

REVISÃO SOBRE OS TIPOS DE ERROS EM MÁQUINA-FERRAMENTA CINCO EIXOS

Flavia de Fátima Meneghel (Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP) flfmeneghe@unimep.br
Lucas Scavariello Franciscato (Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP) lasfrancis@unimep.br
Maria Célia de Oliveira (Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP e Universidade Presbiteriana Mackenzie) marolivei@unimep.br

Resumo:

Este artigo apresenta em estudo dos principais erros existentes em máquina-ferramenta cinco eixos. A importância deste estudo é pelo alto índice de aplicação deste tipo de máquina em mercados com peças de perfil complexo, especialmente por possibilitar o aumento da eficiência e produtividade em uma empresa. Os desvios presentes nesse tipo de máquina-ferramenta podem ser ocasionados por diversos fatores, tais como movimentação dos eixos, orientação de eixo e ferramenta, cinemáticos e térmicos. Esses erros interferem diretamente na qualidade da peça usinada, uma vez que o eixo de usinagem ou de movimentação podem ter deslocamento e posicionamento diferente do inserido no programa de usinagem. Para a identificação dos erros são necessários equipamentos de medição, que na maioria das vezes se comunica com o CNC (*Computer Numeric Control*) da máquina. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo conceitual teórico sobre os principais tipos de erros existentes em máquinas-ferramenta cinco eixos, mostrando também a interferência que os mesmos podem gerar na peça usinada e o quanto representativo são os sistemas de correção de erros que são inseridos no centro de usinagem para reduzir os desvios. Os resultados deste estudo mostraram que com sistemas de compensação de erros pode ter uma redução de desvios chegando a ser o máximo 5µm, e também que se há um sistema que correlaciona diversos tipos de erros do equipamento durante a correção, a peça usinada fica muito próxima das dimensões e tolerâncias projetadas.

Palavras chave: Máquina-ferramenta, Cinco eixos, Erros geométricos, Compensação de erros

Review about types of errors in five-axis machine tool

Abstract

This article presents a study of the main errors existents in five axis machine tools. The importance of this study is because of the high index of application in markets with pieces of complex profile, and also helps in the efficiency and productivity of the company. The deviations in this kind of machining center can be caused by several factors, such as axis movement, axis and tool orientation, kinematic and thermal. These errors directly interfere in the quality of the piece to be machined, once the machining or drive axis can have different displacement and positioning than the one inserted in the machining program. In order to identify the errors, measurement equipments are required, that in most cases communicates with the CNC (*Computer Numeric Control*) of the machine. This work has as objective to make a theoretical survey study on the main types of errors in five axis machine tools, showing an interference that can be generated in the machined piece and how representative are the error correction systems that are inserted in machining center to reduce deviations. The results of this study showed that with error compensation systems can have a deviations reduction, up to a maximum of 5µm, and also if the system correlates several types of errors of the equipment during the correction, the machined piece is very close to the dimensions and projected tolerances.

Key-words: Machine tools, Five axis, Geometric errors, Error compensation.

1. Introdução

O mercado atual busca a utilização de equipamentos de manufatura que sejam eficientes em seu processo e que o produto final atenda aos requisitos de qualidade exigidos em normas ou dados de projetos. Um exemplo de melhora na eficiência no processo de usinagem é o uso de máquina-ferramenta cinco eixos, a qual é designada para a produção de peças em menor lead time quando comparado o processo em máquina de três eixos e também para ser possível a fabricação de itens com perfil complexo (IBARAKI, 2010).

Nas máquinas-ferramentas existem diversos tipos de erros que são ocasionados por diferentes fatores presentes na máquina. Todos erros em máquinas-ferramentas resultam na qualidade da peça usinada, proporcionando que o produto pode estar conforme ou não conforme com o projeto desejado, o que acarreta em diversos impactos na cadeia produtiva do item (IBARAKI, 2010).

Estudos são realizados para ser possível identificar os erros presentes em máquinas-ferramentas cinco eixos, podendo ser eles ocasionados devido a movimentação e posicionamento de eixo, fatores térmicos, entre outros. Nesse cenário de conhecimento dos desvios, também há sistemas de correção desses erros na máquina, os quais estão diretamente associados com eixos de maior interferência e relação entre os demais (BITAR-NEHME, 2016, IBARAKI, 2010 e XIANG, 2016,). Esses tipos de compensação podem ser pré-estabelecidas nas máquinas, de maneira a ser inserida como parâmetro constante de correção no software após fazer a geometria do equipamento, ou então ser corrigida de modo simultâneo durante a usinagem, onde há um modelo matemático que faz a correção utilizando variáveis reais da condição em que a máquina se encontra durante o processo.

Este estudo trata da seguinte questão de pesquisa: Como os erros presentes na máquina-ferramenta cinco eixos interferem no posicionamento da ferramenta durante o processo de usinagem da peça causando diferenças entre a geometria idealizada para a peça e a realizada pela máquina?

Para responder a esta questão, este trabalho busca desenvolver um estudo conceitual teórico sobre os principais tipos de erros existentes em máquinas-ferramenta cinco eixos, mostrando também a interferência que os mesmos podem gerar na peça usinada e o quanto representativo são os sistemas de correção de erros que são inseridos no centro de usinagem para reduzir os desvios.

