

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DOS DESVIOS GEOMÉTRICOS DOS EIXOS
ROTATIVOS EM UM CENTRO DE USINAGEM DE CINCO
EIXOS**

FLAVIA DE FÁTIMA MENEGHEL

ORIENTADORA: PROF^a. DR^a. MARIA CÉLIA DE OLIVEIRA

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2019

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DOS DESVIOS GEOMÉTRICOS DOS EIXOS
ROTATIVOS EM UM CENTRO DE USINAGEM DE CINCO
EIXOS**

FLAVIA DE FÁTIMA MENEGHEL

ORIENTADORA: PROF^a. DR^a. MARIA CÉLIA DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2019

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP
Bibliotecária: Marjory Harumi Barbosa Hito - CRB-8/9128.

M541a	<p>Meneghel, Flavia de Fátima</p> <p>Análise dos desvios geométricos dos eixos rotativos em um centro de usinagem de cinco eixos / Flavia de Fátima Meneghel. – 2019.</p> <p>96 f. : il. ; 30 cm.</p> <p>Orientadora: Profa. Dra. Maria Célia de Oliveira. Dissertação (Mestrado) – Universidade Metodista de Piracicaba, Engenharia de Produção, Santa Bárbara d'Oeste, 2019.</p> <p>1. Engenharia de Produção. 2. Erro Sobre o Objeto. 3. Projeto Mecânico. 4. Eixos. I. Oliveira, Maria Célia de. II. Título.</p> <p>CDU – 658.5</p>
-------	---

Dedicatória

À Deus, pela vida e oportunidades oferecidas.

Aos meus pais, pelo apoio e amor incondicional.

Ao meu irmão, pelo incentivo e amor.

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida, saúde e sabedoria.

Aos meus pais, Antonio e Carmelita, pela educação e valores a mim ensinados.

A Professora Dra. Maria Célia de Oliveira, pela orientação e incentivo para conclusão deste trabalho.

Aos Professores Dr. André Luís Helleno e Dr. Raphael Galdino dos Santos, pela participação da banca examinadora de qualificação e defesa, contribuindo para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos amigos do Departamento de Engenharia de Produtos e Laboratório de Máquina-Ferramenta das Indústrias Romi S.A. pelo ajuda e apoio no desenvolvimento dos testes práticos.

As Indústrias Romi S.A. pela disponibilidade de equipamentos e máquinas para a realização dos testes.

A todos os amigos que contribuíram para a realização deste trabalho.

À UNIMEP (Universidade Metodista de Piracicaba), pelo apoio fornecido em forma de bolsa e recursos.

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

MENEGHEL, Flavia de Fátima. **Análise dos desvios geométricos dos eixos rotativos em um centro de usinagem de cinco eixos.** 2019. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

RESUMO

A utilização de máquinas-ferramenta de cinco eixos vem crescendo nos últimos anos devido à complexidade de peças produzidas. Dentre os erros existentes nesse tipo de máquina, há o de tipo geométrico, sendo ele dependente ou independente da posição do eixo, os quais interferem na qualidade dimensional e geométrica da peça. Para esse tipo de máquina, de cinco eixos, os eixos rotativos interferem nos erros que estão associados aos seus eixos, pois há imperfeições nas peças que compõem a máquina e também ocorre desvios de posicionamento do eixo. Diante disso, pesquisas voltadas para sistemas de compensação desses erros têm sido feitas para tornar o equipamento mais exato na manufatura de suas peças. Este estudo tem como objetivo a análise dos erros geométricos separados dos eixos rotativos de um centro de usinagem vertical de cinco eixos, para ser possível quantificar cada um deles. O método de pesquisa deste estudo foi experimental, sendo que foram executados cinco ensaios diferentes para cada eixo rotativo, totalizando dez tipos de ensaios, utilizando o equipamento *double ballbar*. Os dados coletados e em conjunto com equações, resultaram nos erros geométricos. Uma vez que os erros forem identificados para o modelo de máquina do estudo, pode-se simular a compensação desses erros, que possivelmente resulta no ganho de qualidade da peça produzida. Os valores encontrados dos erros geométricos relacionados ao eixo rotativo C foram menores quando comparados aos desvios do outro eixo rotativo. Com os resultados obtidos no estudo, foi possível verificar que a máquina avaliada apresenta comportamento de erros geométricos similar ao de máquinas do mesmo tipo.

PALAVRAS-CHAVE: Máquina-ferramenta de 5 eixos, Erro geométrico, Análise de erros geométricos, Projeto de máquina, Eixos rotativos.

MENEGHEL, Flavia de Fátima. **Analysis of geometric deviations of rotary axes in a five-axis machining center**. 2019. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

ABSTRACT

The application on metal cutting of five-axis machine tools has been growing in recent years due manufacturing pieces with complex profile. Among the errors in this type of machine, there is the geometric, which can be classified in dependent or independent of the position axis, and them interfere in the dimensional and geometric quality of the workpiece. For the five-axis machine type, the rotary axes are responsible for greatest interference in the errors, because they have difficulty in controlling the movement simultaneously way and too axis deviations. Because of this, research into error compensation systems has been made to ensure the equipment more accurate in the manufacture of their workpieces. This study has the objective to analyze of the geometric errors of the rotating axes of a five-axis vertical machining center and be able to quantify each of them. The research method of this study was experimental, and five experiments for each rotary axis, totalizing ten tests, were performed using double ballbar equipment. The data collected and together with equations, resulted in the geometric errors. When errors were identified for the study machine model, it can be simulated the compensation of these errors and the gain in the quality of the piece produced. The values of the errors associated with C axis were less than compared to the deviations of the other rotating axis. The results that were obtained in the study indicated that the same presents similar behavior to machines of the same type.

KEYWORDS: Five axes machine tool, Geometric error, Geometric errors analysis.

Lista de Figuras

Figura 1 - Modelo básico centro de usinagem vertical cinco eixos.	7
Figura 2 - Indicação dos eixos.	8
Figura 3 - Erros em máquina-ferramenta.	12
Figura 4 - Erro geométrico dependente de posição: a) eixo linear, b) eixo rotativo.....	14
Figura 5 - Erro geométrico independente de posição: a) eixo linear, b) eixo rotativo. ...	16
Figura 6 - Sistema de montagem do interferômetro laser na máquina.	19
Figura 7 – <i>Double ballbar</i>	20
Figura 8 - Peça teste ISO 10791-7.....	22
Figura 9 - Peça cone NAS 979.....	23
Figura 10 - Peça com erro geométrico – coordenada.	24
Figura 11 - Peça com geométrico – eixo rotativo, sentido linear.....	25
Figura 12 - Peça com geométrico – eixo rotativo, sentido angular.....	26
Figura 13 - Etapas para compensação de erros geométricos.....	30
Figura 14 - Medição cinemática durante processo de <i>double ballbar</i> : ideal e real.	31
Figura 15 - Compensação dos erros geométricos: método tradicional básico.	34
Figura 16 - Compensação dos erros geométricos: novo método.....	35
Figura 17 - Medição <i>double ballbar</i> . a) Eixo A; b) Eixo C.....	36
Figura 18 - Medição dos erros do eixo rotativo A com <i>double ballbar</i>	37
Figura 19 - Medição dos erros do eixo rotativo C com <i>double ballbar</i>	38
Figura 20 - Posição do <i>double ballbar</i> e erros dependente e independentes da posição nas medições 2 e 3.....	40
Figura 21 - Resultado medição do <i>ballbar</i> eixo A: com e sem compensação..	41
Figura 22 - Resultado medição do <i>ballbar</i> eixo C: com e sem compensação..	42
Figura 23 - Picos de erros medição do <i>double ballbar</i> : sem e com compensação.....	43
Figura 24 - Erros geométricos independentes da posição dos eixos rotativos.	44
Figura 25 - Erros geométricos dependentes da posição do eixo rotativo A.	44
Figura 26 - Erros geométricos dependentes da posição do eixo rotativo C.	45
Figura 27 - Exatidão da máquina: sem e com compensação.	46
Figura 28 - Centro de usinagem.....	49
Figura 29 - <i>Double ballbar</i> Renishaw QC20-W.	50

Figura 30 - Interferômetro laser Renishaw XL-80.	51
Figura 31 - Fases para modelo dos erros geométricos dos eixos rotativos.	51
Figura 32 - Fase1: Identificação dos erros.	52
Figura 33 - Fase 2: Análise dos erros.	52
Figura 34 - Fases do trabalho experimental.	53
Figura 35 - Fase 1: Preparação dos testes.	54
Figura 36 - Fase 2: Realização dos experimentos.	54
Figura 37 - Posição <i>double ballbar</i> na mesa.	57
Figura 38 - Calço experimentos 9 e 10.	58
Figura 39 - Fase 3: Coleta dos dados.	61
Figura 40 - Fase 4: Análise dos dados.	61
Figura 41 - Indicação dos erros PIGE dos eixos B e C.	63
Figura 42 - PIGEs dos eixos rotativos B e C.	63
Figura 43 - Medição desvio diferença sensora ΔR_{ij} - eixo B, experimentos 1 à 3.	65
Figura 44 - Medição desvio diferença sensora ΔR_{ij} - eixo B, experimentos 4 e 5.	66
Figura 45 - Medição desvio diferença sensora ΔR_{ij} - eixo C, experimentos 6 à 8.	66
Figura 46 - Medição desvio diferença sensora ΔR_{ij} - eixo C, experimentos 9 e 10.	67
Figura 47 - Indicação dos erros PDGE dos eixos B e C.	69
Figura 48 - PDGEs do eixo B. a) Erro de posição δy_b , B) Erro de posição δx_b , c) Erro de posição δz_b	71
Figura 49 - PDGEs angulares do eixo B - a) Erro angular ϵ_{xb} , b) Erro angular ϵ_{zb}	72
Figura 50 - PDGEs do eixo C. a) Erro de posição δy_c , b) Erro de posição δx_c , c) Erro de posição δz_c	73
Figura 51 - PDGEs angulares do eixo C - a) Erro angular ϵ_{yc} , b) Erro angular ϵ_{xc}	74

Lista de Quadros

Quadro 1 - Máquina-ferramenta de cinco eixos: três eixos lineares e dois rotacionais (Classe i).....	9
Quadro 2 - Tipo de máquina-ferramenta cinco eixos conforme aplicação.	9
Quadro 3 - Nomenclatura PDGE conforme ISO 230-1.	15
Quadro 4 - Nomenclatura PIGE conforme ISO 230-7.....	16
Quadro 5 - Estudos de erros geométricos – Período 1971 a 1995.	28
Quadro 6 - Estudos de erros geométricos – Período 1996 a 2015.	29
Quadro 7 - Estudos de erros geométricos – Período 2016 a 2019.	29
Quadro 8 - Dados técnicos principais ROMI DCM 620-5x.	48
Quadro 9 - Dados técnicos principais do <i>double ballbar</i> Renishaw QC20-W. .	50
Quadro 10 - Dados técnicos principais do interferômetro laser Renishaw XL-80.....	50
Quadro 11 - Sequência dos experimentos.....	55
Quadro 12 - Sequência do trabalho experimental.....	58
Quadro 13 - Experimento e identificação PIGEs.....	62
Quadro 14 - Equações para identificação dos PDGEs.	69

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Erros geométricos máquina-ferramenta de cinco eixos.	17
--	----

Lista de Abreviaturas

CAD	-	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	-	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CLSF	-	<i>Cutter Location Source File</i>
CNC	-	<i>Computer Numeric Control</i>
CMM	-	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
HTM	-	<i>Homogenous Transformation Matrix</i>
ISO	-	<i>International Organization of Standardization</i>
MCS	-	<i>Machine Coordinate System</i>
NAS	-	<i>National Aerospace Standard</i>
NURBS	-	<i>Non-Uniform Rational B-Spline</i>
PDGE	-	<i>Position Dependent Geometric Error</i>
PIGE	-	<i>Position Independent Geometric Error</i>
SMEM	-	<i>Self-adaptive Mathematical Expression Model</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO.....	3
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2	REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.1	CENTRO DE USINAGEM VERTICAL DE CINCO EIXOS.....	6
2.2	ERROS GEOMÉTRICOS EM MÁQUINA-FERRAMENTA CINCO EIXOS.....	12
2.3	MEDIÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS.....	18
2.4	EFEITOS DOS ERROS GEOMÉTRICOS NAS PEÇAS	24
2.5	METODOLOGIA DE COMPENSAÇÃO DE ERRO GEOMÉTRICO	27
2.6	COMPENSAÇÃO DE ERROS GEOMÉTRICOS	30
3	MATERIAIS E MÉTODO	48
3.1	MATERIAIS	48
3.2	MÉTODO	51
3.3	TRABALHO EXPERIMENTAL	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1	ERRO GEOMÉTRICO INDEPENDENTE DA POSIÇÃO (PIGE).....	62
4.2	ERRO GEOMÉTRICO DEPENDENTE DA POSIÇÃO (PDGE).....	64
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

A busca pela redução dos desperdícios em sistemas de manufatura faz com que as organizações utilizem equipamentos eficientes em seu processo, de tal forma que os seus produtos atendam aos requisitos de qualidade exigidos por normas ou especificações de projetos. O uso de máquina-ferramenta de cinco eixos é um exemplo de melhora na eficiência de um processo de usinagem. O processo de fabricação neste tipo de máquina permite menor tempo de *set up* e menor *lead time*, quando comparado a usinagem de peças com perfil complexo em máquinas de três eixos (IBARAKI; OYAMA; OTSUBO, 2011; IBARAKI *et al.*, 2010).

Ainda segundo IBARAKI *et al.* (2010), a operação em máquinas-ferramenta apresenta diversos tipos de erros decorrentes da própria máquina. Estes erros interferem na qualidade da peça usinada, resultando em não conformidade com as especificações de projeto do produto, impactando diretamente na cadeia produtiva do item.

Os erros geométricos na operação da máquina-ferramenta são oriundos de imperfeições mecânicas das peças que compõem a sua estrutura (LACALLE; LAMIKIZ, 2009) e são classificados em dois tipos: (i) movimento, que são os PDGE – Erro Geométrico Dependente da Posição, e (ii) orientação e localização, nomeados de PIGE – Erro Geométrico Independente da Posição (XIANG; ALTINTAS, 2016). Além dos erros geométricos, esse tipo de equipamento também possui erros cinemáticos (IBARAKI *et al.*, 2010), erros térmicos (BITAR-NEHME; MAYER, 2016) e erros de controle de movimento (DING *et al.*, 2016a).

Uma forma de garantir que uma máquina-ferramenta produza peças na qualidade dimensional e geométrica exigidas, é compensar eletronicamente os seus erros. Para isso, há métodos de compensação, que estão diretamente associados com a relação entre erros de um eixo principal e dos demais desvios

dos outros eixos (BITAR-NEHME; MAYER, 2016; IBARAKI *et al.*, 2010; XIANG; ALTINTAS, 2016).

Esses modelos de compensação de erros das máquinas-ferramenta podem ser inseridos no CNC (*Computer Numeric Control*) da máquina ou até mesmo no CAM (*Computer Aided Manufacturing*), que é o programa de usinagem da peça, de modo que compensem os erros presentes no equipamento (JIANG, 2014).

A compensação via CNC pode ser realizada durante construção da máquina, na fase de montagem do equipamento, especificamente durante a geometria e alinhamento dos conjuntos mecânicos, na qual há coleta dos dados, para identificar o valor constante de erro que deve ser inserido para correção. Esta identificação pode ser realizada utilizando interferômetro laser, que permite avaliar os erros estáticos, e por meio de um *ballbar* que avalia os erros dinâmicos. Para a correção destes erros, pode-se comparar os resultados obtidos durante a identificação dos erros com o MCS (*Machine Coordinate System*), assim é possível identificar e compensar baseando nas coordenadas real e ideal da máquina (XIANG; ALTINTAS, 2016).

A compensação por meio da trajetória da ferramenta é feita diretamente no programa de usinagem da peça a ser fabricada, para isso, é necessário conhecer a coordenada real que a máquina se movimenta, o modelo de erro a ser compensado e possuir um pós-processador dedicado para o sistema, tendo assim os três requisitos necessários para compensar os erros. Nesse caso, para ser possível processar a peça no perfil ideal, a compensação é feita de modo que a nova trajetória da ferramenta de corte seja a que foi modificada no CAM (HSU; WANG, 2007).

O modelo inserido no CAM faz com que seja válido em vários tipos de máquinas-ferramenta, pois é independente do controlador (CNC) que a máquina possui (HSU; WANG, 2007). Por haver diferenças específicas entre cada CNC existente, necessidade de adaptação na máquina, diferenças de funcionamento e funcionalidade entre fabricantes, e outros aspectos, a correção via programa de usinagem pode ser mais viável.

Já na compensação dos desvios volumétricos de uma máquina-ferramenta, destaca-se o modelo SMEM (*Self-adaptive Mathematical Expression Model*), o qual identifica os erros volumétricos presentes antes da usinagem e viabiliza a reconstrução da superfície a ser usinada (HE *et al.*, 2016).

Devido aplicação das máquinas-ferramenta cinco eixos em segmentos que exigem alto padrão qualidade das peças e visando um mercado com alta capacidade de produção, há necessidade de melhoria no processo de usinagem, que pode estar relacionado com sistemas que compensam, via trajetória da ferramenta, determinados aspectos mensuráveis relacionados com o equipamento responsável pela fabricação da peça. Assim, um modelo de compensação de erros geométricos da máquina-ferramenta, pode fazer com que a máquina seja mais assertiva em suas peças produzidas tanto no perfil geométrico quando nos valores dimensionais.

Diante disso, é necessário, após a identificação experimental, a análise dos erros geométricos dos eixos rotativos em um centro de usinagem vertical de cinco eixos, a qual é utilizada como dado de entrada para o sistema de desenvolvimento de compensação desses erros.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo analisar os erros geométricos dos eixos rotativos de um centro de usinagem vertical de cinco eixos.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Nas máquinas-ferramenta, a exatidão geométrica é muito importante para trabalho e desempenho da mesma, porém o sistema possui erros de

característica geométrica, devido à suas peças e construção (TIAN; LIU; LIU, 2016).

Para que a máquina se torne mais exata é necessário a compensação dos erros existentes, entre eles o geométrico. Sendo assim, é necessário a identificação dos erros geométricos presentes no equipamento e são utilizados para o desenvolvimento de modelos de compensação (LI *et al.*, 2018).

Este trabalho irá estudar os erros geométricos de uma máquina-ferramenta produzida por empresa nacional, a qual busca o desenvolvimento de novas tecnologias e com foco em seus clientes, não somente do mercado nacional, para que produzam peças usinadas com o equipamento apropriado a fim de atingir a qualidade exigida no produto. Contudo, novas pesquisas continuadas do trabalho aqui desenvolvido, quando aplicado e implementado à máquina, como um sistema de compensação de erros geométricos, poderão resultar em melhoria de exatidão da máquina e conseqüentemente de suas peças produzidas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, como apresentado na sequência:

Capítulo 1 - Introdução – descrição do trabalho, abordando o problema, objetivo e justificativa.

Capítulo 2 - Referencial teórico – apresenta os principais conceitos teóricos para o desenvolvimento do trabalho, tendo como tópicos relevantes os erros geométricos em máquina-ferramenta de cinco eixos, a medição dos erros e a compensação desses tipos de erros.

Capítulo 3 - Materiais e método – detalha os materiais, equipamentos e metodologia utilizados nos experimentos do trabalho.

Capítulo 4 - Resultados e discussões – são apresentados os resultados encontrados nos ensaios experimentais e as respectivas discussões.

Capítulo 5 - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros – apresenta as conclusões obtidas com os resultados dos ensaios realizados, bem como sugestões para desenvolvimento de futuros trabalhos.

Capítulo REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS – encontra-se as fontes das bibliografias utilizadas para a elaboração do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O capítulo em questão apresentará os conceitos abordados no assunto do estudo, desde o conceito de máquina-ferramenta até os erros geométricos nesse tipo de máquina, desde sua medição até modelos de compensação. Sendo eles, os conceitos, apresentados em: 2.1) Centro de usinagem vertical de cinco eixos; 2.2) Erros geométricos em máquina-ferramenta cinco eixos; 2.3) Medição dos erros geométricos; 2.4) Efeitos dos erros geométricos nas peças; 2.5) Metodologia de compensação de erro geométrico e 2.6 Compensação de erros geométricos.

2.1 CENTRO DE USINAGEM VERTICAL DE CINCO EIXOS

Um centro de usinagem vertical de cinco eixos é uma máquina-ferramenta, que tem como finalidade a execução do processo de usinagem, apropriada para realizar múltiplas operações, principalmente de fresamento e de furação, sendo que a rotação (movimentação) principal é ocasionada pela ferramenta de corte, a qual está acoplada no cabeçote disposto no sentido vertical. Essa máquina é equipada com CNC (Comando Numérico Computadorizado), capaz de controlar os cinco eixos existentes na configuração da máquina, que na maioria dos casos, três deles são lineares e dois são rotacionais (GROOVER, 2007).

Além disso, a máquina descrita pode possuir trocador automático de ferramenta, e também ser equipada com trocador automático de *pallets* (mesa de trabalho) e posicionamento automático da peça de trabalho (GROOVER, 2007).

O modelo geral para centro de usinagem vertical de cinco eixos é mostrado na Figura 1, a qual apresenta como eixos lineares X, Y e Z, e eixos rotacionais B e C, ilustrando também alguns componentes básicos para a construção estrutural do equipamento, como exemplo base, coluna, cabeçote e mesa de trabalho.

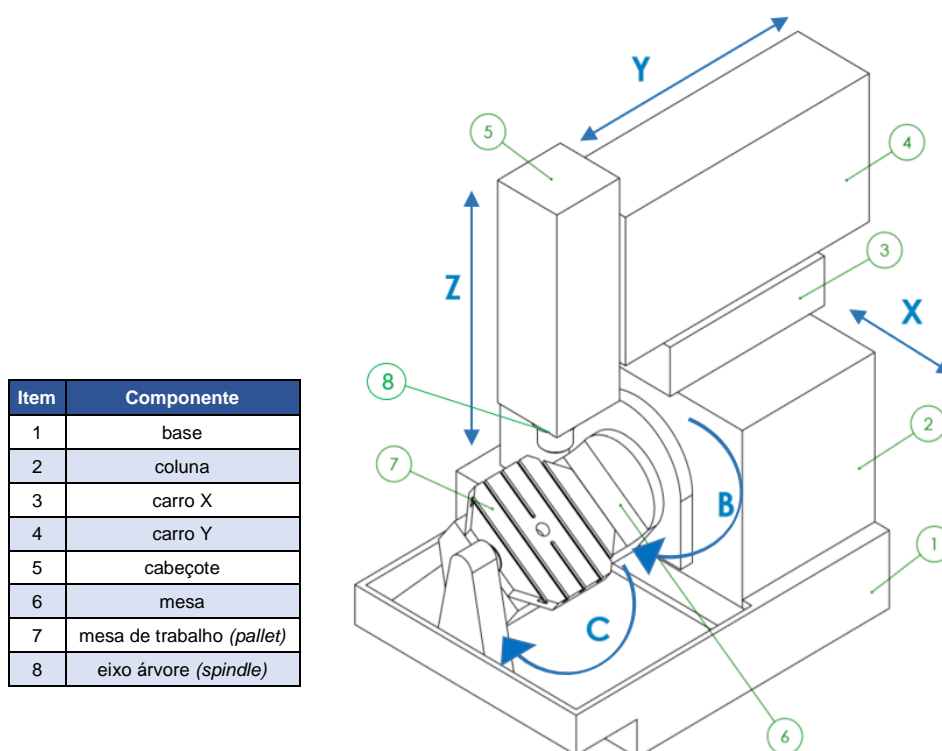


Figura 1 - Modelo básico centro de usinagem vertical cinco eixos.
Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme mostra a Figura 1, no centro de usinagem de cinco eixos, os eixos lineares, conhecidos também por eixos de translação, têm a nomenclatura baseada na regra da mão direita, sendo eles perpendiculares entre si, definindo o eixo Z como paralelo ao eixo do eixo árvore, onde a ferramenta de corte está localizada, o eixo X é horizontal e paralelo ao eixo Z e o eixo Y é definido conforme posição dos eixos X e Z do conceito adotado. Já os eixos rotacionais, conhecidos por eixos angulares, estão dispostos em torno dos eixos lineares X, Y e Z, que são chamados, respectivamente, de A, B e C (ISO 841, 2001).

A Figura 2 apresenta a disposição dos eixos em centros de usinagem e suas respectivas nomenclaturas, sendo que o valor da direção apresentada é positivo, pois essa definição é dada para saindo da peça até o local da ferramenta de corte, já na direção oposta o valor do sentido é negativo (ISO 841, 2001).

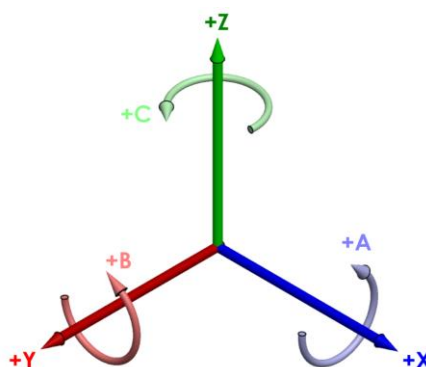


Figura 2 - Indicação dos eixos.
Fonte: Elaborado pela autora.


