

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

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO
TÉRMICO DO EIXO ÁRVORE NOS ERROS DE
POSICIONAMENTO DE UMA MÁQUINA-FERRAMENTA
DE CINCO EIXOS**

LUCAS SCAVARIELLO FRANCISCATO

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 DA INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO
TÉRMICO DO EIXO ÁRVORE NOS ERROS DE
POSICIONAMENTO DE UMA MÁQUINA-FERRAMENTA
DE CINCO EIXOS**

LUCAS SCAVARELLO FRANCISCATO

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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pelo dom da vida, pelos meus pais Gastão (*i.m.*) e Maria, meus irmãos André e Ricardo, minha esposa Juliana, meu filho Bruno, ao Edison e a Márcia; ao Felipe, Simoni, Livia e Davi, e demais familiares.

À professora Maria Célia de Oliveira pela orientação, compreensão e incentivo dispensado ao desenvolvimento deste trabalho

Ao professor André Luis Helleno pelo apoio técnico, incentivo e amizade.

Ao professor Carlos Roberto Camello Lima pelo apoio técnico e amizade durante o desenvolvimento deste trabalho

Aos técnicos, pelo auxílio no desenvolvimento, projeto e realização dos ensaios, especialmente ao Henrique Gonçalves Moreira, e ao Fernando Raphael Violato Rodrigues Pinto

À minha parceira de pesquisa Flávia de Fátima Meneghel, e as pessoas que participaram desta conquista, Ivan, Bianco, Rafael, Marcos, Bruno, Vanessa, Marcelo, Danilo, Gisele, Reginaldo e amigos.

À CAPES (Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior) pelo apoio financeiro.

“Comece onde estiver, use o que tiver, e faça o que puder”

Arthur Ashe

FRANCISCATO, Lucas Scavariello. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO EIXO ÁRVORE NOS ERROS DE POSICIONAMENTO DE UMA MÁQUINA-FERRAMENTA DE CINCO EIXOS.** 2019. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, SP.

RESUMO

As máquinas-ferramenta, especialmente as de cinco eixos, têm se destacado por sua versatilidade, flexibilidade e aplicação nos mais diversos setores de produção. Contudo, durante o processo de usinagem, podem ocorrer erros que geram impacto negativo no produto, e estes erros podem ser gerados por diversos fatores. Um desses fatores é decorrente da variação térmica do equipamento. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento térmico do eixo árvore no erro de posicionamento de uma máquina-ferramenta de cinco eixos. Desta forma, o presente trabalho buscou identificar os fatores que contribuem para a ocorrência do erro de posicionamento através dos resultados obtidos. Para isso esta pesquisa apresenta, como método, a pesquisa explicativa, no qual foram elaborados testes em uma máquina-ferramenta de cinco eixos. A análise considerou os dados obtidos pelos termopares, distribuídos ao longo da estrutura da máquina-ferramenta, bem como os deslocamentos, erros, do eixo árvore ao longo da rotina de testes. As conclusões deste trabalho foram que há erros de posicionamento do eixo árvore de $-7 \mu\text{m}$, e ainda, que a máquina-ferramenta apresentou uma estabilização térmica, mesmo com o aumento da temperatura coletada pelos termopares não houve interferência de maneira a aumentar o erro da máquina-ferramenta.

PALAVRAS CHAVE: máquina-ferramenta de 5 eixos, eixo árvore, comportamento térmico, erro de posicionamento

FRANCISCATO, Lucas Scavariello. **ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE THERMAL BEHAVIOR OF THE SPINDLE IN THE ERRORS OF POSITIONING OF THE FIVE-AXIS MACHINE-TOOL**. 2019. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, SP.

ABSTRACT

Machine tools, especially five-axis machines, have been highlighted by their versatility, flexibility and application in various production sectors. However, during the machining process, errors can occur that generate negative impact on the product, and these errors can be generated by factors. One of these factors is due to the thermal variation of the equipment. Thus, the objective of this work is to analyze the thermal behavior of the spindle, as a positioning error of a five-axis machine-tool. In this way, the present work sought to identify the factors that contribute to the occurrence of the positioning error through the obtained results. For this, this research presents, as a method, the explanatory research, in which tests were developed in a five-axis machine-tool. The analysis considered the data obtained by the thermocouples, distributed along the machine tool structure, as well as the displacements, errors, of the spindle throughout the routine of tests. The conclusions of the work were that there are errors of positioning of the axle of $-7\ \mu\text{m}$, and also, that the machine-tool presented a thermal stabilization, even with the increase of the temperature collected by the thermocouples, there was no interference in order to increase the error of the machine tools.

KEYWORDS: Five-axis Machine-tool, Spindle, Thermal Behavior, Positioning Errors.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------|
| RESUMO | V |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS..... | VIII |
| LISTA DE FIGURAS..... | IX |
| LISTA DE QUADROS | XI |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 OBJETIVO GERAL..... | 4 |
| 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO | 4 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 6 |
| 2.1 MÁQUINAS-FERRAMENTA DE CINCO EIXOS | 6 |
| 2.2 TIPOS DE ERROS EM MÁQUINAS-FERRAMENTAS..... | 14 |
| 2.2.1 ERROS GEOMÉTRICOS E CINEMÁTICOS EM MÁQUINAS-FERRAMENTA | 15 |
| 2.2.2 ERROS TÉRMICOS EM MÁQUINAS-FERRAMENTA..... | 25 |
| 2.2.3 MODELO DE ANÁLISE DO ERRO TÉRMICO | 32 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODO | 35 |
| 3.1 MATERIAIS..... | 36 |
| 3.2 MÉTODO DE PESQUISA..... | 39 |
| 3.3 PREPARAÇÃO DO EXPERIMENTO | 42 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 46 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 55 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 57 |
| ANEXO A – PROGRAMA CNC UTILIZADO NO EXPERIMENTO | 62 |
| ANEXO B – DIAGRAMAÇÃO DO LABVIEW | 66 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MF- Máquinas-ferramenta.

FEM- Finite element method.

PDGEs- Position-Dependent Geometric Errors.

PIGEs- Position-independent geometric errors.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Máquina-ferramenta de cinco eixos | 8 |
| Figura 2: MF de cinco eixos com A e B rotativos na mesa | 10 |
| Figura 3: MF de cinco eixos com B rotativo na mesa..... | 11 |
| Figura 4: MF de cinco eixos B e C rotativos na mesa | 11 |
| Figura 5: MF de cinco eixos com C e A rotativos na mesa | 12 |
| Figura 6: Eixos rotativos de uma MF (A, B e C)..... | 12 |
| Figura 7: Subdivisão dos erros de uma MF | 14 |
| Figura 8: Tipos de erros geométricos em peças usinadas..... | 17 |
| Figura 9: Pirâmide escalonada..... | 18 |
| Figura 10: Sistema de medição com cinco graus de liberdade | 20 |
| Figura 11: Posição da ponta da ferramenta no sistema de medição | 20 |
| Figura 12: Novo sistema para medir com 5 graus de liberdade | 21 |
| Figura 13: Fixação da peça e cavidades..... | 22 |
| Figura 14: Peça padrão com alojamento usinado | 23 |
| Figura 15: Tronco cônico | 24 |
| Figura 16: Diagrama dos efeitos dos efeitos térmicos em uma MF | 26 |
| Figura 17: Fontes de erro de uma MF..... | 27 |
| Figura 18: Simulação térmica de uma MF | 30 |
| Figura 19: Distribuição dos termopares em uma MF | 31 |
| Figura 20: Canais de refrigeração adicionais (A, B, C e D)..... | 32 |
| Figura 21: Tipos de erros térmicos causados pelo eixo árvore | 33 |
| Figura 22: Resultante do erro térmico na ferramenta de corte..... | 33 |
| Figura 23: Posicionamento dos termopares e dos sensores em uma MF | 34 |
| Figura 24: Classificação da Pesquisa | 35 |
| Figura 25: Máquina-ferramenta ROMI DCM 620-5X..... | 36 |
| Figura 26: Especificações técnicas da MF DCM 650-5X | 37 |
| Figura 27: Haste montada no porta-ferramentas | 38 |
| Figura 28: Configuração dos relógios comparadores..... | 38 |
| Figura 29: Etapas do experimento | 39 |
| Figura 30: Fluxograma dos testes..... | 40 |
| Figura 31: Posicionamento dos termopares na MF..... | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 32: Posicionamento dos termopares e relógios comparadores da MF . | 43 |
| Figura 33: Instrumentalização da MF e sistema de coleta de dados | 43 |
| Figura 34: Gatilho para o sistema de coleta de dados (input para o Labview) | 44 |
| Figura 35: Imagem dos dados do Labview como html | 45 |
| Figura 36: Posicionamento da haste durante o giro do eixo árvore | 45 |
| Figura 37: Dados d o teste inicial | 46 |
| Figura 38: Inclinação/ deformação da haste da MF | 47 |
| Figura 39: Dados do teste 1 | 48 |
| Figura 40: Dados do teste 2 | 49 |
| Figura 41: Dados do teste 3 | 50 |
| Figura 42: Dados do relógio 1 (superior)..... | 52 |
| Figura 43: Dados do relógio 2 (inferior)..... | 52 |
| Figura 44: Sistema de refrigeração do cabeçote..... | 53 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Dados compilados dos testes 1, 2 e 3..... | 47 |
|--|----|

1 INTRODUÇÃO

O mercado competitivo e globalizado conta com um consumidor cada vez mais exigente por produtos com melhor qualidade. Desta forma, para que as empresas se mantenham competitivas, a busca por melhorias em seus processos de fabricação torna-se uma rotina e parte da evolução contínua da empresa.

Neste sentido, para Camacho (2015), as empresas promovem uma busca pela eficiência nos processos de manufatura, visando a ganhos de produtividade, competitividade e de desempenho, por meio de atividades de melhoria contínua nos processos de manufatura.

Com um importante papel no desenvolvimento do setor industrial brasileiro, principalmente nos processos de manufatura, as máquinas-ferramenta são equipamentos que promovem mais agilidade e eficiência aos processos manufatureiros (ABIMAQ, 2006).

Sendo assim, as máquinas-ferramenta têm um papel importante no desenvolvimento industrial nacional e fazem parte de um segmento estratégico da indústria, sendo o país um fabricante destes equipamentos o que promove uma evolução tecnológica (FERRARI, 2017).

Segundo She e Chang (2007), entre todos os processos de manufatura, os processos de usinagem destacam-se por atender a demanda com rapidez e qualidade. Ainda, para os autores, o processo de usinagem em máquinas-ferramenta de cinco eixos é utilizado devido, também, a sua grande versatilidade.

As máquinas-ferramenta (MF) têm sido cada vez mais utilizadas em processos de fabricação de vários produtos, dos mais variados setores, como, por exemplo, aeroespacial, automobilístico, produtos de consumo, fabricação de matrizes e moldes (LASEMI; XUE; GU, 2016).

Contudo, durante o processo de usinagem, podem ocorrer erros que geram impacto negativo no produto e, estes erros podem ser gerados por diversos fatores (NASCIMENTO, 2015). Dentre estes fatores, existem três com maior influência sobre a precisão de trabalho de uma máquina-ferramenta: comportamento estático, dinâmico e termo dependente.

Segundo Schwenke *et al.* (2008), estes fatores ainda podem ser classificados como fatores internos e fatores externos à máquina, como, por exemplo, motores elétricos, rolamentos, atrito, temperatura ambiente, que geram os erros geométricos, erros térmicos, cargas estáticas e forças dinâmicas.

A literatura apresenta diversos estudos que tratam os erros decorrentes de cada um destes fatores. Dentre estes estudos destacam-se aqui os trabalhos de Schwenke *et al.* (2008), Weck *et al.* (1995), Bryan (1990). O estudo apresentado por Bryan (1990), é um dos mais importantes nesta área pois, o autor apresenta o diagrama dos efeitos térmicos em uma MF, sendo esta a base para todas as pesquisas posteriores, como, por exemplo, Schwenke *et al.* (2008), e Weck *et al.* (1995), que apresentam seus trabalhos sobre os erros geométricos, ou erros de posicionamento.

Estes erros de posicionamento podem ser classificados como geométricos e térmicos. Os erros geométricos são os que mais contribuem para os erros volumétricos de uma MF e resultam em peças com geometria imprecisa. Esses erros podem ser gerados por um desalinhamento do eixo, pela falha na fabricação e construção dos componentes da MF ou ainda na montagem do equipamento (SCHWENKE *et al.*, 2008).

Os erros causados por fatores térmicos também podem ter efeitos na precisão da MF. Estes erros podem ser oriundos da deformação térmica dos elementos de uma MF causada por fontes de calor, provenientes das estruturas das máquinas (rolamentos, eixos, motores, atrito entre superfícies etc.). Podem também serem causados por mudança de temperatura do ambiente. Esses erros podem representar 50 a 70% do total de erros de posicionamento de uma MF

(ABDULSHAHED *et al.*, 2016). Bryan (1990) afirma que mais de 50% dos erros de uma MF são causados por fatores térmicos.

Autores como Brecher e Wissman (2011) e, Chen e Chang (2016), também afirmam que a variação térmica de uma MF é uma das principais causas dos problemas relacionados com a precisão dos equipamentos de usinagem. Ainda segundo os autores, os erros causados por variações térmicas têm interferência com a deformação e o deslocamento do equipamento, podendo ser causa de problemas de qualidade nas peças usinadas, e podem estar associadas ao projeto do equipamento e/ou as características térmicas do material com que foi construído.

Assim, a precisão de uma MF pode ser afetada por duas fontes de calor: internas e externas, e estas estão associadas em função da variação da temperatura do ambiente em que a MF está instalada. Esta variação de temperatura pode ser proveniente da exposição do equipamento no chão de fábrica. A variação da temperatura no local da manufatura apresenta resultados diferentes durante o dia e durante a noite, e nas transições de estações climáticas (ZHANG; GAO; YAN, 2017).

Além disso, há diversos parâmetros utilizados durante o processo de usinagem, entre eles, destacam-se a velocidade de corte e o avanço. Estes parâmetros variam de acordo com o material que será usinado e a ferramenta utilizada, e para isso, é necessário que o eixo árvore da MF atinja altas velocidades. Desta forma, o conjunto motriz da MF são eficazes para atingir as velocidades necessárias, mas, podem ser as principais fontes geradoras de calor no eixo árvore de uma MF, e este, pode causar erros nas máquinas (KIM; JEONG; CHO, 2004).

Para Kong (2016), a influência térmica no eixo árvore durante as operações de usinagem requer um estudo para a análise de sua influência no produto ou no processo de usinagem, referente às características térmicas. Ainda segundo o autor, os diversos parâmetros, que compõe o processo de usinagem, como por exemplo: velocidade de corte, força de corte, profundidade de corte, entre outros,

estão, de alguma maneira, associados com o eixo árvore do equipamento dependendo da configuração da MF.

Assim como para Dong, Zhou e Liu (2017) e, Brecher e Wissman (2011), um dos elementos centrais de uma MF é o eixo árvore, a qual está suscetível às variações térmicas, devido aos elementos girantes, e relacionadas as características de funcionamento do equipamento bem como por suas características construtivas e as configurações da MF, como, por exemplo, pelos elementos girantes.

Portanto, entender o comportamento térmico do eixo árvore de uma MF de cinco eixos é importante para os usuários e fabricantes do equipamento.

Assim, a questão de pesquisa deste estudo foi definida da seguinte forma: Qual a influência do comportamento térmico no eixo árvore nos erros de posicionamento de uma máquina-ferramenta de cinco eixos?

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento térmico do eixo árvore no erro de posicionamento de uma máquina-ferramenta de cinco eixos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação de mestrado é composta de 5 capítulos. O Capítulo 1 contém uma introdução com o contexto atual dos erros de uma MF, a justificativa e objetivo da pesquisa.

O Capítulo 2 é composto por uma revisão da literatura com os temas: máquinas-ferramentas de cinco eixos, tipos de erros em máquinas-ferramenta, fatores que influenciam em cada um dos tipos de erros, erros geométricos e cinemáticos,

erros térmicos em máquinas-ferramenta e, um modelo de análise do erro térmico.

Os materiais e o método de pesquisa utilizado para o desenvolvimento do experimento, a classificação da pesquisa quanto a sua natureza aplicada, ao seu objetivo exploratório, sua abordagem quantitativa, seu método explicativo, assim como a preparação para o experimento, são apresentados no Capítulo 3.

Os resultados de cada um dos experimentos e as discussões de cada um dos resultados obtidos, bem como a explicação da análise de cada um dos resultados, a interpretação e explicação de como foram analisados os resultados, todos os resultados apresentados de forma gráfica, e uma tabela com o resumo dos principais resultados, compõe o Capítulo 4.

Por fim, uma conclusão é realizada no Capítulo 5, no qual a questão da pesquisa e o objetivo da pesquisa são respondidos, assim como as justificativas para as conclusões, também são apresentadas as dificuldades encontradas e as sugestões para trabalhos futuros, e então, são apresentadas as referências bibliográficas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo é apresentada uma revisão da literatura sobre os principais conhecimentos para a realização desse trabalho, assim como a sua inserção e sua diferença dos trabalhos já existentes na área.

No presente trabalho, o referencial teórico será subdividido em quatro partes: máquina-ferramenta de cinco eixos, onde serão apresentadas as partes e sistemas que compõe este equipamento; os tipos de erros da MF: os erros geométricos e os erros térmicos em MF.

2.1 MÁQUINAS-FERRAMENTA DE CINCO EIXOS

As Máquinas-ferramentas de cinco eixos tornaram-se bastante utilizadas nas indústrias de manufatura. Isso deve-se ao fato de que as MF proporcionam aos processos de usinagem uma grande versatilidade, também devido à alta qualidade associada as peças com geometrias complexas e devido as tolerâncias exigidas das peças cada vez menores (BOHEZ, 2002).

