,T125	10	0,003268	A						
L7,T125	10	0,002884	A						
L1,T125	10	0,000762		B					
L25,T125	10	0,000706		B					
L19,T125	10	0,000596		B					
L3,T125	10	0,000497		B	C				
L9,T125	10	0,000328		B	C				
L2,T125	10	-0,000025		B	C	D			
L8,T125	10	-0,000038		B	C	D			
L26,T125	10	-0,000120		B	C	D			
L11,T125	10	-0,000350		B	C	D			
L22,T125	10	-0,000390		B	C	D			
L24,T125	10	-0,000550		B	C	D			
L13,T125	10	-0,000650		B	C	D	E		
L23,T125	10	-0,000660		B	C	D	E		
L21,T125	10	-0,000710		B	C	D	E	F	
L20,T125	10	-0,001150			C	D	E	F	G
L15,T125	10	-0,001670				D	E	F	G
L17,T125	10	-0,001710				D	E	F	G
L18,T125	10	-0,002360					E	F	G
L10,T125	10	-0,002430						F	G
L14,T125	10	-0,002440						F	G
L27,T125	10	-0,002610							G
L12,T125	10	-0,003350							H
L16,T125	10	-0,003680							H
L28,T125	10	-0,005440							I
									J

Fonte: autoria própria

4.1.4.3 Posição transversal do torno de 250 mm

Ao realizar o teste de normalidade para os resíduos, utilizando os 10 ciclos do sentido de ida, constatou-se que os resultados seguem uma distribuição normal, como ilustra a Figura 1, Apêndice A.

Sendo assim, os resultados da análise estatística para a posição transversal do torno de 250 mm estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - ANOVA para a posição transversal de 250 mm – método de Calibração Indireta

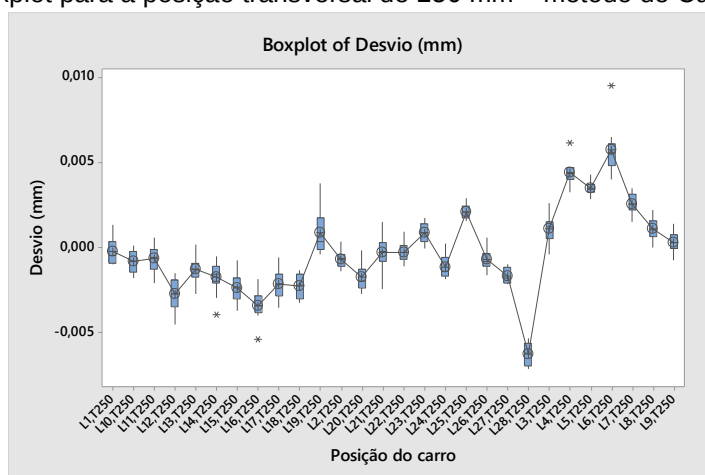
Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	27	0,001669	0,000062	91,79	0,000
Erro	252	0,000170	0,000001		
Total	279	0,001839			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se ***p-value* ≤ 0,05**, o que indica que, para a posição transversal de 250 mm, existe significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

A Figura 34 representa a posição das médias e a variação de dados observados para cada posição longitudinal.

Figura 34 - Boxplot para a posição transversal de 250 mm – método de Calibração Indireta



Fonte: autoria própria

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos pelo Teste de Tukey, após verificação da significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

Tabela 6 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 250 mm – método de Calibração Indireta

Fatores	n	Média (mm)	Agrupamento																									
L6,T250	10	0,005768	A																									
L4,T250	10	0,004418	A	B																								
L5,T250	10	0,003469		B	C																							
L7,T250	10	0,002569			C	D																						
L25,T250	10	0,002101				D	E																					
L3,T250	10	0,001082					E	F																				
L8,T250	10	0,001062					E	F	G																			
L19,T250	10	0,000851					E	F	G	H																		
L23,T250	10	0,000845					E	F	G	H																		
L9,T250	10	0,000293						F	G	H	I																	
L1,T250	10	-0,000250						F	G	H	I	J																
L22,T250	10	-0,000290							G	H	I	J																
L21,T250	10	-0,000310								H	I	J																
L11,T250	10	-0,000690									I	J	K															
L2,T250	10	-0,000700									I	J	K															
L26,T250	10	-0,000750									I	J	K															
L10,T250	10	-0,000850									I	J	K	L														
L24,T250	10	-0,001180										J	K	L	M													
L13,T250	10	-0,001330										J	K	L	M													
L27,T250	10	-0,001700											K	L	M	N												
L14,T250	10	-0,001780											K	L	M	N												
L20,T250	10	-0,001790											K	L	M	N												
L17,T250	10	-0,002180												L	M	N	O											
L18,T250	10	-0,002270													M	N	O											
L15,T250	10	-0,002390														M	N	O										
L12,T250	10	-0,002770															N	O										
L16,T250	10	-0,003450																O										
L28,T250	10	-0,006300																										P

Fonte: autoria própria

4.1.4.4 Posição longitudinal do torno de 50 mm

Os resultados da análise estatística para a posição longitudinal do torno de 50 mm estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - ANOVA para a posição longitudinal de 50 mm – método de Calibração Indireta

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	2	0,000005	0,000003	3,28	0,053
Erro	27	0,000021	0,000001		
Total	29	0,000026			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se **p-value > 0,05**, o que indica que, para a posição longitudinal de 50 mm, **não** existe significância da posição transversal sobre os resultados dos erros. Para esta análise foram utilizados os valores obtidos nesse ponto para os sentidos de ida.

4.1.4.5 Posição longitudinal do torno de 200 mm

Os resultados da análise estatística para a posição longitudinal do torno de 200 mm estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - ANOVA para a posição longitudinal de 200 mm – método de Calibração Indireta

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	2	0,000003	0,000001	1,41	0,261
Erro	27	0,000029	0,000001		
Total	29	0,000032			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se **p-value > 0,05**, o que indica que, para a posição longitudinal de 200 mm, **não** existe significância da posição transversal sobre os resultados dos erros. Para esta análise foram utilizados os valores obtidos nesse ponto para os sentidos de ida.

4.1.4.6 Posição longitudinal do torno de 375 mm

Os resultados da análise estatística para a posição longitudinal do torno de 375 mm estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - ANOVA para a posição longitudinal de 375 mm – método de Calibração Indireta

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	2	0,000002	0,000001	1,17	0,325
Erro	27	0,000026	0,000001		
Total	29	0,000028			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se **p-value > 0,05**, o que indica que, para a posição longitudinal de 375 mm, **não** existe significância da posição transversal sobre os resultados dos erros. Para esta análise foram utilizados os valores obtidos nesse ponto para os sentidos de ida.

4.1.4.7 Posição longitudinal do torno de 550 mm

Os resultados da análise estatística para a posição longitudinal do torno de 550 mm estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - ANOVA para a posição longitudinal de 550 mm – método de Calibração Indireta

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	2	0,000001	0,000001	0,55	0,586
Erro	27	0,000027	0,000001		
Total	29	0,000028			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se **p-value > 0,05**, o que indica que, para a posição longitudinal de 550 mm, **não** existe significância da posição transversal sobre os resultados dos erros. Para esta análise foram utilizados os valores obtidos nesse ponto para os sentidos de ida.

4.1.4.8 Posição longitudinal do torno de 700 mm

Os resultados da análise estatística para a posição longitudinal do torno de 700 mm estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - ANOVA para a posição longitudinal de 700 mm – método de Calibração Indireta

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	2	0,000015	0,000007	11,50	0,000
Erro	27	0,000017	0,000001		
Total	29	0,000032			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se **p-value ≤ 0,05**, o que indica que, para a posição longitudinal de 700 mm, existe significância da posição transversal sobre os resultados dos erros. Para esta análise foram utilizados os valores obtidos nesse ponto para os sentidos de ida.

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos pelo Teste de Tukey, após verificação da significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

Tabela 12 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição longitudinal de 700 mm – método de Calibração Indireta

Fatores	n	Média (mm)	Agrupamento
L27,T250	10	-0,001696	A
L27,T125	10	-0,002611	B
L27,T0	10	-0,003421	B

Fonte: autoria própria

Através do agrupamento, o teste de Tukey evidencia que as posições transversais de 125 mm e 0 mm apresentam equivalência dos resultados obtidos, enquanto a posição 250 mm difere de ambas.

4.2 Separação por Reversão

Os itens a seguir apresentam os resultados obtidos a partir da aplicação do método de Separação por Reversão. Primeiramente são apresentados os resultados obtidos com a remoção do desalinhamento através do Método dos Mínimos Quadrados.

Em seguida, estão os desvios obtidos após a remoção do desalinhamento para cada posição transversal do torno nos sentidos de ida e volta e os resultados obtidos para perfil de retitude do artefato e erro do carro longitudinal após a aplicação do método de Separação por Reversão.