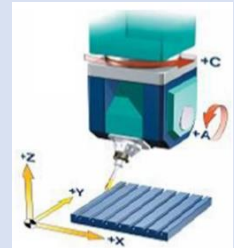

Em uma máquina-ferramenta, a quantidade de eixos que a mesma possui está relacionada com o número de graus de liberdade ou com a quantidade de controlador (servomotor) independente existente para cada eixo linear ou rotacional, sendo que o total de todos os servomotores resulta quantos eixos a máquina possui. A máquina-ferramenta de cinco eixos possui eixos de translação e rotação, podendo ser construída de acordo com sua cinemática (movimento dos mecanismos isolando forças que atuam no sistema) (BOHEZ, 2002a).

As máquinas cinco eixos são classificadas de acordo com a quantidade de eixos lineares e rotativos, divididas nas seguintes classes: (i) três eixos de translação e dois eixos de rotação, (ii) dois eixos de translação e três eixos de rotação, (iii) um eixo de translação e quatro eixos de rotação, e (iv) cinco eixos de rotação, porém as máquinas existentes em sua grande maioria são configuradas conforme classe (i) (BOHEZ, 2002a).

Além destas classes, há sub caracterização desses grupos, que é em função da disposição dos eixos lineares e rotativos na máquina. Dentre as classes apresentadas, a classe (i), que é o de maior utilização no mercado, pode ser disposta em três tipos principais, como apresentados na Quadro 1.

Quadro 1 - Máquina-ferramenta de cinco eixos: três eixos lineares e dois rotacionais (Classe i).

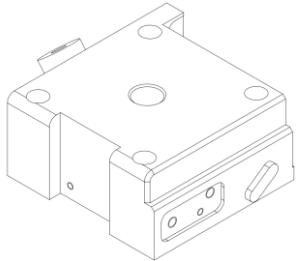
Fonte: Adaptado de GRAY *et al.* (2001)

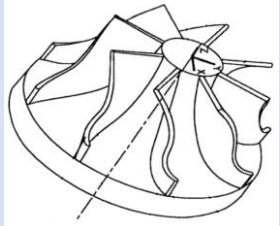
Tipo	Eixos lineares	Eixos rotativos	Exemplo
(i)	X, Y e Z (no cabeçote)	A e C (na mesa de trabalho)	
(ii)	X e Y (na mesa de trabalho) Z (no cabeçote)	A e C (no cabeçote)	
(iii)	X, Y e Z (no cabeçote)	A (no cabeçote) C (na mesa de trabalho)	

Para BOHEZ (2002), além das classificações devido a configuração de construção da máquina, o equipamento também pode ser dividido conforme sua aplicabilidade de tipo de usinagem, como mostra a Quadro 2.

Quadro 2 - Tipo de máquina-ferramenta cinco eixos conforme aplicação.

Fonte: Elaborado pela autora

Tipo	Tipo de usinagem	Modelo	Exemplo de peça
(i)	Posição	Cinco eixos de posição ou Cinco faces	 Fonte: Elaborado pela autora

Tipo	Tipo de usinagem	Modelo	Exemplo de peça
(ii)	Interpolação	Cinco eixos de contorno ou Cinco eixos	 <p data-bbox="1082 548 1307 573">Fonte: BOHEZ (2002a)</p>

Os centros de usinagem de modelo “cinco faces” são máquinas de cinco eixos, que são utilizadas de maneira que até quatro deles, trabalhem de modo interpolado simultaneamente entre si durante a usinagem. A mesa de trabalho tem posicionamento fixo para a usinagem, possibilitando a fabricação de peças com faces planas podendo conter furação, e de peças que a usinagem realizada utilizando três eixos (três faces da peça) não pode ser executada em um único *set up*, sendo que durante esse processo a maioria dos eixos se mantem fixos, movendo apenas o eixo da operação ou da face da peça (BOHEZ, 2002a).

Já as máquinas denominadas como “cinco eixos” são usadas de maneira que seja possível a realização de interpolação (movimentação simultânea) dos cinco eixos existentes durante a usinagem. Para isso, as máquinas são desenvolvidas com CNC específico para o processo com esse tipo de movimentação dos eixos da máquina, pois a orientação da ferramenta de corte e da peça são alteradas a cada estágio da usinagem, viabilizando a fabricação de peças com perfil complexo de superfície (BOHEZ, 2002a).

O Quadro 2 apresenta também exemplo ilustrativo de peças que podem ser fabricadas nesses tipos de máquinas. Como exemplos de produtos produzidos nessas máquinas estão moldes e matrizes, próteses médicas, turbinas (pás), injetores de combustível, peças aeronáuticas, peças automotivas, entre outros.

Ainda segundo BOHEZ (2002a), esse tipo de máquina possui sua construção baseada em alguns requisitos, como: (i) flexibilidade na posição e orientação de peça e ferramenta, (ii) posicionamento e orientação em maior velocidade

possível e mais precisa, (iii) troca rápida de ferramenta e peça, (iv) maior capacidade de remoção de material, e v) econômica para o meio ambiente.

Devido à alta tecnologia de projeto e componentes empregados nas máquinas-ferramenta cinco eixos e também seu funcionamento com CAD/CAM, apropriados para este tipo de máquina, as operações de usinagem, em conjunto com melhor processo e até mesmo com característica produtiva da máquina, podem resultar em melhor qualidade de rugosidade que as máquinas três eixos. Além disso, o processo de usinagem em cinco eixos tem melhor desempenho em tempo quando comparado a equipamentos de três eixos em que a peça possui necessidade de mais de um tipo de posição de fixação para usinagem (BAPTISTA; ANTUNE SIMÕES, 2000).

Outra vantagem das máquinas cinco eixos, quando comparadas as máquinas de três eixos, é que os dois eixos rotacionais são utilizados para aprimorar a orientação da ferramenta de corte em relação ao ponto na superfície normal de usinagem na peça, que dependendo do raio da aresta da fresa utilizada é possível reduzir a quantidade de movimentos (passes) da máquina para determinada operação (GRAY *et al.*, 2001).

As desvantagens da utilização de máquina-ferramenta cinco eixos são o elevado custo do equipamento e novos erros, como os erros de posicionamento devido aos eixos rotativos adicionados no sistema (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

Os erros presentes nas máquinas-ferramenta de cinco eixos, como térmicos, movimento e controle, e também os geométricos, afetam a exatidão da usinagem e conseqüentemente são influentes na qualidade dimensional das peças fabricadas nesse tipo de equipamento (WAN; LIU; ZHANG, 2016). Sendo assim, esses devem ser considerados como decorrentes do processo como um todo, existentes na máquina e até sua utilização, porém há meios que podem compensá-los, minimizando-os de modo que há melhora no desempenho do equipamento.

2.2 ERROS GEOMÉTRICOS EM MÁQUINA-FERRAMENTA CINCO EIXOS

Nas máquinas-ferramenta há erros presentes em todo o sistema. A Figura 3 mostra os erros presentes na máquina-ferramenta conforme sua classificação (quase estático ou dinâmico) e seus tipos. Além disso, os tipos são subcaracterizados conforme localização e/ou fatores que ocasionam esses erros, e podem ser trabalhados de modo que tenham menor impacto na máquina.

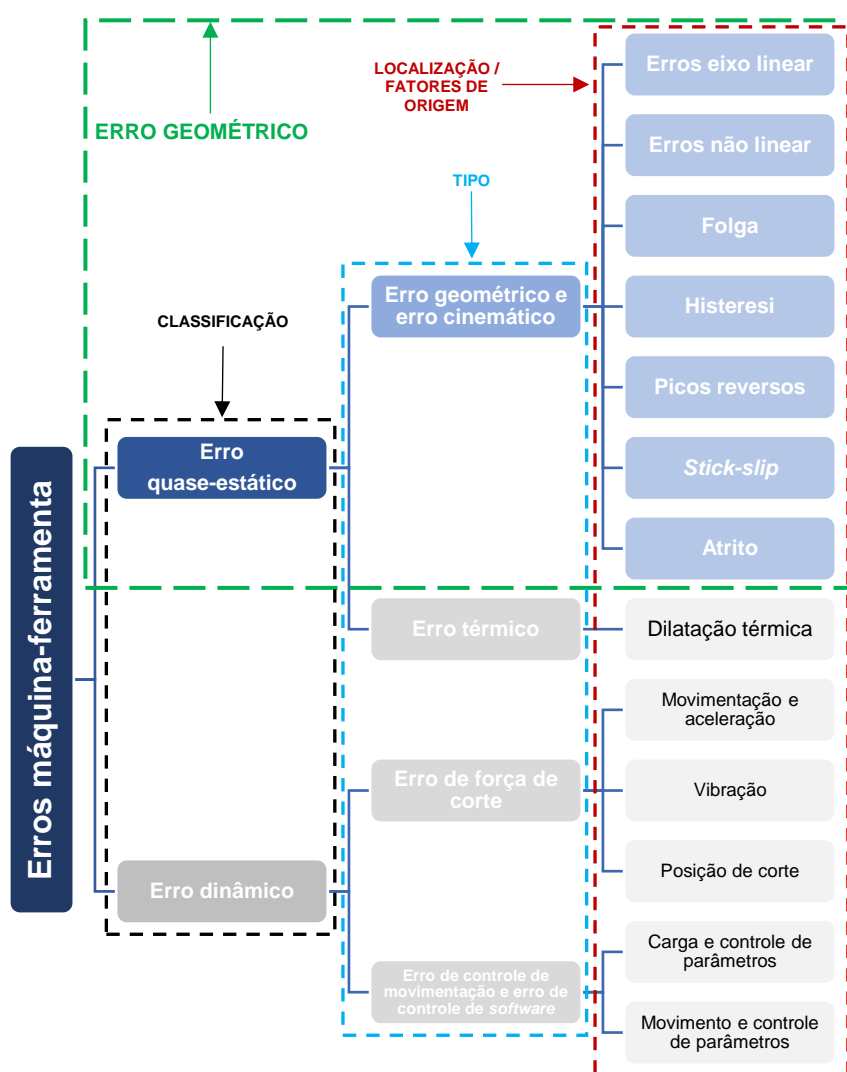


Figura 3 - Erros em máquina-ferramenta.
Adaptado de JIANG (2014) e RAMESH; MANNAN; POO (2000)

Esses erros são ocasionados por fatores relacionados ao equipamento ou devido ao comportamento da máquina-ferramenta durante o seu funcionamento, que estão diretamente relacionados à complexidade da máquina (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

De acordo com a Figura 3, os erros são classificados como quase estático e dinâmico, sendo o primeiro decorrente de fatores estruturais da máquina e que não se alteram devido as condições de funcionamento do equipamento. O segundo erro é devido a fatores de comportamento dinâmico do sistema e geralmente são influenciados por condições de usinagem durante o processo de corte da ferramenta, ocasionados por erros do motor do eixo árvore, vibração da estrutura da máquina, deflexão da ferramenta e erros de controle do servomotor e contorno (RAMESH; MANNAN; POO, 2000).

Na classificação quase-estático há os erros geométricos, os quais representam de 20% a 30% dos erros totais de centros de usinagem (SHEN *et al.*, 2012). A ocorrência desses erros na máquina-ferramenta se dá devido as imperfeições das peças mecânicas que fazem parte do conjunto da máquina, que podem ser causados por desalinhamento dos eixos, utilização de juntas e acoplamentos, degradação de superfícies de guias (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

Esses erros, os geométricos, são responsáveis pelo erros de geometria da peça usinada no equipamento (ABBASZADEH-MIR *et al.*, 2002). Neste estudo serão avaliados os erros geométricos presentes nos eixos rotativos da máquina, pois são os eixos diferenciais da máquina quando comparada a máquina de três eixos.

O erro geométrico é um tipo de erro que é repetitivo e previsível, sendo assim o mesmo possui valor conhecido e pode ser visto como um erro de certeza, classificando-o como erro sistemático. Esse tipo de erro é sistemático devido a resultados esperados e com repetibilidade, ao contrário de erro aleatório que possui valores dispersos e sem tendência em suas medições (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

Os erros geométricos da máquina-ferramenta podem ser erros decorrentes aos seguintes fatores: (i) posicionamento de cada eixo, (ii) retilinidade do eixo com eixo perpendicular, (iii) contorno do eixo, (iv) passo, guia e rotação de cada eixo, (v) folga de cada eixo, e (vi) esquadro entre eixos (RAMESH; MANNAN; POO, 2000).

Esses erros, os geométricos, podem ser divididos em função da posição de seguinte forma: *Position Dependent Geometric Error* (PDGE) e *Position Independent Geometric Error* (PIGE) (LEE *et al.*, 2011).

O erro geométrico dependente da posição são os erros existentes no próprio eixo da máquina e tem correlações modeladas com referência no eixo em questão (LEE *et al.*, 2011). Esse erro também é definido como erro de movimentação dos sistemas de translação e rotação da máquina (XIANG; ALTINTAS, 2016).

A Figura 4 ilustra os erros desse tipo em eixos lineares e eixos rotativos, e o Quadro 3 apresenta as nomenclaturas dos desvios geométricos dependente da posição dos eixos conforme norma ISO 230-1 (2012) para os eixos lineares e ISO 230-7 (2015) para os eixos rotativos.

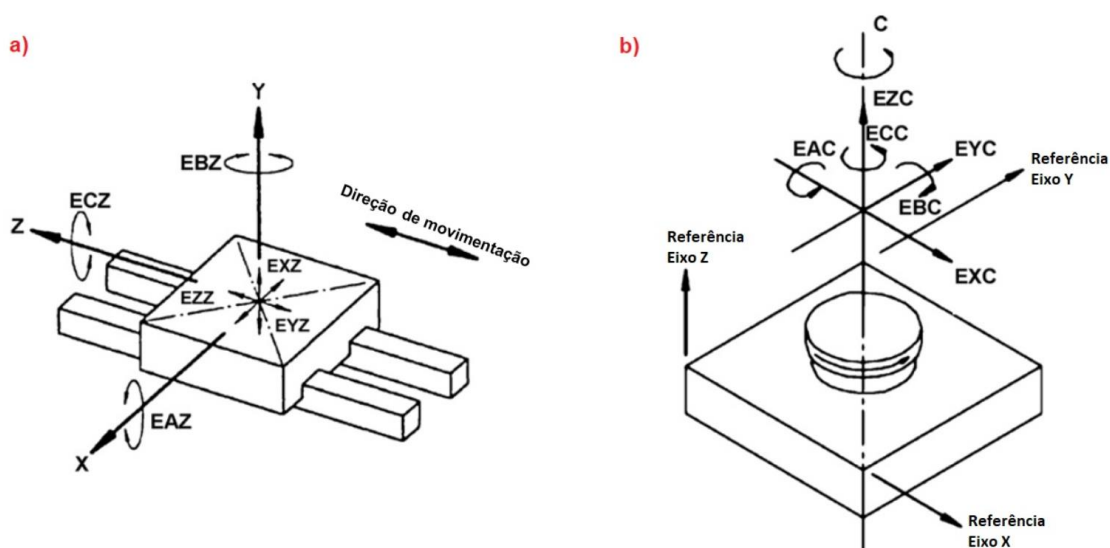


Figura 4 - Erro geométrico dependente de posição: a) eixo linear, b) eixo rotativo.
 Fonte: ISO 230-1 (2012)

Quadro 3 - Nomenclatura PDGE conforme ISO 230-1.
Fonte: Adaptado de ISO 230-1 (2012)

		Nomenclatura ISO 230-1 para PDGE dos eixos						
ERRO		EIXO X	EIXO Y	EIXO Z	EIXO B	EIXO C		
PDGE	Posição de movimentação no sentido do eixo	EXX	EYY	EZZ				
	Trajetória do ponto de movimentação do componente	EYX	EXY	EXZ	-	-		
		EZX	EZY	EYZ				
	Angular de movimentação de componente (passo, yaw e rol)	EAX	EAY	EAZ				
		EBX	EBY	EBZ				
		ECX	ECY	ECZ				
	Radial de movimentação						EXB	EXC
							EYB	EYC
	Axial de movimentação						EZB	EZC
Rotacional de movimentação	-	-	-	EAB			EAC	
				ECB	EBC			
Angular de posicionamento				EBB	ECC			

Como pode ser observado na Figura 4 e no Quadro 3 para cada eixo linear existente há desvios de modo que são (i) um desvio de posição de movimentação no sentido do eixo, (ii) dois desvios de trajetória do ponto de movimentação do componente e (iii) três desvios angulares de movimentação de componente. Já para os eixos rotativos existem os desvios segmentados em (i) dois desvios radiais de movimentação, (ii) um desvio axial de movimentação, (iii) dois desvios rotacionais de movimentação e (iv) um desvio angular de posicionamento. Nesta figura são exemplificados os eixos Z (linear) e o eixo C (rotativo).

Segundo LEE *et al.* (2011), o erro geométrico independentemente da posição são os erros existentes entre os eixos e podem ser modelados em função dessas variáveis de erros. A Figura 5 apresenta os erros desse tipo de posição nos eixos lineares e nos eixos rotativos, e o Quadro 4 mostra as nomenclaturas dos desvios geométricos do tipo independentemente da posição dos eixos conforme norma ISO 230-7 (2015).

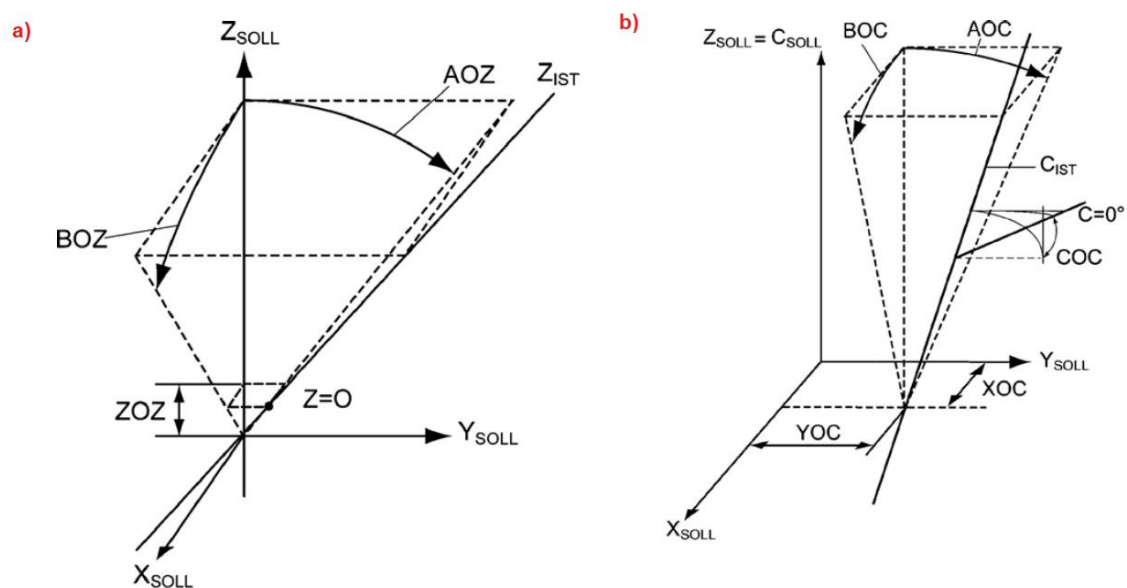


Figura 5 - Erro geométrico independente de posição: a) eixo linear, b) eixo rotativo.
Fonte: ISO 230-7 (2015)

Quadro 4 - Nomenclatura PIGE conforme ISO 230-7.
Fonte: Adaptado de ISO 230-7 (2015)

		Nomenclatura ISO 230-7 para PIGE dos eixos				
ERRO		EIXO X	EIXO Y	EIXO Z	EIXO B	EIXO C
PIGE	Posição	-	-	ZOZ	XOB	XOC
					YOB	YOC
	Esquadro / Orientação	BOZ	AOZ	-	AOB	AOC
					BOB	BOC

Na Figura 5 e no Quadro 4 pode ser observado que para cada eixo linear da máquina-ferramenta em estudo existe um erro de esquadro. Para os eixos rotativos há dois desvios de posição e dois desvios de esquadro. A Figura 5 em questão apresenta de forma ilustrativa os erros independentes de posição do eixo Z (linear) e do eixo C (rotativo).

Ainda na Figura 5, pode ser compreendido que erro de posição é o valor posicionado que não está localizado no ponto conforme proposto, tendo então o valor real diferente do desejado em sentido de deslocamento linear. Já o erro de

esquadro ocorre quando os dois eixos a serem medidos não estão perpendiculares entre si, formando então o ângulo diferente de 90°.

O erro independente de posição também é conhecido como erro de localização, podendo ser caracterizado como erro de posição nominal ao longo do eixo e também como erro de orientação do eixo no Sistema de Coordenada da Máquina (MCS) (SCHWENKE *et al.*, 2008). O principal causador deste erro é o desalinhamento dos componentes da máquina durante sua montagem (LEE; YANG, 2013)

Para uma máquina-ferramenta de cinco eixos, configurada com três eixos lineares e dois eixos rotativos, existem o total de 41 erros geométricos, que são divididos conforme Tabela 1 (XIANG; ALTINTAS, 2016).

Tabela 1 - Erros geométricos máquina-ferramenta de cinco eixos.
Fonte: Elaborado pela autora

	EIXO	QUANTIDADE DE PDGE	QUANTIDADE DE PIGE	TOTAL POR EIXO
eixos lineares	X	6	1	7
	Y	6	1	7
	Z	6	1	7
eixos rotativos	B	6	4	10
	C	6	4	10
	Total por tipo	30	11	

Segundo XIANG; ALTINTAS (2016), esses erros geométricos interferem diretamente na orientação e posição da ferramenta em relação a peça que será usinada. Além disso, os erros geométricos, em conjunto com os erros térmicos, são responsáveis pelo erro volumétrico que a máquina gera ao usinar uma peça (SRIVASTAVA; VELDHUIS; ELBESTAWIT, 1995).

Para LACALLE; LAMIKIZ (2009), os desvios geométricos impactam de modo direto na qualidade da peça que está sendo fabricada na máquina, interferindo no aspecto dimensional e geométrico do item, que é devido a alteração da

posição relativa da ferramenta de corte e da peça, causando diferença dimensional entre eles.

Segundo RAMESH; MANNAN; POO, (2000) e LI *et al.* (2018) a construção de uma máquina sem esses erros é de difícil realidade, pois além da dificuldade e custo de peças fabricadas de modo a não proporcionar erros, a exatidão da máquina ainda assim é interferida pelo seu funcionamento como todo, desde comportamento térmico até ao processo de usinagem. Desse modo, a medição e o monitoramento dos desvios são vistas de maneira simples, e esses processos podem resultar como dados para possíveis sistemas de compensação dos erros.

2.3 MEDIÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS

Para ser possível identificar os erros geométricos existentes no centro de usinagem de cinco eixos, ou até mesmo mapeá-los para a sua possível compensação, é necessário a utilização de instrumentos de medição, que podem realizar medições diretas ou indiretas (XIANG; ALTINTAS, 2016).

No método de medição direto, o qual é comparada com um valor de referência tal como aceleração da gravidade, temperatura ambiente e linha de escala, há limitação devido a especificações do equipamento de medição e também a realização de *setup* para o procedimento, sendo assim o equipamento e a preparação tornam-se quase específicos para determinada aplicação, podendo ser reaplicado em outra medição de capacidade similar. Nesse método é detectado apenas um erro a cada *set up* de medição. Porém, esse método é conceituado como uma metodologia de alta eficiência em seu processo e aquisição dos dados (YANG *et al.*, 2017; QIAO *et al.*, 2017; GIVI, 2015).

Ainda segundo YANG *et al.* (2017), a medição indireta, que é feita para ser possível a comparação com uma grandeza específica por meio de outras unidades, utiliza de equipamentos como interferômetro laser, *ballbar*, *R-test*,

probe, teste de usinagem e rastreamento por interferômetro. Em máquinas-ferramenta o método indireto trabalha com o desvio de movimento da ponta da ferramenta, sendo que esse tipo de medição, com os equipamentos descritos, é vista como um processo eficiente para coleta dos erros geométricos, uma vez que apresentam resultados que são comparáveis com determinada grandeza.

Na medição indireta é possível identificar mais de um erro geométrico durante um único *set up*, sendo assim é visto como eficiente e sua utilização nas pesquisas mais recentes é muito aplicada (QIAO *et al.*, 2017).

O interferômetro laser é um equipamento que, além de identificar outros erros, pode ser usado para mensurar os erros de posicionamento do eixo linear, de característica estática (SCHWENKE *et al.*, 2008). A Figura 6 ilustra como é a montagem de um sistema interferômetro laser para medir o erro na máquina-ferramenta.