Segundo Vichare, Nassehi e Newman (2010), os processos de usinagem em máquinas-ferramentas de cinco eixos CNC é o resultado da aplicação das capacidades integradas de vários recursos, em um único sistema.

Por isso, segundo Sibul *et al.* (2015), o avanço das tecnologias empregadas as MF possibilitou ainda um aumento na flexibilidade desses equipamentos, elevando o grau de qualidade de seus produtos e processos, aumentando a exatidão do posicionamento da ferramenta, melhorando a repetibilidade, e ainda, alta produtividade para realização das operações com o mínimo de intervenção humana.

Segundo Ferrari (2016), o mercado irá demandar MF com diferentes demandas e conceitos construtivos, e ainda, adaptações e integração as tecnologias disponíveis, além de configurações para os mais diversos usos.

Segundo Bohez (2002), podemos afirmar que, entre as principais características de uma MF, destacam-se também a orientação e o posicionamento com grande precisão da ferramenta. Esta nomenclatura “5 eixos” faz menção ao número de direções em que a ferramenta de corte pode mover-se durante o processo de usinagem. Ainda segundo Bohez (2002), as principais especificações construtivas de uma MF podem ser identificadas como:

- O movimento do equipamento deve fornecer a flexibilidade suficiente na orientação e posição da ferramenta;
- Orientação e posicionamento com a maior velocidade possível;
- Orientação e posicionamento com a maior precisão possível;
- Troca rápida de ferramentas e peças/ produto;
- Economia para o meio ambiente;
- Maior taxa de remoção de material possível.

A flexibilidade em uma MF é caracterizada porque há várias configurações possíveis, sendo que, estas configurações definem a sua classificação. Desta forma, as MF são classificadas e caracterizadas pela quantidade de eixos que o equipamento dispõe para a utilização durante o processo de usinagem (TSUTSUMI; SAITO, 2004). Utilizando-se do sistema de coordenadas obedecendo ao plano de trabalho, o qual corresponde a dois eixos lineares de deslocamento e um eixo paralelo à ferramenta de corte. Desta forma, os eixos

cartesianos X, Y e Z, são também, os eixos utilizados nas MF (TSUTSUMI; SAITO, 2004).

Para aumentar a flexibilidade de uma MF, nas possíveis orientações da peça/ produto, sem necessidade de trocas e novos posicionamentos, são utilizados eixos adicionais. A Figura 1 apresenta além dos eixos convencionais X, Y e Z, ainda dois eixos rotativos B e C.

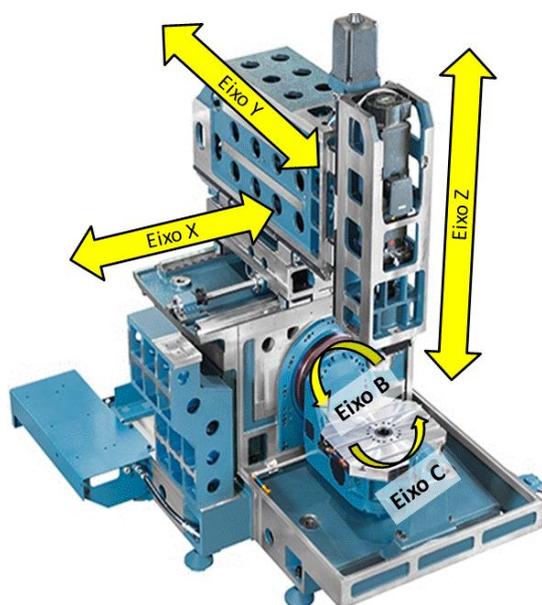


FIGURA 1: MÁQUINA-FERRAMENTA DE CINCO EIXOS

FONTE: ROMI (2015)

Desta forma, como observado da Figura 1, a MF conta com cinco eixos. Para cada um dos eixos de uma MF está associado um grau de liberdade. Assim, em uma MF de cinco eixos, com cinco graus de liberdade, é possível manter sempre um melhor posicionamento do centro da ferramenta de corte com a peça/ produto que está sendo usinado (BOHEZ, 2002).

Por esta razão, durante o processo de usinagem, esta flexibilidade, os graus de liberdade, de uma MF de cinco eixos permite um posicionamento perpendicular,

entre a ferramenta de corte e a peça que está sendo usinada, de modo a otimizar o processo de fabricação mesmo quando houver geometrias consideradas complexas (ENDL; JAJE, 2012).

Os processos de usinagem considerados de difícil acesso, como, por exemplo, cavidades profundas onde os eixos cartesianos e rotacionais podem ser combinados para melhorar o acesso da ferramenta de corte (ENDL; JAJE, 2012). Os graus de liberdade de uma MF são determinados, entre outros motivos, pelo projeto do equipamento e com base nos investimentos aplicados a ele, o tipo de peças que serão fabricados e as configurações do equipamento (HONG; IBARAKI; MATSUBARA, 2011).

Para Bohez (2002), as configurações das MF seguem algumas características de nomenclatura dos eixos. Para os eixos que fazem movimentos rotativos, é atribuída a letra R, enquanto para os eixos de translação, é atribuída a letra T. Desta forma as MF podem ser agrupadas em quatro grupos principais:

- Grupo 1: três eixos do tipo T e dois eixos do tipo R;
- Grupo 2: dois eixos do tipo T, e três eixos do tipo R;
- Grupo 3: um eixo do tipo T, e quatro eixos do tipo R;
- Grupo 4: cinco eixos do tipo R.

Ainda segundo Bohez (2002), estes grupos de MF, aplicam-se de acordo com a necessidade e complexidade das peças a serem fabricadas. Exemplos de aplicações das MF de cinco eixos de alguns grupos são: no grupo 2 são geralmente utilizados para a usinagem de hélices de navios. Já os grupos 3 e 4 podem ser utilizados para o design de robôs geralmente com mais graus de liberdade adicionados. Os cinco eixos podem ser distribuídos entre a peça de trabalho ou a ferramenta em várias combinações. Os cinco graus de liberdade

em uma MF baseada em coordenadas cartesianas são: três movimentos translação X, Y, Z, neste caso seriam representados como TTT, e dois movimentos adicionais rotativos, representados como RR, que podem ser AB, AC ou ainda BC. Combinações de três eixos rotativos (RRR) e dois eixos lineares (TT) são raros.

Para Tsutsumi e Saito (2004), as MF de cinco são geralmente classificadas em três categorias de acordo com suas configurações estruturais, embora existam algumas máquinas com configurações especiais. O primeiro tipo é chamado de cabeçote universal, com dois eixos rotativos, e este tipo é frequentemente aplicado à fabricação de peças ou matrizes aeronáuticas. O segundo é um tipo de mesa rotativa basculante com dois eixos rotativos, que é adequado para a usinagem de pequenos componentes precisos. O terceiro é um tipo de mistura com um cabeça giratória e uma mesa rotativa.

As Figuras 2 e 3, representam duas MF de cinco eixos. Em ambas as aplicações tem-se três eixos tipo T, que são X, Y e Z, e dois eixos do tipo R, A e B. Observa-se também que, a diferença entre as duas aplicações está nos eixos que estão associados à mesa de trabalho e os eixos que estão associados à ferramenta de corte. Na Figura 2, A e B estão na mesa de trabalho, enquanto na Figura 3, B está na mesa de trabalho e A está na ferramenta de corte (BOHEZ, 2002).

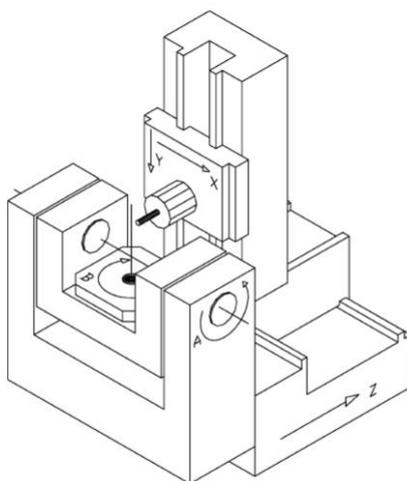


FIGURA 2: MF DE CINCO EIXOS COM A E B ROTATIVOS NA MESA

FONTE: ADAPTADO DE BOHEZ (2002).

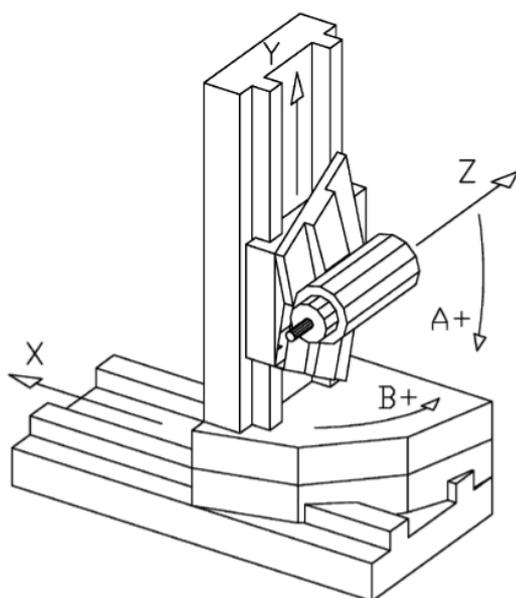


FIGURA 3: MF DE CINCO EIXOS COM B ROTATIVO NA MESA

FONTE: ADAPTADO DE BOHEZ (2002).

A figura 3 apresenta uma outra configuração, com os eixos B e C localizados na mesa de trabalho. E na Figura 4 uma configuração em que C e A estão localizados na mesa de trabalho (BOHEZ, 2002).

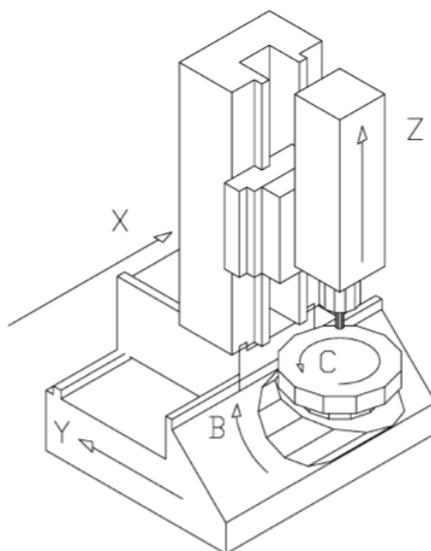


FIGURA 4: MF DE CINCO EIXOS B E C ROTATIVOS NA MESA

FONTE: ADAPTADO DE BOHEZ (2002)

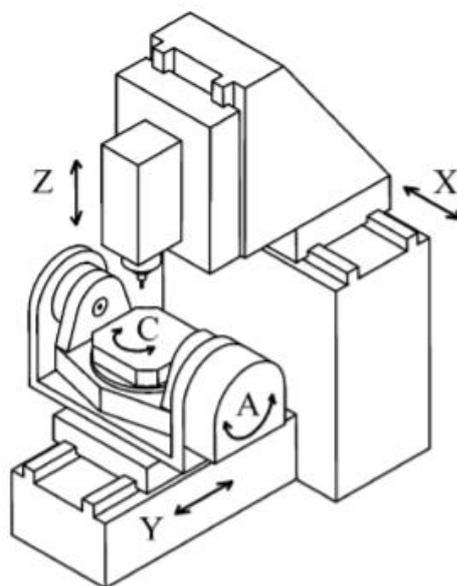


FIGURA 5: MF DE CINCO EIXOS COM C E A ROTATIVOS NA MESA

FONTE: ADAPTADO DE TSUTSUMI E SAITO (2004)

Desta forma, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os eixos cartesianos (X, Y e Z) e os eixos rotacionais (A, B e C), com todas as possíveis variações, em cada um dos eixos cartesianos. O número de eixos de uma MF além de fazer referência ao número de graus de liberdade, também apresenta o número de movimentos independentes controlados nos barramentos das máquinas durante o processo de usinagem (TSUTSUMI; SAITO, 2004).

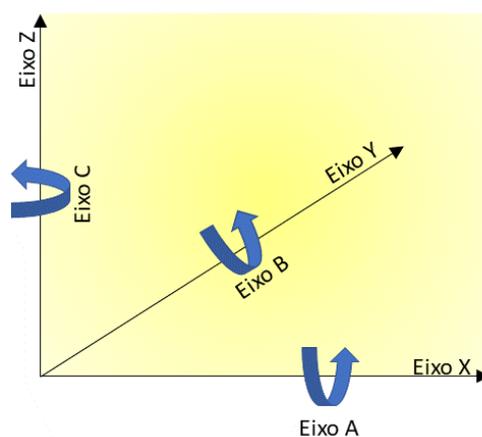


FIGURA 6: EIXOS ROTATIVOS DE UMA MF (A, B E C)

Segundo Tsutsumi e Saito (2004), como apresentado na Figura 6, para cada um dos eixos lineares, podem ser conferidos eixos rotacionais, de acordo com a necessidade e aplicação dos consumidores de uma MF.

No entanto, segundo Hong, Ibaraki e Matsubara (2010), os cinco eixos de uma MF, principalmente os eixos de movimento síncronos, podem conferir ao equipamento um acúmulo de erros, e a precisão geral do movimento da MF pode ser significativamente reduzida.

Da mesma forma, as estruturas complexas de uma MF, e principalmente os eixos rotativos podem ter numerosos desvios de posicionamento, o que pode comprometer a qualidade do produto ou do serviço, devido aos desvios da posição da ponta da ferramenta de corte com relação a peça. Estes erros podem ser originados desde a fabricação das peças e componentes que compõe uma MF, até mesmo de erros ocasionados durante a montagem do equipamento ((RAHMAN; HEIKKALA; LAPPALAINEN, 1999) (TSUTSUMI; SAITO, 2004)).

Além disso, durante o processo de usinagem em uma MF, há diversos parâmetros, como por exemplo, velocidade de corte, velocidade de giro, avanço, entre outros, que devem ser definidos. A maioria destes parâmetros está relacionado ao eixo árvore da máquina-ferramenta. Ainda devem ser considerados a força de corte e o atrito entre a ferramenta de corte e a peça. Nos processos de usinagem os sistemas e partes de uma MF geram calor e podem ocorrer em erros ((BRYAN, 1990), (WECK *et al.*, 1995)).

Desta forma, em uma MF, o seu uso contínuo pode causar a geração de calor de todos os elementos, isso pode provocar a expansão térmica dos vários elementos estruturais da MF. É esta expansão das articulações estruturais da MF que leva à imprecisão, e erros, no posicionamento da ferramenta de corte com relação à peça. Estes erros são chamados de erros térmicos e constituem uma parte significativa do total de erro de uma MF (ZHU *et al.*, 2015).

Assim, o erro total de uma MF não depende apenas de erros devido a montagem, a usinagem dos componentes, ou a estrutura cinemática da MF, mas também

da temperatura. Por isso, os fabricantes buscam, além de melhorar a eficiência da MF, tonar os equipamentos com maior velocidade, e aumentar sua precisão, buscam também maneiras de entender e aprimorar seus equipamentos quanto aos tipos de erros de uma MF (ZHU *et al.*, 2015).

2.2 TIPOS DE ERROS EM MÁQUINAS-FERRAMENTAS

Os erros em uma MF podem causar deformações geométricas nos componentes da MF, em sua estrutura, bem como mudanças das condições de operação do equipamento (JIANG, 2014). Por causa desses erros, a precisão da MF é afetada, uma vez que a posição e a orientação da ferramenta em relação à peça/ produto desviam-se de seus estados ideais. Os erros de uma MF podem ser classificados como erros estáticos (ou quase estáticos) e erros dinâmicos.

Os erros dinâmicos podem ser causados pela força de corte da ferramenta e erros de *software* de controle e movimento. Os erros estáticos podem ser ocasionados pelos erros geométricos e cinemáticos, ou ainda pelos erros térmicos (JIANG, 2014), como esquematizado na Figura 7.

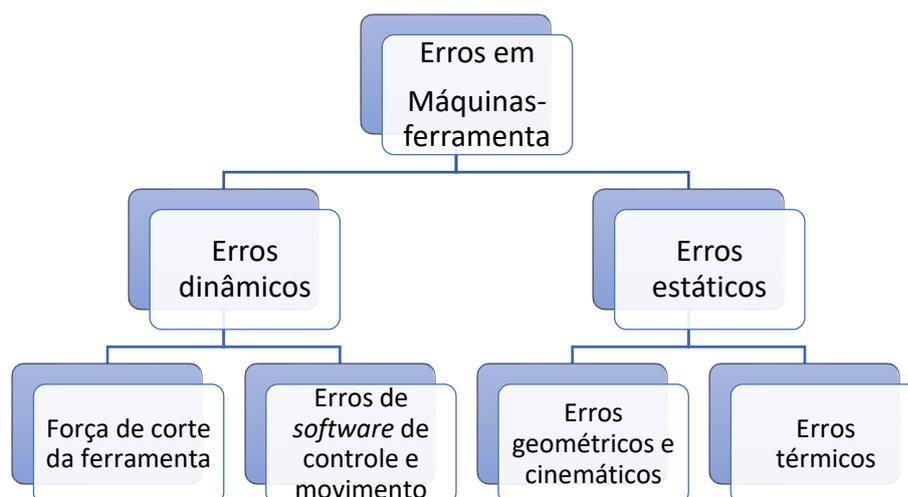


FIGURA 7: SUBDIVISÃO DOS ERROS DE UMA MF

FONTE: ADAPTADO DE JIANG (2014)

Como apresentado na Figura 7, os erros de uma MF podem ser divididos em dinâmicos e estáticos. Os erros dinâmicos, são oriundos da força de corte da ferramenta, e também, erro dinâmico. Já os erros estáticos, tem origem nos erros geométricos e cinemáticos, e também, nos erros térmicos (JIANG, 2014).