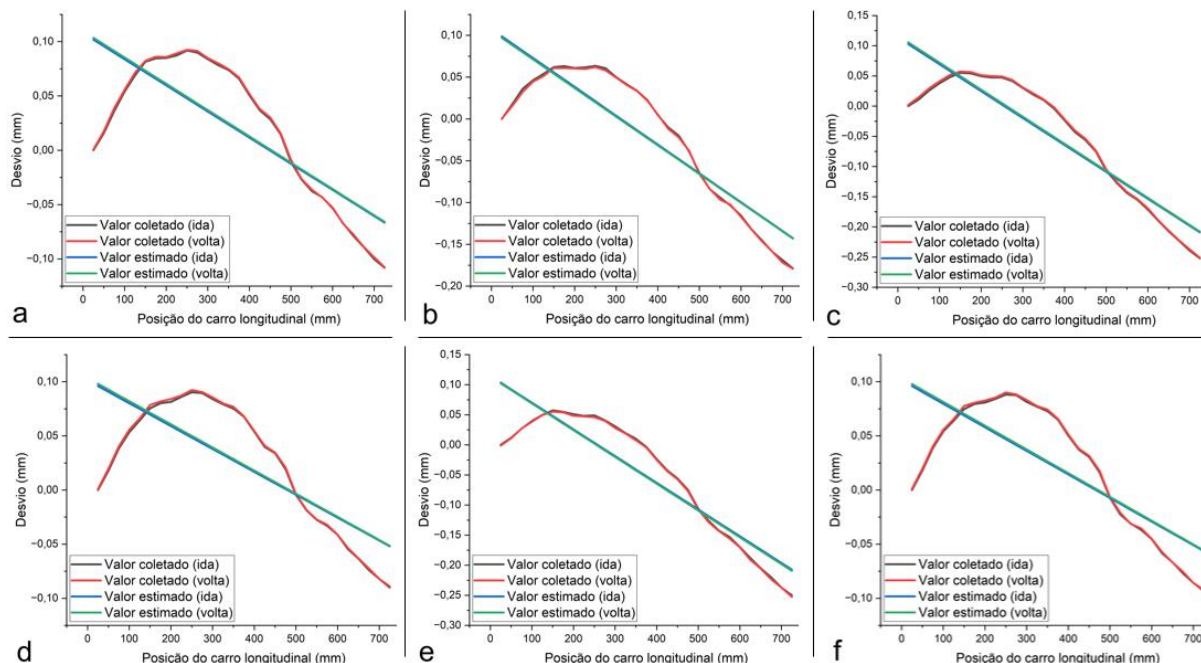
Por fim, são apresentados os resultados obtidos com a ANOVA e Teste de Tukey para verificar a influência da posição transversal e longitudinal do carro do torno sobre o desvio.

4.2.1 Remoção do desalinhamento – Método dos Mínimos Quadrados

A Figura 35 apresenta, para todas as posições do carro transversal antes e após a reversão, o perfil de comportamento dos dados obtidos pelas medições e, aplicando-se o Método dos Mínimos Quadrados, também a reta de ajuste. Observando os perfis de ida e volta, nota-se uma pequena divergência, explicado pela histerese.

Os perfis também diferem antes e após a reversão, esse fato pode ser explicado pela falta de paralelismo da face de medição com centro de fixação do artefato, que acabou evidenciado com a rotação do objeto. No entanto, isso é corrigido matematicamente pelo Método dos Mínimos Quadrados, permitindo realizar a separação de erros.

Figura 35 - Perfil de dados experimentais e reta de ajuste para as posições transversais de (a) 0 mm anterior a reversão e (b) após a reversão, (c) 125 mm anterior a reversão e (d) após a reversão e (e) 250 mm anterior a reversão e (f) após a reversão

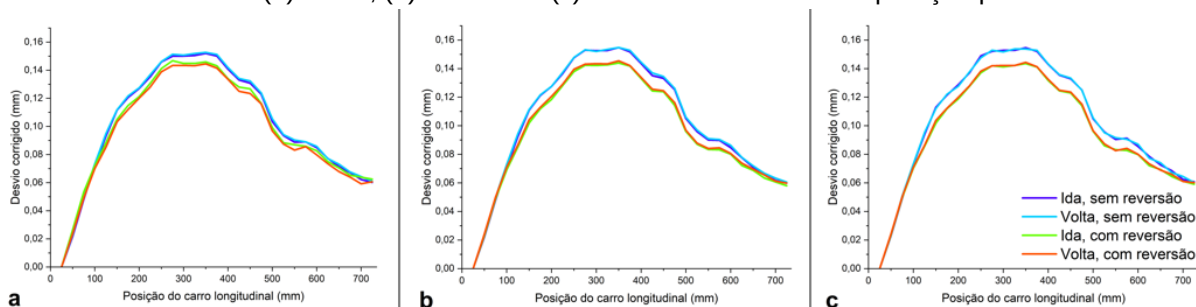


Fonte: autoria própria.

4.2.2 Dados obtidos após remoção do desalinhamento

Com a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados foi removido matematicamente o desalinhamento da montagem do artefato. A partir da Figura 36, percebe-se que os dados obtidos a cada ponto são muito semelhantes em todas as posições do carro transversal e nos sentidos de ida e volta. Porém, é importante ressaltar que os desvios apresentados aqui não representam puramente os erros geométricos do torno. O perfil ilustrado na Figura 36 é uma sobreposição dos erros de retitude do artefato em si com os erros de retitude do carro de deslocamento longitudinal do torno que incidem sobre a direção transversal.

Figura 36 – Desvio corrigido após a aplicação do método dos mínimos quadrados para as posições transversais de (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm - método de Separação por Reversão

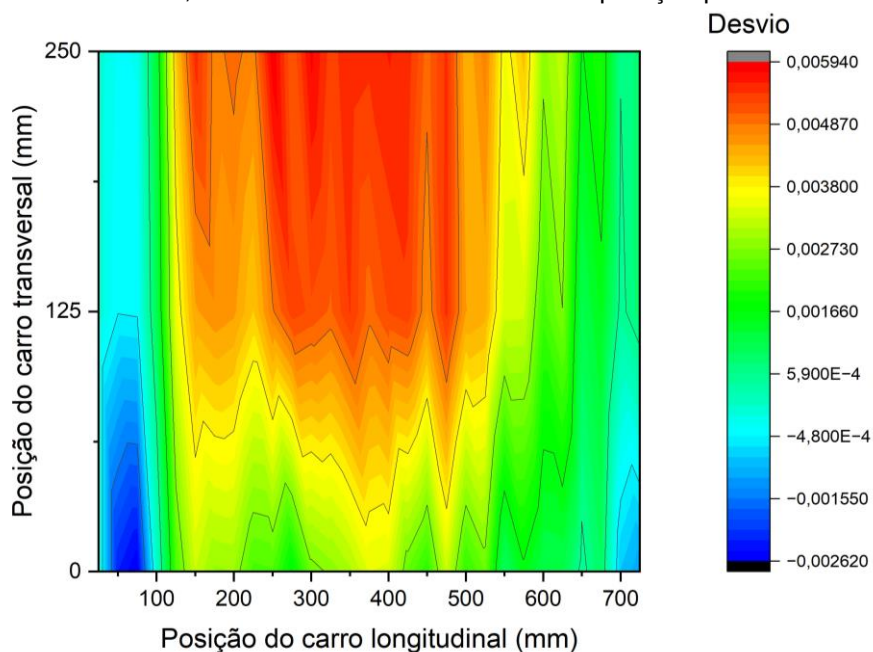


Fonte: autoria própria.

4.2.3 Aplicação do método de Separação por Reversão

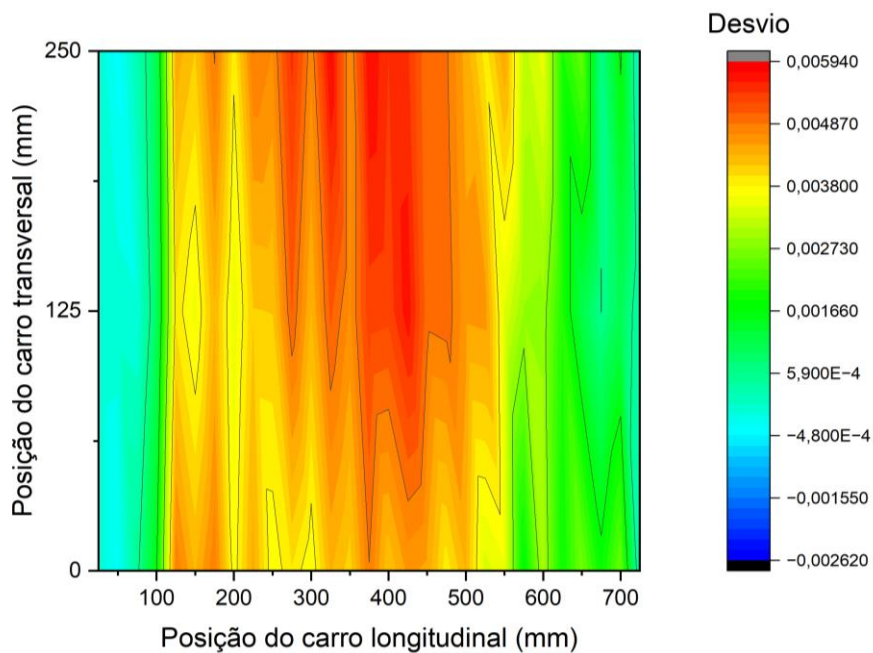
Para o erro transversal do carro longitudinal do torno, foram obtidos os resultados dispostos na Figura 37 e Figura 38.

Figura 37 - Erro transversal do carro longitudinal do torno para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm, movimento de ida - método de Separação por Reversão



Fonte: autoria própria.

Figura 38 – Erro transversal do carro longitudinal do torno para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm, movimento de volta - método de Separação por Reversão



Fonte: autoria própria.