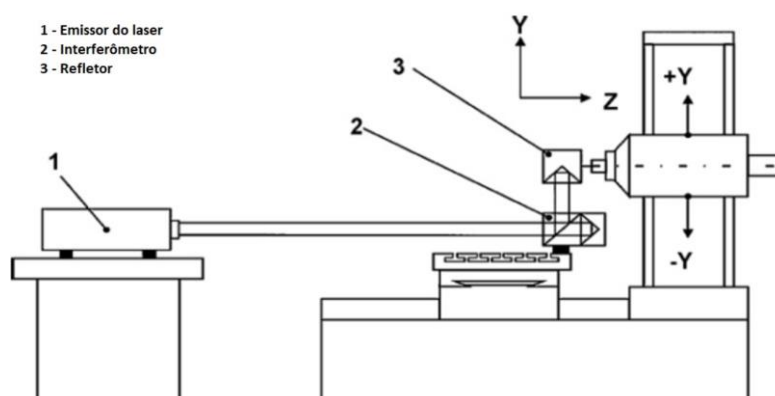


Figura 6 - Sistema de montagem do interferômetro laser na máquina.
Fonte: SCHWENKE *et al.* (2008)

Esse equipamento é formado por três itens principais: (i) emissor do laser, (ii) interferômetro e (iii) refletor, ilustrados, respectivamente, na Figura 6 por 1, 2 e 3. Os três componentes estão associados com o CNC da máquina para ser possível a leitura dos erros, sendo possível analisar e comparar o deslocamento real do eixo linear, que foi identificado pelo interferômetro, com a posição programada para ser deslocada (SCHWENKE *et al.*, 2008).

Ainda segundo SCHWENKE *et al.* (2008) o interferômetro laser é montado na máquina-ferramenta para que seja possível a medição do descolamento em relação a mesa de trabalho e ao eixo árvore ou *probe*, de modo que o emissor do laser é localizado em um local estático fora da máquina, o interferômetro no conjunto da máquina que permanece estático, e o refletor em algum ponto móvel do eixo da máquina em análise que seja capaz de refletir o feixe recebido. Com o sistema montado, é possível identificar o deslocamento projetado no CNC e o real no interferômetro, sendo a diferença entre eles o erro encontrado.

O *double ballbar* é um instrumento de medição que tem como finalidade medir o erro de deslocamento relativo no comprimento ao longo do volume em que o eixo se desloca. Durante o processo de medição, a direção sensora do *ballbar*, que é responsável pela identificação do deslocamento, permanece constante (TSUTSUMI; SAITO, 2003).

A Figura 7 ilustra como é o sistema *ballbar* de medição, o qual é composto por sensor linear telescópico com duas esferas de mesmo diâmetro nas extremidades, sendo que uma delas fica posicionada no *spindle* da máquina-ferramenta e outra acoplada na mesa de trabalho ou dispositivo.

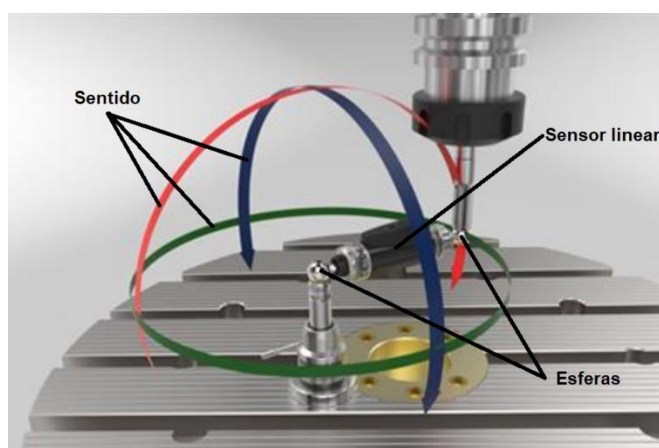


Figura 7 – *Double ballbar*.

Fonte: Adaptado de RENISHAW (2018a), acesso em: 20 fev. 2018.

A medição executada pelo *double ballbar* pode ser feita nos sentidos apresentados na Figura 7 respeitando limitações do equipamento e/ou máquina, e também dos pares de eixos que máquina possui, que será utilizado para

medição. O centro de cada esfera fixada, no *spindle* e na mesa de trabalho, é calculado pelo sistema de coordenada da máquina. Identificando a posição real das esferas e realizando a movimentação conforme deslocamento desejado, com o equipamento, é possível traçar o caminho real dos eixos avaliados que estão sendo programados pela máquina, trajetória que é identificada pelo *double ballbar*.

O *double ballbar* é um equipamento de alta exatidão e é capaz de identificar os erros de interpolação dos eixos lineares. Além disso, os erros angulares e os erros lineares são identificados separadamente. Esse instrumento é mais utilizado para medir os erros em eixos rotativos, pois quando para aplicação de eixos lineares o equipamento mais usual é o interferômetro laser (XIA *et al.*, 2017).

A medição dos erros geométricos existentes no centro de usinagem é realizada conforme apresentada nas normas ISO (*International Organization of Standardization*) 230 e ISO 10791. Os procedimentos estabelecidos nas normas serão utilizados neste trabalho.

Na norma ISO 10791-7 (2014), que é referente as condições de testes para máquina-ferramenta, é atribuída a sequência dos testes que devem ser executados em conjunto com a exatidão e repetibilidade dos erros encontrados, sendo específica em parte da mesma para centro de usinagem vertical de cinco eixos.

A norma ISO 10791-7 (2014) é utilizada ainda para especificar a peça teste para ser usinada em centro de usinagem, a qual também define a exatidão de peças específicas com fase de acabamento. Para centros de usinagem, a peça a ser usinada é feita para identificar o posicionamento e contorno que a máquina realiza. Durante o processo para fabricação dessa peça é necessário que haja movimentação simultânea da maior quantidade de eixos da máquina possível. A Figura 8 ilustra o desenho da peça modelo de teste a ser usinada em centro de usinagem, contento as tolerâncias geométricas requisitadas conforme a norma,

afim de verificar os aspectos dimensionais e de tolerâncias que a máquina realiza.

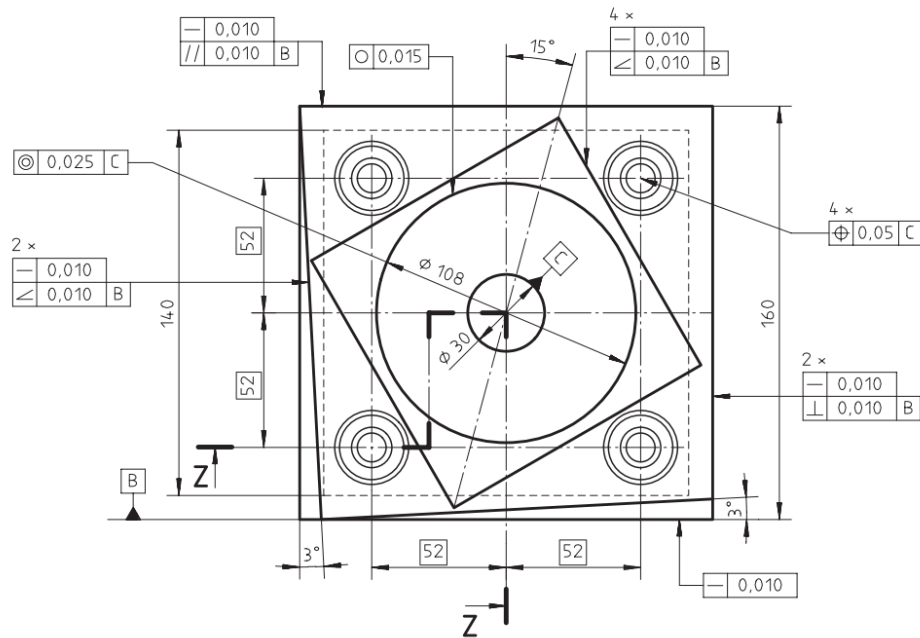


Figura 8 - Peça teste ISO 10791-7.
Fonte: ISO 10791-7 (2014)

Já na norma ISO 230-1 (2012), a qual é destinada para medição dos erros geométricos para máquinas-ferramenta, relaciona os equipamentos que devem ser utilizados durante o processo de medição dos desvios e também os valores aceitáveis para aprovação da geometria de ajuste da máquina. Dentre os equipamentos relacionados para a medição e identificação desses erros estão o interferômetro laser e o *ballbar*.

Além das normas ISO 230 e ISO 10791, foi criado pela NAS (*National Aerospace Standard*), especificamente na NAS 979 (2013), o perfil cônico que o centro de usinagem de cinco eixo deve ser capaz de fazer, porém não há tolerâncias especificadas na norma para esse perfil, fazendo com que a mesma fique com melhor acabamento de rugosidade possível dentro de $0,9 \mu\text{m}$. A Figura 9 mostra o perfil cônico que a máquina deve usinar movimentando os cinco eixos da

máquina de modo simultâneo, e tem como finalidade identificar a exatidão geométrica da máquina.

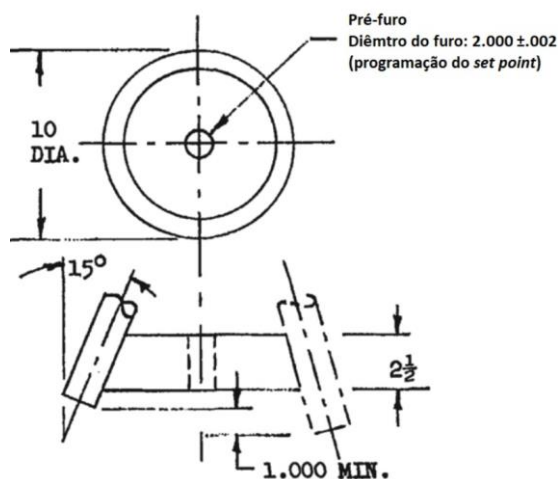


Figura 9 - Peça cone NAS 979.
Fonte: NAS 979 (2013)

É ilustrado na Figura 9 a relação do diâmetro da base do cone a ser usinado na máquina, o qual deve ter um ângulo de inclinação de 15° numa altura de 63,5mm e ser fabricado conforme algumas especificações indicadas no desenho.

Dentre as normas especificadas para verificar a exatidão geométrica da máquina-ferramenta, a de maior utilização e praticidade é a ISO 230-1, pois não é necessário teste prático de usinagem e posteriormente análises com medições, sendo aceitáveis apenas as medições com os equipamentos, interferômetro laser e *double ballbar*, recomendados pela norma.

Dessa forma, as máquinas-ferramenta são fabricadas de modo que atendam as normas específicas para os erros geométricos que as mesmas contêm devido sua complexidade no processo produtivo das peças que fazem parte do conjunto e também da montagem do equipamento.

A identificação e medição dos erros presentes nas máquinas-ferramenta podem auxiliar no desenvolvimento e execução para compensação desses erros, a qual resulta diretamente na exatidão da máquina (ZHU *et al.*, 2012). A exatidão da

máquina-ferramenta influência de maneira direta na peça que é produzida no equipamento, podendo a mesma ter seu processo que atende os requisitos de engenharia ou normas regulamentadoras, ou então perfil com deficiência em alguns aspectos devido aos erros geométricos da máquina.

2.4 EFEITOS DOS ERROS GEOMÉTRICOS NAS PEÇAS

Os erros geométricos existentes nas máquinas-ferramenta verticais de cinco eixos afetam os perfis das peças que são usinadas na máquina, ocasionando diversos efeitos geométricos e consequentemente dimensionais na peça produzida (IBARAKI *et al.*, 2010).

Como exemplo de erro geométrico em peça usinada há o erro de deslocamento de coordenada, ou seja, a coordenada desejada é diferente da coordenada real, resultando no perfil com face angular diferente do ângulo desejado (HUANG *et al.*, 2016). A Figura 10, ilustra esse tipo de erro, sendo as indicações P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 e P_6 as coordenadas reais realizadas e o P_2' a coordenada desejada. O erro entre P_2 e P_2' é caracterizado por ε_x e ε_y .

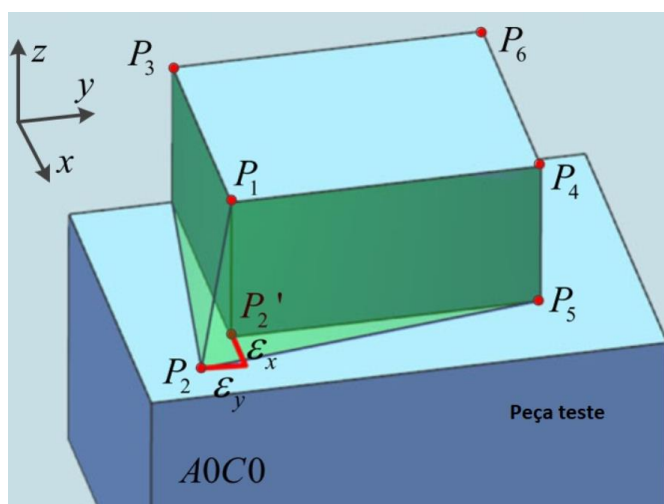


Figura 10 - Peça com erro geométrico – coordenada.
Fonte: HUANG *et al.* (2016)

Nota-se na Figura 10 que o perfil desejado para usinagem é um bloco retangular com ângulos retos entre si, e tendo como vértices ideais P_1 , P_2' , P_3 , P_4 , P_5 e P_6 ,

porém com o erro de deslocamento de coordenada, há a ocorrência de perfil do bloco com aresta angular entre os pontos P_1 , P_2 , e também alteração nas faces correlacionadas com os mesmos.

Quando há ocorrência de erros geométricos em eixos rotativos, pode haver alteração da posição da ferramenta em relação ao centro da mesa no sentido linear, ou então alteração de inclinação da mesa de trabalho no sentido angular, que são ilustrados, respectivamente, pelas Figura 11 e Figura 12 (IBARAKI *et al.*, 2010).

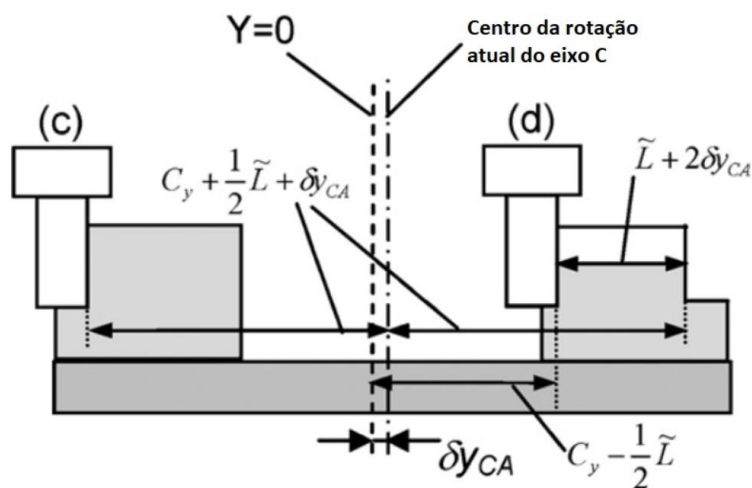


Figura 11 - Peça com geométrico – eixo rotativo, sentido linear.
Fonte: IBARAKI *et al.* (2010)

Na Figura 11, o erro é representado por δy_{CA} , o qual é responsável pelo deslocamento do eixo Y em relação a sua origem 0 . Esse erro ocasiona a diferença no comprimento do diâmetro usinado, como representa a peça usinada pela ferramenta indicada por (d).

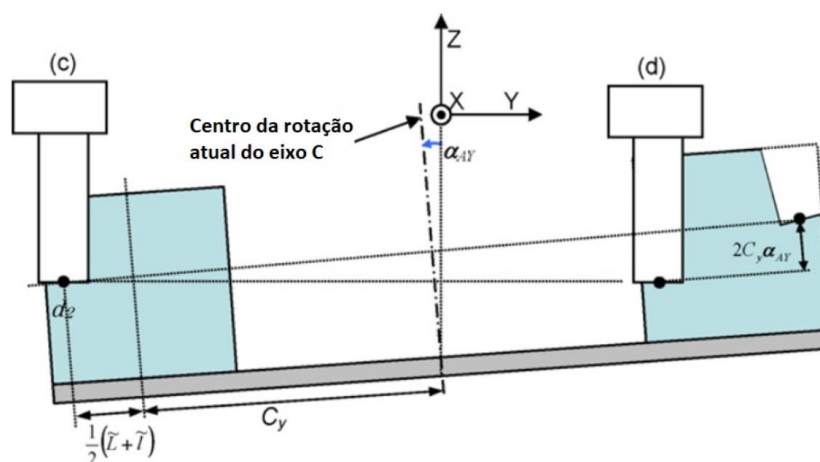


Figura 12 - Peça com geométrico – eixo rotativo, sentido angular.
 Fonte: IBARAKI *et al.* (2010)

A Figura 12 mostra o erro geométrico do eixo da mesa de trabalho no sentido angular, o qual é representado por α_{AY} . Como peça resultante desse tipo de erro, ocorre a inclinação das faces usinadas, formando o esquadro (90°) com o eixo do erro e não com o eixo ideal do plano de trabalho. Essa representação se dá na peça que está sendo usinada pela ferramenta (d).

Os erros geométricos dos eixos rotativos têm mais influência na máquina-ferramenta quando comparados com os erros dos eixos lineares, pois em conjunto com a movimentação dos eixos lineares há aumento de representatividade desses erros (HUANG *et al.*, 2016). Com isso, há o aumento de pesquisas voltadas para os erros geométricos dos eixos rotativos das máquinas-ferramenta cinco eixos, como o método de medição contínua dos 12 erros dependentes de posição dos eixos rotativos (GUO *et al.* 2018), método que descreve a posição e orientação instantânea dos eixos giratórios (LIU *et al.*, 2019), e estudo que por meio da usinagem de uma peça teste, identifica os erros geométricos dos eixos rotativos (IBARAKI; YOSHIDA; ASANO, 2019).

2.5 METODOLOGIA DE COMPENSAÇÃO DE ERRO GEOMÉTRICO

Os erros geométricos podem ser compensados por meio de sistemas de compensação incorporados à máquina-ferramenta ou no programa de usinagem, que proporcionam à máquina-ferramenta maior exatidão, a qual tem se tornado essencial para a fabricação de componentes (peças usinadas) e conseqüentemente aumentando a qualidade produtiva. A exatidão do equipamento é influenciada pelos erros geométricos, sendo os dos eixos lineares mais fáceis de compensar quando comparados com os dos eixos rotativos (KHAN; CHEN, 2011), pois há necessidade de alto controle do servomotor dos eixos para realizar a mecânica desejada (LEI; PAUNG; YU, 2009). Essa influência dos erros geométricos na exatidão da máquina ocasiona deformação na peça, como foi apresentado no tópico 2.4.

Os estudos voltados para compensação dos erros geométricos iniciaram no começo dos anos 70, e teve rápida aceitação devido ao custo efetivo e o resultado apresentado para o aumento da exatidão da máquina (KHAN; CHEN, 2011). Na maioria dos casos, o investimento financeiro para o sistema de compensação via *software* e *hardware* é baixo quando comparado a melhoria de exatidão nas peças que fazem parte do conjunto estrutural da máquina, e gera resultados satisfatórios de melhoria de sistemas com compensação desses erros geométricos (KHAN; CHEN, 2011).

Os Quadro 5 a Quadro 7 apresentam, de modo resumido, a cronologia dos estudos, bem como seus autores e principalmente o avanço referente aos erros geométricos, incluindo medição dos mesmos presentes em máquina-ferramenta, e também a compensação dos erros.

Quadro 5 - Estudos de erros geométricos – Período 1971 a 1995.
 Fonte: Adaptado de KHAN; CHEN (2011).

1- Metodologias de medição de erros e compensação alterando programa de usinagem (KOLISKOR, 1971), e compensação baseada no CMM (BUSCH; KUNZMANN; WILDELE, 1985)
2- Compensações: dos erros independentes devido dilatação do cabeçote (OKUSHIMA, K., KAKINO, Y., HIGASHIMOTO, 1975), de erros adicionando deformação térmica (ZHANG <i>et al.</i> , 1985), correlacionando com temperatura ambiente (TEEUWSEN <i>et al.</i> , 1989), e em tempo real com erro térmico (centro de torneamento) (LO C-H, YUAN JX, 1995)
3- Primeiro <i>software</i> de compensação de erros (DONMEZ <i>et al.</i> , 1986a) e (DONMEZ <i>et al.</i> , 1986b), e identificação do erro e obtenção de parâmetro para compensação (BELFORTE <i>et al.</i> , 1987)
4- Modelo cinemático envolvendo 18 erros (KURTOGLU; SOHLENIUS, 1990), e medição do erro volumétrico correlacionado com parâmetro de correção do erro (MOU, 1993)
5- Melhora de tempo de resposta para exatidão da máquina (CHEN <i>et al.</i> , 1993)
6- Modelos de erros, medição e esquemas de compensação para máquinas de três eixos (KIRIDENA, 1994b), (KIRIDENA, 1994a), (KIRIDENA, 1994c)
7- Modelo de controle de erros (geométrico e térmico) por meio de rede neural (CHEN, 1995)

No Quadro 5 foram apresentados, de forma sucinta e baseada em KHAN; CHEN (2011), a cronologia dos estudos relacionados a compensação de erros geométricos em máquina-ferramenta, abordando a metodologia adotada pelos autores. O início é marcado com metodologia baseada em identificar os erros geométricos em peça usinada e posteriormente fazer a compensação no programa de usinagem, baseando-se nos erros encontrados anteriormente (KOLISKOR, 1971). Também foram mostrados estudos como o de compensação de erro volumétrico, de modo que a mesma ocorra em tempo real (MOU J, 1993).

Também foi apresentado no Quadro 5 o estudo que houve o incremento de *software* com modelo matemático de compensação em máquinas de três eixos, e até mesmo o desenvolvimento de *software* específico para esse tipo de aplicação (DONMEZ *et al.*, 1986a) e (DONMEZ *et al.*, 1986b).

Quadro 6 - Estudos de erros geométricos – Período 1996 a 2015.
Fonte: Adaptado de KHAN; CHEN (2011).

1- Compensação em tempo real com modelo matemático para centro de torneamento (NI, 1997)
2- Compensação: de 39 erros em máquinas (BOHEZ, 2002b), de erros considerando erro de orientação da ferramenta (HSU; WANG, 2007), e baseada na geometria da máquina (TSUTSUMI <i>et al.</i> , 2013)
3- Desenvolvimento de <i>software</i> de compensação (WANG; LIU; KANG, 2002), e de pós processador gera código de compensação (KHAN; WUYI, 2010)
4- Compensação simultânea de erro geométrico e de força de corte em máquina três eixos (RAKSIRI; PARNICHKUN, 2004)
5- Análise dos erros com <i>ballbar</i> (YANG <i>et al.</i> , 2004), e modelamento, identificação e compensação do erro (ZHU <i>et al.</i> , 2012)
6- Associação dos erros dos eixos rotativos com os erros dos eixos lineares (BI <i>et al.</i> , 2015)

Já no Quadro 6, BOHEZ (2002b) apresenta sistema que compensa erros independentes de componentes em máquina-ferramenta de cinco eixos. A utilização de equipamento de medição de erro, como o *double ballbar*, já pode ser usada para metodologia de compensação de erros (YANG *et al.*, 2004). Um novo pós-processador foi desenvolvido para compensar erros geométricos em máquina de cinco eixos (KHAN; WUYI, 2010). Os estudos mais recentes de erros geométricos em máquina-ferramenta têm como objeto de estudo máquinas do tipo de cinco eixos, sendo ainda que pode ter o foco voltado para erros dos eixos rotativos, como apresenta BI *et al.* (2015).

Quadro 7 - Estudos de erros geométricos – Período 2016 a 2019.
Fonte: Elaborado pela autora.

1- Criação de expressões (DING <i>et al.</i> , 2016b) e operações para compensação dos erros (YANG <i>et al.</i> , 2017)
2- Identificação dos erros em máquinas cinco eixos (YANG; DING, 2016), com cabeçote rotativo (GUO <i>et al.</i> , 2017), e individuais dos eixos rotativos (mesa de trabalho) (LEE; YANG, 2016) e de erros dependentes em único <i>set up</i> (GUO <i>et al.</i> , 2018)
3- Identificação dos erros por meio de peça em processo de torneamento (IBARAKI; YOSHIDA; ASANO, 2019)
4- Compensação de erro relacionando trajetória da ferramenta com o local de corte (FU <i>et al.</i> , 2018)

No Quadro 7, mostra que há continuidade em estudo de desenvolvimento de novos métodos de medição dos erros como mostrado pelos autores DING *et al.* (2016b), YANG; DING (2016), GUO *et al.* (2017) e GUO *et al.* (2018).

Para LEE; YANG (2016) os erros geométricos dos eixos rotativos de uma máquina-ferramenta podem ser identificados separadamente. Isso é possível devido a coleta de dados com equipamentos apropriados, que geram resultados de erros, podendo separá-los por meio de equações matemáticas. Com isso, é possível obter a compensação dos erros geométricos dos eixos rotativos da máquina, inseridas manualmente no CNC, e deixar a mesma mais exata para a fabricação das peças.

Para o estudo aqui desenvolvido, serão estudados os erros geométricos dos eixos rotativos do centro de usinagem vertical de cinco eixos, sendo os experimentos baseados na metodologia de LEE; YANG (2016).

Esses estudos, mostram além de métodos e procedimentos para identificar os erros geométricos, os métodos de compensação dos mesmos. A validação dos modelos de compensação é apresentada somente por simulação, e até mesmo uma análise entre simulação e experimentos práticos de usinagem, apresentando em ambos os valores de melhoria na exatidão da máquina-ferramenta.