A seguir, serão apresentados os erros estáticos, ou seja, os erros geométricos e cinemáticos, e em seguida, os erros térmicos em uma MF, sendo este último, a proposta do experimento desta pesquisa.

2.2.1 Erros Geométricos e cinemáticos em máquinas-ferramenta

Durante a fabricação de todos os componentes e sistemas mecânicos de uma MF podem ocorrer desvios entre as dimensões projetadas, nominais, e as dimensões reais dos componentes. Da mesma forma, podem ocorrer desvios no momento da montagem dos sistemas e partes da MF, e estas variações e desvios são as principais fontes dos erros geométricos e cinemáticos de uma MF (FLORUSSEN, 2002).

Segundo Okafor e Ertekin (2000), os erros geométricos são considerados como erros da máquina, não só dos componentes da MF, mas também podem ocorrer em condições de partida a frio, onde não há acomodação dos componentes. Segundo os autores, as imperfeições mecânicas da estrutura de uma MF, o desalinhamento dos sistemas de movimentação e o desgaste dos componentes causam os erros geométricos ou ainda de sua configuração no sistema de uma MF (DASSANAYAKE *et al.*, 2008; SCHWENKE *et al.*, 2008; SCHELLEKENS *et al.*, 1998).

Segundo Lei e Hsu (2003), 80% de todos erros geométricos estão associados aos eixos rotativos da MF e os restantes 20% estão nos seus eixos lineares. A posição da ponta da ferramenta em um processo de usinagem de uma MF é determinada pelos eixos lineares e de rotação, e há uma relação não linear entre as coordenadas, da peça e as coordenadas da máquina. Estes erros de posicionamento, podem ocasionar erros de geometria do produto final, e podem

ser diretamente relacionados aos sistemas de coordenadas dos eixos do equipamento, que comprometam a precisão geométrica da MF (HSU; WANG, 2007).

A precisão geométrica dos componentes de uma MF é um critério chave no desempenho do equipamento e cada vez mais pesquisas sobre este tema são realizadas a fim de entender o comportamento do equipamento e buscar alternativas para minimizar ou, ainda, solucionar os problemas (SCHWENKE *et al.*, 2008). Os erros geométricos de uma MF passam, inicialmente, pela suposição do comportamento do corpo rígido do equipamento, e cada movimento de um eixo da MF pode ser descrito, por exemplo, por seis graus de liberdade: três translações e três rotações. O erro de localização de um eixo (linear ou rotacional) é definido como um erro da posição nominal e orientação deste eixo no sistema de coordenadas da máquina (SCHWENKE *et al.*, 2008).

Os erros geométricos de uma MF podem, por exemplo, ocasionar erros de posicionamento, erros de perpendicularidade e erros de retilidade do eixo Y (OKAFOR; ERTEKIN, 2000). Estes erros em uma peça podem ser observados na Figura 8.

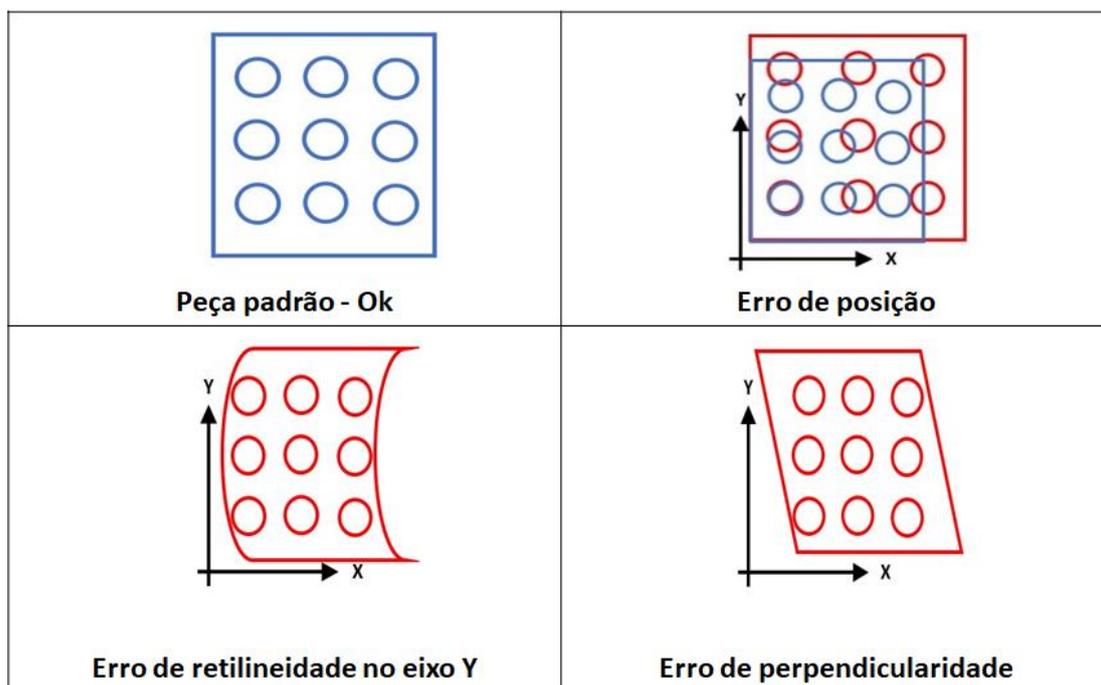


FIGURA 8: TIPOS DE ERROS GEOMÉTRICOS EM PEÇAS USINADAS

FONTE: ADAPTADO DE OKAFORD E ERTEKIN (2000)

Parte dos erros apresentados na Figura 8 são característicos de novos equipamentos, que são observados antes da liberação da MF pelo fabricante, para que a mesma seja utilizada para as atividades nas quais ela foi designada. Cerca de 75% dos erros geométricos de uma MF podem ser gerados nos processos de fabricação de seus componentes e/ou durante a sua montagem (DANIEL; OLSON; SUTHERLAND, 1998).

Os erros geométricos, quando ocorrem durante o processo de usinagem da peça/ produto, podem causar problemas de deslocamento ou de localização da ferramenta, ocasionando problemas dimensionais e de geometria nas peças/ produtos finais de uma MF (ALESSANDRO; GIANNI; ANTONIO, 2015). Para avaliar e corrigir os erros geométricos, os autores propuseram a usinagem de uma peça com uma geometria na qual seria possível observar e medir os erros geométricos provocados no processo de usinagem. Desta maneira, a peça sugerida é composta por uma base quadrada e, um escalonamento gradual nos

seus níveis seguintes, a peça, chamada de pirâmide escalonada, pode ser observada na Figura 9, assim como seus níveis 1, 2, 3 e 4.

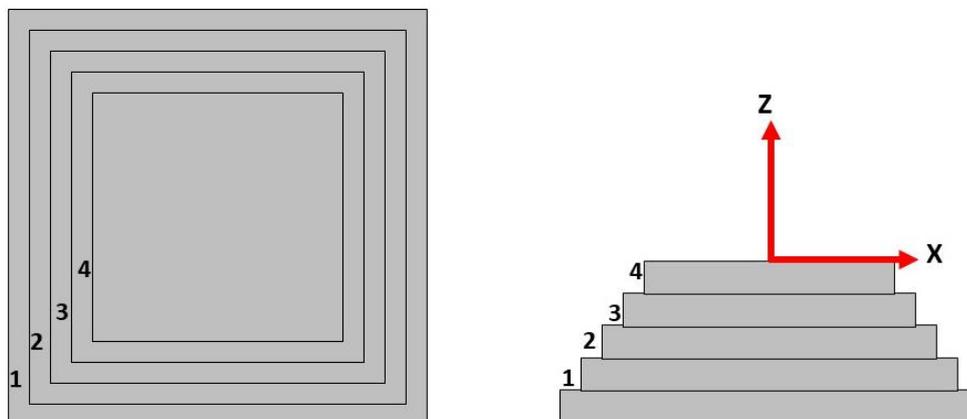


FIGURA 9: PIRÂMIDE ESCALONADA

FONTE: ADAPTADO DE ALESSANDRO, GIANNI, ANTONIO (2015)

Quando a MF possui erros geométricos, os desvios e deslocamentos causados durante o processo de usinagem poderão ser observados na Figura 9, uma vez que, irregularidades na geometria da peça ficarão evidenciadas devido ao escalonamento da pirâmide. Desta forma, os erros podem ser identificados e mensurados para sugerir a correção dos erros geométricos de uma MF. O método proposto apresenta uma comparação entre a peça usinada e o modelo teórico. Os dados coletados das medições da peça usinada são utilizados como dados de entrada em um simulador de usinagem, como por exemplo, o CAM (*Computer Aided Manufacturing*), onde os resultados obtidos servirão como dados de entrada para um novo, ou melhorado, programa que terá todas as características do processo de usinagem incluindo material da peça usinada, ferramentas utilizadas e parâmetros do processo (ALESSANDRO; GIANNI; ANTONIO, 2015).

Segundo Alessandro, Gianni e Antonio (2015), como resultado da simulação, o modelo analítico proposto considerou dois sistemas de coordenadas de referências: o primeiro tem a origem fixada na intersecção entre os eixos B e C

e o segundo com a mesma origem, só que considerando a mesa rotativa basculante. O modelo assume X, Y, Z, B e C como posições lineares e rotativas de seu sistema. O modelo propõe, ainda, para reduzir o número de parâmetros utilizados, uma integração dos parâmetros de usinagem. Os autores ainda propuseram a utilização deste teste de usinagem com uma frequência maior, podendo ser utilizado a cada preparação do equipamento.

Como observado na Figura 9, o estudo apresentou os erros geométricos de uma MF, e estes erros podem diminuir o desempenho do equipamento, uma vez que cada vez mais a MF é amplamente utilizada para fabricar produtos complexos e de alta precisão em sua tolerância (YANG; YUAN; NI, 1996). Neste sentido, os erros geométricos são o principal tipo de erro que interfere na posição relativa e na orientação entre a ferramenta e a peça durante a usinagem (LEE; LEE; YANG, 2013).

Os erros geométricos podem ser categorizados em erros geométricos dependentes da posição (PDGEs) e erros geométricos independentes da posição (PIGEs). Os PDGEs são os erros causados pela imperfeição do componente do próprio eixo linear e são variados de acordo com a posição do comando. Por outro lado, os PIGEs são os erros causados pela imperfeição do conjunto entre os eixos lineares, e permanecem constantes sem qualquer efeito da posição de comando (ZHANG; YANG; ZHANG, 2013). Em uma MF de três eixos, por exemplo, são conhecidos 21 erros geométricos, sendo 18 do PDGEs e 3 do PIGEs. Para cada tipo de erro geométrico, dependente ou independente, são apresentadas propostas para medir, minimizar ou eliminar seus efeitos no equipamento.

Lee, Lee e Yang (2013) propõem um sistema de medição de cinco graus de liberdade. Este sistema, como apresentado na Figura 10, consiste de um espelho de referência tipo L e cinco sensores capacitivos (S1, S2, S3, S4 e S5), onde a ferramenta de usinagem é posicionada de maneira que os sensores façam a leitura da sua posição.

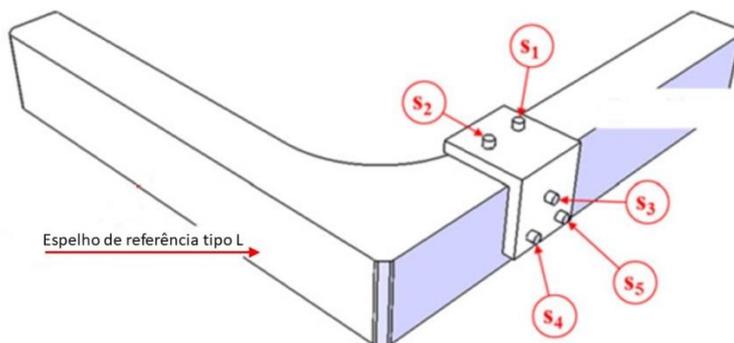


FIGURA 10: SISTEMA DE MEDIÇÃO COM CINCO GRAUS DE LIBERDADE

FONTE: ADAPTADO DE LEE, LEE E YANG (2013)

No sistema apresentado na Figura 10, a ponta da ferramenta de corte entra no sistema e sua posição real é confrontada com a posição teórica, como observado na Figura 11.

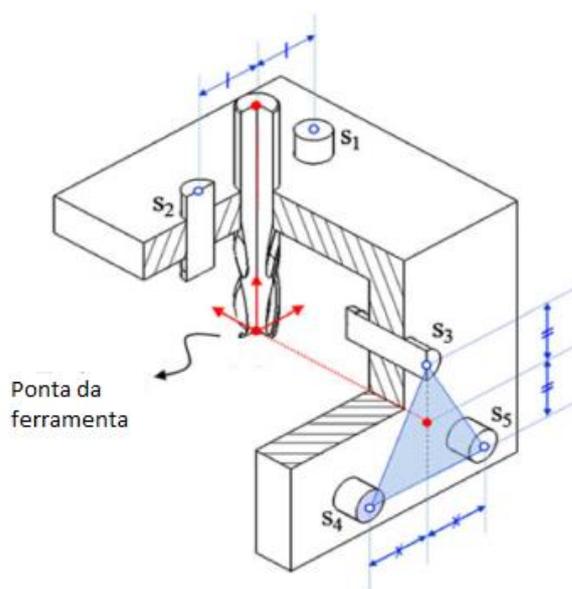


FIGURA 11: POSIÇÃO DA PONTA DA FERRAMENTA NO SISTEMA DE MEDIÇÃO

FONTE: ADAPTADO DE LEE, LEE E YANG (2013)

Desta forma, foi possível verificar o posicionamento real da ponta da ferramenta, principalmente com relação aos eixos lineares. Ainda segundo Lee, Lee e Yang

(2013), com o sistema de medição com cinco graus de liberdade foi possível medir onze erros lineares X e Y, sendo que, estes eixos lineares somam 18 erros.

Ainda Lee, Lee e Yang (2016), apresentam uma proposta melhorada do sistema anterior. O novo sistema híbrido, também com cinco graus de liberdade e um interferômetro a laser, foi capaz de medir os 18 erros geométricos do tipo PDGEs de uma MF dos eixos X, Y e Z. Contudo, o atual sistema possui possibilidades de posicionamento do espelho de referência que não era possível anteriormente, como apresentado na Figura 12.

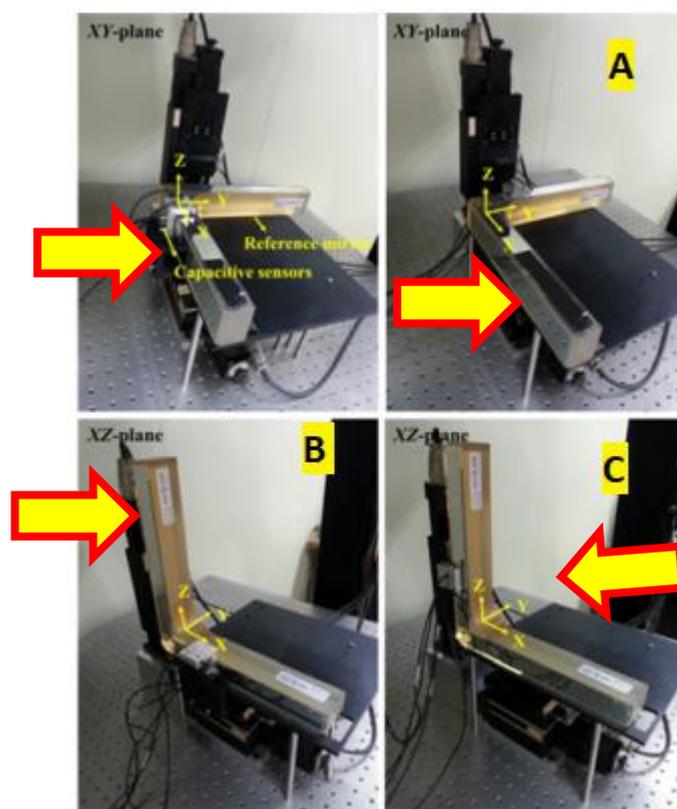


FIGURA 12: NOVO SISTEMA PARA MEDIR COM 5 GRAUS DE LIBERDADE

FONTE: ADAPTADO DE LEE, LEE E YANG (2016)

Como observado na Figura 12, o novo sistema conta com novos posicionamentos. O novo sistema conta com dois posicionamentos possíveis A, B e C, que são X e Y, e X e Z. No sistema proposto em 2013 havia apenas a posição A, onde as medições eram possíveis nos eixos X e Y. Desta forma, os

erros de deslocamento linear que afetam os deslocamentos foram calculados para definir em um único sistema de coordenadas.

Segundo Givi e Mayer (2014), os erros geométricos podem ser observados por meio de diversas características na peça, como, por exemplo, na profundidade durante o processo de usinagem. Os autores avaliaram os erros geométricos principalmente na profundidade durante o processo de usinagem, por meio de uma peça padrão. Esta peça é afixada na mesa rotativa da MF, em seguida as cavidades são usinadas em duas etapas.