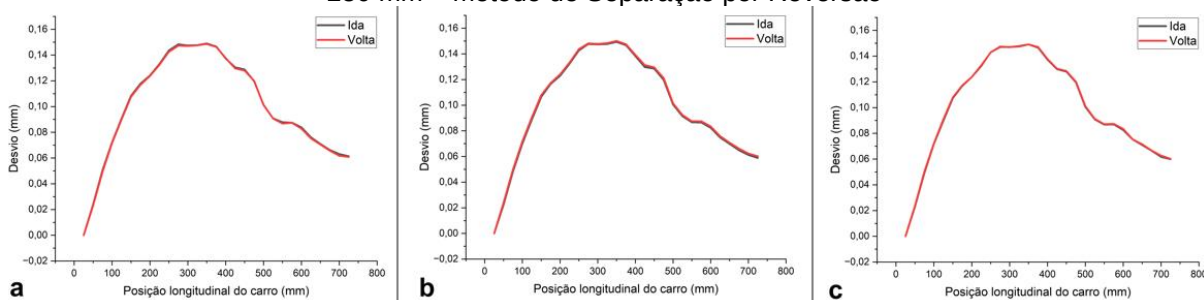
Observando os gráficos, percebe-se que os erros do carro variam para as diferentes posições transversais do torno, um indício da influência da posição

transversal do carro do torno sobre os erros transversais encontrados. Além disso, os menores erros são identificados na posição de 0 mm do carro transversal, decorrente do maior recuo do carro, sendo isso mais visível no sentido de ida do carro.

Pela Figura 37 e Figura 38 também é possível observar como o erro do carro está concentrado na região central do deslocamento longitudinal, mesmo para diferentes posições transversais. O que também é um forte indício de que não apenas a posição transversal do torno exerce influência sobre os erros, mas também a longitudinal.

Além disso, o método de Separação por Reversão de Erros aplicado pela reversão de artefato, permitiu identificar o erro de retitude do próprio artefato metálico utilizado, obtendo-se os perfis apresentados na Figura 39. Tendo em vista que o mesmo artefato foi utilizado em todas as montagens, o perfil similar das curvas para todas as posições transversais do carro do torno reforça a coesão da metodologia aplicada.

Figura 39 - Perfil de retitude do artefato para as posições transversais de (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm – método de Separação por Reversão



Fonte: autoria própria.

4.2.4 ANOVA e Teste de Tukey

Os itens a seguir tem o objetivo de verificar a influência da posição transversal e longitudinal do carro do torno sobre o erro. Para isso, são apresentados os resultados obtidos para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm e posteriormente para os pontos longitudinais de 50 mm, 200 mm, 375 mm, 550 mm e 700 mm.

4.2.4.1 Posição transversal do torno de 0 mm

Realizando o teste de normalidade para os resíduos, utilizando os 10 ciclos do sentido de ida, constatou-se que os resultados seguem uma distribuição normal, como ilustra a Figura 2, Apêndice A.

Sendo assim, foi aplicada a ANOVA, os resultados da análise estatística para a posição transversal do torno de 0 mm estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - ANOVA para a posição transversal de 0 mm – método de Reversão

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	27	0,000755	0,000028	13,54	0,000
Erro	252	0,000520	0,000002		
Total	279	0,001275			

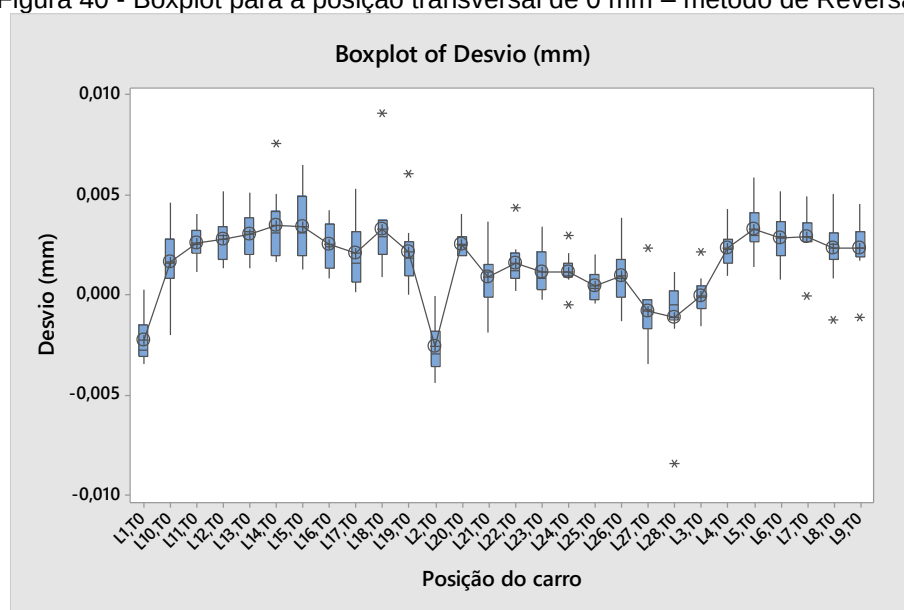
Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se **$p\text{-value} \leq 0,05$** , o que indica que, para a posição transversal de 0 mm, existe significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

A Figura 40 representa a posição das médias e a variação de dados observados para cada posição longitudinal.

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos pelo Teste de Tukey, após verificação da significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

Figura 40 - Boxplot para a posição transversal de 0 mm – método de Reversão



Fonte: autoria própria

Através do agrupamento, o teste de Tukey evidencia quais pontos longitudinais não apresentam diferença significativa entre os resultados obtidos, onde valores acompanhados de mesma letra não diferem estatisticamente.

Tabela 14 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 0 mm – método de Reversão

Fatores	n	Média (mm)	Agrupamento	
L14,T0	10	0,003454	A	
L15,T0	10	0,003390	A	
L5,T0	10	0,003268	A	B
L18,T0	10	0,003267	A	B
L13,T0	10	0,003039	A	B
L7,T0	10	0,002910	A	B

L6,T0	10	0,002869	A	B						
L12,T0	10	0,002788	A	B	C					
L11,T0	10	0,002607	A	B	C					
L20,T0	10	0,002554	A	B	C					
L16,T0	10	0,002511	A	B	C					
L9,T0	10	0,002351	A	B	C					
L4,T0	10	0,002318	A	B	C	D				
L8,T0	10	0,002310	A	B	C	D				
L19,T0	10	0,002118	A	B	C	D				
L17,T0	10	0,002062	A	B	C	D				
L10,T0	10	0,001642	A	B	C	D				
L22,T0	10	0,001580	A	B	C	D				
L24,T0	10	0,001146	A	B	C	D	E			
L23,T0	10	0,001116	A	B	C	D	E			
L26,T0	10	0,000928		B	C	D	E			
L21,T0	10	0,000909		B	C	D	E			
L25,T0	10	0,000472			C	D	E			
L3,T0	10	-0,000048				D	E	F		
L27,T0	10	-0,000847					E	F	G	
L28,T0	10	-0,001156					E	F	G	
L1,T0	10	-0,002259						F	G	
L2,T0	10	-0,002619							G	

Fonte: autoria própria

4.2.4.2 Posição transversal do torno de 125 mm

Realizando o teste de normalidade para os resíduos, utilizando os 10 ciclos do sentido de ida, constatou-se que os resultados seguem uma distribuição normal, como ilustra a Figura 2, Apêndice A.

Os resultados da análise estatística para a posição transversal do torno de 125 mm estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - ANOVA para a posição transversal de 125 mm – método de Reversão

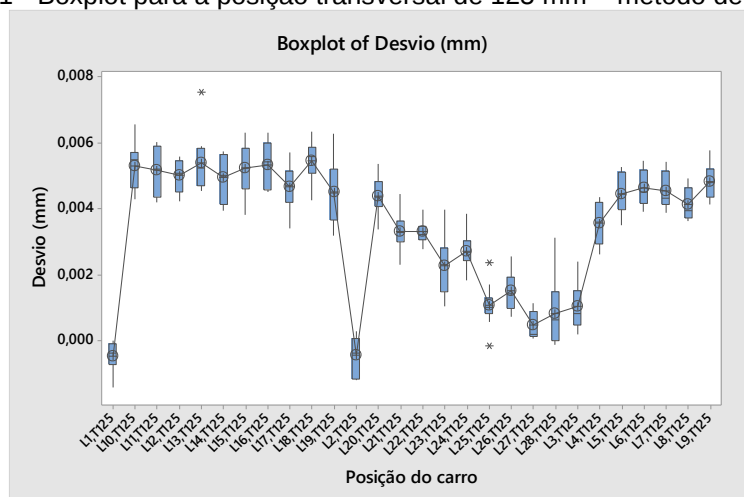
Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	27	0,000986	0,000037	83,48	0,000
Erro	252	0,000110	0,000000		
Total	279	0,001096			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se ***p-value* ≤ 0,05**, o que indica que, para a posição transversal de 125 mm, existe significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

A Figura 41 representa a posição das médias e a variação de dados observados para cada posição longitudinal.

Figura 41 - Boxplot para a posição transversal de 125 mm – método de Reversão



Fonte: autoria própria.

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos pelo Teste de Tukey, após verificação da significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

Tabela 16 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 125 mm – método de Reversão

Fatores	n	Média (mm)	Agrupamento						
L18,T125	10	0,005474	A						
L13,T125	10	0,005417	A						
L16,T125	10	0,005359	A						
L10,T125	10	0,005314	A						
L15,T125	10	0,005236	A	B					
L11,T125	10	0,005192	A	B					
L12,T125	10	0,005019	A	B					
L14,T125	10	0,004954	A	B					
L9,T125	10	0,004837	A	B					
L17,T125	10	0,004671	A	B					
L6,T125	10	0,004655	A	B	C				
L7,T125	10	0,004557	A	B	C				
L19,T125	10	0,004521	A	B	C				
L5,T125	10	0,004477	A	B	C				
L20,T125	10	0,004408	A	B	C	D			
L8,T125	10	0,004149		B	C	D			
L4,T125	10	0,003570			C	D	E		
L21,T125	10	0,003326				D	E	F	
L22,T125	10	0,003313				D	E	F	
L24,T125	10	0,002723					E	F	
L23,T125	10	0,002276						F	G
L26,T125	10	0,001523							G
L25,T125	10	0,001086							H
L3,T125	10	0,001057							H
L28,T125	10	0,000853							H
L27,T125	10	0,000485							H
L2,T125	10	-0,000435							I
L1,T125	10	-0,000463							I

Fonte: autoria própria

4.2.4.3 Posição transversal do torno de 250 mm

Realizando o teste de normalidade para os resíduos, utilizando os 10 ciclos do sentido de ida, constatou-se que os resultados seguem uma distribuição normal, como ilustra a Figura 2, Apêndice A.