2.6 COMPENSAÇÃO DE ERROS GEOMÉTRICOS

Os modelos de compensação dos erros geométricos podem ser implementados na máquina-ferramenta de modo que aumente a exatidão da máquina e para isso o procedimento é realizado em três etapas conforme Figura 13.



Figura 13 - Etapas para compensação de erros geométricos.
Fonte: HSU; WANG (2007)

A primeira etapa apresentada na Figura 13 é medição dos erros, que consiste em coletar os dados (erros geométricos) reais que a máquina apresenta, podendo ser feita com equipamentos como *double ballbar*, medição por probe (HSU; WANG, 2007), ou basicamente pelos equipamentos e peças teste referenciados na norma ISO 230 e NAS 979. Para essas coletas de dados são considerados as condições também estabelecidas na norma ISO 230-1, a qual necessita de ambiente com temperatura controlada, estabilização térmica da máquina, e erros admissíveis para o sistema máquina inicial.

Desse modo, há necessidade de estabilização térmica da máquina e realização de movimentos redundantes, afim de considerar que os efeitos dos erros dinâmicos, dos erros térmicos, dos erros de controle de movimento, dos erros de deformação devido a força induzida no sistema e dos erros de posição e movimentação de cada eixo, são de baixo impacto nos erros geométricos (YANG *et al.*, 2017).

Durante a medição de erro geométrico, que pode ser feita com *double ballbar* em máquina-ferramenta de cinco eixos do modelo de estudo desse trabalho, tem-se a trajetória ideal e a trajetória real de medição, sendo que o erro é estimado a partir da comparação de ambas as trajetórias (CHEN *et al.*, 2016), como pode ser identificado na Figura 14.

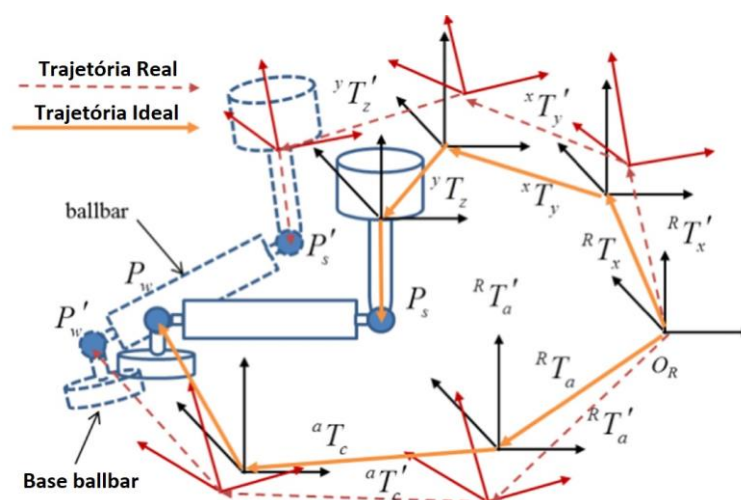


Figura 14 - Medição cinemática durante processo de *double ballbar*: ideal e real.
Fonte: CHEN *et al.* (2016).

A Figura 14 mostra de modo esquemático a medição entre os eixos linear Z e rotativo C, por meio do *double ballbar*, sendo possível visualizar os erros geométricos presentes no sistema, que são a diferença entre as linhas especificadas como trajeto ideal (contínua) e trajeto real (tracejada). Essa mesma diferença pode ser vista quando há a usinagem de peças, resultando na distorção da peça quando comparada com a peça ideal como ilustrado na Figura 10.

A utilização do *double ballbar* para a identificação dos erros geométricos é muito utilizada nestes estudos, principalmente nos eixos rotativos, pois nas máquinas-ferramenta de cinco eixos uma das maiores dificuldades é estimar os erros desses eixos, uma vez que a cinemática desses eixos é mais complexa (HSU; WANG, 2007).

A segunda etapa para correção dos erros geométricos, de acordo com a Figura 13, é o desenvolvimento do modelo de correção desses erros. Nesta etapa há a utilização de matriz de transformação homogênea (HTM), podendo ter casos que optam pelo uso de equação com base nos dados cinemáticos da máquina (HSU; WANG, 2007), e expressões analíticas (YANG *et al.*, 2017). A utilização de cinemática inversa é aplicada no desenvolvimento do modelo de erros (YANG *et al.*, 2017). Todos métodos utilizam como base os valores de erros coletados na primeira etapa do processo.

No caso de estudo de modelo de compensação de erro que utiliza matriz de transformação homogênea, a mesma é responsável por relacionar o vetor em coordenadas da peça, sendo eles da localização ideal e também o da posição real, para ser possível identificar o real posicionamento do eixo (HSU; WANG, 2007).

Na utilização de cinemática inversa nos modelos de compensação de erros geométricos, deseja-se encontrar o deslocamento ideal que a máquina necessita realizar para atingir o ponto específico programado no processo de usinagem da

peça, em que a posição da ferramenta é determinada pelos eixos lineares e rotativos (HSU; WANG, 2007).

Já os modelos de compensação de erros geométricos com expressões analíticas, têm suas incógnitas de erros identificadas durante o processo de identificação e medição dos respectivos erros geométricos e calculados por meio de expressões algébricas, que têm como exemplos as equações (1) e (2), as quais são utilizadas para identificar erros em eixos lineares, respectivamente de Z e Y, em centro de usinagem horizontal de cinco eixos (YANG *et al.*, 2017).

$$Z = z - \delta_{Az} - L - \alpha_{CY}y + \beta_{CX}x + (\alpha_{CY}y - \beta_{CX}x) \cos(C) + (\alpha_{CY}x - \beta_{CX}y) \sin(C) - (L\alpha_{ZY} - \delta_{Ay}) \sin(A) + (L + \delta_{Az}) \cos(A) \quad (1)$$

$$Y = \delta_{Cy} - \delta_{Ay} + L\alpha_{ZY} - \alpha_{CY}z - (\delta_{Az} + L) \sin(A) + (\delta_{Ay} - L\alpha_{ZY}) \cos(A) + (y - \delta_{Cx} + \beta_{CX}z) \cos(C) + (x - \delta_{Cy} + \alpha_{CY}z) \sin(C) + Z\alpha_{ZY} \quad (2)$$

As equações (1) e (2) estão associadas com o ângulo de rotação do eixo rotativo (A) e (C), e os valores de erros δ , α e β e um deslocamento representado por L

Com o modelo de erro desenvolvido, é necessário a implementação do mesmo na máquina para que seja possível a compensação dos erros geométricos. Há estudos que aplicam o modelo no pós-processador do CAM, possibilitando a compensação independentemente do controlador da máquina (HSU; WANG, 2007), correção e modificação dos códigos do controle numérico por meio de expressões algébricas (YANG *et al.*, 2017) sendo a compensação realizada diretamente para informar o controlador da máquina (KHAN; CHEN, 2011), inserindo os dados diretamente no CNC da máquina, não necessitando adicionar um novo pós-processador (YANG; MAYER; ALTINTAS, 2015).

A ideia básica de compensação dos erros geométricos é apresentada na Figura 15, e além disso, novo esquema genérico, a qual a compensação é realizada pelo código do comando, é ilustrado na Figura 16.

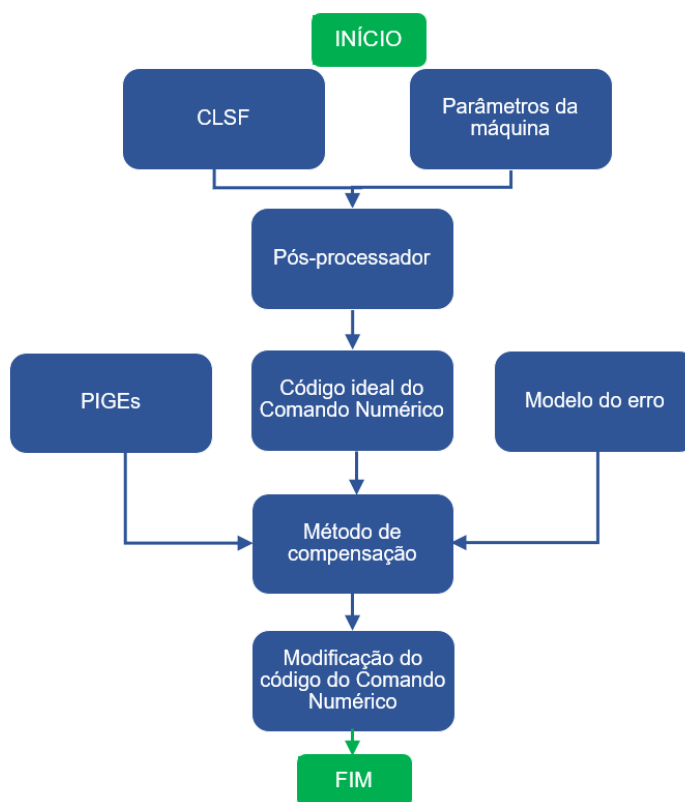


Figura 15 - Compensação dos erros geométricos: método tradicional básico.
Fonte: YANG *et al.* (2017)

A Figura 15 mostra o método tradicional de compensação de erro geométrico, sendo que é necessário ter os dados de entrada programa de usinagem (CLSF - *Cutter Location Source File*) e os parâmetros da máquina, que no pós-processador realiza-se o tratamento dos dados, o qual identifica o código ideal do comando para trajetória sem compensação. O código ideal, junto com os erros independentes de posição e o modelo de correção, quando em conjunto com o método de compensação, resulta na modificação do código do comando para realizar determinado percurso de ferramenta de modo compensado.

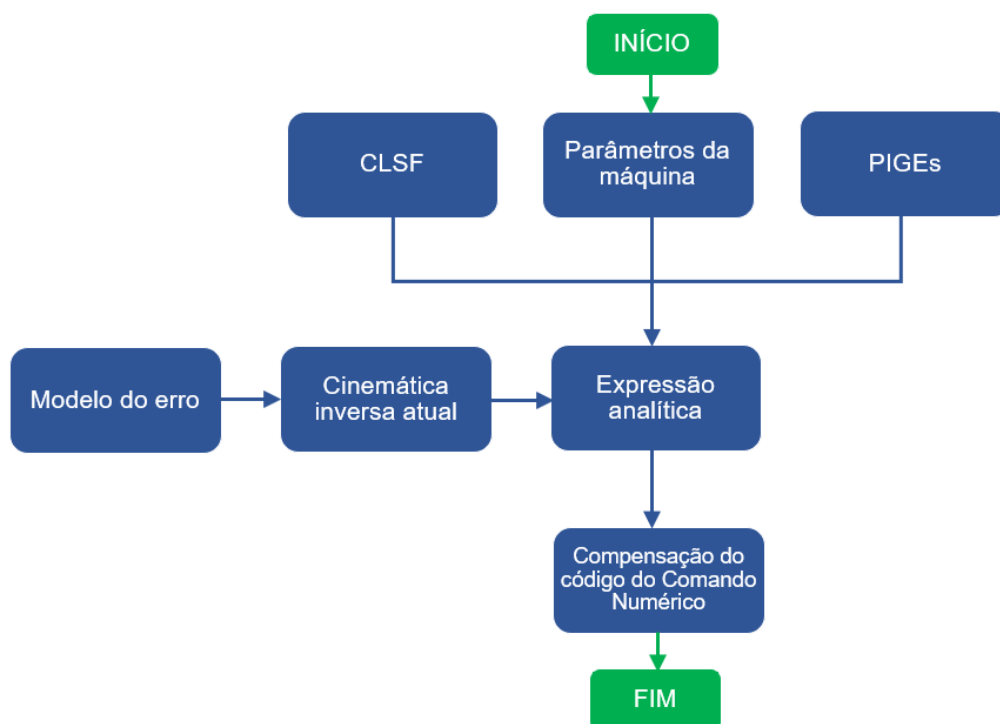


Figura 16 - Compensação dos erros geométricos: novo método.
Fonte: YANG *et al.* (2017).

Já na Figura 16, é apresentado o modelo de compensação dos erros geométricos quando há utilização de expressões analíticas, tendo como requisitos o conjunto compilado de dados do CLSF, do parâmetro da máquina e dos erros independentes de posição, junto com o modelo de erro e o modelo cinemático da máquina. Esses dados são adicionados em expressões analíticas, que compensam os erros no código de comando.

Para ser possível seguir as etapas apresentadas na Figura 13 e também a ideia básica de compensação dos erros, como mostra a Figura 15, os autores iniciam os estudos do modelo de compensação coletando os erros geométricos, tratando os mesmos e posteriormente resultando em modelos simulados ou práticos validados.

Os sistemas de compensação dos erros geométricos podem ser estudados de modo que avaliam (i) todos erros geométricos da máquina-ferramenta, (ii) somente os erros geométricos dependentes da posição, (iii) somente os erros geométricos independentes da posição, (iv) erros geométricos de determinados eixos, (v) erros geométricos específicos de determinados eixos. Esses sistemas

podem ter variação também devido ao tipo de equipamento de medição utilizado para aquisição dos erros, além dos métodos matemáticos utilizados para a compensação.

XIANG; ALTINTAS (2016) desenvolveram um método para medir, modelar e compensar os 41 erros geométricos presentes em máquina-ferramenta de cinco eixos. No estudo, foi utilizado interferômetro laser para identificar os erros dos eixos lineares e *double ballbar* para os erros dos dois eixos rotativos da máquina. Os erros encontrados nos eixos rotativos por meio do *double ballbar* são apresentados na Figura 17.

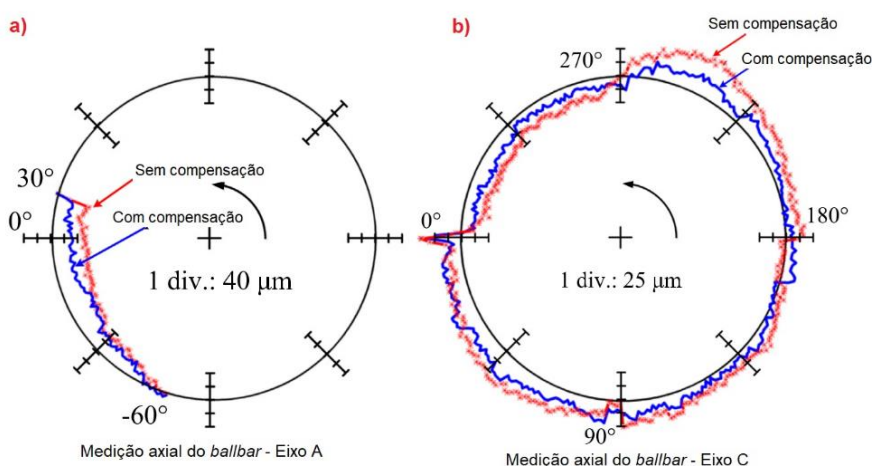


Figura 17 - Medição *double ballbar*. a) Eixo A; b) Eixo C.
Fonte: XIANG; ALTINTAS (2016)

Na Figura 17 é possível observar os erros dos eixos rotativos com e sem compensação de erros, os quais podem ser reduzidos de 80 μm para 40 μm no eixo A (-45° da Figura 17a), e de 50 μm para 25 μm (45° da Figura 17b).

A dificuldade de usar o método de XIANG; ALTINTAS (2016) é que foram estudados todos os erros geométricos dos cinco eixos da máquina-ferramenta, desde os lineares até os rotativos, sendo assim torna-se uma análise volumétrica dos erros, e o objetivo desse trabalho é o estudo apenas os eixos rotativos, os quais são o diferencial quando comparado a uma máquina de três eixos e não há identificação desses erros para a máquina específica do estudo.

Outro método foi proposto por LEE; YANG (2016), no qual é possível compensar os erros geométricos sem considerar os erros lineares, direcionando apenas para os eixos rotativos. Para esse estudo, foi desenvolvido dois modelos matemáticos, para calcular os erros geométricos dos eixos rotativos separadamente. Os autores consideraram a estabilidade cinemática da máquina, para modelar a posição das esferas do *double ballbar* usando os erros geométricos e a posição nominal do sistema de coordenada.

No estudo de LEE; YANG (2016), inicialmente foram medidos os erros dos eixos rotativos A e C diagnosticados pelo *double ballbar* em dez diferentes configurações de medição, como é ilustrada, respectivamente, na Figura 18 e Figura 19.

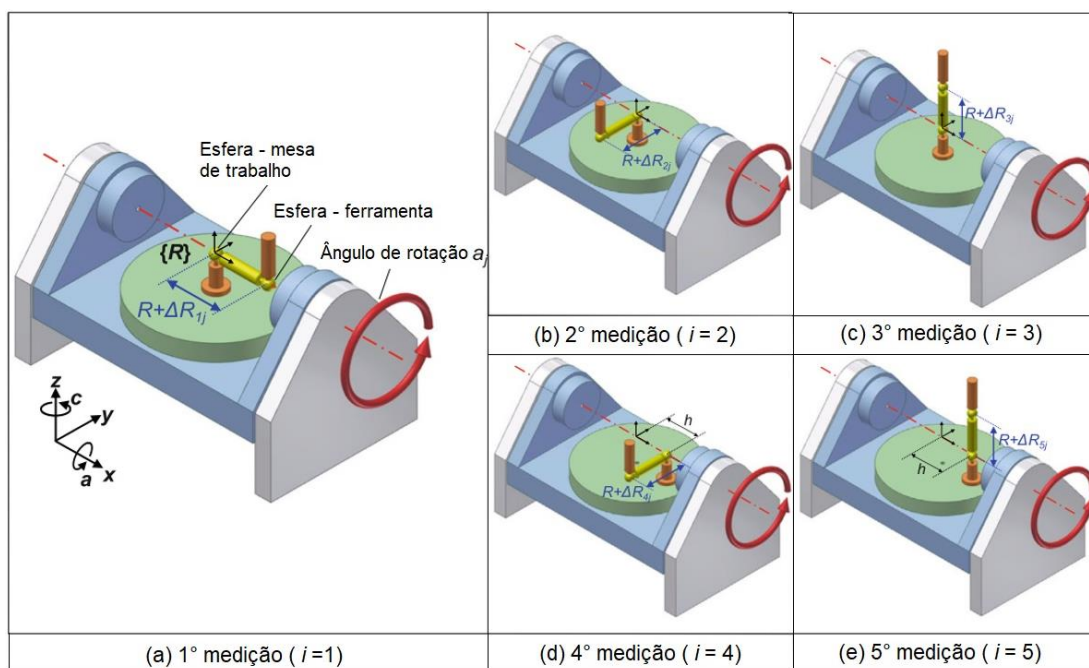


Figura 18 - Medição dos erros do eixo rotativo A com *double ballbar*.
Fonte: LEE; YANG (2016)

A Figura 18 ilustra a posição do *double ballbar* na mesa de trabalho e o sentido de movimento do eixo rotativo A durante a medição dos erros identificados pelo equipamento, sendo cada imagem (a), (b), (c), (d) e (e) uma posição do *double ballbar* para teste, totalizando cinco posições para o eixo analisado.

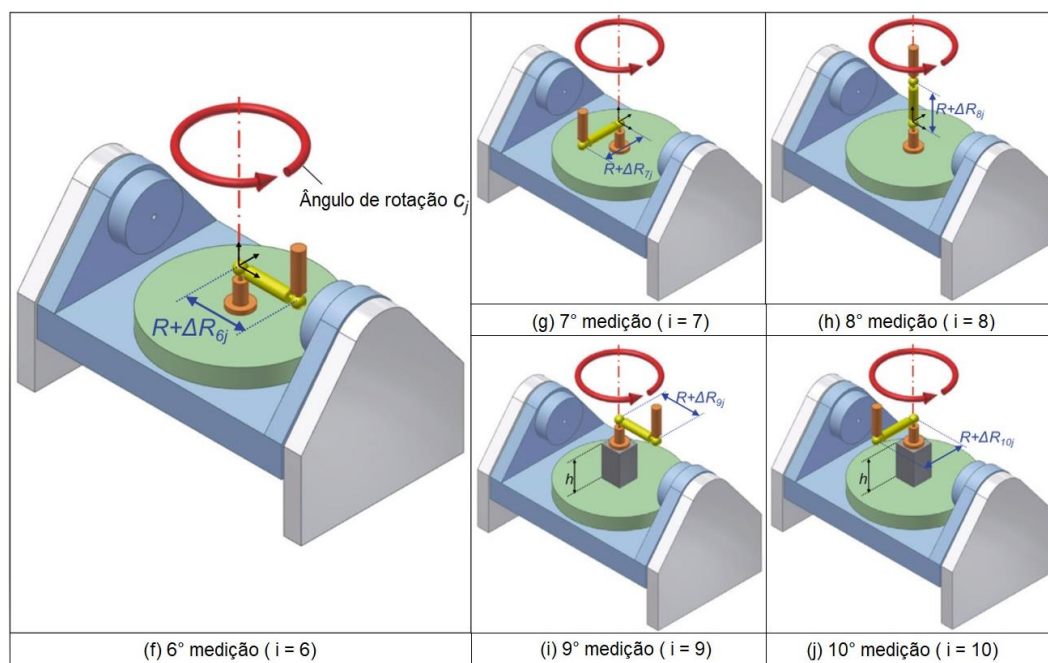


Figura 19 - Medição dos erros do eixo rotativo C com *double ballbar*.
Fonte: LEE; YANG (2016)

A Figura 19 mostra as cinco posições do *double ballbar* para os testes de coleta dos erros do eixo C, sendo cada uma delas ilustradas na imagem (f), (g), (h), (i) e (j). Foram realizadas, no total, dez posicionamentos do equipamento, cinco para cada eixo rotativo.

Foram modeladas as equações de (3) a (12) para calcular os erros geométricos separadamente dos eixos em estudo, os rotativos, sendo que os eixos lineares foram desconsiderados (LEE; YANG, 2016). As equações de (3) a (7) são utilizadas para identificar os erros geométricos do eixo rotativo A, já as equações (8) a (12) de são responsáveis pela identificação dos erros, também geométricos, do eixo B.

$$\Delta R_{1j} - \Delta R_{11} = -\delta_{xa} \quad (3)$$

$$\Delta R_{2j} - \Delta R_{21} = \delta_{ya} + o_{ya} - ca_j o_{ya} + sa_j o_{za} \quad (4)$$

$$\Delta R_{3j} - \Delta R_{31} = -\delta_{za} + o_{za} - sa_j o_{ya} + ca_j o_{za} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{4j} - \Delta R_{41} = & \delta_{ya} + h \varepsilon_{za} + o_{ya} + h s_{za} - ca_j(o_{ya} + h s_{za}) \\ & + sa_j(o_{za} + h s_{ya}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{5j} - \Delta R_{51} = & -\delta_{za} + h \varepsilon_{ya} + o_{za} + h s_{ya} - sa_j(o_{ya} + h s_{za}) \\ & + ca_j(o_{za} + h s_{ya}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta R_{6j} - \Delta R_{61} = -\delta_{xc} - O_{xc} + cc_j o_{xc} - SC_j(O_{ya} + O_{yc}) \quad (8)$$

$$\Delta R_{7j} - \Delta R_{71} = \delta_{yc} + O_{ya} + O_{yc} - SC_j O_{xc} - CC_j(O_{ya} + O_{yc}) \quad (9)$$

$$\Delta R_{8j} - \Delta R_{81} = -\delta_{zc} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{9j} - \Delta R_{91} = & -\delta_{xc} + h \varepsilon_{yc} - O_{xc} + h S_{ya} - h S_{yc} \\ & + CC_j(O_{xc} + h S_{ya} + h S_{yc}) - SC_j(O_{ya} + O_{yc} - h S_{xc}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{10j} - \Delta R_{101} = & \delta_{yc} + h \varepsilon_{xc} + O_{ya} - O_{yc} - h S_{xc} - SC_j(O_{xc} + h S_{ya} + h S_{yc}) \\ & - CC_j(O_{ya} + O_{yc} - h S_{xc}) \end{aligned} \quad (12)$$

Em que:

h offset entre medições [mm]

i sequência de medição ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$)

a_j ângulo nominal do eixo rotativo A ($j=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$) [graus]

c_j ângulo nominal do eixo rotativo C ($j=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$) [graus]

R comprimento nominal experimental do *double ballbar* [mm]

ΔR_{ij} diferença entre comprimento nominal do *double ballbar* R na medição i com a_j e c_j , respectivamente [μm]

$\{j\}$ sistema de coordenada de eixo j (j=X, Y, Z, A, C)

$\{R\}$ referência no sistema de coordenadas

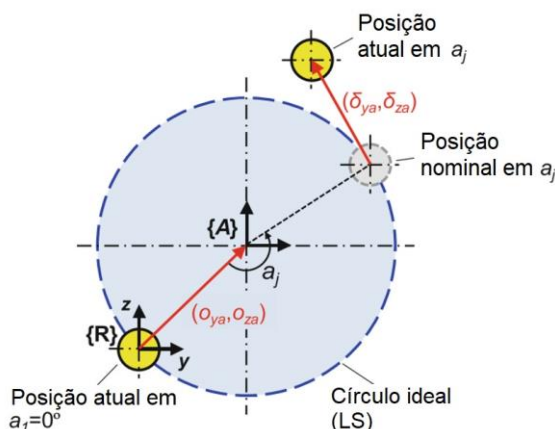


Figura 20 - Posição do *double ballbar* e erros dependente e independentes da posição nas medições 2 e 3.