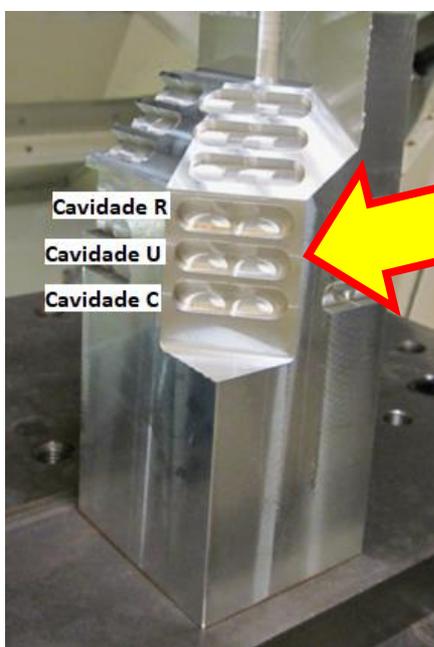


FIGURA 13: FIXAÇÃO DA PEÇA E CAVIDADES

FONTE: ADAPTADO DE GIVI, MAYER (2014)

A Figura 13 apresenta a fixação da peça na mesa da MF e suas cavidades. No teste proposto por Givi e Mayer (2014), as cavidades são usinadas em duas etapas. Cada etapa, usina metade da cavidade em uma posição; em seguida, a peça em uma outra posição tem sua outra metade usinada. A peça mostrou uma incompatibilidade entre as superfícies usinadas. A Figura 14 apresenta as faces usinadas da peça com os alojamentos usinados.

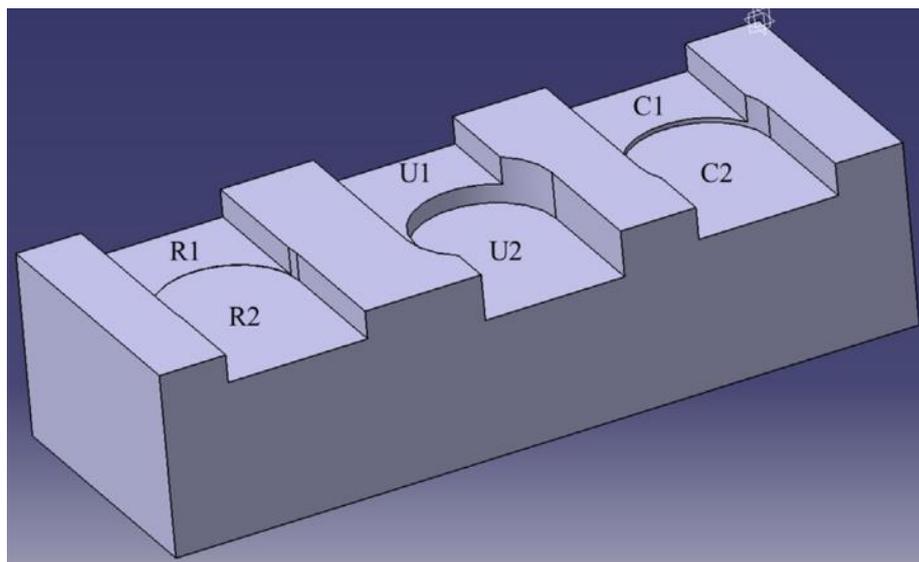


FIGURA 14: PEÇA PADRÃO COM ALOJAMENTO USINADO

FONTE: GIVI E MAYER (2014)

A Figura 154 apresenta três informações distintas, R1 e R2 são as faces de referência, usinadas em etapa única, na mesma posição. As faces U1 e U2 foram usinadas com distintos pontos de referência (posição), e observa-se um erro de concordância entre as metades da cavidade. Em seguida, as cavidades C1 e C2 foram usinadas após a aplicação de um modelo de matriz Jacobiana e derivadas direcionais. As cavidades C1 e C2, mesmo usinadas em partes e em posições diferentes, apresentaram uma redução no erro de concordância.

Outros autores avaliaram os erros geométricos das MF utilizando outras características. Por exemplo, Uddin *et al.* (2009) avaliaram os erros geométricos de uma MF pela circularidade e a concentricidade das peças usinadas. Os autores utilizaram, como peça padrão, o tronco cônico (*cone frustum*), Figura 15. Esta peça cônica foi a escolhida pelos autores pois, seria possível medir a concentricidades entre a base do cone e a parte superior do cone. Além disso, seria possível avaliar e medir a circularidade dos dois diâmetros, superior e inferior, também medir a inclinação ao longo de todo o perfil da peça.

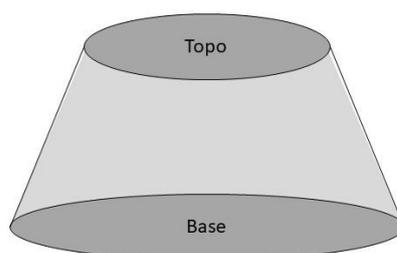


FIGURA 15: TRONCO CÔNICO

FONTE: ADAPTADO DE UDDIN ET AL. (2009)

Como proposto pelos autores Uddin *et al.* (2009) e apresentado na Figura 15, a aplicação desta peça segue o padrão/norma NAS 979-1:1969 (*Uniform Cutting Tests*). Os autores utilizaram de um *double ball bar* (DBB) para avaliar e medir o erro da MF. O DBB é utilizado para coleta de dados do desempenho de MF, principalmente em erros volumétricos. Devido a sua rápida verificação, facilidade ao uso e sua precisão é bastante utilizado. Segundo Uddin *et al.* (2009), o equipamento é exposto a simulações de um processo de usinagem, principalmente com características como, interpolações, e tendo o DBB como captador de dados. Em seguida, um modelo analítico para a compensação dos erros foi utilizado, com base nos dados coletados e retroalimentados no programa.

O modelo apresentado por Uddin *et al.* (2009), considera a posição do centro da ferramenta com a posição na trajetória da ferramenta. Assim, a posição do centro da ferramenta e a posição na trajetória da ferramenta compensada. Os dados observados entre a peça usinada e a peça simulada, com os dados obtidos pelo DBB apresentam uma divergência de até $4\mu\text{m}$ na base da peça, de $6,5\mu\text{m}$ no topo da peça, e de $4,5\mu\text{m}$ na concentricidade da peça. Os erros geométricos em MF de cinco eixos analisados pelo tronco cônico são amplamente aplicados na indústria, uma vez que estes equipamentos se caracterizam por sua flexibilidade.

Contudo, não são apenas os erros geométricos e cinemáticos que compõe os erros estáticos em uma MF, segundo Jiang (2014), há também os erros

classificados como erros térmicos, como observado anteriormente na Figura 7, e que serão apresentados a seguir.

2.2.2 Erros térmicos em máquinas-ferramenta

Durante o processo de usinagem, as fontes de calor de uma MF podem transmitir calor, por condução, convecção e/ou radiação. Essa transmissão de calor pode ocorrer pelo meio ambiente, pelos componentes da MF, ou pelo próprio processo de usinagem, e isso pode ocasionar deformações na estrutura do equipamento (BRYAN, 1990). As deformações proporcionam erros de posicionamento dos eixos, da ferramenta ou da peça. Isso pode gerar peças/ produtos com dimensões imprecisas.

Durante o processo de usinagem, os servo-motores são um exemplo de fontes geradoras de calor, assim como os motores, o ambiente, o atrito entre a ferramenta e a peça entre outras. Estas fontes podem causar variações na temperatura dos componentes e estrutura da MF, sendo que qualquer mudança de temperatura na estrutura da MF pode deformar termicamente o equipamento e, com isso, afetar a precisão da operação (ANDERSON,1992).

Dentre todos os erros de uma peça usinada, cerca de 40 a 70% deles podem ser associados aos efeitos da variação da temperatura dos componentes da MF (ABDULSHAHED *et al.* (2016); HOREJS, MARES e NOVOTNY, 2017; BRYAN, 1990).

A variação térmica de uma MF é uma das principais causas dos problemas relacionados com a precisão dos equipamentos. Os erros térmicos têm interferência com a deformação da MF e o deslocamento da ferramenta durante o processo de usinagem, podendo causar problemas de geometria ou dimensional nas peças/ produtos (Bryan, (1990); Anderson, (1992); WECK *et al.*, (2012); Brecher; Wissmann, (2011); Mayr *et al.*, (2012); (CHEN; CHANG, 2016).

Segundo Bryan (1990), as fontes de calor que podem causar os erros térmicos são apresentadas em um diagrama, o qual pode ser observado na Figura 16.

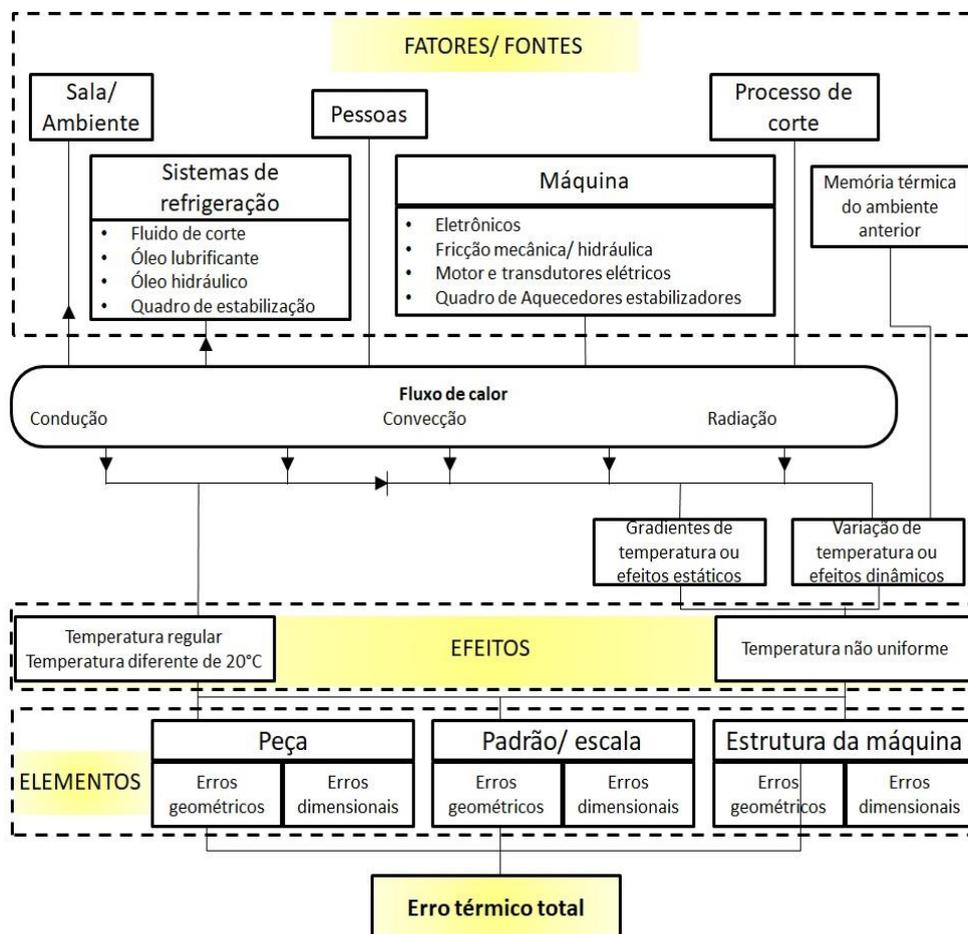


FIGURA 16: DIAGRAMA DOS EFEITOS DOS EFEITOS TÉRMICOS EM UMA MF

FONTE: ADAPTADO DE BRYAN (1990)

Na parte superior da Figura 16, tem-se os fatores ou fontes de calor, ao todo seis fontes de calor: a sala ou ambiente em que a MF está; o sistema de refrigeração onde estão inclusos os óleos lubrificante e hidráulicos e o fluido de corte; as pessoas que estão no ambiente da MF; o próprio sistema da MF incluindo todos os seus equipamentos eletrônicos, motores e transdutores, os sistemas de fricção mecânica e hidráulica; o processo de usinagem; e a memória térmica. Segundo Bryan (1990), estas são as fontes de calor que podem influenciar termicamente a MF, em que o fluxo do calor oriundo destas fontes pode ser

transmitido por meio de condução, convecção e/ou radiação e causar efeitos. Os efeitos podem ser a temperatura regular, na qual não há grande interferência térmica, ou temperatura não uniforme, neste caso a variação térmica pode ter efeitos nos seguintes elementos: a peça ou produto, o padrão ou escala e ainda a estrutura da MF. Por fim, na parte inferior da Figura 16, observar-se o erro térmico, ou, segundo o autor, o erro térmico total, causado pelos fatores ou fontes, com seus efeitos nos elementos da MF.

As fontes de calor que podem causar erros em uma MF, observadas por Bryan, podem ser ainda classificadas como: internas e externas. Segundo Anderson (1992), a precisão da MF pode sofrer com erros: sistemáticos ou aleatórios; e ambos são afetados por fontes internas ou externas, como apresentado na Figura 17.

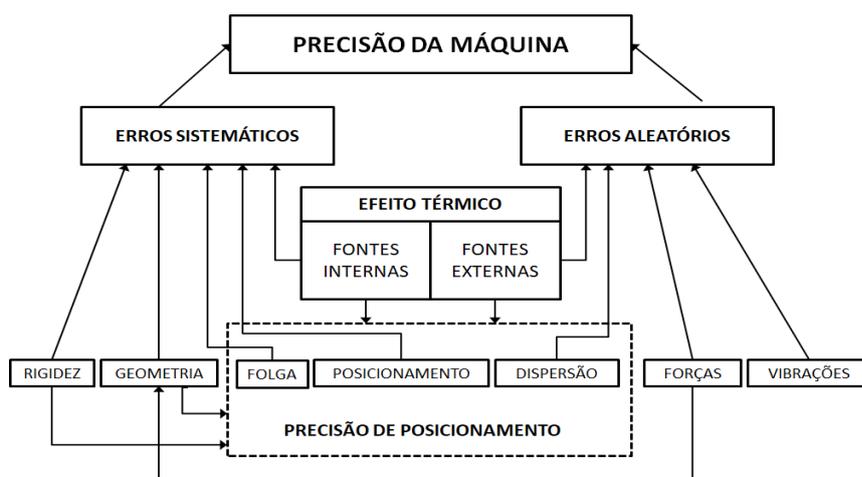


FIGURA 17: FONTES DE ERRO DE UMA MF

FONTE: ADAPTADA DE ANDERSON (1992)

Outros autores também classificam as fontes de calor como internas e externas (ZHANG; GAO; YAN, 2017); BRYAN, 1990; ANDERSON, 1992; WECK *et al.*, 2012). Entre as fontes internas geradoras de calor, destacam-se os motores lineares, atrito entre os componentes durante o processo de corte, e os motores elétricos. Os motores elétricos são eficientes para atingir altas velocidades, como, por exemplo, no *eixo árvore* durante o processo de usinagem, no qual a

velocidade de corte é um dos parâmetros essenciais; contudo, podem gerar calor (KIM, JEONG e CHO, 2004; ANDERSON, 1992; WECK *et al.*, 1995).

Segundo Anderson (1992), as fontes de calor externas são causadas pelo meio ambiente ou ainda, por qualquer variação de temperatura fora do equipamento. Essa variação da temperatura do ambiente pode ser encontrada no chão de fábrica, podendo causar deformação térmica na estrutura da MF. Estas variações da temperatura no local da manufatura ainda apresentam resultados diferentes durante o dia e a noite, e ainda nas transições de estações (KIM, JEONG e CHO, 2004; ANDERSON, 1992; WECK *et al.*, 1995).

Ainda segundo Anderson (1992), os erros sistemáticos podem ter origem na rigidez, geometria, folga e/ou posicionamento da MF. Os erros aleatórios podem ter origem na dispersão de forças e/ou vibrações. O autor afirma que os erros aleatórios têm pouca influência, uma vez que estes erros são inerentes ao processo e ocorrem dentro de um intervalo aceitável. Por outro lado, os erros sistemáticos podem ser corrigidos e apresentam um deslocamento comum de sua amostragem e, portanto, é possível prever. Os artigos pesquisados que propõem mapear ou ainda solucionar problemas térmicos abordam erros do tipo sistemáticos.

As fontes internas conduzem diretamente o calor para a estrutura da MF e causam deformações térmicas. Entre as principais fontes internas de calor, destaca-se o eixo árvore (WECK *et al.*, 1995). Ainda segundo o autor, o eixo árvore pode causar uma considerável deformação axial, que pode ser causado, entre outras coisas, pelo mancal de rolamentos, principalmente quando o eixo árvore da MF atingir altas velocidades. Por isso, entender o comportamento térmico de uma MF torna-se importante para determinar a sua capacidade e precisão. No entanto, segundo Weck *et al.* (1995), durante o processo de usinagem, a relação entre a aresta de corte da ferramenta e o comportamento térmico da MF é muito complexo, pois, além das fontes de calor já apresentadas anteriormente, internas e externas, o processo de usinagem é composto por outras variáveis, como, por exemplo o tipo da ferramenta de corte, as características de processo, como o material à ser usinado. Por isso, no projeto

de uma MF, as empresas buscam materiais para sua fabricação com baixa expansão térmica.

Mayr *et al.* (2012) apontam que os tópicos referentes aos estudos dos erros térmicos em MF estão associados à medição da temperatura da MF, do meio ambiente e do deslocamento conhecido da ferramenta. Segundo os autores, essas pesquisas têm sido impulsionadas pelo desenvolvimento de dispositivos de medição e pelo aumento do uso de recursos computacionais, no qual os fabricantes de MF buscam obter maior conhecimento e controle sobre as variações provocadas pelos erros térmicos. Isso porque, os usuários da MF perceberam que há diferenças importantes dos erros térmicos quando comparam diferentes MF. Em algumas MF, a maior parte da energia fornecida é utilizada para estabilizar a temperatura. Desta forma, é concebível que o mercado deseje MF energeticamente eficientes e termicamente estáveis (MAYR *et al.*, 2012).