Os resultados da análise estatística para a posição transversal do torno de 250 mm estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - ANOVA para a posição transversal de 250 mm – método de Reversão

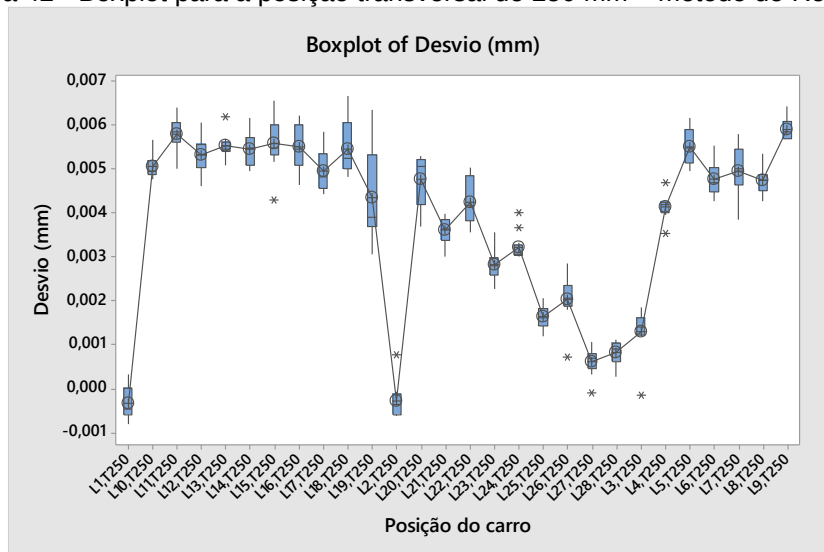
Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	27	0,001044	0,000039	178,59	0,000
Erro	252	0,000055	0,000000		
Total	279	0,001098			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se **p-value $\leq 0,05$** , o que indica que, para a posição transversal de 250 mm, existe significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

A Figura 42 representa a posição das médias e a variação de dados observados para cada posição longitudinal.

Figura 42 - Boxplot para a posição transversal de 250 mm – método de Reversão



Fonte: autoria própria

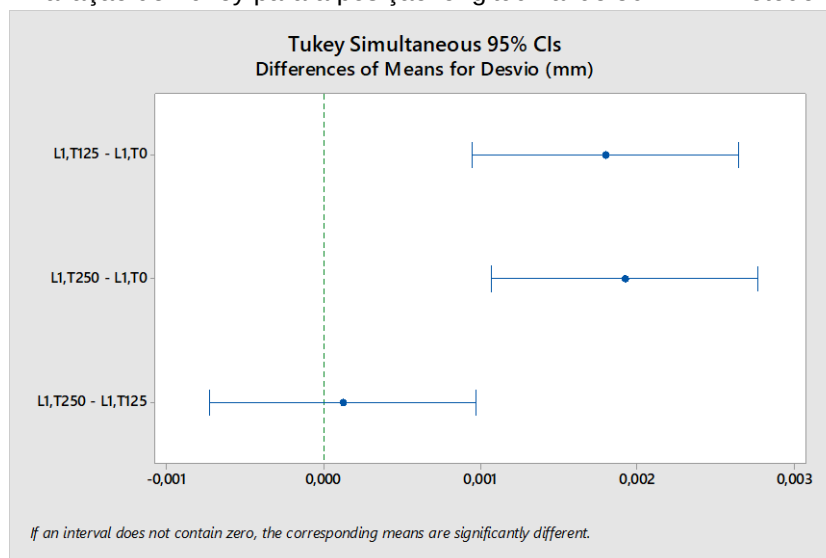
A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos pelo Teste de Tukey, após verificação da significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

Tabela 18 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição transversal de 250 mm – método de Reversão

Fatores	n	Média (mm)	Agrupamento				
L9,T250	10	0,005921	A				
L11,T250	10	0,005817	A	B			
L15,T250	10	0,005598	A	B	C		
L13,T250	10	0,005533	A	B	C	D	
L5,T250	10	0,005514	A	B	C	D	
L16,T250	10	0,005511	A	B	C	D	
L14,T250	10	0,005466	A	B	C	D	E

Através do agrupamento, o teste de Tukey evidencia que as posições transversais de 125 mm e 250 mm apresentam equivalência dos resultados obtidos, enquanto a posição de 0 mm difere de ambas, como ilustra a Figura 43.

Figura 43 - Avaliação de Tukey para a posição longitudinal de 50 mm – método de Reversão



Fonte: autoria própria.

4.2.4.5 Posição longitudinal do torno de 200 mm

Os resultados da análise estatística para a posição longitudinal do torno de 200 mm estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - ANOVA para a posição longitudinal de 200 mm – método de Reversão

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	2	0,000024	0,000012	15,80	0,000
Erro	27	0,000020	0,000001		
Total	29	0,000044			

Fonte: autoria própria.

Por meio da ANOVA verificou-se **p-value $\leq 0,05$** , o que indica que, para a posição longitudinal de 200 mm, existe significância da posição transversal sobre os resultados dos erros. Para esta análise foram utilizados os valores obtidos nesse ponto para os sentidos de ida.

A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos pelo Teste de Tukey, após verificação da significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

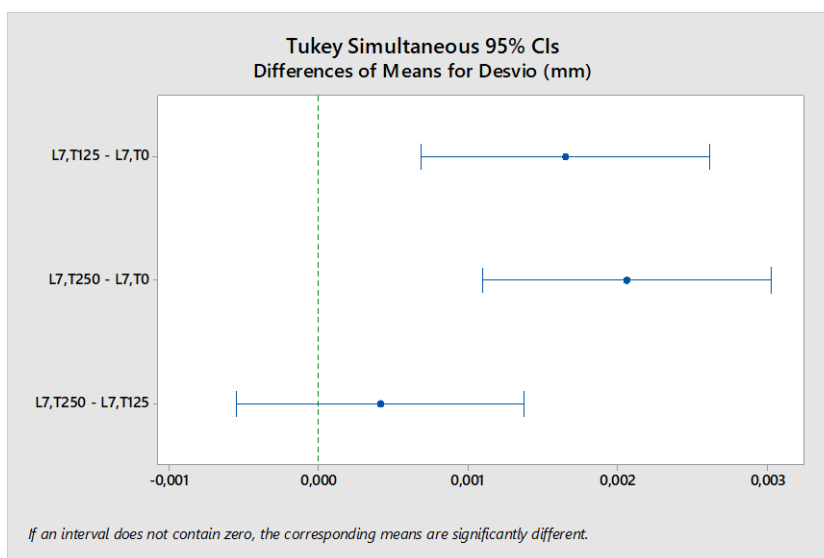
Tabela 22 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição longitudinal de 200 mm – método de Reversão

Fatores	n	Média (mm)	Agrupamento
L7,T250	10	0,004970	A
L7,T125	10	0,004557	A
L7,T0	10	0,002910	B

Fonte: autoria própria

Através do agrupamento, o teste de Tukey evidencia que as posições transversais de 125 mm e 250 mm apresentam equivalência dos resultados obtidos, enquanto a posição de 0 mm difere de ambas, como mostra a Figura 44.

Figura 44 – Avaliação de Tukey para a posição longitudinal de 200 mm – método de Reversão



Fonte: autoria própria

4.2.4.6 Posição longitudinal do torno de 375 mm

Os resultados da análise estatística para a posição longitudinal do torno de 375 mm estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - ANOVA para a posição longitudinal de 375 mm – método de Reversão

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	2	0,000022	0,000011	8,48	0,001
Erro	27	0,000035	0,000001		
Total	29	0,000057			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se **p-value ≤ 0,05**, o que indica que, para a posição longitudinal de 375 mm, existe significância da posição transversal sobre os resultados dos erros. Para esta análise foram utilizados os valores obtidos nesse ponto para os sentidos de ida.

A Tabela 24 apresenta os resultados obtidos pelo Teste de Tukey, após verificação da significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

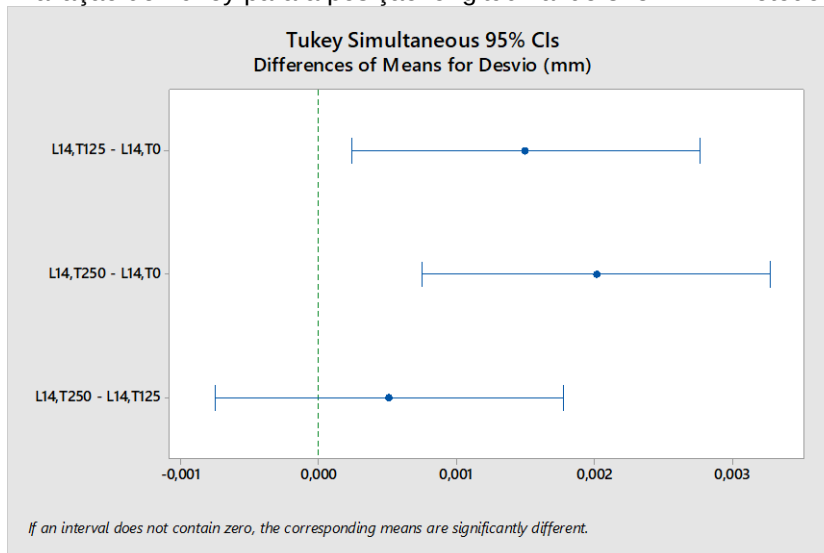
Tabela 24 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição longitudinal de 375 mm – método de Reversão

Fatores	n	Média (mm)	Agrupamento
L14,T250	10	0,005466	A
L14,T125	10	0,004954	A
L14,T0	10	0,003454	B

Fonte: autoria própria

Através do agrupamento, o teste de Tukey evidencia que as posições transversais de 125 mm e 250 mm apresentam equivalência dos resultados obtidos, enquanto a posição de 0 mm difere de ambas, como mostra a Figura 45.