Fonte: LEE; YANG (2016)

A Figura 20 ilustra a posição de medição do *double ballbar* nos casos 2 e 3 do estudo de LEE; YANG (2016), sendo que para a rotação do eixo A, a esfera do *ballbar* tem como origem a posição $\{R\}$, e para as medições 4 e 5 há o incremento de uma distância h na direção do eixo X da distância $\{R\}$ da origem do sistema de coordenada. Isso representa que a esfera do *double ballbar* está localizada nas direções de Y e Z com distância $\{R\}$.

O desvio apresentado pelo *double ballbar* é descrito por ΔR_i na posição inicial do ângulo de rotação do eixo e ΔR_{ij} na posição final do ângulo de rotação do eixo. As incógnitas o_{eixos} são substituídas pela posição inicial de coordenada nos eixos. Os erros de esquadro são representados nas equações pelas incógnitas s_{eixos} e os erros angulares por ε_{eixos} .

A compensação é feita de modo direto no CNC, sendo alterada a trajetória no programa de usinagem, no qual a posição nominal da esfera fixa no suporte da

mesa é modificada para o centro do círculo dos erros independentes de posição e cada posição da esfera fixa no eixo árvore é alterada conforme os erros dependentes de posição, sendo estes valores os mesmos identificados no teste de medição dos erros. Com esse tipo de compensação é possível controlar um eixo rotativo por medição e possui os erros lineares removidos dos dados adquiridos do *double ballbar* para ser possível tratar somente os erros geométricos (LEE; YANG, 2016).

A máquina do estudo de LEE; YANG (2016) possui erros geométricos encontrados com e sem compensação, por meio das medições realizadas com o *double ballbar* em cada posição, sendo apresentadas na Figura 21 e Figura 22.

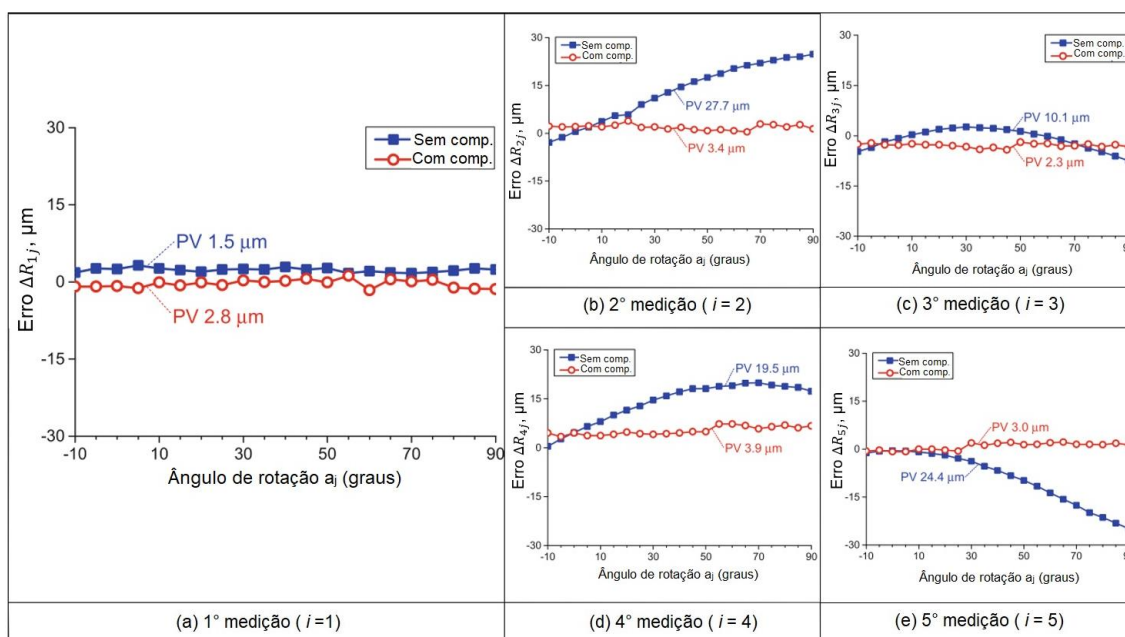


Figura 21 - Resultado medição do *ballbar* eixo A: com e sem compensação.
Fonte: LEE; YANG (2016)

A Figura 21 apresenta os valores obtidos durante os testes de medição com *double ballbar*, com e sem compensação, representados nos gráficos, respectivamente, por resultados azuis e vermelhas, sendo que cada gráfico ilustra os erros (ΔR_{ij}) gerados pelo equipamento nas posições de medições ilustradas na Figura 18.

Ainda pode ser observado na Figura 21, que quando há a implementação desse tipo de compensação, na maioria das medições realizadas há menor pico de erro (PV) quando comparado com a máquina sem ter a compensação implementada. A redução de pico de erro é mostrada na maioria dos casos (b), (c), (d) e (e) gerando em determinada medição (a) a redução de pico de erro de 27,7 μm para 3,4 μm , porém no caso de (a) a compensação faz efeito contrário ao desejado.

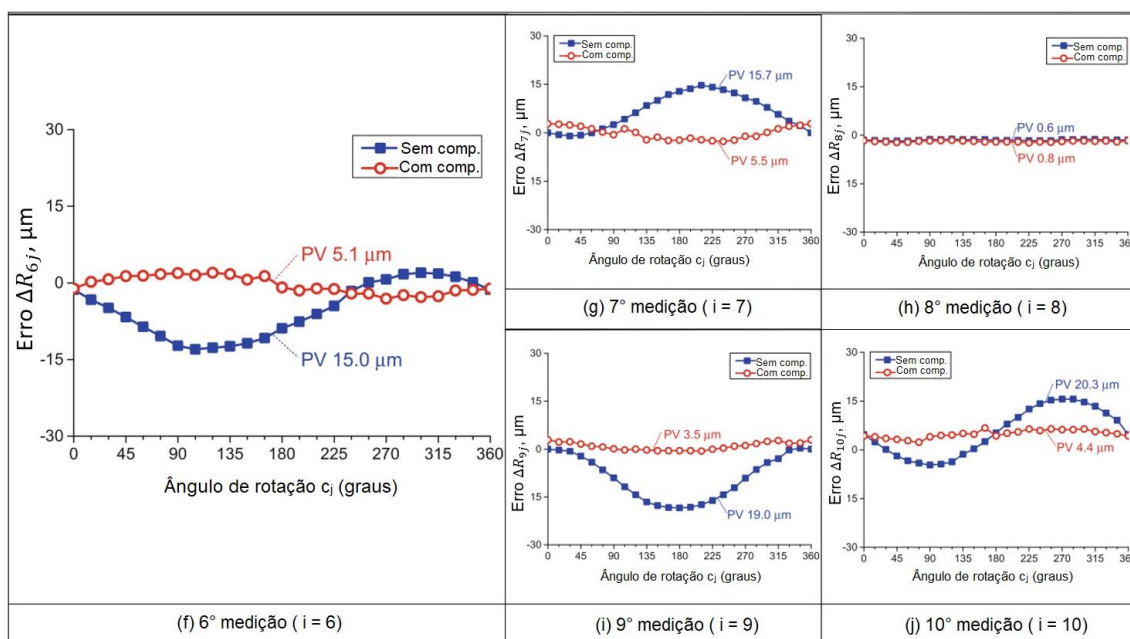


Figura 22 - Resultado medição do *ballbar* eixo C: com e sem compensação.

Fonte: LEE; YANG (2016)

Na Figura 22 são apresentados os resultados dos testes de medição com *double ballbar* no eixo C, com e sem compensação, representados nos gráficos, respectivamente, por resultados azuis e vermelhas, no qual cada um dos gráficos mostram os erros (ΔR_{ij}) gerados pelo equipamento de medição nas posições de medições ilustradas na Figura 19 em cada ângulo de rotação do eixo.

Ainda na Figura 22, LEE; YANG (2016) mostram que quando a máquina tem sistema de compensação desses, há a redução, na maioria dos casos, dos picos de erro (PV) quando a máquina possui o sistema de compensação ativado. Esse fato, de minimizar os erros, nos casos (f), (g), (i) e (j), gerando em determinada medição (j) a redução de pico de erro de 20,3 μm para 4,4 μm . No caso de (h),

a ação do sistema de compensação de erros na máquina não apresenta melhoria, sendo que o pico de erro aumenta $0,2 \mu\text{m}$.

A Figura 23 apresenta os picos de diferença dos erros (PV) do *double ballbar* encontrados durante o estudo de LEE; YANG (2016), com e sem compensação, de forma resumida.

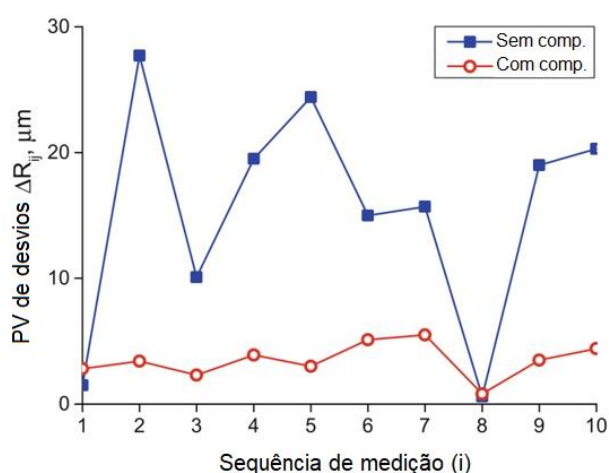


Figura 23 - Picos de erros medição do *double ballbar*. sem e com compensação.
Fonte: LEE; YANG (2016)

Os picos de erros entre as medições com e sem compensação, são representadas, respectivamente, pelas linhas vermelha e azul na Figura 23, sendo que o diferencial de erro de pico entre determinado ângulo de medição são ilustrados na Figura 21 e Figura 22.

Após as coletas e identificações dos erros com o *double ballbar*, os erros geométricos dos eixos rotativos foram identificados separadamente pelas equações de (3) a (12). Os erros foram devidos em dois tipos devido a posição: independente e dependente, que são apresentados, respectivamente, pelas Figura 24, Figura 25 e Figura 26.

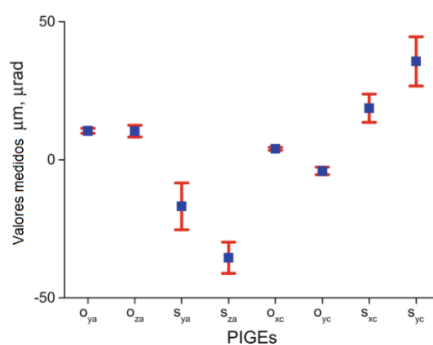


Figura 24 - Erros geométricos independentes da posição dos eixos rotativos.
Fonte: LEE; YANG (2016)

Na Figura 24 são apresentados os picos dos erros geométricos identificados pelas equações de (3) a (12) em cada posição angular de medição dos eixos rotativos A e C.

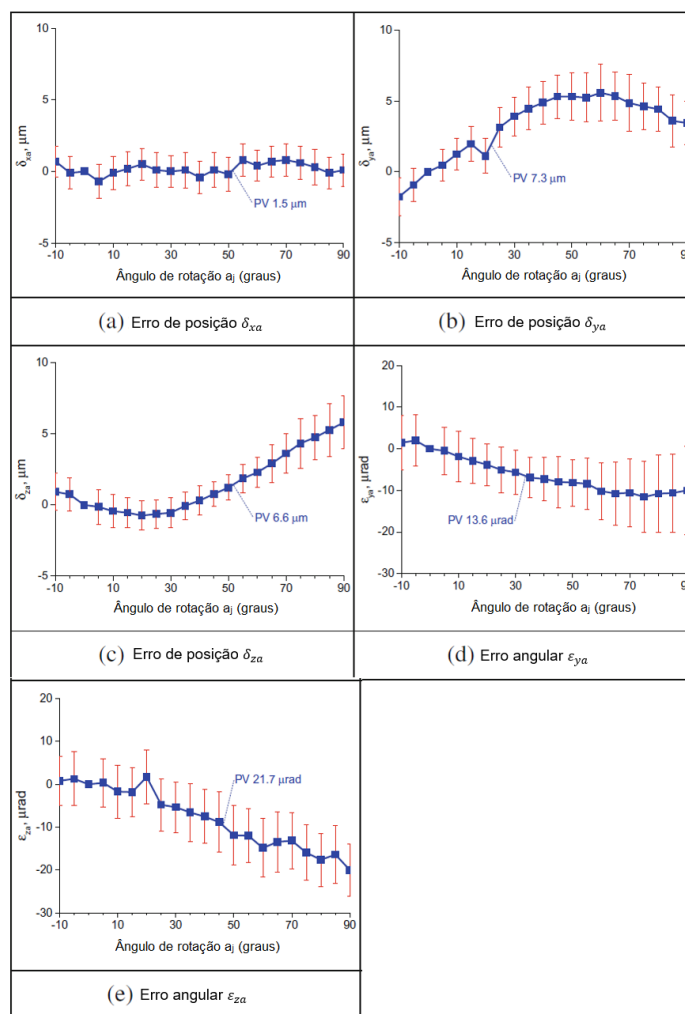


Figura 25 - Erros geométricos dependentes da posição do eixo rotativo A.
Fonte: LEE; YANG (2016)

A Figura 25 apresenta os picos de valores de erros geométrico do eixo A, os quais incluem erros de posição e angular do eixo, que foram calculados por meio das equações de (3) a (12).

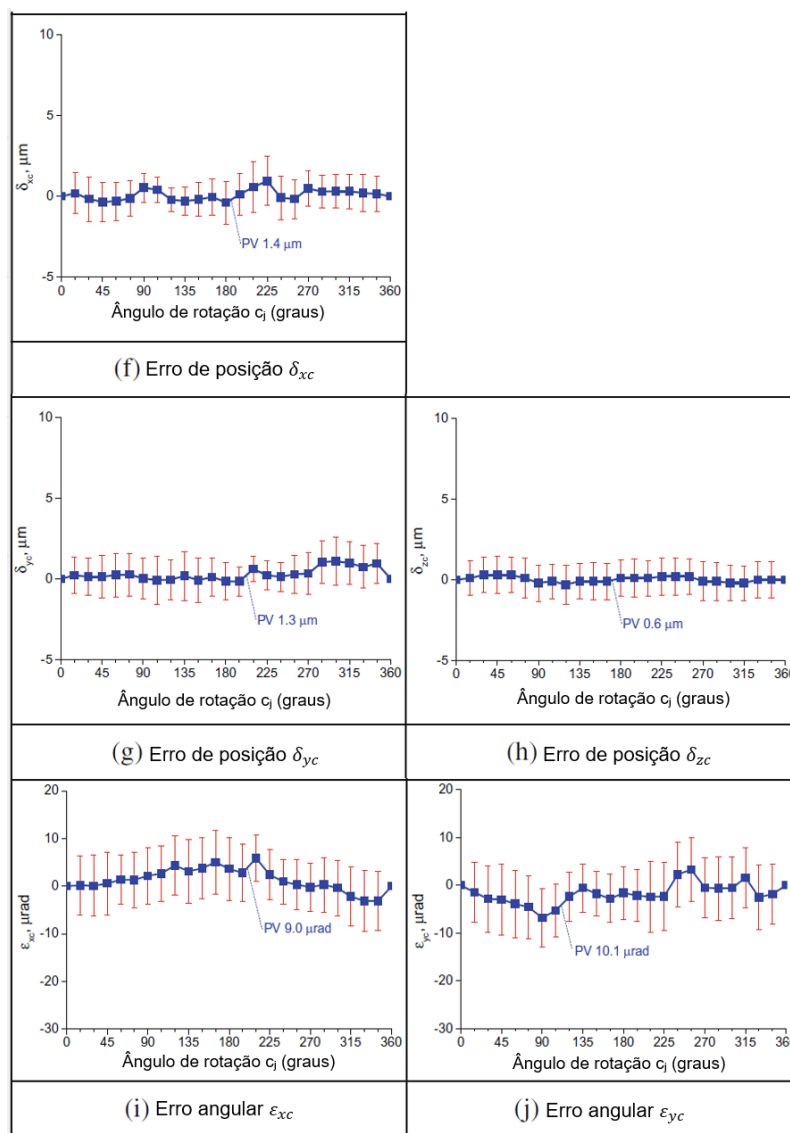


Figura 26 - Erros geométricos dependentes da posição do eixo rotativo C.
Fonte: LEE; YANG (2016)

LEE; YANG (2016) apresentam na Figura 26 os erros geométrico do eixo C da máquina de seu estudo, para ser possível essa identificação separada, foram utilizadas as equações de (3) a (12).

Além do método proposto por LEE; YANG (2016), BI *et al.* (2015) também apresentam como identificar e compensar os erros geométricos de eixos rotativos de máquina-ferramenta de cinco eixos, porém é necessário a utilização de recursos específicos, como o pós-processador, e uma máquina de estudo com um dos eixos rotativos presentes no cabeçote.

A identificação dos erros geométricos dos eixos rotativos da máquina-ferramenta de cinco eixos também pode ser realizada por meio de medição de peça usinada, utilizando como equipamento de medição um probe, o qual é acoplado no eixo árvore da máquina. A partir dessa medição, em determinados pontos da peça, há uma referência virtual que gera o perfil da peça fabricada, sendo assim possível identificar o erro do equipamento. O processo é repetido três vezes para verificar a repetibilidade do sistema medido (BI *et al.*, 2015).

Com isso, método de compensação proposto BI *et al.* (2015) altera o local de corte da ferramenta, ou seja o programa de usinagem, sendo que só é possível devido ao *software* para cálculo já incorporado no *hardware* de ajuste da máquina.

Os erros encontrados durante o estudo de BI *et al.* (2015), sendo com e sem compensação, são apresentados na Figura 27.

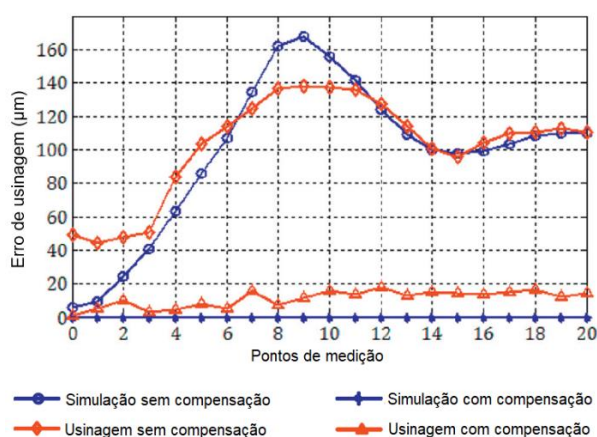


Figura 27 - Exatidão da máquina: sem e com compensação.
Fonte: BI *et al.* (2015)

Os resultados obtidos por BI *et al.* (2015), na Figura 27, mostram que o erro encontrado entre a usinagem com e sem compensação possui um erro de 120 μm , sendo que a máquina sem compensação tem o desvio de 138 μm e com compensação o erro é reduzido para 18 μm . O método apresentado pode ser visto como relevante para deixar a máquina mais precisa, porém para o mesmo ser desenvolvido são necessários recursos adicionais, como por exemplo pós-processador.

Como o objeto do presente estudo é um centro de usinagem vertical de cinco eixos, o método de LEE; YANG (2016) será utilizado como base para os testes e análises dos erros dos eixos rotativos.

3 MATERIAIS E MÉTODO

O presente estudo é caracterizado como uma pesquisa experimental, a qual é definida como uma relação de controle e manipulação de duas ou mais variáveis por parte do pesquisador, que é o responsável pelo acompanhamento e entendimento das variações estudadas (MIGUEL, 2007).

Considerando este método, este capítulo apresenta os materiais (equipamentos) que serão usados para o desenvolvimento dos experimentos e o método (processos) para planejamento, coleta de dados, análise e discussão dos resultados.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento dos experimentos serão descritos a seguir, apresentando as principais características técnicas de funcionalidade dos equipamentos.

1. Centro de Usinagem

Os experimentos serão realizados utilizando um centro de usinagem vertical cinco eixos, o modelo ROMI DCM 620-5X, o qual está equipado com CNC SIEMENS 840D sl, conforme mostrado na Figura 28. O Quadro 8 apresenta os dados técnicos característicos do equipamento utilizado.

Quadro 8 - Dados técnicos principais ROMI DCM 620-5x.
Fonte: Elaborado pela autora

Especificação técnica	
Eixo árvore	até 15.000 rpm
Curso eixo X	620 mm
Curso eixo Y	520 mm
Curso eixo Z	460 mm
Curso eixo B	-110° a +110°

Especificação técnica	
Curso eixo C	360 °
Avanço rápido eixo X	36 m/min
Avanço rápido eixo Y	
Avanço rápido eixo Z	
Rotação eixo B	12 rpm
Rotação eixo C	
Magazine ferramentas	até 30 ferramentas, cone BT-40
Potência motor principal	24 cv
Potência total instalada	50 kVA
Comando (CNC)	Siemens 840D sl



Figura 28 - Centro de usinagem.
 Fonte: INDÚSTRIAS ROMI S.A. (2017)

2. *Double ballbar*

Para a identificação dos erros geométricos do centro de usinagem, do estudo, será utilizado o *double ballbar* modelo QC20-W da Renishaw, como mostra a Figura 29 e especificações no Quadro 9.

Quadro 9 - Dados técnicos principais do *double ballbar* Renishaw QC20-W.
 Fonte: RENISHAW (2013)

Especificação técnica	
Curso	2 mm
Resolução	0,1 μm
Range de medição plano XY	[0° , 360°]
Range de medição plano YZ	[-20° , 200°]
Range de medição plano ZX	[-110° , 110°]

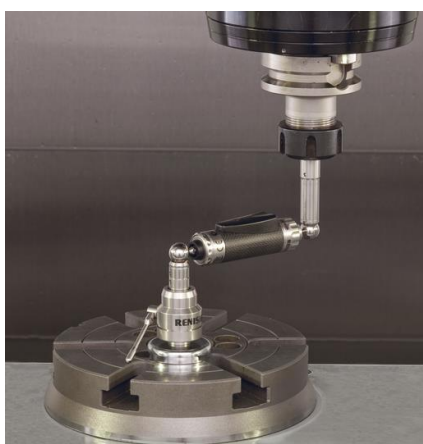


Figura 29 - *Double ballbar* Renishaw QC20-W.
 Fonte: RENISHAW (2018b), acesso em: 15 fev. 2018.

3. Interferômetro Laser

A minimização dos erros dos eixos lineares será realizada com o interferômetro laser modelo XL-80 da Renishaw. As características técnicas são apresentadas no Quadro 10 e o equipamento é ilustrado na Figura 30.

Quadro 10 - Dados técnicos principais do interferômetro laser Renishaw XL-80.
 Fonte: REINSHAW (2016)

Especificação técnica	
Exatidão de medição	$\pm 0,5$ ppm
Resolução linear	1 nm
Velocidade máxima durante medição	4 m/s



Figura 30 - Interferômetro laser Renishaw XL-80.
Fonte: RENISHAW (2018c), acesso em: 15 fev. 2018.

3.2 MÉTODO

Para identificar os erros geométricos no centro de usinagem vertical utilizado neste experimento, serão testes e uma simulação. A Figura 31 apresenta as fases planejadas.



Figura 31 - Fases para modelo dos erros geométricos dos eixos rotativos.
Fonte: Elaborado pela autora.

Para cada fase apresentada na Figura 31 há também as etapas experimentais planejadas, que são apresentadas nas Figura 32 e Figura 33.

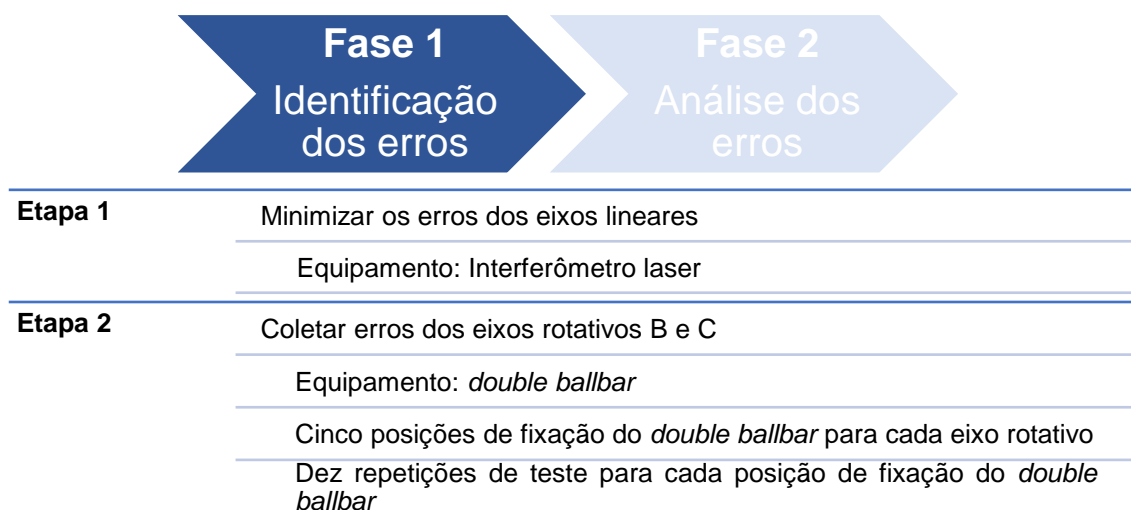


Figura 32 - Fase1: Identificação dos erros.
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 32 mostra as duas etapas da fase 1, sendo ela a identificação dos erros. Para isso, será necessário reduzir os erros dos eixos lineares (etapa 1), uma vez que os mesmos não fazem parte modelo do estudo. A etapa 2 é a identificação dos erros dos eixos rotativos B e C, sendo a posição do *double ballbar* na mesa as mesmas utilizadas por LEE; YANG (2016), totalizando dez (cinco para cada eixo), e em cada posição serão repetida as medições dez vezes.