A fim de melhorar a estabilidade térmica de uma MF, Kong (2016) apresenta um estudo de simulação de elementos finitos (FEM), como por exemplo Dong, Zhou e Liu (2017). A simulação mostrou que o eixo árvore da MF foi a parte mais afetada termicamente, conforme apresentado na Figura 18.

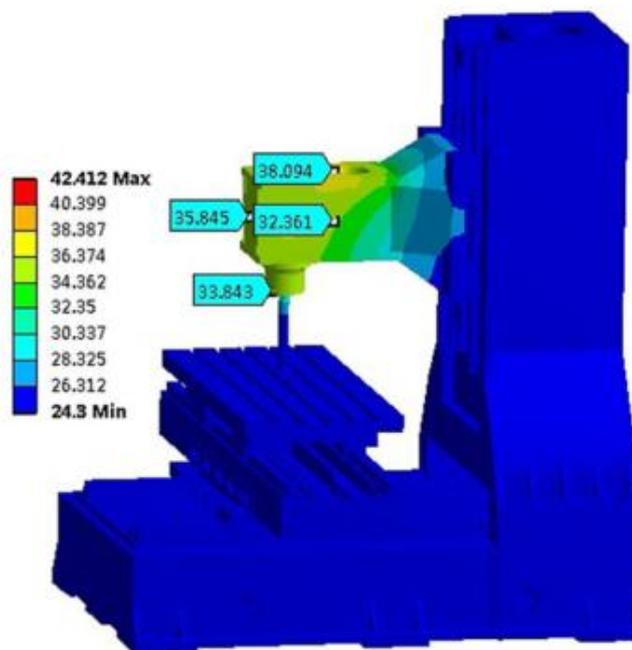


FIGURA 18: SIMULAÇÃO TÉRMICA DE UMA MF

FONTE: ADAPTADO DE KONG (2016)

A Figura 18 apresenta o resultado da simulação que dependeu da coleta de dados por meio de termopares, que foram distribuídos ao longo da MF. Como pode ser observado na Figura 19, a maior quantidade de termopares foi posicionada no eixo árvore da MF, uma vez que este foi, segundo a simulação, o local mais afetado termicamente.

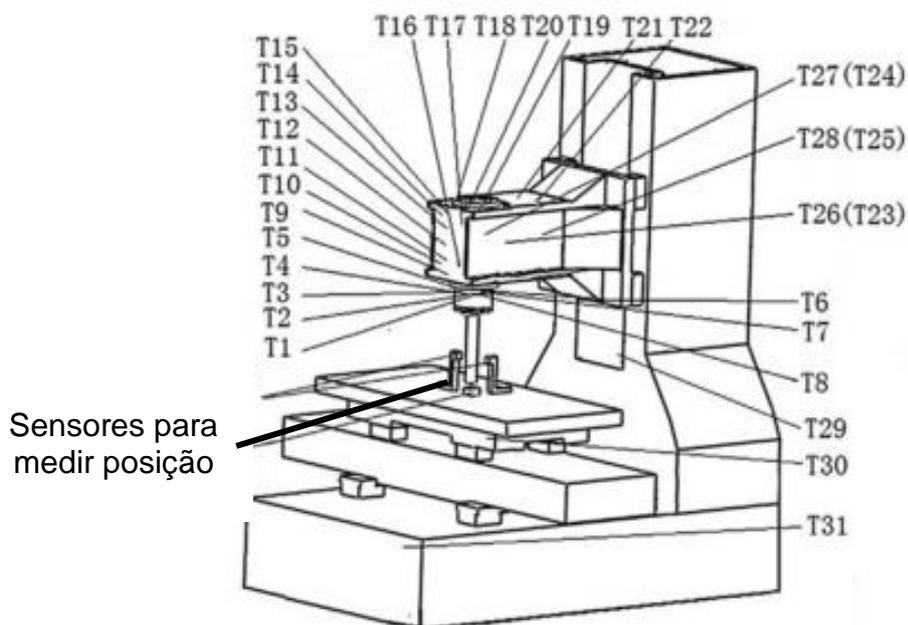


FIGURA 19: DISTRIBUIÇÃO DOS TERMOPARES EM UMA MF

FONTE: ADAPTADO DE KONG (2016)

O experimento proposto por Kong (2016), além dos termopares utilizados no monitoramento térmico, ainda conta com um sensor laser para verificar o deslocamento do cabeçote móvel da MF. O experimento constatou uma deformação de 44,8 μm do cabeçote em relação ao eixo Y. As medidas de temperaturas mais elevadas coletadas foram de 35,8 e 38,1 $^{\circ}\text{C}$, obtidas em termopares localizados no eixo árvore. Ainda segundo o autor, as observações do teste experimental foram semelhantes à simulação. A proposta do autor para minimizar a deformação térmica do eixo árvore da MF é uma alteração física no equipamento, como observado na Figura 20.

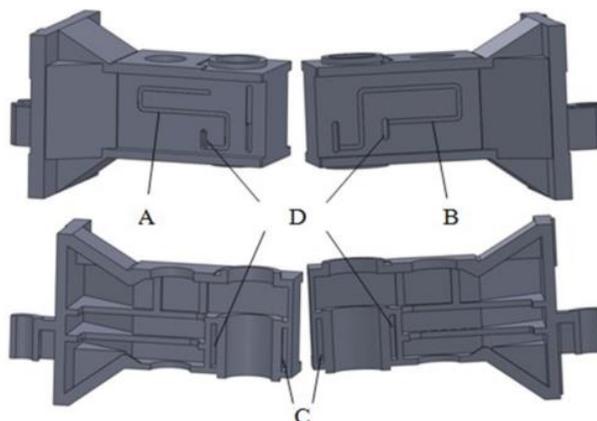


FIGURA 20: CANAIS DE REFRIGERAÇÃO ADICIONAIS (A, B, C E D)

FONTE: ADAPTADO DE KONG (2016)

Conforme ilustra a Figura 20, foi realizada uma melhoria nos canais de refrigeração adicionais (A, B, C e D). Alterações com esta característica em uma MF mostraram resultados positivos. Contudo, este tipo de modificação é limitado, pois a concepção do projeto do equipamento não permite modificações na estrutura da MF (KONG, 2016). Os canais de refrigeração adicionais contribuíram com a redução de até 7% na temperatura do eixo árvore. Ainda segundo o autor, a deformação térmica é pequena em relação ao eixo X, porém maior nos eixos Z e Y. Além disso, o eixo árvore interfere de maneira irrelevante em outras partes da MF. Para melhorar o modelo simulado, o autor sugere que outras características de contorno sejam consideradas, como, por exemplo, a temperatura ambiente.

2.2.3 Modelo de Análise do Erro Térmico

Como apresentado anteriormente, o sistema do eixo árvore é uma das maiores fontes de calor em uma MF. O calor gerado pelo sistema do eixo árvore se dissipa para os vários componentes de uma MF e faz com que eles sofram deformações (CHEN, 1996). Segundo o autor, os erros térmicos causados pelo eixo árvore podem ser classificados como: a) expansão do alojamento do eixo

árvore, b) a flexão do braço em balanço, c) a expansão do eixo árvore, e d) a flexão da coluna da MF, como ilustrado na Figura 21.

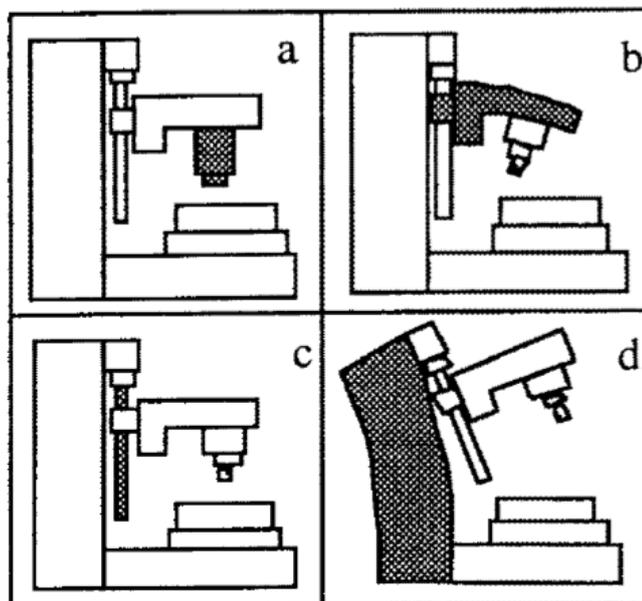


FIGURA 21: TIPOS DE ERROS TÉRMICOS CAUSADOS PELO EIXO ÁRVORE

FONTE: ADAPTADO DE CHEN (1996)

Segundo Chen (1996), os erros térmicos resultantes na ponta da ferramenta de corte incluem o deslocamento da posição com relação à peça usinada, como mostrado na Figura 22.

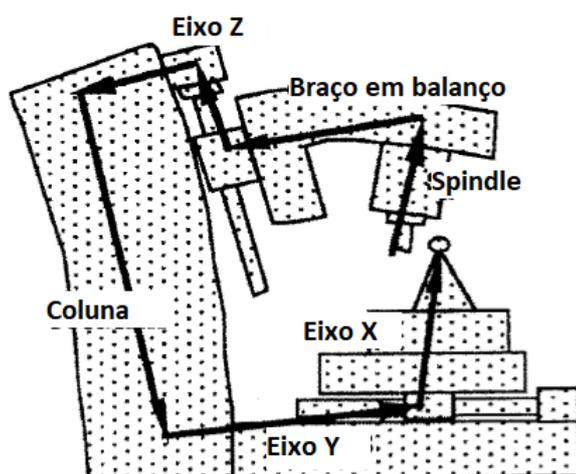


FIGURA 22: RESULTANTE DO ERRO TÉRMICO NA FERRAMENTA DE CORTE

FONTE: ADAPTADO DE CHEN (1996)

Para monitorar a temperatura, Chen (1996) posicionou onze termopares (T), distribuídos em partes da MF, como coluna, base e *eixo árvore*. Além disso, para medir a posição da ferramenta de corte, o autor posicionou sensores laser, apresentados na Figura 23.

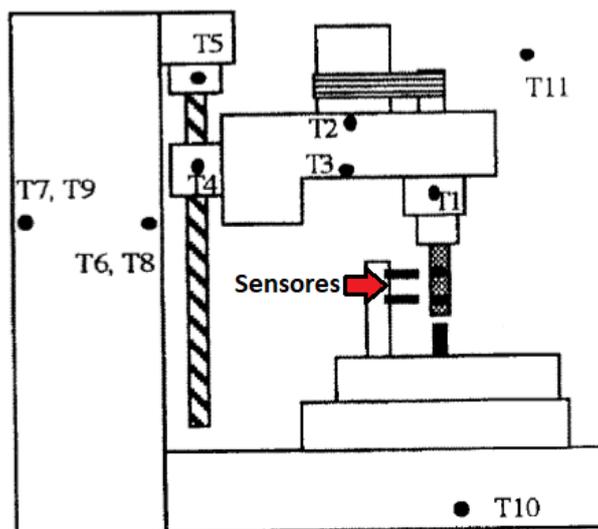


FIGURA 23: POSICIONAMENTO DOS TERMOPARES E DOS SENSORES EM UMA MF

FONTE: ADAPTADO DE CHEN (1996)

Como ilustra a Figura 23, dois sensores são posicionados em pontos distintos da ferramenta de corte para medir o erro no eixo Y de uma MF. Além disso, observa-se a posição dos onze termopares, marcados com a letra T.

O experimento proposto por Chen (1996), teve as velocidades de 800, 2.500 e 5.000 rpm no *eixo árvore*. Os resultados do deslocamento do *eixo árvore*, em relação ao eixo Y, apresentados foram de 34 μm .

Os experimentos propostos neste trabalho serão realizados com base em toda a revisão bibliográfica apresentada. Os materiais e métodos, assim como as etapas do experimento e a análise dos resultados coletados, serão apresentados nos capítulos a seguir.

3 MATERIAIS E MÉTODO

O presente trabalho refere-se a uma pesquisa experimental. Segundo Miguel (2007), um experimento é um estudo entre as variáveis de um sistema, em que as condições são controladas pelo pesquisador. Ainda segundo o autor, o pesquisador manipula e controla variáveis e analisa o resultado por elas causado no fenômeno estudado.

A Figura 24 traz a classificação da pesquisa quanto a sua natureza, objetivo, abordagem e o método.

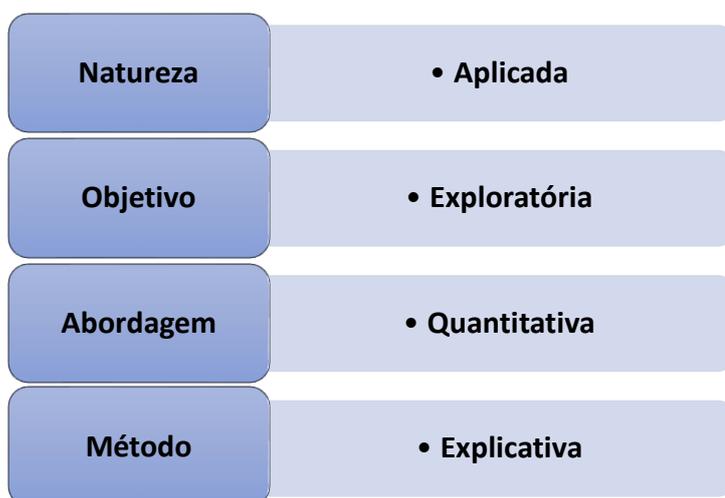


FIGURA 24: CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Como apresentado na Figura 24, a natureza da pesquisa é aplicada, pois tem como objetivo a utilização de toda a informação disponível, e seus resultados são concretos. A pesquisa ainda tem como objetivo exploratória, uma vez que permite ao pesquisador uma maior familiaridade com o tema pesquisado. Quanto à abordagem, é classificada como quantitativa, pois busca uma abordagem pontual e estruturada, utilizando dados quantitativos, e também a coleta de dados é realizada de forma estruturada. A classificação da pesquisa ainda tem como método explicativo, que se preocupa em identificar os fatores

que determinam ou contribuem para a ocorrência de um trata de um fenômeno (GIL, 2002).

Nos próximos tópicos, serão apresentados os materiais utilizados para a realização do experimento, bem como as etapas do experimento definidas pelo método utilizado.

3.1 MATERIAIS

Para o experimento descrito neste trabalho, que será realizado no laboratório avançado de manufatura da UNIMEP, em Santa Bárbara D'oeste, será utilizada uma MF de cinco eixos. A máquina-ferramenta será o centro de usinagem em 5-eixos modelo DCM 620-5X, fabricado pela empresa Romi, Figura 25. O equipamento tem capacidade de deslocamento de 600 mm no eixo X, 520 mm no eixo Y e 460 mm no eixo Z. Para os eixos adicionais, as capacidades são de -110° à $+110^{\circ}$ em B, e 360° para o eixo C.



FIGURA 25: MÁQUINA-FERRAMENTA ROMI DCM 620-5X

FONTE: ADAPTADO DE ROMI (2018)

De acordo com o fabricante, os centros de usinagem vertical 5 eixos DCM 620, com CNC SIEMENS, permitem realizar usinagem de peças com geometrias simples e complexas. Ainda segundo o fabricante, o cabeçote (eixo árvore) conta com um sistema de refrigeração, que traz como grande benefício a minimização de possíveis distorções térmicas da carcaça, assegurando o perfeito alinhamento da linha de centro do eixo-árvore nas operações de usinagem que requerem alta precisão de posicionamento do eixo Z.

As informações referentes à capacidade da MF são fornecidas pelo fabricante, conforme a Figura 26.

| Especificações técnicas | ROMI DCM 650-5X |
|---|------------------------|
| Cabeçote vertical | |
| Faixa de rotação [rpm] | 15 a 15.000 |
| Avanços | |
| Avanço rápido (eixos X/ Y/ Z) [m/min.] | 36 |
| Avanço de corte programável [mm/min.] | 1 a 20.000 |
| Rotação máxima dos eixos B e C [rpm] | 12 |
| Cursos | |
| Curso do eixo X [mm] | 620 |
| Curso do eixo Y [mm] | 520 |
| Curso do eixo Z [mm] | 460 |
| Distância entre a raiz do eixo-árvore e a mesa [mm] | 150-610 |
| Ângulo de rotação do eixo B [graus] | -110 a +110 |
| Ângulo de rotação do eixo B [graus] | 360 |

FIGURA 26: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA MF DCM 650-5X

Para coletar os dados de temperatura, utilizou-se no experimento termopares do tipo T. Este tipo de termopar é formado por fios de Cobre puro, como termo elemento positivo, e *Constantan*, como termo elemento negativo, e possuem sua

base de metal. Estes termopares são a utilizados para a medição contínua de - 270 °C até 370 °C. Para este experimento, serão utilizados 10 termopares, oito deles posicionados no equipamento, e os outros dois para coletar os dados da temperatura ambiente.

Como peça padrão, que será posicionada no porta-ferramentas da MF a fim de medir o deslocamento do eixo Y, será utilizada uma haste cilíndrica com 133,7 mm de altura e 12 mm de diâmetro. A haste pode ser observada na Figura 27.

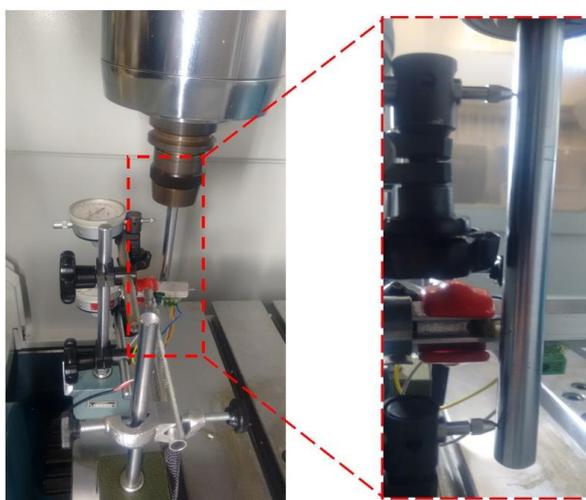


FIGURA 27: HASTE MONTADA NO PORTA-FERRAMENTAS

Para medir o deslocamento do eixo Y, serão utilizados dois relógios comparadores, presos pela base magnética à mesa da MF. Os relógios utilizados neste experimento estão apresentados na Figura 28.