Figura 45 - Avaliação de Tukey para a posição longitudinal de 375 mm – método de Reversão



Fonte: autoria própria

4.2.4.7 Posição longitudinal do torno de 550 mm

Os resultados da análise estatística para a posição longitudinal do torno de 550 mm estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - ANOVA para a posição longitudinal de 550 mm – método de Reversão

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	2	0,000044	0,000022	26,50	0,000
Erro	27	0,000022	0,000001		
Total	29	0,000067			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se **p-value ≤ 0,05**, o que indica que, para a posição longitudinal de 550 mm, existe significância da posição transversal sobre os resultados dos erros. Para esta análise foram utilizados os valores obtidos nesse ponto para os sentidos de ida.

A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos pelo Teste de Tukey, após verificação da significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

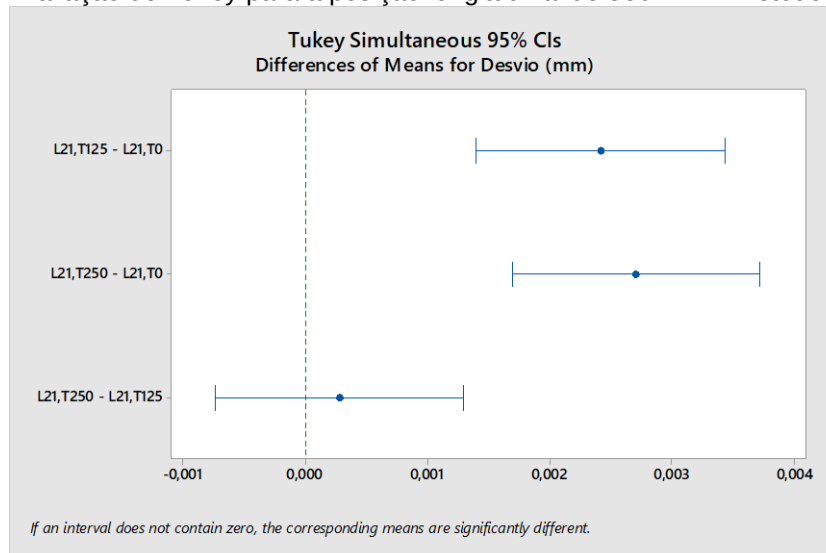
Tabela 26 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição longitudinal de 550 mm – método de Reversão

Fatores	n	Média (mm)	Agrupamento
L21,T250	10	0,003611	A
L21,T125	10	0,003326	A
L21,T0	10	0,000909	B

Fonte: autoria própria

Através do agrupamento, o teste de Tukey evidencia que as posições transversais de 125 mm e 250 mm apresentam equivalência dos resultados obtidos, enquanto a posição de 0 mm difere de ambas, como mostra a Figura 46.

Figura 46 - Avaliação de Tukey para a posição longitudinal de 550 mm – método de Reversão



Fonte: autoria própria

4.2.4.8 Posição longitudinal do torno de 700 mm

Os resultados da análise estatística para a posição longitudinal do torno de 700 mm estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - ANOVA para a posição longitudinal de 700 mm – método de Reversão

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F-value	P-value
Fator	2	0,000013	0,000007	7,73	0,002
Erro	27	0,000023	0,000001		
Total	29	0,000036			

Fonte: autoria própria

Por meio da ANOVA verificou-se **$p\text{-value} \leq 0,05$** , o que indica que, para a posição longitudinal de 700 mm, existe significância da posição transversal sobre os resultados dos erros. Para esta análise foram utilizados os valores obtidos nesse ponto para os sentidos de ida.

A Tabela 28 apresenta os resultados obtidos pelo Teste de Tukey, após verificação da significância da posição longitudinal sobre os resultados dos erros.

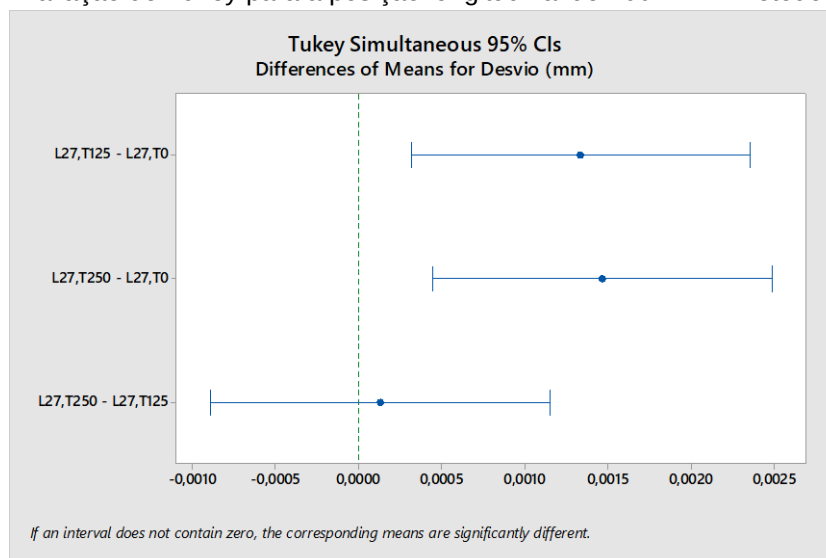
Tabela 28 - Comparação de médias pelo Teste de Tukey para a posição longitudinal de 700 mm – método de Reversão

Fatores	n	Média (mm)	Agrupamento
L27,T250	10	0,000613	A
L27,T125	10	0,000485	A
L27,T0	10	-0,000847	B

Fonte: autoria própria

Através do agrupamento, o teste de Tukey evidencia que as posições transversais de 250 mm e 125 mm apresentam equivalência dos resultados obtidos, enquanto a posição de 0 mm difere de ambas, como ilustra a Figura 47.

Figura 47 - Avaliação de Tukey para a posição longitudinal de 700 mm – método de Reversão



Fonte: autoria própria

4.3 Comparação entre os métodos de Calibração Indireta e Separação por Reversão

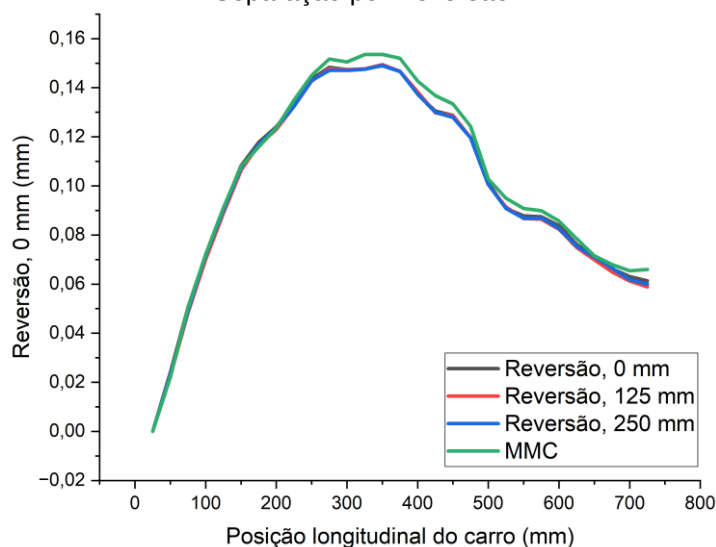
Os itens a seguir tem o intuito de comparar os métodos de Calibração Indireta e Separação por Reversão através da análise dos dados obtidos em cada um.

4.3.1 Perfil de retitude do artefato

Analisando, através da Figura 48, o perfil de retitude do artefato obtido com a MMC e os perfis obtidos com o método de Separação por Reversão para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm, é possível afirmar que os métodos estão coerentes, tendo em vista que o perfil da curva é muito semelhante para todos os casos.

Outro ponto relevante é que, na região central, a MMC constatou um erro maior para o artefato que o obtido através do método de Separação por Reversão, sendo 6,746 μm a maior diferença, encontrada na posição longitudinal de 425 mm. Porém é uma diferença pequena, o que evidencia a confiabilidade do método de Separação por Reversão, tendo em vista que a MMC trabalha com uma resolução de 0,000001 mm enquanto o LVDT de 0,0001 mm.