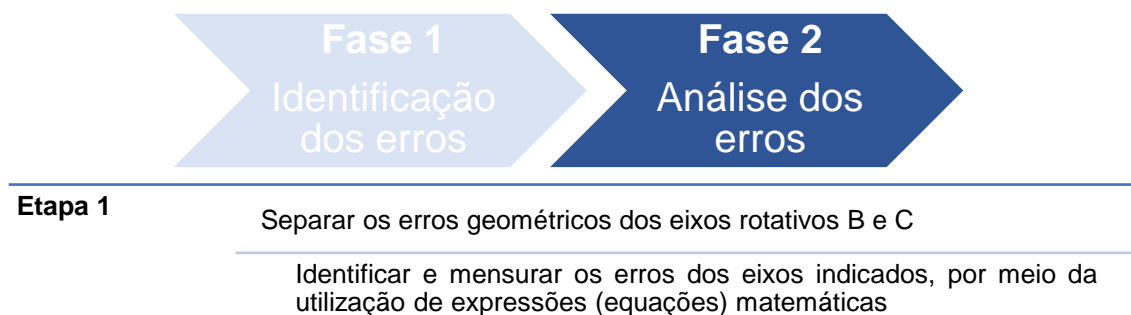


Figura 33 - Fase 2: Análise dos erros.
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Fase 2 do estudo aqui proposto, como mostra a Figura 33, serão identificados os erros geométricos existentes nos eixos rotativos, utilizando valores coletados na Fase 1 e as equações de (3) a (12), de LEE; YANG (2016).

Para os testes planejados não serão considerados os erros lineares e nem os erros térmicos.

Os experimentos serão desenvolvidos nas dependências do Laboratório da UNIMEP, campus Santa Bárbara d'Oeste, com o apoio de setores de Engenharia de Produtos e Laboratório das Indústrias Romi SA, fabricante do equipamento em estudo.

3.3 TRABALHO EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento deste trabalho, o qual analisa os erros geométricos dos eixos rotativos B e C de um centro de usinagem vertical de cinco eixos, o objeto de estudo é uma máquina-ferramenta de modelo que está descrito no tópico 3.1 e se encontra nas dependências da Universidade, bem como o *double ballbar* também especificado no mesmo tópico.

A Figura 34 apresenta as quatro fases realizadas na etapa do trabalho experimental, que serão detalhadas na sequência. Cada fase foi elaborada para cada teste de modo individual.



Figura 34 - Fases do trabalho experimental.
Fonte: Elaborado pela autora

A primeira fase para desenvolvimento do trabalho experimental foi a preparação dos testes, sendo necessários a elaboração dos programas CNC para movimentação dos eixos rotativos em cada um dos dez testes realizados e também a montagem dos materiais, principalmente do *double ballbar*, para a execução dos experimentos. Essa fase está ilustrada na Figura 35.

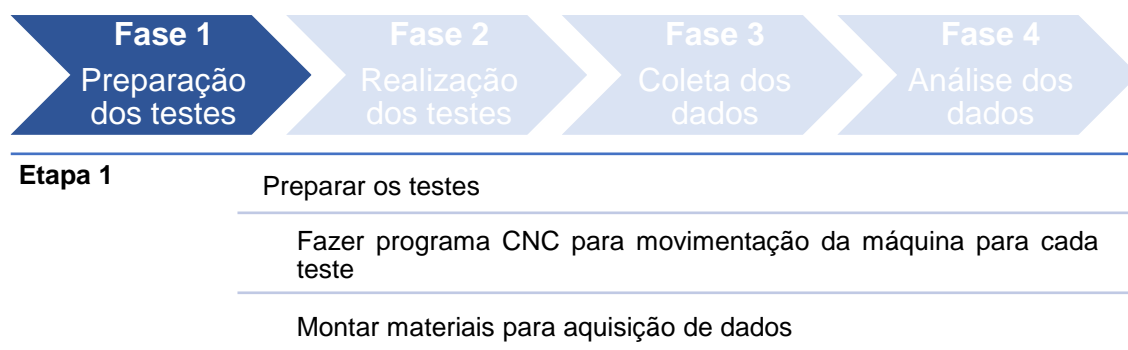


Figura 35 - Fase 1: Preparação dos testes.
Fonte: Elaborado pela autora

A etapa seguinte, a fase 2, ilustrada na Figura 36, foi a realização dos dez testes tendo como referência o método de LEE; YANG (2016), o qual foi adaptado para a máquina do método proposto.

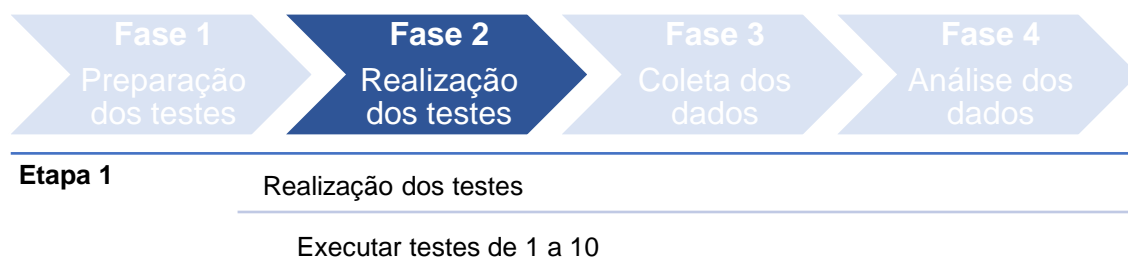
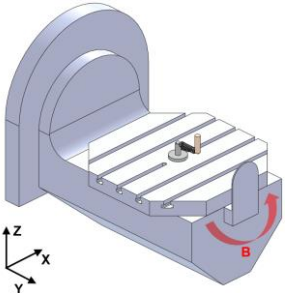
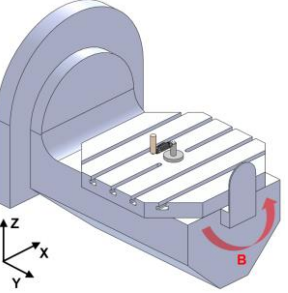
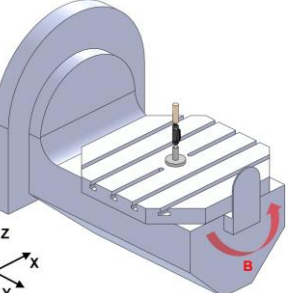
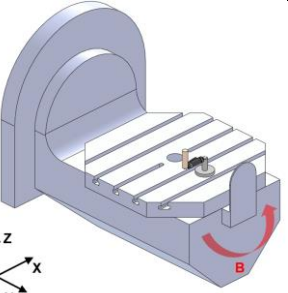
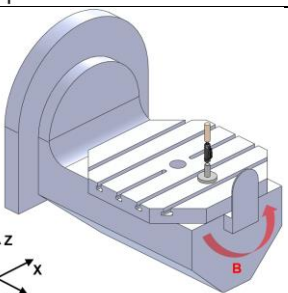
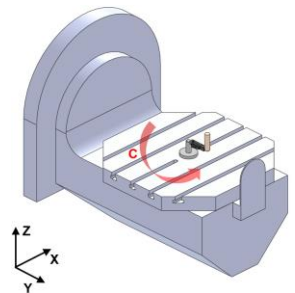
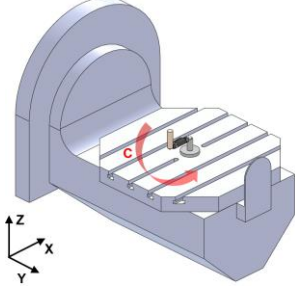
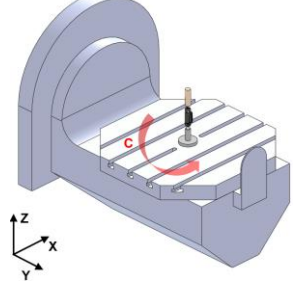
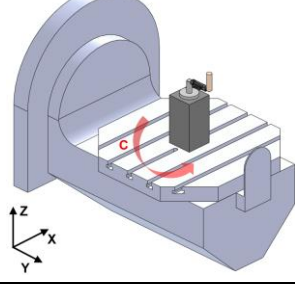
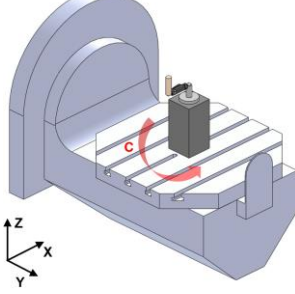


Figura 36 - Fase 2: Realização dos experimentos.
Fonte: Elaborado pela autora

A sequência dos experimentos realizados é apresentada no Quadro 11, totalizando dez tipos de testes, sendo os experimentos de 1 a 5 referentes ao eixo B, e os experimentos de 6 a 10 pertinentes ao eixo C. Cada ensaio foi realizado três vezes, afim de obter maior coleta de dados e auxílio na análise. A montagem do *double ballbar* na mesa também são indicadas, e a movimentação é feita apenas pelo eixo rotativo em estudo, assim não há movimento programado para o *double ballbar*, mantendo as duas esferas na posição de início dos testes em todo período de medição.

Quadro 11 - Sequência dos experimentos.
Fonte: Elaborado pela autora

Experimento	Eixo rotativo	Localização <i>double ballbar</i> na mesa de trabalho	Sentido sensor linear do <i>double ballbar</i>	Representação de movimentação	Objetivo
1	B	Centro	Y		<ul style="list-style-type: none"> - Mensurar diferença sensora do <i>double ballbar</i> $\Delta R1j$ - Identificar erro dependente de posição δyb, por meio de equação
2	B	Centro	X		<ul style="list-style-type: none"> - Mensurar diferença sensora do <i>double ballbar</i> $\Delta R2j$ - Identificar erro independente de posição Oxb, por meio de dados adquiridos pelo equipamento - Identificar erro dependente de posição $\delta x b$, por meio de equação
3	B	Centro	Z		<ul style="list-style-type: none"> - Mensurar diferença sensora do <i>double ballbar</i> $\Delta R3j$ - Identificar erro independente de posição Ozb, por meio de dados adquiridos pelo equipamento - Identificar erro dependente de posição $\delta z b$, por meio de equação
4	B	Deslocado do centro na direção do eixo Y	X		<ul style="list-style-type: none"> - Mensurar diferença sensora do <i>double ballbar</i> $\Delta R4j$ - Identificar erro independente de posição Sxb, por meio de dados adquiridos pelo equipamento - Identificar erro dependente de posição $\epsilon x b$, por meio de equação
5	B	Deslocado do centro na direção do eixo Y	Z		<ul style="list-style-type: none"> - Mensurar diferença sensora do <i>double ballbar</i> $\Delta R5j$ - Identificar erro independente de posição Szb, por meio de dados adquiridos pelo equipamento - Identificar erro dependente de posição $\epsilon z b$, por meio de equação

Experimento	Eixo rotativo	Localização <i>double ballbar</i> na mesa de trabalho	Sentido sensor linear do <i>double ballbar</i>	Representação de movimentação	Objetivo
6	C	Centro	Y		<ul style="list-style-type: none"> - Mensurar diferença sensora do <i>double ballbar</i> $\Delta R6f$ - Identificar erro independente de posição O_{yc}, por meio de dados adquiridos pelo equipamento - Identificar erro dependente de posição δ_{yc}, por meio de equação
7		Centro	X		<ul style="list-style-type: none"> - Mensurar diferença sensora do <i>double ballbar</i> $\Delta R7f$ - Identificar erro independente de posição O_{xc}, por meio de dados adquiridos pelo equipamento - Identificar erro dependente de posição δ_{xc}, por meio de equação
8	C	Centro	Z		<ul style="list-style-type: none"> - Mensurar diferença sensora do <i>double ballbar</i> $\Delta R8f$ - Identificar erro dependente de posição δ_{zc}, por meio de equação
9	C	Centro e sobre calço na direção do eixo Z	Y		<ul style="list-style-type: none"> - Mensurar diferença sensora do <i>double ballbar</i> $\Delta R9f$ - Identificar erro independente de posição S_{xc}, por meio de dados adquiridos pelo equipamento - Identificar erro dependente de posição e_{xc}, por meio de equação
10	C	Centro e sobre calço na direção do eixo Z	X		<ul style="list-style-type: none"> - Mensurar diferença sensora do <i>double ballbar</i> $\Delta R10f$ - Identificar erro independente de posição S_{yc}, por meio de dados adquiridos pelo equipamento - Identificar erro dependente de posição e_{yc}, por meio de equação

Como pode ser observado no Quadro 11 cada um dos experimentos está associado a um determinado eixo rotativo e a um eixo linear, sendo que alguns deles (ensaios 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, e 10) têm como objetivo a identificação direta de erros geométricos independentes da posição e todos, mensurar a distância sensora do *double ballbar*, que é necessária para identificar os erros geométricos dependentes de posição por meio de equações.

A posição das esferas do *double ballbar*, da ferramenta e da mesa de trabalho, ficaram dispostas como mostra a Figura 37. A mesma também ilustra a direção do comprimento e da diferença sensora do equipamento ($R + \Delta R_j$), além o deslocamento do mesmo, no sentido do eixo Y, para os experimentos 4 e 5, que é indicado por h e tem valor de 152,067 mm.

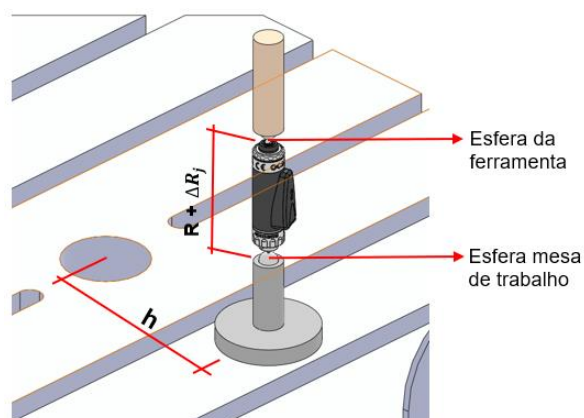


Figura 37 - Posição *double ballbar* na mesa.
Fonte: Elaborado pela autora

Já a Figura 38 representa a altura H do calço, no sentido do eixo Z, no qual o *double ballbar* é montado para os experimentos 9 e 10, e tem movimentação apenas do eixo C. O valor de deslocamento em Z para esses experimentos é de 189,2 mm.

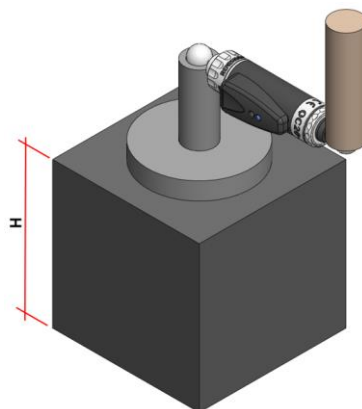



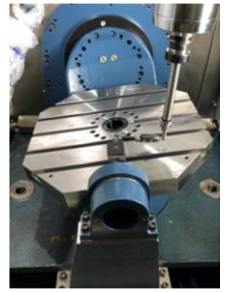

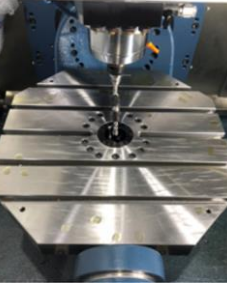




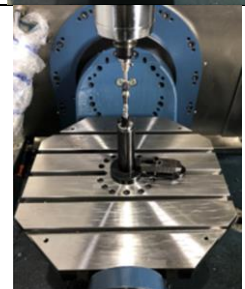

Figura 38 - Calço experimentos 9 e 10.
Fonte: Elaborado pela autora

A Quadro 12 ilustra os dez experimentos realizados neste trabalho, a qual mostra a mesa de trabalho e o *double ballbar* posicionado no local correto sobre a mesma. Para os experimentos do eixo B, numerados de 1 a 5, houve limitação de medição, sendo necessário movimentar o eixo no total de 90°, sendo eles – 80° a + 10°. Já para os experimentos de 6 a 10, referentes ao eixo C, não teve limitações de curso durante os testes, e o curso de medição foi de 360°.

Quadro 12 - Sequência do trabalho experimental.
Fonte: Elaborado pela autora

Experimento	Eixo rotativo	Característica do experimento	Imagem do experimento
1	B	Movimentação eixo rotativo B, <i>double ballbar</i> localizado no centro da mesa de trabalho com sensor linear no sentido Y	
2	B	Movimentação eixo rotativo B, <i>double ballbar</i> localizado no centro da mesa de trabalho com sensor linear no sentido X	

Experimento	Eixo rotativo	Característica do experimento	Imagem do experimento
3	B	Movimentação eixo rotativo B, <i>double ballbar</i> localizado no centro da mesa de trabalho com sensor linear no sentido do eixo Z	
4	B	Movimentação eixo rotativo B, <i>double ballbar</i> deslocado do centro da mesa de trabalho na direção do eixo Y e com sensor linear no sentido do eixo X	
5	B	Movimentação eixo rotativo B, <i>double ballbar</i> deslocado do centro da mesa de trabalho na direção do eixo Y e com sensor linear no sentido do eixo Z	
6	C	Movimentação eixo rotativo C, <i>double ballbar</i> localizado no centro da mesa de trabalho com sensor linear no sentido Y	
7		Movimentação eixo rotativo C, <i>double ballbar</i> localizado no centro da mesa de trabalho com sensor linear no sentido X	

Experimento	Eixo rotativo	Característica do experimento	Imagem do experimento
8	C	Movimentação eixo rotativo C, <i>double ballbar</i> localizado no centro da mesa de trabalho com sensor linear no sentido do eixo Z	
9	C	Movimentação eixo rotativo C, <i>double ballbar</i> localizado no centro da mesa de trabalho sobre calço na direção do eixo Z e com sensor linear no sentido do eixo Y	
10	C	Movimentação eixo rotativo C, <i>double ballbar</i> localizado no centro da mesa de trabalho sobre calço na direção do eixo Z e com sensor linear no sentido do eixo X	

Para cada experimento realizado, o *double ballbar* era calibrado em seu conjunto, a fim de evitar erros decorrentes da manipulação do equipamento. Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura controlada.

A fase 3, como mostra a Figura 39, a coleta de dados foi extraída diretamente do arquivo de leitura do *double ballbar*, o qual contém dados que serão denominados diretamente como erro geométricos dos eixos rotativos ou apresentam valores utilizados nas equações para sua identificação.

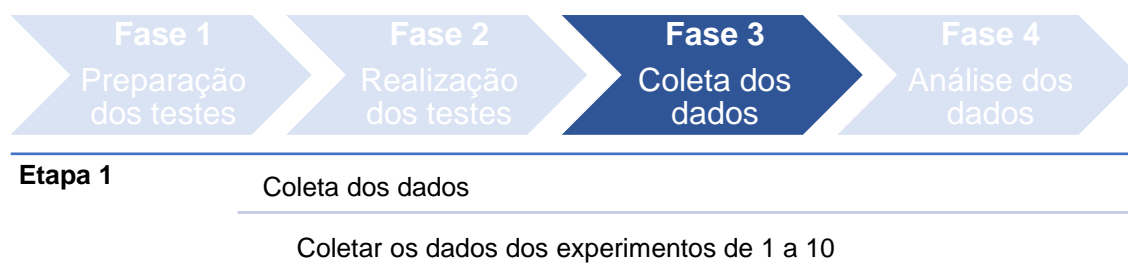


Figura 39 - Fase 3: Coleta dos dados.
Fonte: Elaborado pela autora

A aquisição dos dados foi realizada diretamente pelo programa de leitura dos dados do *double ballbar*, especificamente o Ballbar 20 da Renishaw, por meio de um *laptop*. O *software* utilizado foi configurado, para analisar os valores coletados pelo equipamento, conforme norma ISO 230-4.

A quarta e última fase do trabalho experimental foi a análise dos dados coletados, ilustrada na Figura 40, afim de identificar os erros geométricos dos eixos rotativos B e C da máquina do estudo, além de uma comparação de resultados entre as máquinas (do estudo e a do método) para quantificar a exatidão do equipamento, e até mesmo as possíveis causas para o erro característico. As análises serão apresentadas no capítulo 4 deste trabalho.

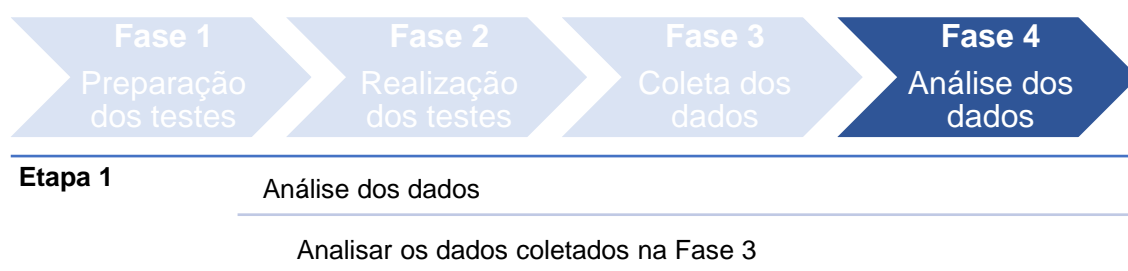


Figura 40 - Fase 4: Análise dos dados.
Fonte: Elaborado pela autora

Os experimentos foram realizados conforme descrito nas etapas anteriores para ser possível identificar os erros geométricos dos eixos rotativos B e C da máquina em estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e analisados os erros geométricos encontrados por meio dos experimentos realizados, bem como os que são oriundos das equações de (3) e (12).

4.1 ERRO GEOMÉTRICO INDEPENDENTE DA POSIÇÃO (PIGE)

Os erros geométricos independentes da posição dos eixos rotativos da máquina, não estão relacionados com a posição dos eixos, sendo assim, a sua identificação foi possível ser realizada com os dados fornecidos pelo equipamento *double ballbar*, em seu relatório de resultados, onde apresenta as grandezas de erro de esquadro e erro de *offset* definidas diretamente com a medição.

O Quadro 13 apresenta o erro geométrico independente de posição e em qual experimento que se coletou o valor. Os mesmos são ilustrados de forma representativa na Figura 41 e são quantificados conforme ilustra a Figura 42.

Quadro 13 - Experimento e identificação PIGEs.
Fonte: Elaborado pela autora

Experimento	Erro
2	Offset Oxb
3	Offset Ozb
4	Esquadro Sxb
5	Esquadro Szb
6	Offset Oyc
7	Offset Oxc
9	Esquadro Sxc
10	Esquadro Syc

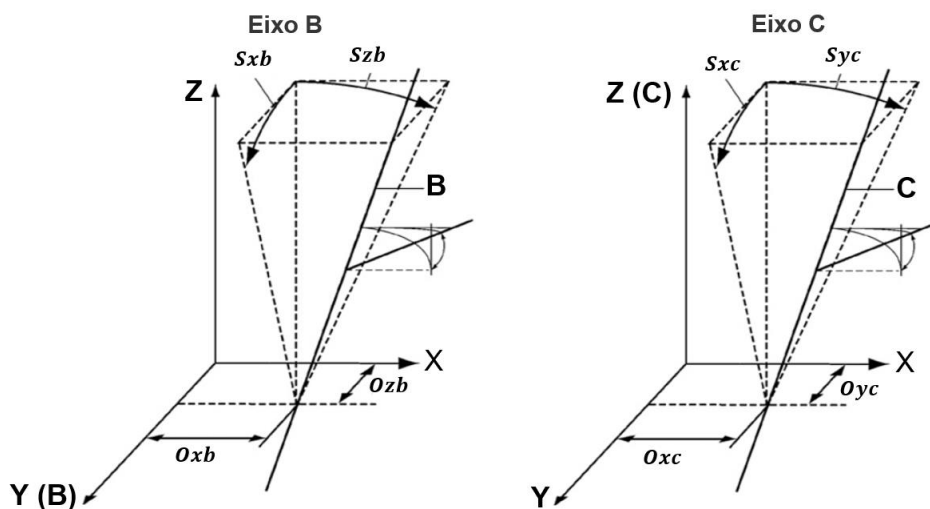


Figura 41 - Indicação dos erros PIGE dos eixos B e C.
Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 41 representa os erros geométricos independentes de posição estudados para os eixos rotativos B e C da máquina em relação ao plano cartesiano.