FIGURA 28: CONFIGURAÇÃO DOS RELÓGIOS COMPARADORES

3.2 MÉTODO DE PESQUISA

Para a presente pesquisa, o método proposto segue quatro etapas, são elas: planejamento do experimento, *set-up* a MF, coleta de dados, e análise dos resultados. Todas estas etapas foram idealizadas tendo como referência os artigos e pesquisadores apresentados neste trabalho. O método é apresentado a seguir, na Figura 29.

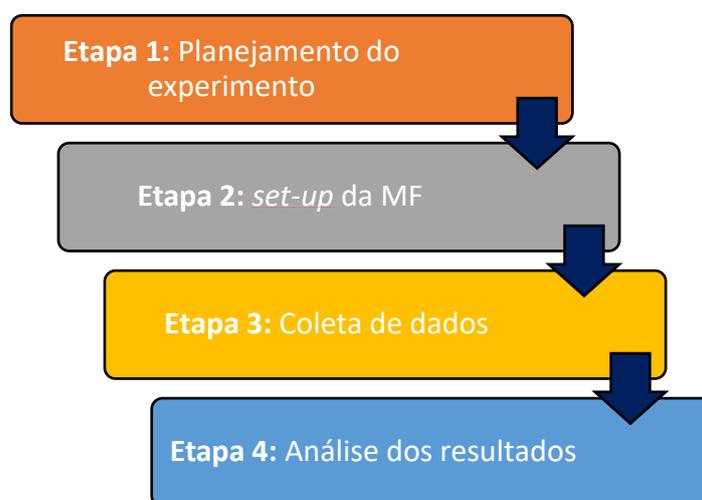


FIGURA 29: ETAPAS DO EXPERIMENTO

Na etapa 1, será realizado o planejamento do experimento, no qual a rotina de testes, posicionamento dos termopares, coleta de dados, posicionamento dos relógios comparadores serão definidos, com base no referencial teórico.

Na rotina de testes, para este experimento, a MF terá um procedimento de pré-aquecimento, que é importante para a validação dos resultados do experimento (ZOPPELLARI, 2014; CHEN *et al.*, 1993; CHEN, YAN, NI, 1996). A Figura 30 apresenta o fluxograma dos testes.

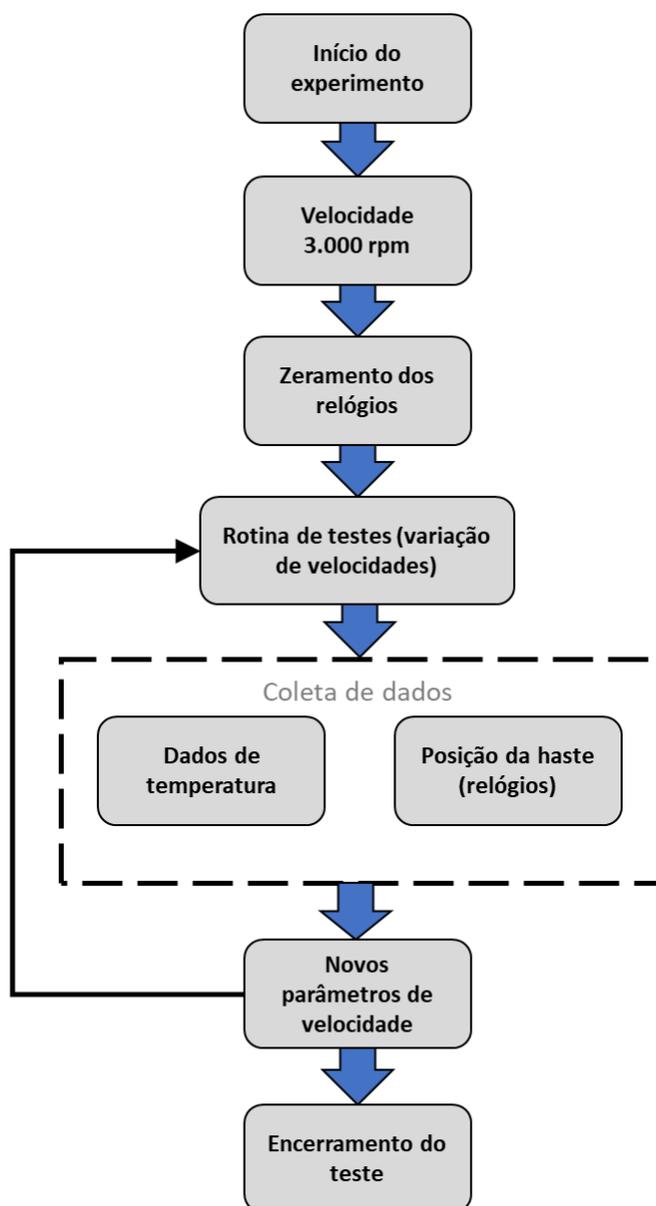


FIGURA 30: FLUXOGRAMA DOS TESTES

Como observado na Figura 30, os testes terão uma rotina preparação e, posteriormente, variações na velocidade de giro da haste. As velocidades utilizadas no teste serão: 3.000, 4.500, 6.000, 9.000, 12.000 e 15.000 rpm (velocidade máxima da MF). Para o pré-aquecimento, será utilizada a velocidade de 3.000 rpm durante 30 minutos e, em seguida, ocorrerá uma pausa de 10 minutos. Na sequência, 4.500 rpm durante 30 minutos, seguida de uma pausa de 10 minutos até a próxima velocidade. Deste modo, a cada nova velocidade, teremos 30 minutos de ciclo seguidos de 10 minutos de pausa, até atingir a

velocidade máxima do equipamento(15.000rpm) e finalizar os testes. Os tempos dos ciclos, assim como as pausas, têm como referência o artigo de Chen (1996).

Como apresentado na Figura 30, após a rotina de pré-aquecimento, ocorrerá o zeramento dos relógios. Neste momento, um relógio comparador estará posicionado a 20 mm da parte superior da haste, e o segundo relógio comparador posicionado a 10 mm da parte inferior da haste. Deste modo, os relógios comparadores estarão separados por 103,7 mm, com o intuito de identificar a possível inclinação/ deslocamento do eixo Y, conforme apresentado anteriormente nas Figuras 21 e 22 (CHEN, 1996).

Em seguida, na etapa 2, o *set-up* da MF, no qual todos os materiais utilizados no experimento serão preparados e/ou posicionados conforme definido pelo planejamento da etapa 1. O posicionamento dos termopares pode ser observado na Figura 31.

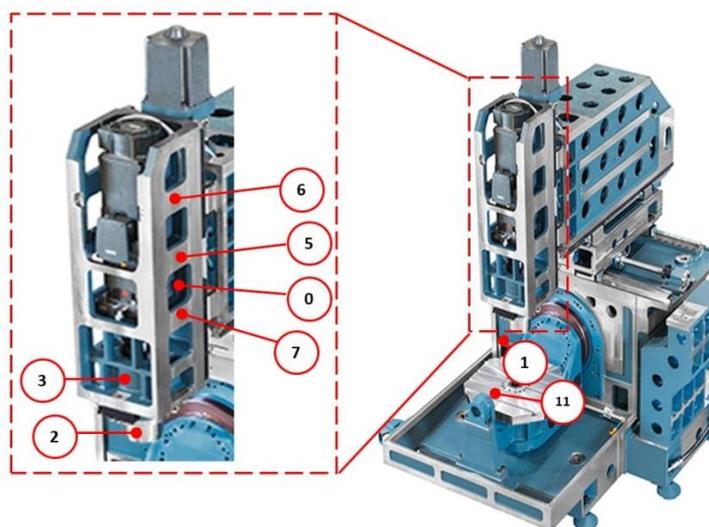


FIGURA 31: POSICIONAMENTO DOS TERMOPARES NA MF

Como apresentado na Figura 31, há seis termopares posicionados no *eixo árvore*, são eles 0, 2, 3, 5, 6 e 7. O termopar 1, está posicionado na coluna da MF e, o termopar 11 está posicionado na mesa da MF, próximo aos relógios comparadores. A maior quantidade de termopares posicionados no *eixo árvore*

justifica-se, pois, como apresentado no referencial teórico, especificamente no item 2.2.2, é a região da MF na qual se observa uma das maiores fontes de calor. Os termopares posicionados na coluna e na mesa justificam-se para avaliar a possível dissipação térmica do eixo árvore (CHEN, 1996). Da mesma forma, os termopares 13 e 15 coletarão dados da temperatura ambiente. A coleta de dados dos termopares conta ainda com o sistema *National Instruments Labview* (2012).

Na etapa 3, será executada a rotina de teste, previamente definida na etapa 1, juntamente com a coleta dos dados dos termopares e relógios comparadores. Nesta etapa, após a rotina de pré-aquecimento, giro de 3.000 rpm durante 30 minutos, ocorre a parada do *eixo árvore* através do comando M19, que se trata de uma posição de referência da MF, e posteriormente ocorre o zeramento dos relógios comparadores. Durante o ciclo em vazio de giro, o *eixo árvore*, a haste está posicionada à 10 mm dos relógios; em seguida, ocorre o avanço até a compressão das hastes dos relógios.

Inicialmente foram realizados testes piloto para adequação da coleta de dados, posicionamento dos termopares, dos relógios comparadores, do sistema para a coleta da temperatura e do programa CNC. A alteração mais relevante foi a inclusão do comando M19, como já apresentado anteriormente, no programa de testes. Este comando faz a ferramenta, neste caso a haste, parar após o giro, na mesma posição. Isso foi necessário para que qualquer variação ou deformação da haste provenientes da usinagem, não interfiram na medição da posição.

Na etapa 4, serão analisados os dados coletados na etapa 3, realizadas as conclusões.

3.3 PREPARAÇÃO DO EXPERIMENTO

Como parte da etapa 2, apresentado na Figura 29, o *set-up* da MF traz a instrumentalização de todos os materiais conforme o planejamento previamente realizado na etapa 1.

Após o posicionamento de todos os termopares, o equipamento está instrumentalizado para iniciar os testes, como observado nas Figura 32 e 33.



FIGURA 32: POSICIONAMENTO DOS TERMOPARES E RELÓGIOS COMPARADORES DA MF

A Figura 32 apresenta o posicionamento dos termopares na MF. Como observado, há termopares afixados na mesa, na coluna, no ambiente, e a maioria deles está no *eixo árvore*.



FIGURA 33: INSTRUMENTALIZAÇÃO DA MF E SISTEMA DE COLETA DE DADOS

Na Figura 33, pode-se observar a instrumentalização da MF, onde os termopares estão conectados ao sistema de coleta de dados National Instruments Labview (2012). O Labview é um ambiente de desenvolvimento altamente produtivo, para a criação de aplicações customizadas e que interagem com os dados ou sinais do mundo real, em áreas como ciência e engenharia (NI, 2014).

Para este experimento, o Labview foi utilizado para armazenar os dados dos termopares após o *trigger*, que é dado por um dispositivo como apresentado na Figura 34.

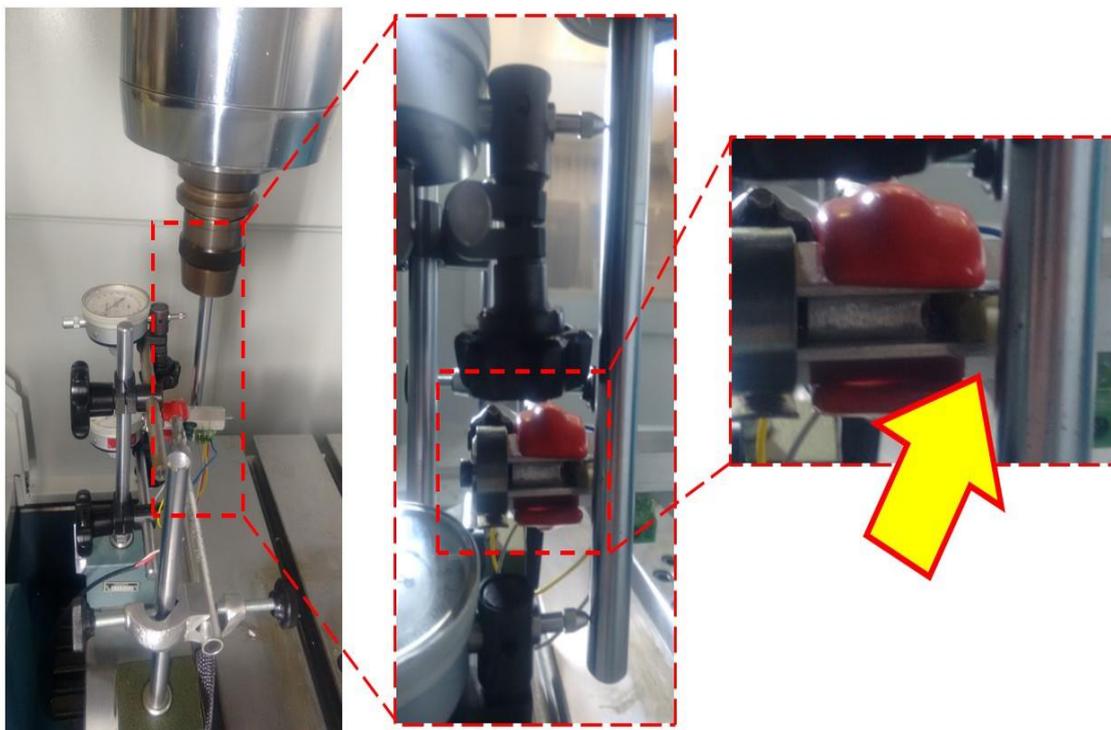


FIGURA 34: GATILHO PARA O SISTEMA DE COLETA DE DADOS (INPUT PARA O LABVIEW)

Como observado na Figura 34, em destaque o *trigger*, que é disparado no mesmo momento em que a haste vai para o ponto de medição dos relógios comparadores para a coleta de dados de sua da posição, dando o *input* para os dados dos termopares. Após o *input*, os dados são armazenados pelo Labview, e são apresentados nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e 36.

Dados coletados Termopares

| | TC 0 | TC 1 | TC 2 | TC 3 | TC 5 | TC 6 | TC 7 | TC 11 | TC 13 | TC 15 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3000 RPM | 25,03 | 23,27 | 25,37 | 24,64 | 24,88 | 24,79 | 24,70 | 22,82 | 23,13 | 23,57 |
| 4500 RPM | 26,06 | 23,43 | 26,24 | 25,58 | 25,81 | 26,04 | 26,05 | 22,95 | 23,62 | 23,81 |
| 6000 RPM | 26,88 | 23,49 | 27,05 | 26,40 | 26,90 | 27,38 | 27,15 | 23,10 | 24,07 | 24,17 |
| 9000 RPM | 27,73 | 23,69 | 28,24 | 27,49 | 27,85 | 28,40 | 28,01 | 23,18 | 24,32 | 24,66 |
| 12000 RPM | 28,54 | 23,99 | 30,25 | 29,13 | 28,51 | 29,07 | 28,76 | 23,43 | 24,57 | 25,46 |
| 15000 RPM | 29,26 | 24,28 | 33,05 | 31,18 | 29,13 | 29,74 | 29,53 | 23,69 | 24,88 | 26,33 |

FIGURA 35: IMAGEM DOS DADOS DO LABVIEW COMO HTML

A seguir, a Figura 366 mostra o posicionamento dos relógios comparadores, afixados à mesa da MF por meio de uma base magnética. Observa-se ainda a posição da haste a 10 mm com relação aos relógios.