Figura 48 - Perfil de retitude do artefato obtido através dos métodos de Calibração Indireta e Separação por Reversão

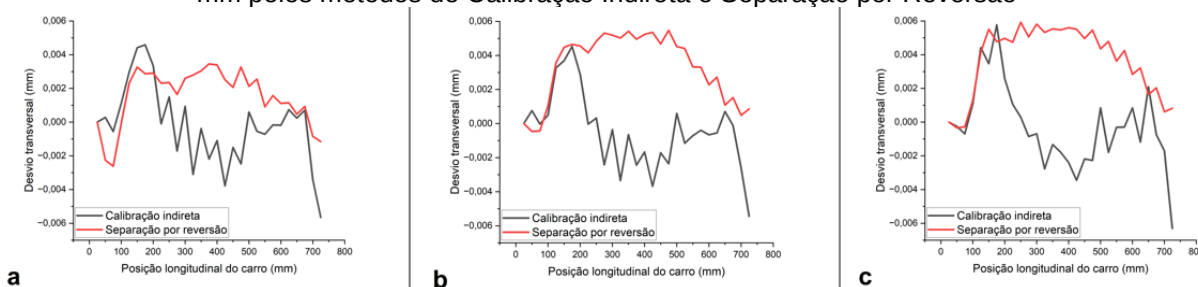


Fonte: autoria própria

4.3.2 Erro transversal do carro do torno

A Figura 49 apresenta o erro transversal do carro longitudinal para as posições de 0 mm, 125 mm e 250 mm para os métodos de Calibração Indireta e separação de erros por reversão.

Figura 49 - Erro transversal do carro longitudinal para as posições de (a) 0 mm, (b) 125 mm e (c) 250 mm pelos métodos de Calibração Indireta e Separação por Reversão



Fonte: autoria própria

Observando os gráficos percebe-se que eles possuem uma tendência similar no início, porém perfis diferentes na região central. É importante ressaltar que esse gráfico está em uma escala pequena, sendo o valor máximo 0,006 mm e o mínimo -0,008 mm. Comparando os dados, chega-se ao resultado de que o ponto de maior divergência para todos é na posição longitudinal de 425 mm, com valores de 6,291 μm , 9,040 μm e 8,963 μm para as posições transversais 0 mm, 125 mm e 250 mm, respectivamente.

O gráfico apresentado na Figura 48 evidencia uma diferença de 6,746 μm entre a curva da MMC e as curvas obtidas através do método de Reversão por

Separação na região do ponto longitudinal de 425 mm, o que explica a diferença semelhante em sentido oposto apresentada nos gráficos Figura 49 na mesma área.

4.3.3 ANOVA

Tanto o método de Calibração Indireta quanto o método de Separação por Reversão evidenciam que a posição longitudinal do carro influencia no valor do desvio transversal, tendo em vista que todos os p-valores são menores que 0,05, como mostra a Tabela 29.

Tabela 29 - Resultado ANOVA para as posições transversais de 0 mm, 125 mm e 250 mm

Posição transversal (mm)	<i>p-value</i>	
	Calibração Indireta	Separação por Reversão
0	0,000	0,000
125	0,000	0,000
250	0,000	0,000

Fonte: autoria própria

Com relação ao método de Separação por Reversão, a Tabela 2 indica, através do p-valor $< 0,05$, que a posição transversal influencia o desvio em todas as posições longitudinais, o que não acontece no método de Calibração Indireta, que evidenciou essa influência apenas na posição de 700 mm.

Tabela 30 - Resultado ANOVA para as posições longitudinais de 50 mm, 200 mm, 375 mm, 550 mm e 700 mm

Posição longitudinal (mm)	<i>p-value</i>	
	Calibração Indireta	Separação por Reversão
50	0,053	0,000
200	0,261	0,000
375	0,325	0,001
550	0,586	0,000
700	0,000	0,002

Fonte: autoria própria

5 CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivo comparar os métodos de medição por Calibração Indireta e Separação de Erros. A análise dos dados revelou consistência significativa entre os perfis de retitude do artefato e erro da máquina obtidos por ambos os métodos, indicando concordância em diversas posições longitudinais e transversais.

A partir dos resultados obtidos, foi possível constatar a presença de erros transversais de 0,005 mm, entre as posições longitudinais 100 mm e 200 mm e - 0,006 mm entre as posições de 700 mm e 725 mm, através do método de Calibração Indireta. Erros transversais de 0,005 mm também foram identificados entre as posições longitudinais de 100 mm e 550 mm, especialmente para o posicionamento do carro transversal em 250 mm, através do método de Separação de Erros.

Além disso, esses erros podem variar ao longo do tempo, pois o valor do erro é dinâmico, visto que tem uma dependência multifatorial dos seus valores, como por exemplo, horas de trabalho da máquina, desgaste dos componentes, condições de trabalho e parâmetro de cortes utilizados, operador, entre outros.

A ANOVA mostrou que há influência da posição transversal do carro do torno no erro obtido, sendo que os menores erros são identificados na posição transversal de 0 mm, decorrente do maior recuo do carro, com isso, peças de maior diâmetro apresentarão um erro menor quando comparadas a peças de diâmetros menores.

Mesmo com erros na grandeza de micrometros, é possível que eles causem danos na estrutura da máquina ao longo do tempo de utilização, e assim, são dados importantes que podem ser acompanhados com frequência para uma elaboração de planos de manutenções ou intervenções mecânicas em momentos ideais.

Além disso, esses erros são um ponto de atenção na usinagem de peças que exigem precisão, portanto, aplicando o método de Calibração Indireta ou de Separação de Erros, é possível definir qual o ponto ideal para a usinagem de peças que exigem altos níveis de precisão, garantindo o menor erro possível.

Diante desses achados, torna-se evidente que o método de Separação por Reversão apresenta-se como uma alternativa viável e economicamente mais acessível para a calibração de erros geométricos em processos de torneamento.

Apesar de não ser um método tão simples quanto o método de Calibração Indireta, a eficácia e confiabilidade demonstradas o tornam uma opção atrativa para empresas que buscam métodos eficientes e economicamente vantajosos.

Sendo assim, os resultados apresentados permitem que o responsável pelo processo de fabricação, aplicando os métodos estudados, avalie se o equipamento poderá ou não atender a qualidade de um produto com especificações bem definidas em projeto, e assim, avaliar os possíveis efeitos dos erros apresentados nas qualidades dos produtos, permitindo estabelecer limites aceitáveis para a fabricação, além de ter uma maior liberdade para escolher o método preferível de medição, tendo em vista que este estudo permitiu comparar e validar os métodos de Calibração Indireta e Separação por Reversão.

REFERÊNCIAS

- ABIMAQ. A história das máquinas: ABIMAQ 70 anos. **Abimaq/Sindimaq. Magma Editora Cultural**, São Paulo, 2006.
- ANSI/ASME. **Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers**. 1991.
- ARENCIBIA, R. V. e RIBEIRO, J. R. S. **Incerteza na Medição da Largura de Cordões de Solda**. Universidade Federal de Uberlândia. 2009.
- BRYAN J. B. **The Abbe Principle Revised** - an Updated Interpretation, Precision Engineering, 1979.
- CABEZAS, S.; SZILÁGYI, A. **Thermal behavior in CNC machine-tools**. University of Miskolc, Department of Machine Tools. Design of Machines and Structures, Vol. 10, No. 2, pp. 5–10. 2020.
- CASTANHEIRA, N. P. **Estatística Aplicada a Todos os Níveis**. Curitiba: Editora Intersaberes, 2018.
- CHEN G., ZHANG Y., YUAN B. A method of identifying geometric errors for machine tools with 3 axes based on a set of sine functions using double ballbar. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 121, no. 1-2, pp. 559-571, 2022.
- CHEN Y.-T., LIN W.-C., LIU C.-S. Design and experimental verification of novel six-degree-of freedom geometric error measurement system for linear stage. **Optics and Lasers in Engineering**, vol. 92, pp. 94-104, 2017.
- CHEN, Y., MORE, P., LIU, C., CHENG, C. Identification and compensation of position-dependent geometric errors of rotary axes on five-axis machine tools by using a touch-trigger probe and three spheres, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 102, no. 9-12, pp. 3077-3089, 2019.
- DENG, M., LI, H., XIANG, S., LIU, P., FENG, X., DU, Z. & YANG, J. Geometric errors identification considering rigid-body motion constraint for rotary axis of multi-axis machine tool using a tracking interferometer, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 158, 2020.
- DI GIACOMO, B. **Computer aided calibration and hybrid compensation of geometric errors in coordinate measuring machines**. 418p. Tese (Doutorado) - Institute of Science and Technology, University of Manchester, Manchester, 1986, 1986.
- DI GIACOMO, B; MORAIS, C. A. G. **Mapping by Optimization of the Minimum Volumetric Error in Coordinate Measuring Machines**. Applied Mechanics and Materials. v. 798, p. 287-291, 2015.
- DOWNING, D.; CLARK, F. **Estatística Aplicada**. 2 Ed. São Paulo: Saraiva. 2003.

ELMELEGY, A; ZAHWI, S. Comparative study of error determination of machine tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 124, no. 11-12, pg. 4575-4602, 2023.

EVANS, C. J.; HOCKEN, R. J.; ESTLER, W. T. Self-Calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation, and 'Absolute Testing'. **CIRP Annals**, v. 45, n. 2, p. 617–634, 1996.

FAN, J.; ZHANG, Y. **A novel methodology for predicting and identifying geometric errors of rotary axis in five-axis machine tools**. College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing. 2020.

FERRAZ, A. M. **Procedimento de Calibração Indireta para Máquinas de Medir a Três Coordenadas**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FRACARO, J. **Fabricação Pelo Processo de Usinagem e Meios de Controle**. Curitiba: Editora Intersaberes, 2017.

FU, G.; GONG, H.; FU, J.; GAO, H.; DENG, X. Geometric error contribution modeling and sensitivity evaluating for each axis of five-axis machine tools based on POE theory and transforming differential changes between coordinate frames. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. 2019.

FU, G; FU, J.; XU, Y.; CHEN, Z; LAI, J. **Accuracy enhancement of five-axis machine tool based on differential motion matrix**: Geometric error modeling, identification and compensation. Zhejiang University, China. 2014.