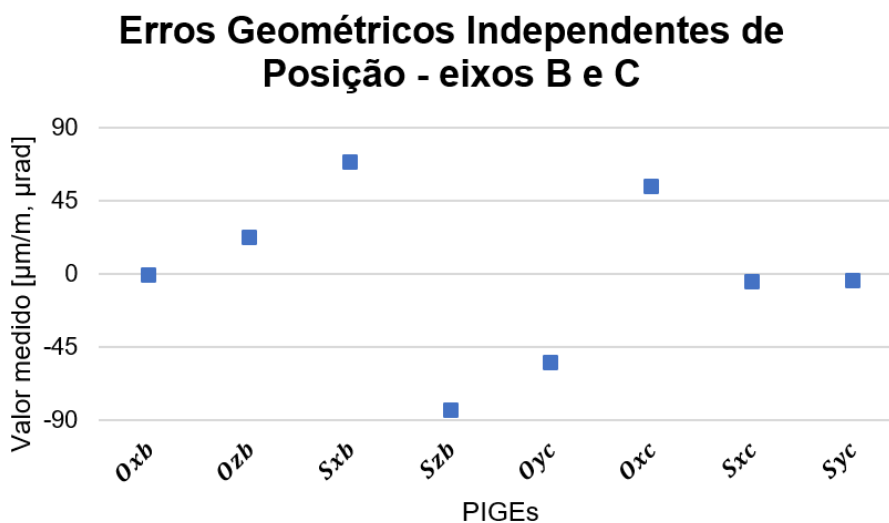


Figura 42 - PIGEs dos eixos rotativos B e C.
Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 42 é possível verificar que os maiores PIGEs encontrados nessa máquina são referentes ao erro de esquadro do eixo B, sendo S_{xb} e S_{zb} , respectivamente, 68,6 e -83,5 µm/m. Porém quando analisado os erros do mesmo tipo S_{xc} e S_{yc} , do eixo C, esses apresentam baixos valores de erro

quando comparados aos valores do outro eixo rotativo, sendo respectivamente -4,6 e -4,2 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Ainda na Figura 42, são ilustrados os erros de *offset*, sendo os que são relacionados com o eixo B (O_{xb} e O_{zb}) menores que os do eixo C (O_{yc} e O_{xc}), equivalendo a -0,9 e 22,6 $\mu\text{m}/\text{m}$ para o primeiro eixo, e -54,2 e 54,0 $\mu\text{m}/\text{m}$ para o outro eixo.

Quando comparado esses resultados com os dados do estudo de LEE; YANG (2016), como ilustra a Figura 24, é possível dizer que os erros de *offset* do eixo B também são baixos quando comparados ao valores de esquadro do mesmo eixo. Já no eixo C, o estudo aqui presente apresenta comportamento diferente ao estudo do pesquisador, sendo menor o erro de esquadro quando analisados com o erro de *offset*.

Ainda na comparação dos estudos, em termos quantitativos é possível assemelhar a diferença devido as tolerâncias exigidas de agrupamento das peças entre os conjuntos do equipamento e, conseqüentemente, realizadas pelos fabricantes durante a montagem da máquina, pois os mesmos podem seguir diferentes normas regulamentadoras.

Pode-se dizer que os erros caracterizados como de esquadro (S) podem ser decorrentes devido a montagem geométrica dos itens do equipamento, resultando em posição angular diferente de 90° em relação da base do esquadro (eixo de assento) e a face lateral (eixo perpendicular). Já os erros de *offset* (O) são ocasionados devido ao deslocamento de posição no momento que o item foi montado na máquina.

4.2 ERRO GEOMÉTRICO DEPENDENTE DA POSIÇÃO (PDGE)

Os erros geométricos dependentes da posição estão associados com o posicionamento do eixo, sendo assim em cada ângulo de rotação o valor do erro pode ser diferente das demais localização ao longo do curso.

Para a identificação desses erros, é necessário quantificar a dimensão nominal do sensor linear do *double ballbar* em cada ângulo de posicionamento a ser analisado. Esses dados foram coletados automaticamente pelo equipamento ao longo de todo curso de movimentação para leitura, que se inicia em 10° e termina em -80° . Os valores da diferença nominal experimental do *double ballbar* (ΔR_{ij}) do eixo B estão apresentados, de forma sintetizada em quantidade de posicionamento, nas Figura 43 e Figura 44.

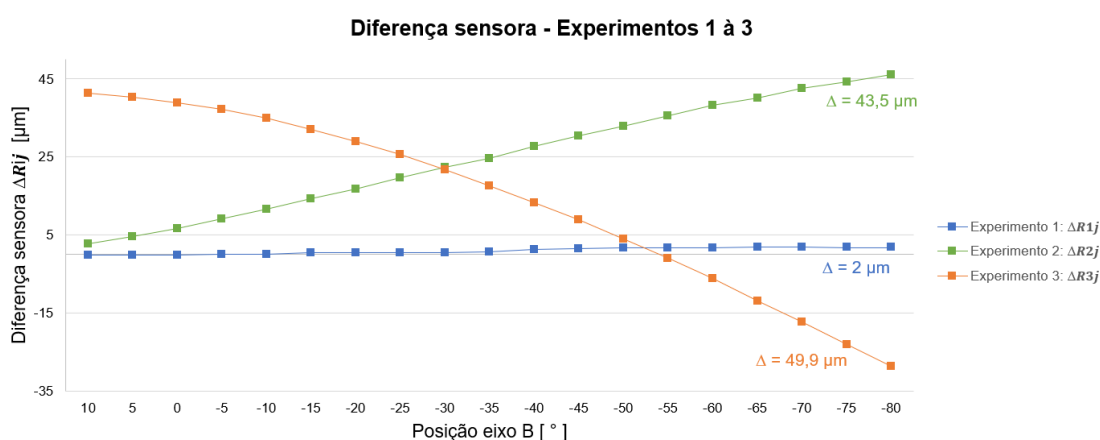


Figura 43 - Medição desvio diferença sensora ΔR_{ij} - eixo B, experimentos 1 à 3.
Fonte: Elaborado pela autora

É possível notar na Figura 43 que a diferença sensora vai aumentando ao longo da movimentação do eixo B, nos experimentos 1 e 2, sendo que no teste 2, a diferença se inicia em $2,67 \mu\text{m}$ e no final do curso obtém $46,13 \mu\text{m}$. Esse fato também ocorre no experimento 1, porém em menor escala. Já para o experimento 3, a alteração tende a diminuir ao longo de todo o curso realizado, que pode estar associado ao fato de estar relacionado com a altura de montagem do conjunto da mesa no sentido do eixo linear Z.

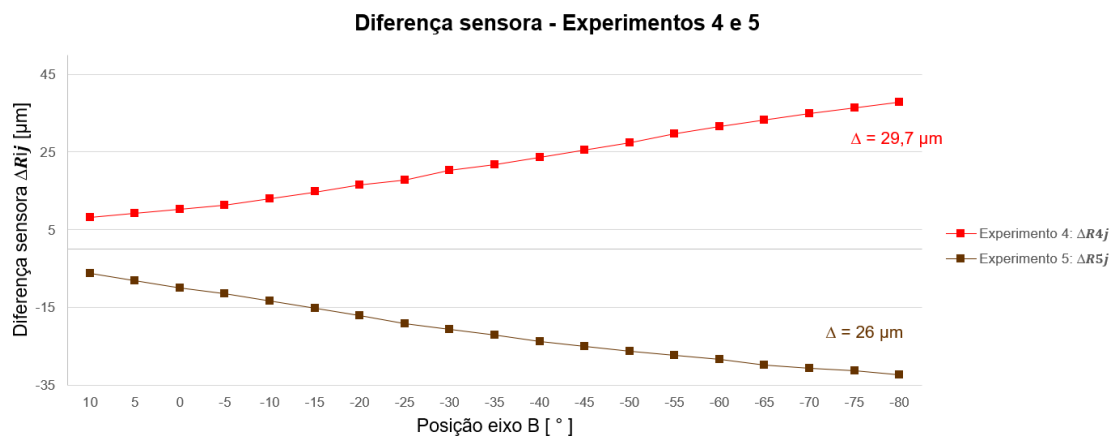


Figura 44 - Medição desvio diferença sensora ΔR_{ij} - eixo B, experimentos 4 e 5.
Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 44, são apresentadas as diferenças sensoras relativas aos experimentos 4 e 5, também relacionados ao eixo rotativo B. Nos dois ensaios, a tendência da alteração sensora é aumentar ao longo da movimentação da mesa.

Já nas Figura 45 e Figura 46, são identificadas as diferenças do comprimento do sensor linear do equipamento de medição (ΔR_{ij}) dos experimentos realizados para o eixo C da máquina-ferramenta, ao longo dos 360° de curso existente para o eixo em questão.

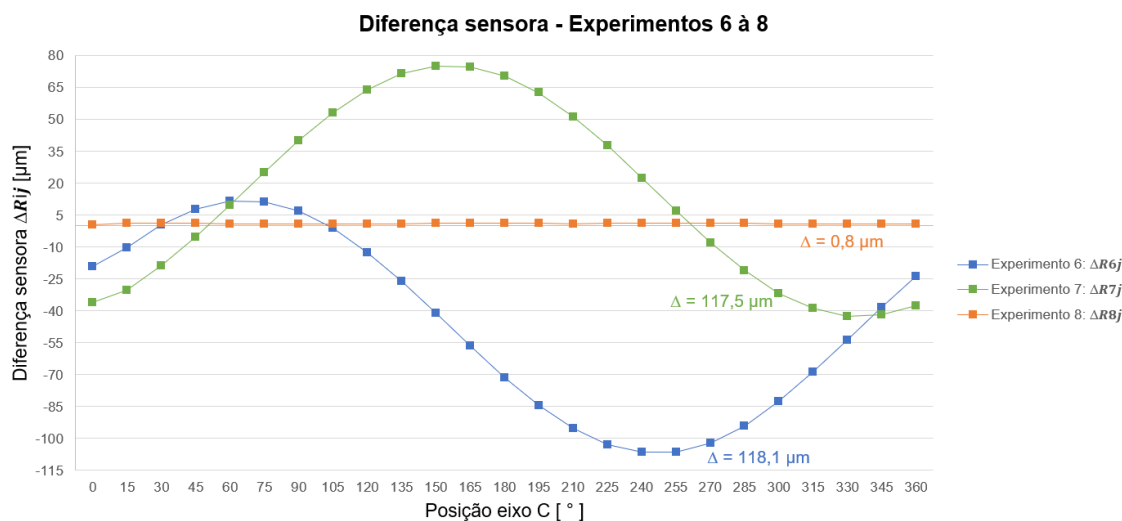


Figura 45 - Medição desvio diferença sensora ΔR_{ij} - eixo C, experimentos 6 à 8.
Fonte: Elaborado pela autora

Pode ser observado na Figura 45, que para o eixo C, a diferença sensora tende a ser constante para experimento 8, o qual está relacionado com o eixo Z, porém para outros dois ensaios, o 6 e 7 observa-se o comportamento oscilante de forma repetitiva e contínua no determinado período (curso de teste), tendo caso, como no teste 7, o valor máximo e mínimo de diferença, de aproximadamente 75 e -42 μm .

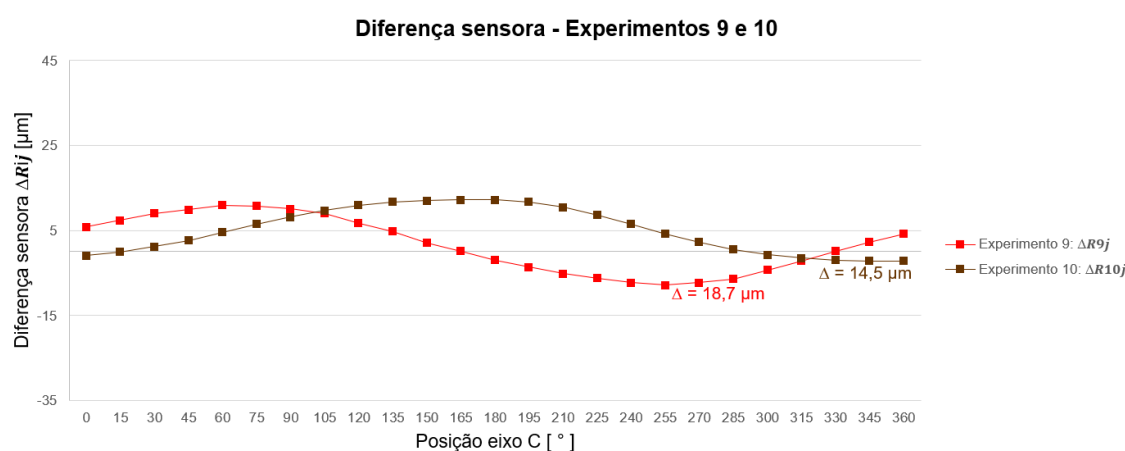


Figura 46 - Medição desvio diferença sensora ΔR_{ij} - eixo C, experimentos 9 e 10.
Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 46 mostra que a diferença sensora para os testes 9 e 10 também apresentam comportamento oscilante, sendo ele repetitivo e contínuo ao longo do curso de medição.

Ainda nas Figura 43 a Figura 46, também é são apresentadas as diferenças (Δ) entre o menor e o maior valor de comprimento do sensor linear. Para os experimentos realizados, os menores valores de erros foram encontrados quando o sensor linear do *double ballbar* se encontra linearmente ao eixo de rotação, caso que ocorre para os experimentos 1 (eixo B) e 8 (eixo C), sendo respectivamente 2 e 0,8 μm .

Já as maiores diferenças sensora linear se dão para os experimentos 3 (eixo B) e 6 (eixo C), com valores de 69,9 e 118,1 μm , ambos com o *double ballbar* localizado no centro da mesa e com posição 90° do eixo rotação na vertical (para o eixo B) e na horizontal (para o eixo C).

As curvas geradas da medição do comprimento sensor em relação ao ângulo de posicionamento do eixo, são de perfis similares aos ilustrados nas Figura 21 e Figura 22, do estudo de LEE; YANG (2016). Assim, pode-se dizer que o desempenho das máquinas-ferramenta verticais de cinco eixos possuem o mesmo comportamento quando são realizados os experimentos para identificar os erros geométricos dos eixos rotativos, apresentados nas Figura 18 e Figura 19.

Ainda baseado nessas medições, as diferenças acentuadas podem ser decorrentes dos fatores de tolerâncias de funcionalidade do equipamento ou até mesmo de ajustes realizados na máquina. Relacionando com o estudo de LEE; YANG (2016), há diferença sensora com valor bem próximo, como no caso de experimento 5, onde a máquina do estudo apresenta o valor de 6,5% maior, e em outros casos o comportamento da máquina apresenta melhor resultado, como visto nos experimentos 9 e 10, sendo a melhora respectivamente, de 1,8% e de 28,8%.

O principal ponto avaliado neste trabalho foram os erros geométricos dependentes de posição. Para ser possível quantificar esses erros, foram utilizados os valores coletados com o instrumento *double ballbar*, sendo eles os PIGEs e as diferenças do comprimento do sensor linear, e também equações.

Os erros PDGEs aqui apresentados são os erros de posição (δ) e os erros angular (ε), totalizando dez erros, conforme ilustrados na Figura 47.

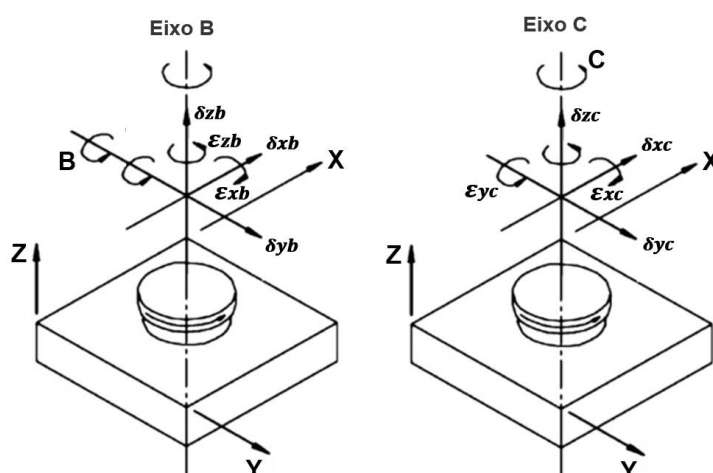


Figura 47 - Indicação dos erros PDGE dos eixos B e C.
Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 47 mostra os erros geométricos de posição (δ) e angulares (ε) dos eixos rotativos da máquina, os quais estão associados entre o próprio eixo rotativo e também com o eixo linear que o erro está sendo relacionado.

Cada experimento realizado está associado a uma equação, com objetivo a identificação de um PDGE relacionado com o eixo rotativo. O Quadro 14 apresenta as equações utilizadas em cada um dos experimentos para mensurar os erros em questão.

Quadro 14 - Equações para identificação dos PDGEs.
Fonte: Elaborado pela autora

Dados experimento	Equação	Erro a ser identificado
1	$\Delta R_{1j} - \Delta R_{11} = -\delta_{yb}$ (13)	δ_{yb}
2	$\Delta R_{2j} - \Delta R_{21} = \delta_{xb} + o_{xb} - cb_j o_{xb} + sb_j o_{zb}$ (14)	δ_{xb}
3	$\Delta R_{3j} - \Delta R_{31} = -\delta_{zb} + o_{zb} - sb_j o_{xb} + cb_j o_{zb}$ (15)	δ_{zb}
4	$\Delta R_{4j} - \Delta R_{41} = \delta_{xb} + h \varepsilon_{zb} + o_{xb} + h s_{zb} - cb_j(o_{xb} + h s_{zb}) + sb_j(o_{zb} + h s_{xb})$ (16)	ε_{xb}

Dados experimento	Equação	Erro a ser identificado
5	$\Delta R_{5j} - \Delta R_{51} = -\delta_{zb} + h \varepsilon_{xb} + o_{zb} + h s_{xb} \quad (17)$ $- sb_j(o_{xb} + h s_{zb}) + cb_j(o_{zb} + h s_{xb})$	ε_{zb}
6	$\Delta R_{6j} - \Delta R_{61} = -\delta_{yc} - O_{yc} + cc_j O_{yc} \quad (18)$ $- SC_j(O_{xb} + O_{xc})$	δ_{yc}
7	$\Delta R_{7j} - \Delta R_{71} = \delta_{xc} + O_{xb} + O_{xc} - SC_j O_{yc} \quad (19)$ $- CC_j(O_{xb} + O_{xc})$	δ_{xc}
8	$\Delta R_{8j} - \Delta R_{81} = -\delta_{zc} \quad (20)$	δ_{zc}
9	$\Delta R_{9j} - \Delta R_{91} = -\delta_{yc} + h \varepsilon_{xc} - O_{yc} + h S_{xb} - h S_{xc} \quad (21)$ $+ cc_j(O_{yc} + h S_{xb} + h S_{xc})$ $- sc_j(O_{xb} + O_{xc} - h S_{yc})$	ε_{xc}
10	$\Delta R_{10j} - \Delta R_{101} = \delta_{xc} + h \varepsilon_{yc} + O_{xb} - O_{xc} - h S_{yc} \quad (22)$ $- sc_j(O_{yc} + h S_{xb} + h S_{xc})$ $- cc_j(O_{xb} + O_{xc} - h S_{yc})$	ε_{yc}

Em que:

h offset entre medições [mm]

i sequência do experimento ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$)

b_j ângulo nominal do eixo rotativo B ($j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$) [graus]

c_j ângulo nominal do eixo rotativo C ($j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$) [graus]

R comprimento nominal experimental do *double ballbar* [mm]

ΔR_{ij} diferença entre comprimento nominal do *double ballbar* R na medição i com b_j e c_j , respectivamente [μm]

$\{j\}$ sistema de coordenada de eixo j ($j = X, Y, Z, B, C$)

$\{R\}$ referência no sistema de coordenadas

Na Figura 48 são apresentados os PDGEs do eixo B, obtidos pelas equações de (13) a (15), e mostrados sequencialmente nas figuras de A a C.

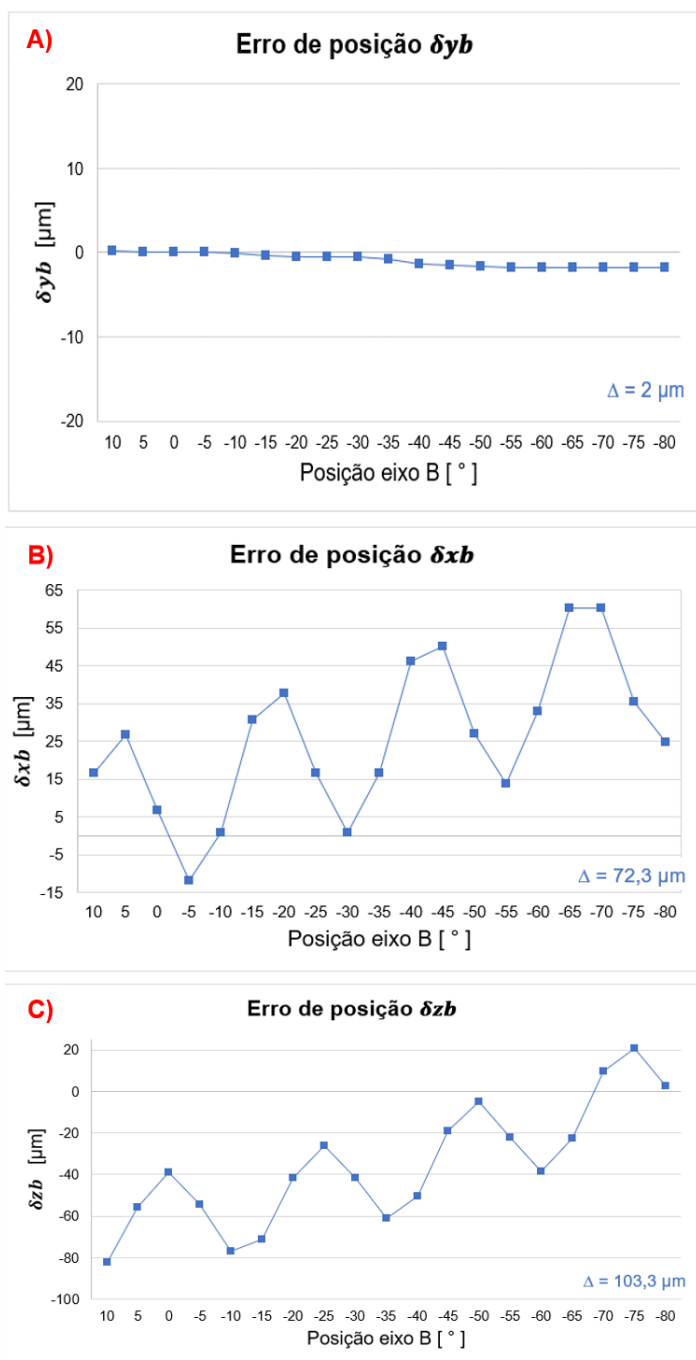


Figura 48 - PDGEs do eixo B. a) Erro de posição δ_{yb} , B) Erro de posição δ_{xb} , c) Erro de posição δ_{zb} .

Fonte: Elaborado pela autora

Como pode ser observado nos gráficos da Figura 48, o menor erro de posição está relacionado com o eixo linear Y, o qual obtém pico de valor de $2 \mu\text{m}$, podendo dizer que é um valor baixo por se tratar de relação entre eixo linear e eixo rotativo, sendo ele de $-0,2$ a $1,8 \mu\text{m}$ ao longo da faixa de medição. Já a maior diferença de erro se dá em relação ao eixo Z, atingindo uma diferença entre o menor e maior erro em diferentes posicionamento da mesa de $103 \mu\text{m}$ com erro de até $-82,5 \mu\text{m}$, e quando é correlacionado com o outro eixo linear, o eixo X, o valor de pico é de $72,3 \mu\text{m}$, e o erro máximo de $60,4 \mu\text{m}$.

Os erros geométricos de posição do eixo B com os eixos X e Z podem ser considerados elevados, pois estão associados com a diferença sensora, que foram altas, e também com o PIGE de offset O_{zb} , que possui um valor mediano.

Os erros angulares relacionados ao eixo rotativo B são apresentados na Figura 49.

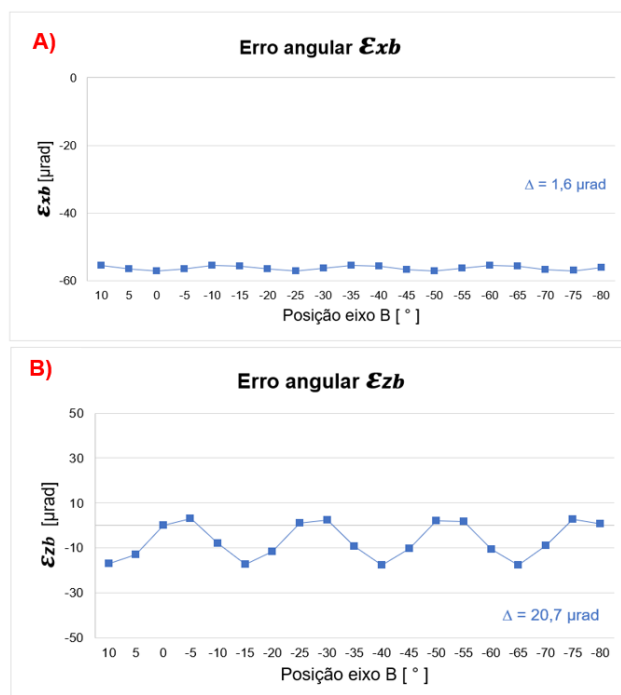


Figura 49 - PDGEs angulares do eixo B - a) Erro angular ϵ_{xb} , b) Erro angular ϵ_{zb} .
Fonte: Elaborado pela autora

Conforme mostra na Figura 49, o erro angular (ϵ) do eixo B em relação ao eixo linear X, calculado por meio da Equação (16), apresenta baixo pico de valor, sendo ele $1,6 \mu\text{rad}$, porém o valor encontrado para o erro é em média de $-56,3$

μrad . Quando analisado o eixo rotativo correlacionado com o eixo Z, foi utilizada a Equação (17) para mensurar o desvio, sendo que o pico de desvio encontrado é de $20,7 \mu\text{rad}$, variando o erro entre $-17,6$ e $3,1 \mu\text{rad}$.