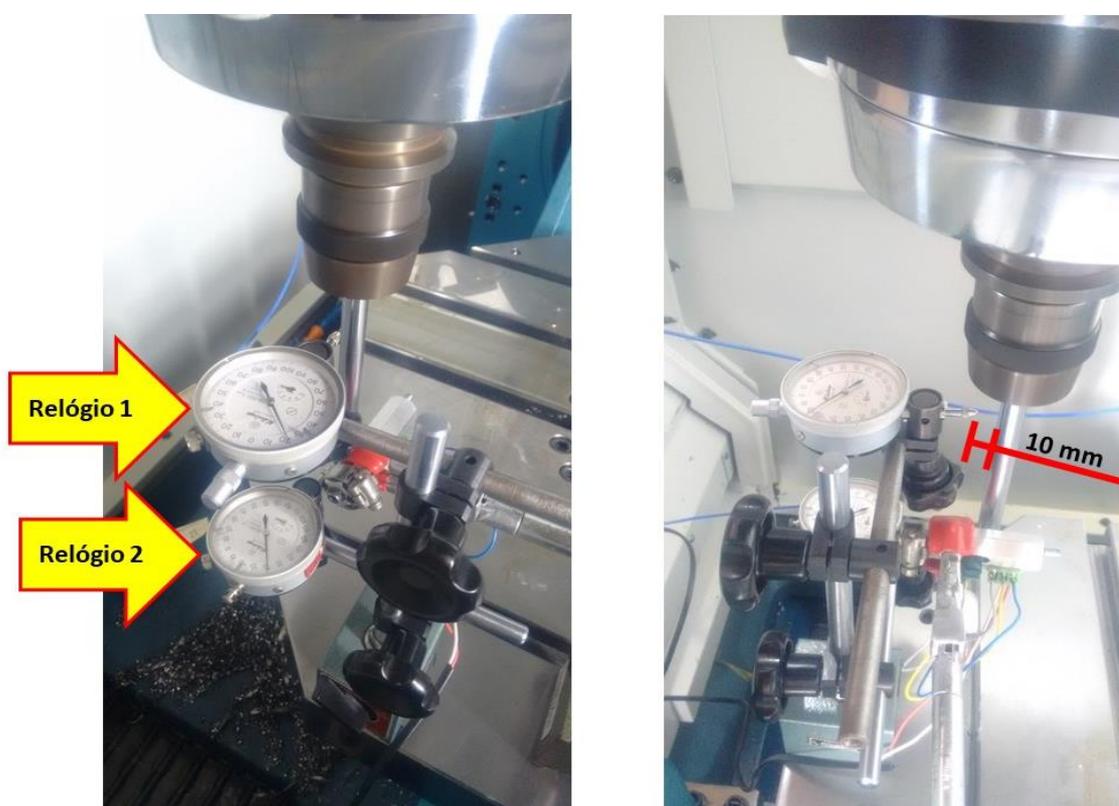


FIGURA 36: POSICIONAMENTO DA HASTE DURANTE O GIRO DO EIXO ÁRVORE

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como parte da etapa 4, apresenta-se neste capítulo a análise dos resultados. A Figura 37 apresenta dados de temperatura de quatro termopares nas velocidades de 3.000, 6.000, 12.000 e 15.000 rpm. Os termopares TC0, TC3 e TC7 posicionados no *eixo árvore* da MF como apresentado na Figura 31. O Termopar TC15 coleta dados da temperatura ambiente.

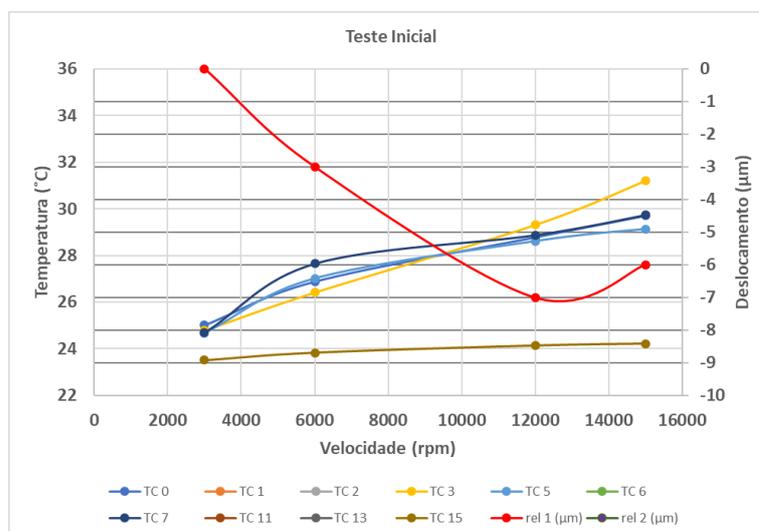


FIGURA 37: DADOS DO TESTE INICIAL

Ainda a Figura 37, apresenta no eixo principal a temperatura em °C (lado esquerdo) e no eixo secundário (lado direito), o deslocamento, medido pelo relógio comparador 1, em µm.

Com relação aos dados dos termopares, o termopar TC7, posicionado na estrutura do *eixo árvore*, como apresentado na Figura 31, apresentou uma temperatura inicial de 24,69 °C e uma temperatura ao final do teste de 29,73 °C, uma variação de 5,04 °C.

O termopar TC0, posicionado na parte de trás do *eixo árvore*, apresentou a maior temperatura no início do teste e a menor variação entre a temperatura inicial e final. No início do teste uma temperatura de 25,01 °C e, ao final do teste, 29,70 °C, uma variação de 4,69 °C.

O termopar TC3, posicionado na parte inferior do *eixo árvore*, apresentou a maior variação de temperatura. No início do teste, o TC3 apresentava uma temperatura de 24,78 °C e, ao final do teste apresentava temperatura de 31,20 °C, uma variação de 6,42 °C.

Da mesma maneira, o termopar TC15 apresentou, no início do teste 23,51 °C e, ao final do teste 24,21 °C. Uma variação de 0,70 °C na temperatura ambiente durante todo o teste.

Os dados mostram que o pico do deslocamento/ deformação ocorreu com o teste em 12.000 rpm, quando as temperaturas dos termopares TC0, TC3 e TC7 estão entre 28 e 30 °C. O deslocamento apresentado é de até -7 µm no relógio 1, este valor negativo é apresentado na Figura 38.

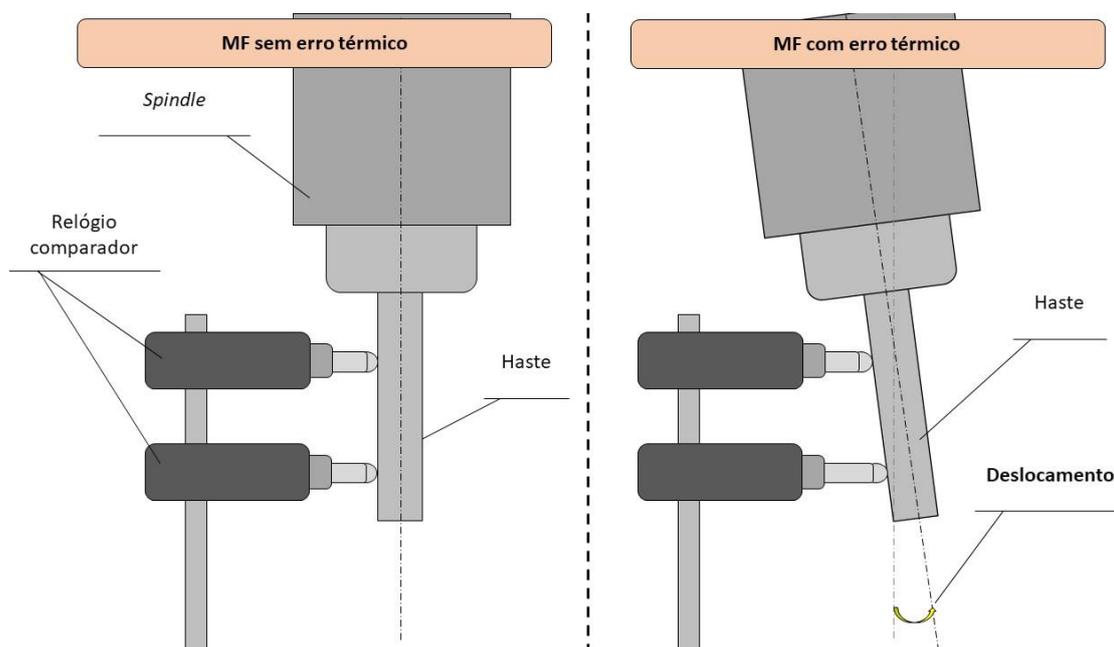


FIGURA 38: INCLINAÇÃO/ DEFORMAÇÃO DA HASTE DA MF

Os dados apresentados no teste inicial, Figura 37, principalmente o valor negativo do deslocamento justificam-se, como observado anteriormente nas Figura 21 e Figura 22, como parte do referencial teórico apresentado por Chen (1996).

Ainda, observa-se na Figura 37 que, mesmo com o aumento da velocidade para 15.000 rpm e com o aumento da temperatura dos termopares TC0, TC3 e TC7, os dados coletados pelo relógio comparador 1 apresentam uma redução no deslocamento/deformação da MF em 1 μm , caracterizando uma estabilização térmica.

Ainda com relação aos dados do TC15, Figura 37 observa-se que os dados da temperatura ambiente não foram relevantes quando comparados com as variações térmicas observadas nos demais termopares, assim como, no deslocamento/deformação da MF.

A seguir, serão apresentados os resultados dos outros experimentos, com a adição dos termopares como apresentado na Figura 31. E ainda, com a adição de mais um relógio comparador.

A Figura 39, apresenta os resultados do teste 1.

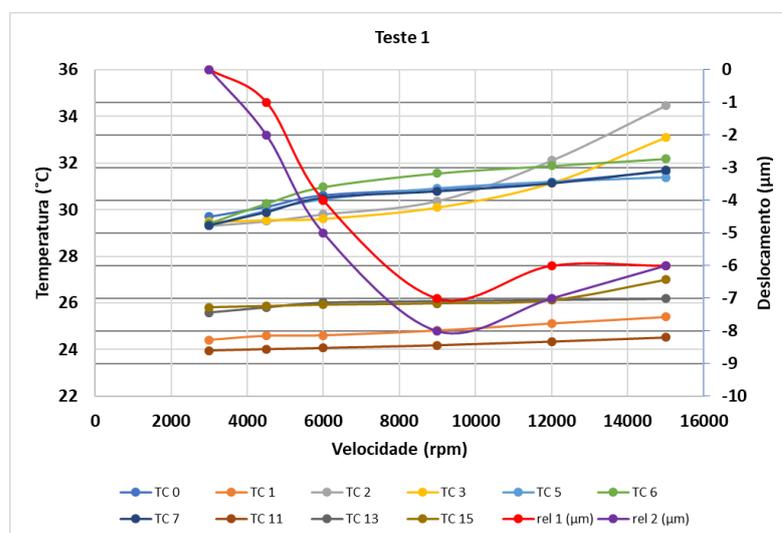


FIGURA 39: DADOS DO TESTE 1

Como apresentado na Figura 37, os dados do termopar TC3 mostram uma temperatura inicial de 29,47 °C e no final do teste 33,09 °C, uma variação de 3,62 °C.

Outro termopar que apresentou uma grande variação comparado com os demais foi o TC2, 5,14 °C de variação. Inicialmente 29,32 °C e no final do experimento 34,46 °C. Da mesma forma, o TC6, apresentou uma variação de 2,77 °C. No início do teste a temperatura inicial era de 29,41 °C e no final do teste a temperatura era de 32,18 °C.

Estes termopares os resultados mostram as maiores variações, novamente, como apresentado na Figura 37, os valores da temperatura ambiente não apresentaram valores de variação relevantes quando comparados com os demais termopares.

Nos dados apresentados na Figura 39, observam-se dados dos dois relógios comparadores. No relógio 1, na parte superior da haste, observa-se um pico de deslocamento de -7 µm, enquanto o relógio 2, na parte inferior da haste, apresentou um deslocamento máximo de -8 µm. Além disso, os dados dos relógios comparadores apresentaram seu deslocamento máximo com a velocidade de 9.000 rpm. Aos 12.000 e 15.000 rpm o valor medido pelos relógios apresenta uma redução no relógio 2 de 2 µm, e uma redução de 1 µm no relógio 1.

A Figura 40 apresenta os dados coletados no teste 2.

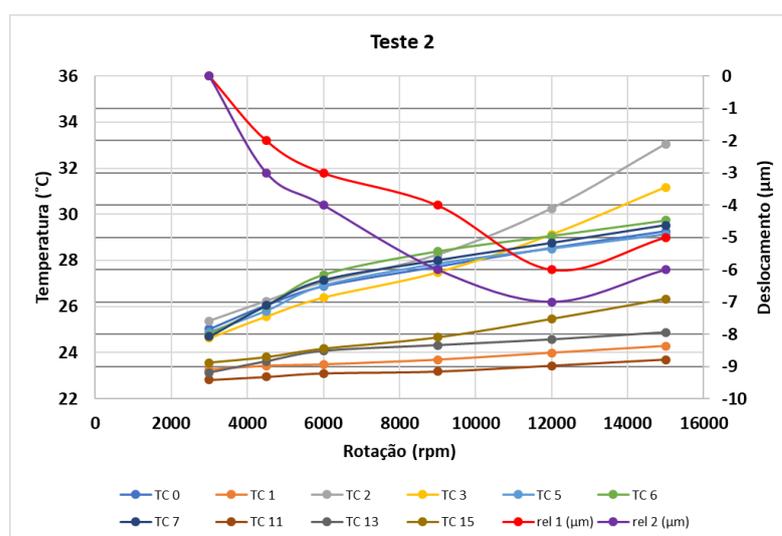


FIGURA 40: DADOS DO TESTE 2

Na Figura 40, observa-se que, assim como os dados apresentados na Figura 39, os termopares que apresentaram as maiores variações foram TC2, TC3 e TC6, com variações de 7,68 °C, 6,54 °C e 4,95 °C, respectivamente.

No entanto, as variações foram maiores quando comparadas com os valores da Figura 35. Ainda, com relação aos valores das temperaturas dos termopares mencionados anteriormente, nota-se que, as temperaturas do início dos testes e do final dos testes também são distintas, em média 2,5 °C maiores no teste 1 (Figura 39) comparados com o teste 2 (Figura 40), isto porque o teste 1 foi realizado uma hora após o teste inicial (Figura 37), enquanto o teste 2 foi realizado no dia seguinte.

Com relação aos dados dos relógios comparadores, como se observa na Figura 40, observa-se um pico de deslocamento de -6 µm no relógio 1 (superior), e -7 µm no relógio 2 (inferior). Ambos os relógios apresentaram o pico de deslocamento, assim como na Figura 39, quando a velocidade do teste era 12.000 rpm. Enquanto o teste em 15.000 rpm o valor medido apresenta uma redução 1 µm em ambos os relógios.

A Figura 41 apresenta os dados do teste 3, realizado uma hora após o teste 2 (Figura 41).

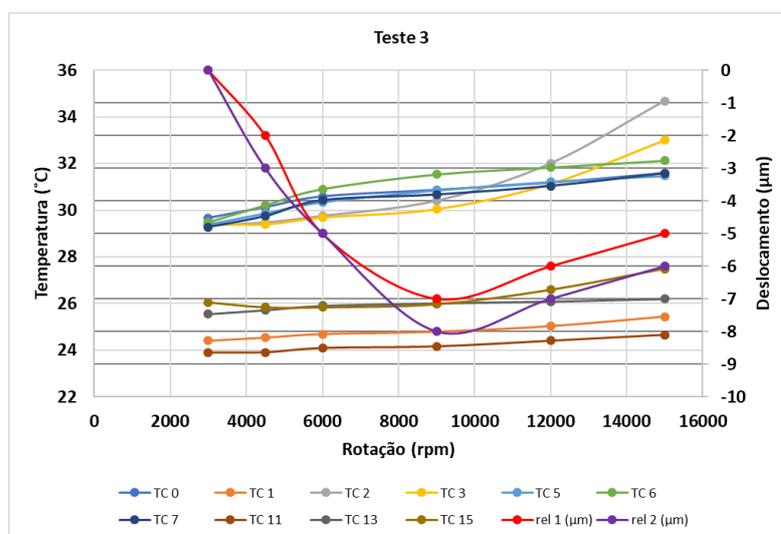


FIGURA 41: DADOS DO TESTE 3

Conforme ilustrado na Figura 41, assim como nas Figura 39 e Figura 40, os termopares que apresentaram maior variação foram TC2, TC3 e TC6, com variações de temperaturas de 5,34 °C, 3,62 °C e 2,64 °C. Observa-se que estes valores são similares quando comparados com as variações do teste 1. Observa-se ainda que a temperatura média entre os testes 1 e 3 é similar.

Nos dados apresentados na Figura 41, o relógio 1, na parte superior da haste, apresentou um pico de deslocamento de -7 μm , enquanto o relógio 2, na parte inferior da haste, apresentou um deslocamento máximo de -8 μm . Além disso, os dados dos relógios comparadores apresentaram seu deslocamento máximo com a velocidade de 9.000 rpm. Enquanto aos 12.000 e 15.000 rpm o valor medido pelos relógios apresenta uma redução no relógio 1 de 2 μm , e uma redução de 1 μm no relógio 2, respectivamente.

Os resultados de todos os três testes apontaram que os termopares TC2, TC3 e TC6, localizados no *eixo árvore* da MF como apresentado na Figura 31, foram os termopares que sofreram maiores variações térmicas. Estes dados justificam-se pelo posicionamento em uma das regiões mais termicamente afetadas da MF, conforme apresentado por Kong (2016), Chen (1996), Kim, Jeong e Cho (2004), Brecher e Wissman (2011), e Dong, Zhou e Liu (2017).

Assim, os dados compilados, com os termopares TC2, TC3 e TC6, dos testes 1, 2 e 3 são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1: DADOS COMPILADOS DOS TESTES 1, 2 E 3

| Velocidades (rpm) | TC2 | | | TC3 | | | TC6 | | |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | TESTE 1 | TESTE 2 | TESTE 3 | TESTE 1 | TESTE 2 | TESTE 3 | TESTE 1 | TESTE 2 | TESTE 3 |
| 3000 | 29,32 | 25,37 | 29,34 | 29,47 | 24,64 | 29,43 | 29,41 | 24,79 | 29,49 |
| 4500 | 29,51 | 26,24 | 29,47 | 29,55 | 25,58 | 29,39 | 30,26 | 26,04 | 30,22 |
| 6000 | 29,81 | 27,05 | 29,75 | 29,61 | 26,4 | 29,69 | 30,97 | 27,38 | 30,91 |
| 9000 | 30,38 | 28,24 | 30,4 | 30,09 | 27,49 | 30,04 | 31,56 | 28,4 | 31,54 |
| 12000 | 32,11 | 30,25 | 32 | 31,14 | 29,13 | 31,13 | 31,88 | 29,07 | 31,84 |
| 15000 | 34,46 | 33,05 | 34,68 | 33,09 | 31,18 | 33,01 | 32,18 | 29,74 | 32,13 |
| Máx | 34,46 | 33,05 | 34,68 | 33,09 | 31,18 | 33,01 | 32,18 | 29,74 | 32,13 |
| Mín | 29,32 | 25,37 | 29,34 | 29,47 | 24,64 | 29,39 | 29,41 | 24,79 | 29,49 |
| Variação | 5,14 | 7,68 | 5,34 | 3,62 | 6,54 | 3,62 | 2,77 | 4,95 | 2,64 |

Observa-se que os dados dos testes 1 e 3 são similares devido às condições de início dos testes. Mesmo assim, os deslocamentos apresentam valores similares.