GUO S., JIANG G., ZHANG D., MEI X. Position-independent geometric error identification and global sensitivity analysis for the rotary axes of five-axis machine tools. **Measurement Science and Technology**, vol. 28, no. 4, 2017.

HELENE, O. **Método dos Mínimos Quadrados com Formalismo Matricial**. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006

HINES, W.; MONTGOMERY, D.C.; GOLDSMAN, D.M.; BORROR, C.M. **Probabilidade e Estatística na Engenharia**. 4 Ed. Rio de Janeiro: LTC. 2013.

HSIEH T.-H., CHEN P.-Y., JYWE W.-Y., CHEN G.-W., WANG M.-S. A geometric error measurement system for linear guideway assembly and calibration. **Applied Sciences (Switzerland)**, vol. 9, no. 3, 2019.

HUANG Y.B., FAN K.C., LOU Z.F., SUN W. A novel modeling of volumetric errors of three-axis machine tools based on Abbe and Bryan principles. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 151, 2022.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia** – VIM. 2007.

JEFRIYANTO, W.; SAKA, B. G. M.; PINENG, M.; DJAMAL, M. Development of LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensor as land displacement sensor. **Journal of Physics: Conference Series**. 2020.

JIA P., ZHANG B., ZHENG F., FENG Q. Comprehensive measurement model of geometric errors for three linear axes of computer numerical control machine tools. **Measurement Science and Technology**, vol. 33, no. 1, 2022.

JIANG, X., CRIPPS, R.J. Accuracy evaluation of rotary axes of five-axis machine tools with a single setup of a double ball bar, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, vol. 231, no. 3, pp. 427-436, 2017.

KONG, G., ZONG, Z., YANG, J., CHEN, J. Roundness error separation based on singularity detection and exact-stop of spindle in on-machine measurement of spindle rotation error. **Mechanical Systems and Signal Processing**, vol. 169, 2022.

KUNZMANN, H.; NI, J.; WÄLDELE, F. **Accuracy Enhancement**. Bosch, J. A. Coordinate Measuring and Systems. New York: Marcel Dekker, Inc, 1995.

KVRGIC V.M., RIBIC A.I., DIMIC Z., ZIVANOVIC S.T., DODEVSKA Z.A. Equivalent geometric errors of rotary axes and novel algorithm for geometric errors compensation in a nonorthogonal five-axis machine tool. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, vol. 37, pp. 477-488, 2022.

LI, X., LI, Z., JIN, S., ZHANG, J., DING, S., NIU, Z. A novel error equivalence model on the kinematic error of the linear axis of high-end machine tool, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2021.

LI, X., LI, Z., JIN, S., ZHANG, J., DING, S., NIU, Z. A novel error equivalence model on the kinematic error of the linear axis of high-end machine tool, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2021.

LI, Z., SATO, R., SHIRASE, K. & SAKAMOTO, S. Study on the influence of geometric errors in rotary axes on cubic-machining test considering the workpiece coordinate system, **Precision Engineering**, vol. 71, pp. 36-46, 2021.

LIN, H., KELLER, F., STEIN, M. Influence and compensation of CMM geometric errors on 3D gear measurements. Measurement. **Journal of the International Measurement Confederation**, vol. 151, 2020.

LIU W., LI X., JIA Z., LI H., MA X., YAN H., MA J. Binocular-vision-based error detection system and identification method for PIGEs of rotary axis in five-axis machine tool. **Precision Engineering**, vol. 51, pp. 208-222, 2018.

LIU Y., WAN M., XING W.-J., ZHANG W.-H. Identification of position independent geometric errors of rotary axes for five-axis machine tools with structural restrictions. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, vol. 53, pp. 45-57, 2018.

LIU, C, LAI, J., LUO, Y. Design of a measurement system for six-degree-of-freedom geometric errors of a linear guide of a machine tool, **Sensors (Switzerland)**, vol. 19, no. 1, 2019.

LIU, C.; XIANG, S.; LU, C.; WU, C.; DU, Z.; YANG, J. Dynamic and static error identification and separation method for three-axis CNC machine tools based on feature workpiece cutting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2020.

LIU, W., LI, X., JIA, Z., LI, H., MA, X., YAN, H., & MA, J. Binocular-vision-based error detection system and identification method for PIGEs of rotary axis in five-axis machine tool. **Precision Engineering**, vol. 51, pp. 208-222, 2018.

LIU, Y. DING, F. LI, D. WU, Y. XUE, J. WANG, W. QIAO, Z. WANG, B. Machining accuracy improvement for a dual-spindle ultra-precision drum roll lathe based on geometric error analysis and calibration. **Precision Engineering**, v. 66, p. 401–416, 2020.

LIU, Y., WAN, M., XING, W., XIAO, Q., ZHANG, W. Generalized actual inverse kinematic model for compensating geometric errors in five-axis machine tools, **International Journal of Mechanical Sciences**, vol. 145, pp. 299-317, 2018.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2015.

MARQUES, A; GIPIELA, M. L.; VALLE, P. D. **Aula prática de paquímetro**. Laboratório de Metrologia. UFPR. 2018. Disponível em: <<http://www.metrologia.ufpr.br/pdfs/MetroNot/P1.Aula.pratica.de.paquimetro.pdf>>. Acesso em 10 de setembro de 2019.

MARUYAMA D., IBARAKI S., SAKATA R. Measurement of Machine Tool Two-Dimensional Error Motions Using Direction-Regulated Laser Interferometers. **International Journal of Automation Technology**, vol. 16, no. 2, pp. 157-166, 2022.

MILLER, J.E., LONGSTAFF, A.P., Parkinson, S., Fletcher, S. Improved machine tool linear axis calibration through continuous motion data capture, **Precision Engineering**, vol. 47, pp. 249-260, 2017.

MORAIS, C. A. G. **Sistemas Redundantes de Medição para Separação de Erros em Máquinas de Media por Coordenadas**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MUTILBA, U., GOMEZ-ACEDO, E., KORTABERRIA, G., OLARRA, A., YAGÜE-FABRA, J.A. Traceability of on-machine tool measurement: A review, **Sensors (Switzerland)**, vol. 17, no. 7, 2017.

NIST TECHNICAL NOTE 1297. **Guide lines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results**. National Institute of standards and technology. 1994.

OLIVEIRA, A.F.G. **Testes Estatísticos para Comparação de Médias**. Revista Eletrônica Nutritime, v.5, nº 6, p.777-788. 2008.

PIANEZZER, G. A. **Modelagem Estatística**. Curitiba: Editora Contentus, 2020.

QUINSLER, A. P. **Probabilidade e Estatística**. Curitiba: Editora Intersaberes, 2022.

ROCHA, G. C. R. **Separação de erros geométricos transversaia ao barramento em torno horizontal: aplicação da reversão de artefato como método de calibração de erros.** Câmpus Experimental de Itapeva, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Itapeva, 2021.

SCHELLEKENS, P.; SPAAN, H.; SOONS, J.; TRAPET, E.; LOOCK, V.; DOOMS, J.; DE RUITER, H.; MAISCH, M. **Development of Methods for Numerical Correction of Machine Tools.** Proceedings of the 7th International Precision Engineering Seminar, Springer Verlag, Kobe (Japan), pg. 213–223. 1993.

SCHWENKE, H.; KNAPP, W.; HAITJEMA, H.; WECKENMANN, A.; SCHMITT, R.; DELBRESSINE, F. **Geometric error measurement and compensation of machines - An update.** CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2008.

SOUZA, C. C., ARENCIBIA, R. V. Adequação da Calibração do Micrômetro para Externos à NBR ISO/IEC 17025. **Horizonte Científico**, vol. 5, 2011.

SPAAN, H. **Software Error Compensation of Machine Tools.** Tese PhD, Eindhoven University of Technology. 1995.

TAI W.-C., LIU C.-S. Development and verification of six-degree-of-freedom error measurement system based on geometrical optics for linear stage. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 119, no. 5-6, pp. 3903-3916, 2022.

TE CONNECTIVITY SENSORS. **TE LVDT Technology:** Application Note. 2016.

TELESHEVSKII, V.I., PIMUSHKIN, Y.I., SOKOLOV, V.A. Null-Point Migration of a Multicoordinate System under a Static Load, **Russian Engineering Research**, vol. 39, no. 12, pp. 1077-1079, 2019.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da Teoria de Erros.** São Paulo: Editora Blucher, 1996.

XIA, H., PENG, W., OUYANG, X., CHEN, X., WANG, S., CHEN, X. Identification of geometric errors of rotary axis on multi-axis machine tool based on kinematic analysis method using double ball bar, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 122, pp. 161-175, 2017.

XIONG, X., HU, P., ZHANG, W., JU, B., CHEN, Y. Implementation and verification of a dual-probe measurement system for geometric form evaluation of a ring-type cylinder. **Precision Engineering**, vol. 74, pg. 290-302, 2022

YANG, H., HUANG, X., DING, S., YU, C. & YANG, Y. Identification and compensation of 11 position-independent geometric errors on five-axis machine tools with a tilting head, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 94, no. 1-4, pp. 533-544, 2018.

YANG, S., LEE, K. Machine tool analyzer: a device for identifying 13 position-independent geometric errors for five-axis machine tools, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 115, no. 9-10, pp. 2945-2957, 2021.