Os resultados dos erros geométricos dependentes de posição do eixo C são ilustrados na Figura 50, que de A a C foram calculados por meio, respectivamente, das equações de (18) a (20).

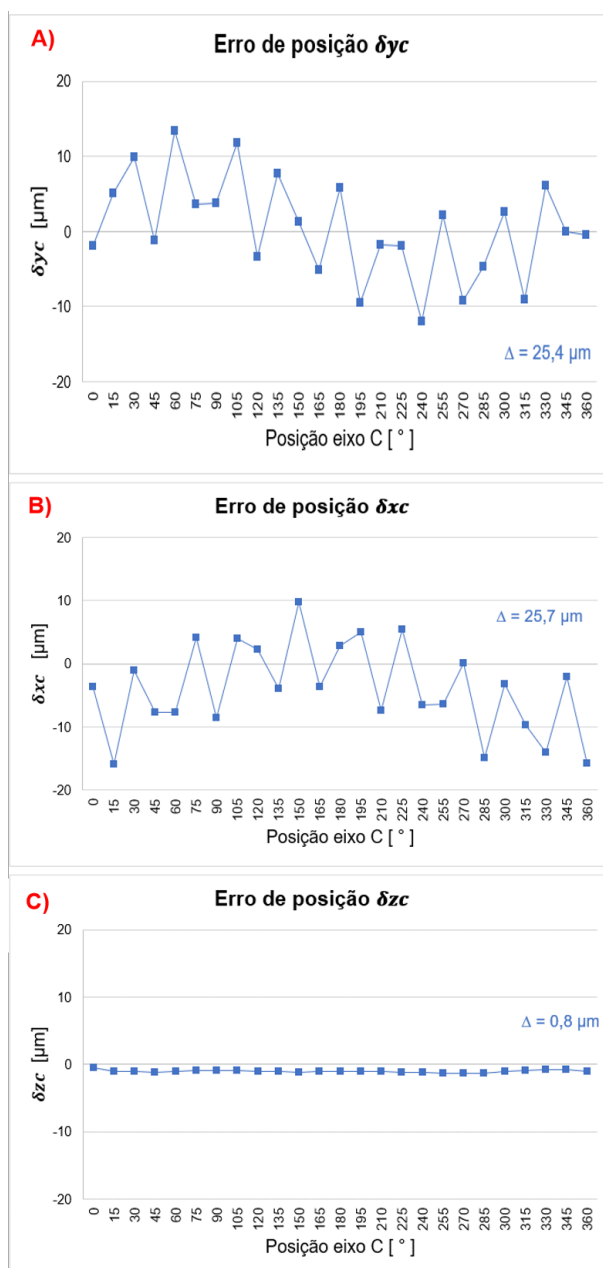


Figura 50 - PDGEs do eixo C. a) Erro de posição δ_{yc} , b) Erro de posição δ_{xc} , c) Erro de posição δ_{zc} .

Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 50, é possível notar que quando se refere ao erro de posição (δ), o eixo linear que menor possui interferência é o Z, o qual apresenta apenas média de $-0,9 \mu\text{m}$, e $0,8 \mu\text{m}$ entre pico de erros, fator que pode estar associado pelo fato do mesmo possuir centro de giro paralelo ao centro de giro do eixo C e não está correlacionado com nenhum outro erro existente.

Também é possível dizer que para os erros de posição relacionados entre o eixo C com os eixos lineares Y e X, os valores encontrados variam de -12 a $13,3 \mu\text{m}$ para Y, e de $-15,9$ a $9,8 \mu\text{m}$ para o outro eixo, sendo para ambos a diferença (Δ) próxima a $25,5 \mu\text{m}$. Essa quantidade de erro pode estar associado ao fato que ambos os eixos lineares possuem centro de giro perpendicular ao centro de giro do eixo C e também com os erros de *offset* (O_c).

A Figura 51 apresenta os valores dos erros PDGEs angulares do eixo C ao longo de todo o curso de medição durante os experimentos.

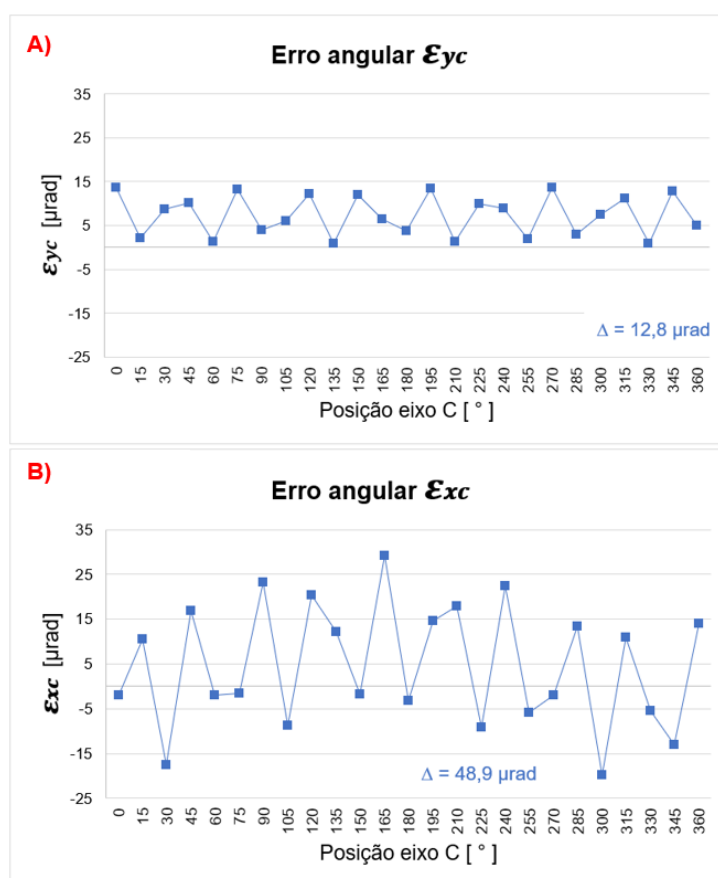


Figura 51 - PDGEs angulares do eixo C - a) Erro angular ϵ_{yc} , b) Erro angular ϵ_{xc} .
Fonte: Elaborado pela autora

O erro angular (ε) do eixo C em relação ao eixo Y é menor aproximadamente 73% em valor de pico (Δ) quando comparado em relação ao mesmo tipo de erro correlato com o eixo X, sendo respectivamente 12,8 e 48,9 μrad . O erro relacionado ao eixo X não ultrapassa 13,6 μrad , e o pertinente ao eixo X varia de -19,7 a 29,1 μrad . Esses erros foram obtidos por meio das equações (21) e (22).

Todos os PDGEs de posição (δ) do eixo C são menores que os mesmos tipos de erros do eixo B quando correlacionados com o mesmo eixo linear, e para erro o angular relacionado com o eixo X ocorre o mesmo comportamento. Esse comportamento também é observado no estudo de LEE; YANG (2016), que são demonstrados nas Figura 25 e Figura 26, sendo assim é possível dizer que há tendência de o erro ser menor para o eixo rotativo C quando comparado com o outro eixo giratório.

Retomando a relação entre a presente pesquisa com o estudo de LEE; YANG (2016), pode-se associar a diferença de valores quantitativos, em alguns casos dos PDGEs, devido a diferença de valores dos PIGEs, sendo que esses erros independentes são utilizados na equações de (13) a (22), interferindo diretamente no cálculo dos erros dependentes.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo do presente estudo foi analisar os erros geométricos dos eixos rotativos de uma máquina-ferramenta vertical de cinco eixos, identificando-os quantitativamente e fazendo sua análise.

Com o estudo aqui desenvolvido e apresentado foi possível identificar os erros geométricos dos eixos rotativos, o qual utiliza o equipamento *double ballbar* de forma a controlar um eixo giratório por vez. Os dados coletados nos ensaios, pelo aparelho de medição, são propriamente o PIGEs, e outros são informações e dados para o cálculo dos PDGEs.

Os menores erros geométricos encontrados, da máquina do estudo entre os eixos rotativos, se localizam no eixo C, comportamento este que foi observado durante a análise dos erros geométricos, tanto os dependentes quanto os independentes de posição, os quais fazem parte do eixo rotativo de menor complexidade de projeto, construção e funcionamento. No processo de usinagem que necessita utilização de apenas um dos eixos rotativos, é indicado preferencialmente o uso do eixo C, pois com isso há menor incidência de erros geométricos nas peças produzidas.

Para os PIGEs da máquina-ferramenta do presente estudo, os erros geométricos em maior relevância são encontrados no eixo B quando comparado ao eixo C, podendo estar associado, além do mecanismo do conjunto da mesa, a maneira de como foi realizada a montagem da mesma no conjunto da máquina o qual não foi montado com esquadro total de 90° e também com erro de deslocamento em direção linear, pois essa é causa característica desse tipo de erro. Sendo que um possível retrabalho de montagem de conjuntos desses eixos, poderiam fazer com que esses valores fossem reduzidos.

Considerando os PDGEs, alguns tipos de erros em relação ao eixo C apresentam comportamento repetitivo ao longo das medições realizadas, e todos eles apresentam valores considerados baixos. O eixo B possui erros de

maior valor quando comparado ao outro eixo, e a maioria não apresenta comportamento contínuo ao longo do posicionamento angular do eixo. Esse fato pode ser caracterizado pelo tipo de mecanismo presente no conjunto da mesa em cada eixo rotativo, devido a folga de mecanismo de cora e sem fim para os erros de posição e angulares, bem como ocasionados por componentes que são movimentados e os exercem movimento durante a rotação do eixo.

Com o conhecimento dos erros geométricos para o equipamento, o fabricante pode trabalhar na montagem da máquina-ferramenta, afim dos ajustes dos conjuntos montados possuir menores tolerâncias entre si, impactando nos erros independentes da posição, e esse trabalho apresenta baixo impacto no custo do produto, pois esse erro tem causa relacionada com o agrupamento dos conjuntos da máquina. Pode também ser trabalhada maneiras de compensação de erros a serem implementadas pelo próprio fabricante da máquina, de modo deixá-la mais exata.

As sugestões de trabalhos futuros são apresentadas de forma a ter próximas etapas, as quais vão além do objetivo desse estudo, que foi a análise dos erros geométricos utilizando o *double ballbar*, e possibilita maior conhecimento do material de estudo, além de até mesmo melhoria na máquina-ferramenta, como no caso de compensação de erros. Como sugestões para continuidades deste trabalho e também pesquisas futuras, indica-se:

- a) Realizar a correção manualmente dos erros geométricos identificados durante a medição e equações, e fazer novos testes para identificar o impacto ocasionado, para ser possível verificar a diferença prática, sem usinagem, quando a ferramenta possui alteração de trajetória;
- b) Fazer peça teste e identificar os erros geométricos, afim de compará-los e validá-los com os identificados com o *double ballbar*, para possibilitar a análise prática entre erros com e sem usinagem;
- c) Desenvolver sistema de compensação automático dos erros geométricos, o qual é feito via CNC, recurso que auxilia na exatidão da máquina-ferramenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASZADEH-MIR, Y., MAYER, J. R. R., CLOUTIER, G., FORTIN, C. Theory and simulation for the identification of the link geometric errors for a five-axis machine tool using a telescoping magnetic ball-bar. **International Journal of Production Research**, v. 40, n. 18, p. 4781–4797, 2002.

BAPTISTA, R.; ANTUNE SIMÕES, J. F. Three and five axes milling of sculptured surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 103, n. 3, p. 398–403, 2000.

BELFORTE, G., BONA, B., CANUTO, E., DONATI, F., FERRARIS, F., GORINI, I., MOREI, S., PEISINO, M., SARTORI, S., LEVI, R. Coordinate measuring machines and machine tools selfcalibration and error correction. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 36, n. 1, p. 359–364, 1987.

BI, Q., HUANG, N., SUN, C., WANG, Y., ZHU, L., DING, H. Identification and compensation of geometric errors of rotary axes on five-axis machine by on-machine measurement. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 89, p. 182–191, 2015.

BITAR-NEHME, E.; MAYER, J. R. R. Thermal volumetric effects under axes cycling using an invar R-test device and reference length. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 105, p. 14–22, 2016.

BOHEZ, E. L. J. Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, n. 4, p. 505–520, 2002a.

BOHEZ, E. L. J. Compensating for systematic errors in 5-axis NC machining. **CAD Computer Aided Design**, v. 34, n. 5, p. 391–403, 2002b.

BUSCH, K.; KUNZMANN, H.; WILDELE, F. Calibration of coordinate measuring machines. **Precision Engineering**, v. 7, n. 3, p. 139–144, 1985.

CHEN, J. S., YUAN, J. X., NI, J., WU, S. M. Real-time compensation for time-variant volumetric errors on a machining center. **Journal of Engineering for Industry**, v. 115, n. 4, p. 472–479, 1993.

CHEN, J. X., LIN, S. W., ZHOU, X. L., GU, T. Q. A ballbar test for measurement and identification the comprehensive error of tilt table. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 103, p. 1–12, 2016.

CHEN, J. S. Computer-aided accuracy enhancement for multi-axis CNC machine tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 35, n. 4, p. 593–605, 1995.

DING, S., HUANG, X., YU, C., LIU, X. Identification of different geometric error models and definitions for the rotary axis of five-axis machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 100, p. 1–6, 2016.

DING, S., HUANG, X., YU, C., WANG, W. Actual inverse kinematics for position-independent and position-dependent geometric error compensation of five-axis machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 111, n. September, p. 55–62, 2016.

DONMEZ, M. A., BLOMQUIST, D. S., HOCKEN, R. J., LIU, C. R., BARASH, M. M. A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation. **Precision Engineering**, v. 8, n. 4, p. 187–196, 1986.

DONMEZ, M. A., LEE, K., LIU, C. R., BARASH, M. M. A real-time error compensation system for a computerized numerical control turning center. **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, p. 172–176, 1986.

FU, G., GU, T., GAO, H., JIN, Y., DENG, X. Geometric error compensation for five-axis ball-end milling by considering machined surface textures. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 99, p. 1235–1248, 2018.

GIVI, M. **COMPENSATION OF RELEVANT AND COMPENSABLE VOLUMETRIC ERRORS FOR FIVE-AXIS MACHINE TOOLS BASED ON DIFFERENTIAL KINEMATICS**. [s.l.] Université de Montréal, 2015.

GRAY, P., BEDI, S., ISMAIL, F., RAO, N., MORPHY, G. Comparison of 5-axis and 3-axis finish machining of hydroforming die inserts. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 17, n. 8, p. 562–569, 2001.

GROOVER, M. . **Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems**. 4. ed. Hoboken, NJ - United States of America: JOHN WILEY & SONS, INC, 2007.

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**, v. 28, n. 4, 2017.

GUO, Y., TANG, X., ZHOU, X., SONG, B., JIANG, Z., XIE, Y., YE, B. Continuous measurements with single setup for position-dependent geometric errors of rotary axes on five-axis machine tools by a laser displacement sensor. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 99, p. 1589–1602, 2018.

HE, Z., FU, J., ZHANG, X., SHEN, H. A uniform expression model for volumetric errors of machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 100, p. 93–104, 2016.

HSU, Y. Y.; WANG, S. S. A new compensation method for geometry errors of

five-axis machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 2, p. 352–360, 2007.

HUANG, N., ZHANG, S., BI, Q., WANG, Y. Identification of geometric errors of rotary axes on 5-axis machine tools by on-machine measurement. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, n. 1–4, p. 505–512, 2016.

IBARAKI, S., SAWADA, M., MATSUBARA, A., MATSUSHITA, T. Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools. **Precision Engineering**, v. 34, n. 3, p. 387–398, 2010.

IBARAKI, S.; OYAMA, C.; OTSUBO, H. Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 3, p. 190–200, 2011.

IBARAKI, S.; YOSHIDA, I.; ASANO, T. A machining test to identify rotary axis geometric errors on a five-axis machine tool with a swiveling rotary table for turning operations. **Precision Engineering**, v. 55, p. 22–32, 2019.

INDÚSTRIAS ROMI S.A. **Centros de usinagem vertical - 5 eixos / 5 faces - Linha ROMI DCM 620**. Disponível em: <http://www.romi.com/wp-content/uploads/2016/02/cat_romi_dcm_620_po_ak-01_baixa.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2017.

ISO 10791-7, 2014. **ISO 10791-7:2014 - Test conditions for machining centres - Part 7: Accuracy of finished test pieces**. International Organization Standardization, 2014.

ISO 230-1, 2012. **ISO 230-1:2012 - Test code for machine tools - Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions**. International Organization for Standardization, 2012.

ISO 230-7, 2015. **ISO 230-7:2015 - Test code for machine tools - Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation**. International Organization for Standardization, 2015.

ISO 841, 2001. **ISO 841:2001 - Industrial automation systems and integration - Numerical control of machines - Coordinate system and motion nomenclature**. International Organization Standardization, 2001.

JIANG, X. **Characterising Geometric Errors in Rotary Axes of 5-axis Machine Tools**. University of Birmingham, 2014.

KHAN, A. W.; CHEN, W. A methodology for systematic geometric error compensation in five-axis machine tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 53, n. 5–8, p. 615–628, 2011.

KHAN, A. W.; WUYI, C. Systematic geometric error modeling for workspace volumetric calibration of a 5-axis turbine blade grinding machine. **Chinese**

Journal of Aeronautics, v. 23, n. 5, p. 604–615, 2010.

KIRIDENA VSB, F. P. Computational approaches to compensating quasistatic errors of three-axis machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, n. 34, p. 127–145, 1994a.

KIRIDENA VSB, F. P. Parameter estimation and model verification of 1st order quasistatic error model for machine centers. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 34, p. 101–125, 1994b.

KIRIDENA VSB, F. P. Kinematic modeling of quasi-static errors of three-axis machine centers. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 34 (1), p. 85–100, 1994c.

KOLISKOR, A. Compensating for automatic-cycle machining errors. **Machines and Tooling**, v. 5, p. 1–14, 1971.

KURTOGLU, A.; SOHLENIUS, G. The accuracy improvement of machine tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 39, n. 1, p. 417–419, 1990.

LACALLE, L. N. L. DE; LAMIKIZ, A. **Machine Tools for High Performance Machining**. Girona, Spain: eStudio Calamar S.L, 2009.

LEE, D. M., ZHU, Z., LEE, K. II, YANG, S. H. Identification and measurement of geometric errors for a five-axis machine tool with a tilting head using a double ball-bar. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 12, n. 2, p. 337–343, 2011.

LEE, K. II; YANG, S. H. Robust measurement method and uncertainty analysis for position-independent geometric errors of a rotary axis using a double ball-bar. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 14, n. 2, p. 231–239, 2013.

LEE, K. II; YANG, S. H. Compensation of position-independent and position-dependent geometric errors in the rotary axes of five-axis machine tools with a tilting rotary table. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, n. 5–8, p. 1677–1685, 2016.

LEI, W. T.; PAUNG, I. M.; YU, C. C. Total ballbar dynamic tests for five-axis CNC machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 6, p. 488–499, 2009.

LI, Q., WANG, W., JIANG, Y., LI, H., ZHANG, J., JIANG, Z. A sensitivity method to analyze the volumetric error of five-axis machine tool. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, n. 5–8, p. 1791–1805, 2018.

LIU, Y. et al. Identification and compensation of geometric errors of rotary axes in five-axis machine tools through constructing equivalent rotary axis (ERA). **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 152, n. October 2018, p. 211–227, 2019.

LO C-H, YUAN JX, N. J. An application of real-time error compensation on a turning center. **Int J Mach Tools Manuf**, v. 35, n. 12, p. 1669–1682, 1995.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007.

MOU J, L. C. A methodology for machine tool error correction - an adaptive approach. **Asme-wam Ped**, v. 64, p. 69–81, 1993.

NAS 979, 2013. **NAS 979 - Uniform cutting tests**. National Aerospace Standard, 2013.

NI, J. CNC Machine accuracy enhancement through real-time error compensation. **Journal of Manufacturing Science Engineering**, v. 119, p. 717–725, 1997.

OKUSHIMA, K., KAKINO, Y., HIGASHIMOTO, A. Compensation of thermal displacement by coordinate system correction. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 24, p. 327–331, 1975.

QIAO, Y., CHEN, Y., YANG, J., CHEN, B. A five-axis geometric errors calibration model based on the common perpendicular line (CPL) transformation using the product of exponentials (POE) formula. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 118–119, p. 49–60, 2017.

RAKSIRI, C.; PARNICHKUN, M. Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, p. 1283–1291, 2004.

RAMESH, R.; MANNAN, M. A.; POO, A. N. Error Compensation in Machine Tools - a review Part I: Geometric, Cutting Force induced and fixture depend errors. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, p. 1235–1256, 2000.

REINSHAW. XL-80 laser measurement system Machine tools and CMM. **Reinshaw**, p. 28, 2016.

RENISHAW. QC20-W wireless ballbar system description and specifications Software. p. 8, 2013.

RENISHAW. **Sistema ballbar QC20-W**. Disponível em: <<http://www.renishaw.com.br/pt/sistema-ballbar-qc20-w--11075>>. Acesso em: 20 jan. 2018a.

RENISHAW. **The latest version of Ballbar 20 software (V5.09.04) is now available free of charge for existing users of Renishaw's QC20-W and QC10 ballbars**. Disponível em: <<http://www.renishaw.com/en/the-latest-version-of-ballbar-20-software-v50904-is-now-available-free-of-charge-for-existing-users-of-renishaws-qc20-w-and-qc10-ballbars--14181>>. Acesso em: 15 fev. 2018b.

RENISHAW. **XL-80 laser system**. Disponível em:

<<http://www.renishaw.com/en/xl-80-laser-system--8268>>. Acesso em: 15 fev. 2018c.

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**, v. 57, n. 2, p. 660–675, 2008.

SHEN, H., FU, J., HE, Y., YAO, X. On-line asynchronous compensation methods for static/quasi-static error implemented on CNC machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 60, p. 14–26, 2012.

SRIVASTAVA, A. K.; VELDHUIS, S. C.; ELBESTAWIT, M. A. Modelling geometric and thermal errors in a five-axis cnc machine tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 35, n. 9, p. 1321–1337, 1995.

TEEUWSEN, J.W.M.C., SOONS, J.A., SCHELLEKENS, P.H.J., VAN DER WOLF, A. C. H. A general method for error description of CMMs using polynomial fitting procedures. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 36, p. 505–510, 1989.

TIAN, W.; LIU, S.; LIU, X. Accuracy design of high precision machine tools using error sensitivity analysis methodology. **Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 1, n. 92, p. 1–13, 2016.

TSUTSUMI, M., TONE, S., KATO, N., SATO, R. Enhancement of geometric accuracy of five-axis machining centers based on identification and compensation of geometric deviations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 68, p. 11–20, 2013.

TSUTSUMI, M.; SAITO, A. Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 771–780, 2003.

WAN, M.; LIU, Y.; ZHANG, W. A new algorithm for the identification of CNC geometric errors. **Procedia CIRP**, v. 56, p. 293–298, 2016.

WANG, S. M.; LIU, Y. L.; KANG, Y. An efficient error compensation system for CNC multi-axis machines. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, n. 11, p. 1235–1245, 2002.

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**, v. 122, n. 100, p. 161–175, 2017.

XIANG, S.; ALTINTAS, Y. Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools. **International Journal of Machine Tools and**

Manufacture, v. 101, p. 65–78, 2016.

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**, v. 94, n. 1–4, p. 1–12, 2017.

YANG, S. H., KIM, K. H., PARK, Y. K., LEE, S. G. Error analysis and compensation for the volumetric errors of a vertical machining centre using a hemispherical helix ball bar test. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 23, n. 7–8, p. 495–500, 2004.

YANG, J.; DING, H. A new position independent geometric errors identification model of five-axis serial machine tools based on differential motion matrices. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 104, p. 68–77, 2016.

YANG, J.; MAYER, J. R. R.; ALTINTAS, Y. A position independent geometric errors identification and correction method for five-axis serial machines based on screw theory. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 95, p. 52–66, 2015.

ZHANG, G., VEALE, R., CHARLTON, T., BORCHARDT, B., HOCKEN, R. Error compensation of coordinate measuring machines. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 34, n. 1, p. 445–448, 1985.

ZHU, S., DING, G., QIN, S., LEI, J., ZHUANG, L., YAN, K. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 52, n. 1, p. 24–29, 2012.