Os valores compilados dos dados dos relógios comparadores são apresentados nas Figura 42 e Figura 43 (relógio 1 e 2 respectivamente).

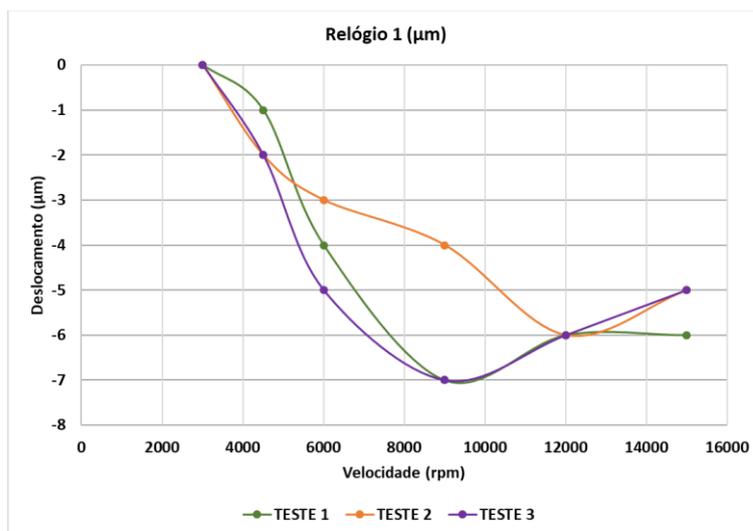


FIGURA 42: DADOS DO RELÓGIO 1 (SUPERIOR)

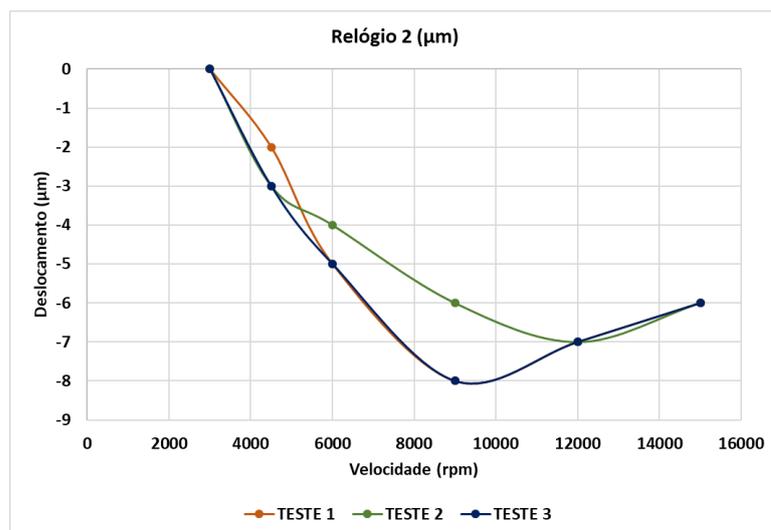


FIGURA 43: DADOS DO RELÓGIO 2 (INFERIOR)

Como apresentado nas Figura 42 e Figura 43, observa-se que o deslocamento nos testes 1 e 3 segue com resultados similares, onde o pico do deslocamento ocorre no teste a 9.000 rpm. Da mesma forma, no teste 2, o pico do deslocamento ocorreu no teste com velocidade de 12.000 rpm.

Assim, observa-se nos dados do quadro 1, em conjunto das Figuras 43 e 44 que a estabilização térmica ocorre quando a temperatura dos termopares TC2, TC3 e TC6 está por volta de 30 °C.

Os dados obtidos sobre o deslocamento da haste, quando comparados com os dados de outros autores, podem ser considerados pequenos. Outros autores, como por exemplo, Mayr *et al.* (2015), apresenta deslocamentos de 20 μm . Da mesma forma, Horejs, Mares e Novotny (2017), apresentam deslocamento de 24 μm , Guo, Yu e Yang (2013) apresenta 14 μm de deslocamento, e Chen (1996) apresenta deslocamento de 34 μm .

O deslocamento apresentado neste trabalho pode ser atribuído ao fato de que a MF utilizada no procedimento experimental conta com um sistema de resfriamento do cabeçote. O sistema de refrigeração é composto por uma unidade de refrigeração que promove a circulação de um líquido de arrefecimento na carcaça do cabeçote, como apresentado na Figura 44 (ROMI, 2018).

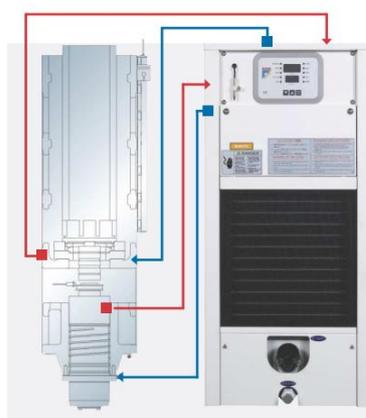


FIGURA 44: SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO CABEÇOTE

FONTE: ADAPTADO DE ROMI (2018)

O trabalho apresentado pelos autores citados anteriormente, Mayr *et al.* (2015), Horejs, Mares e Novotny (2017), e Guo, Yu e Yang (2013), que tiveram o deslocamento como comparativo para o presente trabalho não mencionam, sobre a MF estudada, a presença de um sistema semelhante.

Em todos os artigos pesquisados como base para este trabalho não foram encontradas evidências de que haja, pesquisas em MF com este tipo de sistema para refrigeração do cabeçote.

Ainda segundo a empresa fabricante da MF utilizada para o experimento do presente trabalho, um dos benefícios de deste sistema de refrigeração é a minimização de possíveis distorções térmicas da carcaça, o que melhoraria o alinhamento do *eixo árvore*, para usinagens que requerem alta precisão.

Segundo Mayr *et al.* (2015), desde a publicação de Bryan, em 1990, considerada uma das pioneiras e principais publicações sobre os efeitos térmicos em MF, as investigações sobre o tema aumentaram muito, impulsionadas pelo desenvolvimento de dispositivos de medição, pelo aumento do uso das MF, e para atender as necessidades dos clientes.

5 CONCLUSÃO

As Máquinas-ferramentas são amplamente utilizadas nas indústrias devido a sua versatilidade, associada à sua alta qualidade, bem como a sua aplicação em peças com geometrias complexas (BOHEZ, 2002).

Contudo, segundo Hong, Ibaraki e Matsubara (2010), os cinco eixos de uma MF podem gerar acúmulo de erros no equipamento, e a precisão geral do equipamento pode ser reduzida. Além disso, há diversas fontes de calor, internas e externas à MF que podem ser causa dos erros térmicos do equipamento, e durante o processo de usinagem parâmetros como, por exemplo, avanço e velocidade de corte, estão relacionados ao eixo árvore e podem ser associados aos erros térmicos ((BRYAN, 1990), (WECK *et al.*, 1995)).

Neste sentido, os resultados obtidos neste trabalho comprovaram que houve influência do comportamento térmico no eixo árvore nos erros de posicionamento da máquina-ferramenta de cinco eixos estudada, como apresentado pelos dados do relógio comparador que mostraram uma deformação de até 7 μm .

Além disso, por meio dos experimentos realizados neste trabalho, foi possível analisar o comportamento térmico do eixo árvore no erro de posicionamento de uma máquina-ferramenta de cinco eixos.

Os experimentos desenvolvidos neste trabalho utilizaram o máximo das informações, como por exemplo, dados de temperatura e deslocamento com os limites dos parâmetros do equipamento.

Através dos experimentos realizados, também foi possível verificar uma estabilização térmica do equipamento, mesmo com o aumento da temperatura coletada pelos termopares não houve interferência de maneira a aumentar o erro da máquina-ferramenta.

Observa-se também, que as variações na temperatura ambiente, neste experimento, mostraram-se irrelevantes no que diz respeito ao deslocamento do

eixo árvore, pois, os dados da temperatura do TC15 não apresentaram correlação com o deslocamento observado.

Não foram encontradas informações nos artigos pesquisados como base do referencial teórico do presente trabalho, com relação à estabilização térmica do equipamento, ou ainda sobre MF com sistema de refrigeração no cabeçote.

Desta forma, como proposta para trabalhos futuros, este estudo sugere avaliar de forma comparativa, em uma mesma máquina-ferramenta, o comportamento térmico com e sem a utilização do sistema de refrigeração no cabeçote.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMAQ, Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos. **A história das máquinas** – ABIMAQ 70 anos. Editora Magma, São Paulo, 2006.

ABDULSHAHED, A. M. *et al.* **Thermal error modelling of a gantry-type 5-axis machine tool using a Grey Neural Network Model**. Journal of Manufacturing Systems, v. 41, p. 130–142, 2016.

ALESSANDRO, V.; GIANNI, C.; ANTONIO, S. **Axis geometrical errors analysis through a performance test to evaluate kinematic error in a five axis tilting-rotary table machine tool**. Precision Engineering, v. 39, p. 224–233, 2015.

ANDERSON, P. **Methodology for evaluating the production accuracy of the machine tools**. Tampere Technical University, 1992.

BOHEZ, E. L. J. **Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis**. v. 42, p. 505–520, 2002.

BRECHER, C.; WISSMANN, A. **Compensation of thermo-dependent machine tool deformations due to eixo árvore load: Investigation of the optimal transfer function in consideration of rough machining**. Production Engineering, v. 5, n. 5, p. 565–574, 2011.

Bryan, J., **International Status of Thermal Error Research**, Annals of the CIRP, 39/2, 645-656, 1990.

CAMACHO, C. **A incansável busca pela eficiência**. Revista O mundo da usinagem, Outubro 2015 Edição 107. Pág 36, ISS 1518-6091

CHEN, T.; CHANG, C. **Analysis of the Real-time Compensation for Thermal Error at CNC Milling Machine**. v. 4004, p. 4–8, 2016.

CHEN, J. **Neural Network-based Modelling and Error Compensation of Thermally-induced Eixo árvore Errors**. Inter Journal Advanced manufacturing Technol. p. 303–308, 1996.

CHEN, J. *et al.* **An on-machine error calibration method for a laser micromachining tool**. Precision Engineering, v. 47, p. 239–248, 2017.

DINIZ, A. E. MARCONDES, F.C. COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagens dos materiais**. 6 ed. São Paulo: MM editor, 242p. 2006.

DONG, Y.; ZHOU, Z.; LIU, M. **A general thermal model of machine tool eixo árvore**. Advances in Mechanical Engineering, v. 9, n. 1, 2017.

FERRARI, Alfredo. **Máquinas-ferramenta: Um segmento estratégico**. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/maquinas-ferramenta-um-segmento-estrategico/>> . Acesso: 30/12/2018

FLORUSSEN, G. H. J. **Accuracy Analysis of multi-axis Machines by 3D Length Measurements**. Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015, v. 1, 2015.

GIVI, M.; MAYER, J. R. R. **Validation of volumetric error compensation for a fi ve-axis machine using surface mismatch producing tests and on-machine touch probing**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 87, p. 89–95, 2014.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GIL, A. C. **Como elaborar Projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HSU, Y. Y.; WANG, S. S. **A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. v. 47, p. 352–360, 2007.

KIM, J. J.; JEONG, Y. H.; CHO, D. W. **Thermal behavior of a machine tool equipped with linear motors**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 44, n. 7–8, p. 749–758, 2004.

KONG, L. **Simulation, Experiment, and Optimization Method for Thermal Characteristics of Machine Tool**. Heat Transfer-Asian Research, v. 0, n. 0, p. 1–14, 2016.

JIANG, X. **Characterising Geometric Errors in Rotary Axes of 5-axis Machine Tools**. A thesis submitted to the Faculty of Engineering of The University of

Birmingham for the degree of doctor of philosophy. December, 2014.

LASEMI, A.; XUE, D.; GU, P. **Accurate identification and compensation of geometric errors of 5-axis CNC machine tools using double ball bar.** Measurement Science and Technology, v. 27, n. 5, 2016.

LAWLOR, A. **O Processo de Produção, Sistemas e Métodos.** Atlas, São Paulo, 1978.

LEE, J.; LEE, H.; YANG, S. **Total Measurement of Geometric Errors of a Three-Axis Machine Tool by Developing a Hybrid Technique.** International journal of precision engineering and manufacturing Vol. v. 17, n. 4, p. 427–432, 2016.

LEI, W. T.; HSU, Y. Y. **Accuracy enhancement of five-axis CNC machines through real-time error compensation.** International Journal of Machine Tools & Manufacture v. 43, p. 871–877, 2003.

MIGUEL, P.A.C, *et al.* **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações** - Coleção ABEPRO. Segunda edição. Editora Elsevier 2011.

MAREŠ, M.; HOREJŠ, O. **Modelling of cutting process impact on machine tool thermal behaviour based on experimental data.** Procedia CIRP, v. 58, p. 152–157, 2017.

MAYR, J. *et al.* **Thermal issues in machine tools.** CIRP Annals - Manufacturing Technology. v. 61, p. 771–791, 2012.

MIGUEL, P.A.C. **Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução.** Revista Produção, v17, n1, p216-219. Jan/Abr 2007.

NASCIMENTO, Claudia Hespanholo. **Estudo do erro de posicionamento do eixo X em função da temperatura de um centro de usinagem.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. 2015.

National Instruments, **O que é LabVIEW.** Disponível em <<http://www.ni.com/newsletter/51141/pt/>> . Acessado em: 15/01/2019.

SHE, C. S.; CHANG, C. **Design of a generic five-axis postprocessor based on generalized kinematics model of machine tool.** International Journal of Machine Tools & Manufacture v. 47, p. 537–545, 2007.

OKAFOR, A. C.; ERTEKIN, Y. M. **Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics.** International Journal of Machine Tools & Manufacture. v. 40, p. 1199–1213, 2000.

SCHWENKE, H. *et al.* **Geometric error measurement and compensation of machines.** CIRP Annals - Manufacturing Technology — An update. v. 57, p. 660–675, 2008.

TSUTSUMI, M.; SAITO, A. **Identification of angular and positional deviations inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 44, n. 12–13, p. 1333–1342, 2004.

UDDIN, M. S. *et al.* Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors. v. 33, p. 194–201, 2009.

WECK, M, *et. al.*, **Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools,** Annals of the CIRP, 44/2, 589-598, 1995

YANG, S.; YUAN, J.; NI, J. **Accuracy enhancement of a horizontal machining center by real-time error compensation.** Journal of Manufacturing Systems, v. 15, n. 2, p. 113–124, 1996.

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, C.; GAO, F.; YAN, L. **Thermal error characteristic analysis and modeling for machine tools due to time-varying environmental temperature.** Precision Engineering, v. 47, p. 231–238, 2017.

ZHANG, Y.; YANG, J.; ZHANG, K. **Geometric error measurement and compensation for the rotary table of five-axis machine tool with double ballbar**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 65, n. 1–4, p. 275–281, 2013.

ZOPELARRI, A. B. **Modelamento e compensação de erros térmicos para um centro de torneamento**. Dissertação (Mestrado) – Escola de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. 83p.

Anexo A – Programa CNC utilizado no experimento

N10 G90 G17 G71 G94 G64

N20 T="HASTE"

N30 M6

N40 M46

N50 G0X-189.9 Y-198.377

N60 Z90

N70 G54 D1 S3000 M3

N80 G4 F1800

N90 S0M3

N100 M19

N110 G1Y-208.377F200

N120 G4 F60

N130 G0X-189.9 Y-198.377

N140 G4 F600

N150 G90 G17 G71 G94 G64

N160 T="HASTE"

N170 M6

N180 M46

N190 G0X-189.9 Y-198.377

N200 Z90

N210 G54 D1 S4500 M3

N220 G4 F1800

N230 S0M3

N240 M19

N250 G1Y-208.377F200

N260 G4 F60

N270 G0X-189.9 Y-198.377

N280 G4 F600

N290 G90 G17 G71 G94 G64

N300 T="HASTE"

N310 M6

N320 M46

N330 G0X-189.9 Y-198.377

N340 Z90

N350 G54 D1 S6000 M3

N360 G4 F1800

N370 S0M3

N380 M19

N390 G1Y-208.377F200

N400 G4 F60

N410 G0X-189.9 Y-198.377

N420 G4 F600

N430 G90 G17 G71 G94 G64

N440 T="HASTE"

N450 M6

N460 M46

N470 G0X-189.9 Y-198.377

N480 Z90

N490 G54 D1 S9000 M3

N500 G4 F1800

N510 S0M3

N520 M19

N530 G1Y-208.377F200

N540 G4 F60

N550 G0X-189.9 Y-198.377

N560 G4 F600

N570 G90 G17 G71 G94 G64

N580 T="HASTE"

N590 M6

N600 M46

N610 G0X-189.9 Y-198.377

N620 Z90

N630 G54 D1 S12000 M3

N640 G4 F1800

N650 S0M3

N660 M19

N670 G1Y-208.377F200

N680 G4 F60

N690 G0X-189.9 Y-198.377

N700 G4 F600

N710 G90 G17 G71 G94 G64

N720 T="HASTE"

N730 M6

N740 M46

N750 G0X-189.9 Y-198.377

N760 Z90

N770 G54 D1 S15000 M3

N780 G4 F1800

N790 S0M3

N800 M19

N810 G1Y-208.377F200

N820 G4 F60

N830 G0X-189.9 Y-198.377

N840 M30