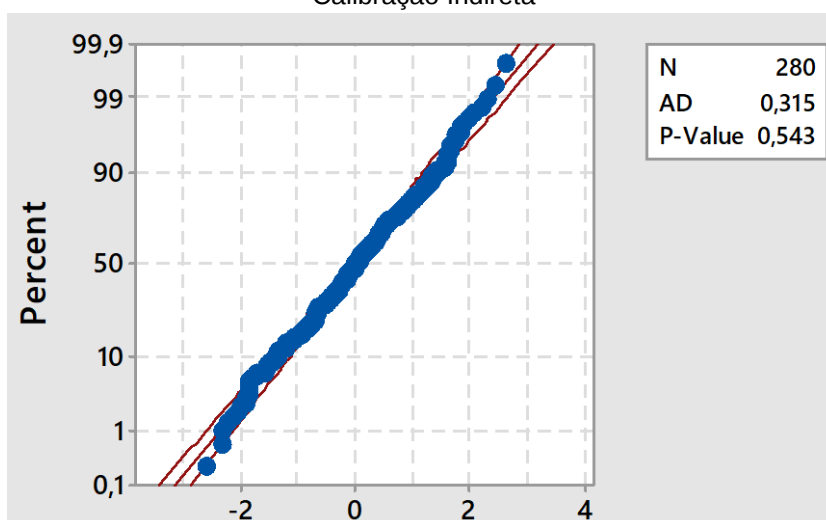
ZHANG, G.X. **A Study on the Abbe Principle and Abbe Error**. Tianjin University. China. 1989.

ZIRONDI, R. B. **Modelo Reduzido de Sintetização de Erros para Máquinas de Medir a Três Corrdenadas**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

APÊNDICE A – Testes de normalidade

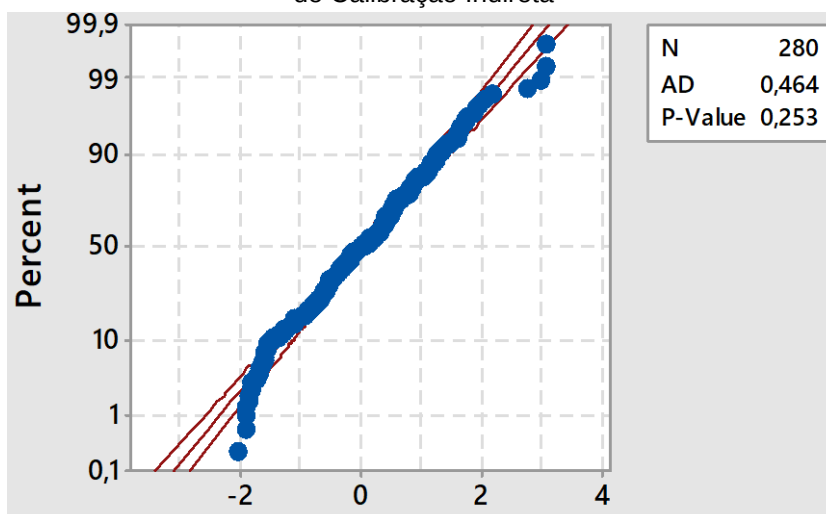
Tendo em vista que as análises de ANOVA exigem dados de populações que sigam uma distribuição normal com variâncias iguais entre fatores e independência dos resíduos, as Figuras 1, 2 e 3 apresentam os resultados obtidos para o teste de normalidade das posições de 0 mm, 125 mm e 250 mm, respectivamente, do carro transversal do torno para o método de Calibração Indireta.

Figura 1 - Teste de normalidade da posição de 0 mm do carro transversal do torno para o método de Calibração Indireta



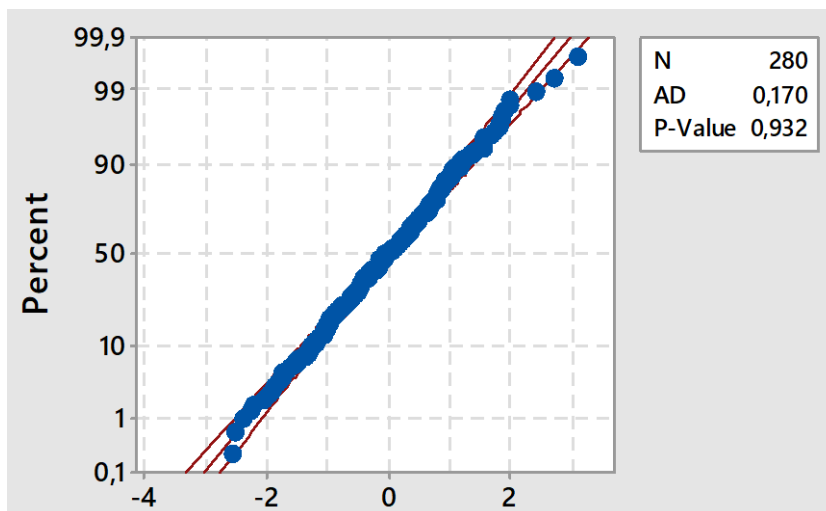
Fonte: autoria própria

Figura 2 - Teste de normalidade da posição de 125 mm do carro transversal do torno para o método de Calibração Indireta



Fonte: autoria própria

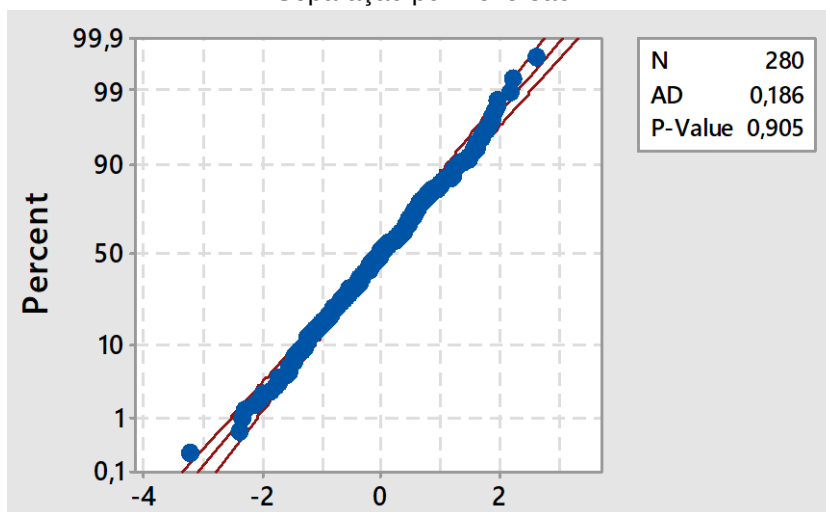
Figura 3 - Teste de normalidade da posição de 250 mm do carro transversal do torno para o método de Calibração Indireta



Fonte: autoria própria

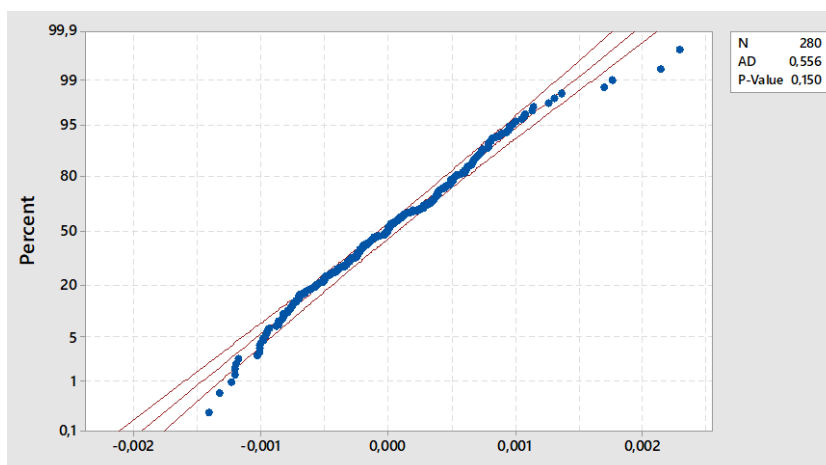
O mesmo foi feito para o método de Separação por Reversão, como ilustram as Figuras 4, 5 e 6.

Figura 4 - Teste de normalidade da posição de 0 mm do carro transversal do torno para o método de Separação por Reversão



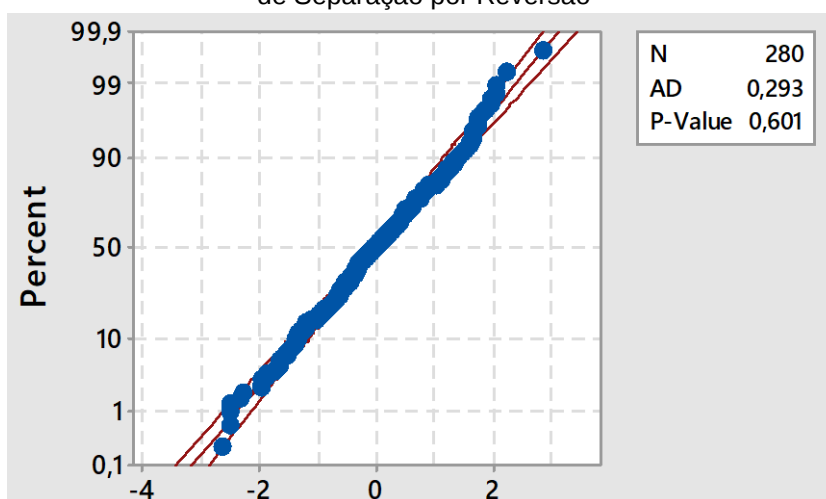
Fonte: autoria própria

Figura 5 - Teste de normalidade da posição de 125 mm do carro transversal do torno para o método de Separação por Reversão



Fonte: autoria própria

Figura 6 - Teste de normalidade da posição de 250 mm do carro transversal do torno para o método de Separação por Reversão



Fonte: autoria própria