2. Erros em máquina-ferramenta cinco eixos

As máquinas-ferramenta cinco eixos possuem três eixos lineares (translacional) e dois eixos rotativos (angulares) (figura 1), podendo ser o eixo árvore (*spindle*) vertical, horizontal ou no eixo rotativo. É um tipo de máquina utilizada para fabricação de peças com perfis complexos, como por exemplo, moldes e matrizes, e sempre tem o tempo de processo de fabricação reduzido quando comparado com máquinas três eixos, melhorando assim a produtividade. Nos dias de hoje, a utilização desse tipo de máquina-ferramenta está crescendo, pois há busca de eficiência em todo o processo produtivo.

Os erros presentes em uma máquina-ferramenta podem estar relacionados com a fabricação da mesma, desde o processo de produção de uma peça que faz parte do equipamento até a montagem de todo conjunto, ou até mesmo com seu funcionamento durante a usinagem. Os desvios podem ser identificados por meio de medições com instrumentos devidamente calibrados e aferidos periodicamente (XIANG, 2016). Para cada tipo de erro são utilizados diferentes recursos para medição, podendo ser desde equipamentos como interferômetro *laser*,

ballbar e até sensores de temperatura, porém para todos é necessária a comunicação com o CNC (Comando Numérico Computadorizado) da máquina para ser possível a coleta de dados.

Nesse tipo de máquina, existem diversos erros que podem ser causados por diversos fatores. Esses desvios são conhecidos como erros de movimento, erros de localização, erros de orientação (XIANG, 2016), erros cinemáticos (IBARAKI, 2010) e erros térmicos (BITAR-NEHME, 2016). As máquinas do tipo apresentada no artigo, as de cinco eixos, são mais complexas quando comparadas com as de três eixos, sendo assim há também maior quantidade de erros presentes em todo sistema.

Quando é possível identificar os erros existentes, há possibilidade da elaboração de um modelo de correção para melhoria do produto e consequentemente da peça usinada.

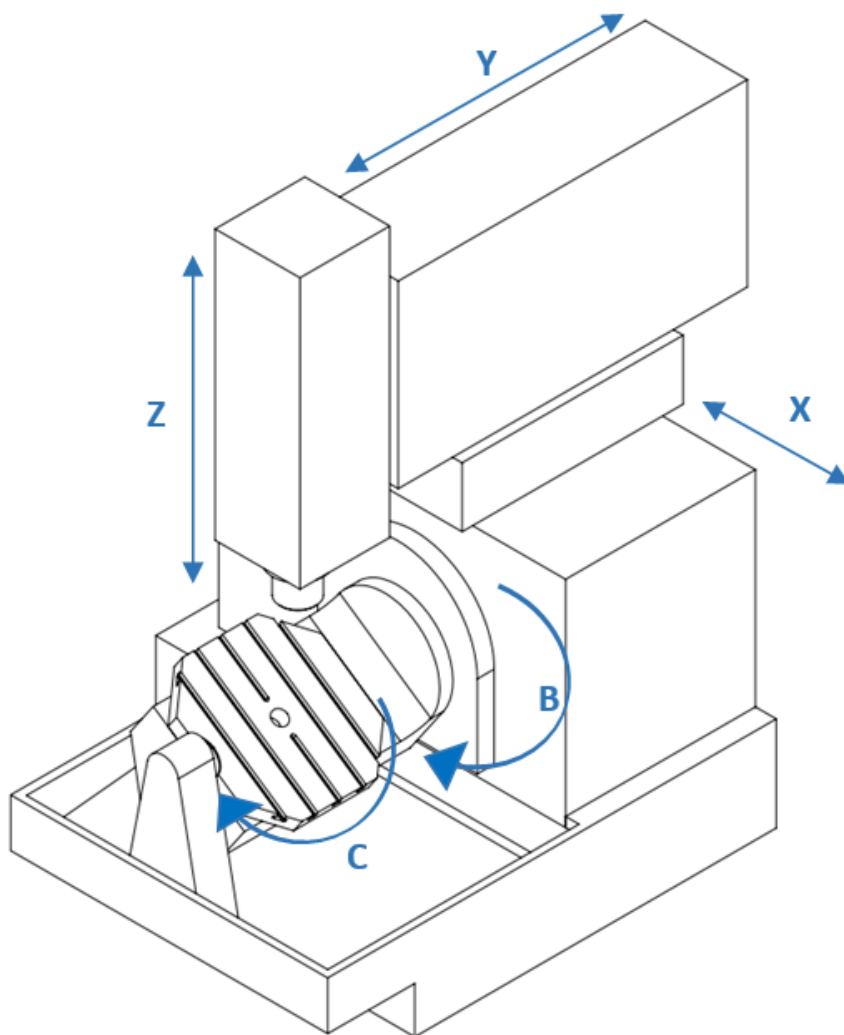


Figura 1 – Máquina-ferramenta cinco eixos com suas coordenadas

A figura 1 apresenta um esquema de um centro de usinagem vertical cinco eixos, sendo os eixos lineares X, Y e Z, e os rotativos B e C.

Os erros nas máquinas-ferramentas cinco eixos na maioria das vezes não estão relacionados somente com um eixo, mas sim em conjunto com uma segunda coordenada. Os erros apresentados nesse artigo serão os geométricos de movimento (PDGE – Erro Geométrico Dependente da Posição ou *Position-Dependent Geometric Errors*), orientação e localização (PIGE – Erro Geométrico Independente da Posição ou *Position-Independent Geometric*

Errors), erros cinemáticos, erros térmicos e erros de servomotor.

Os erros geométricos existentes em máquinas-ferramenta são oriundos de imperfeições mecânicas das peças do conjunto, podendo ser causados pelo desalinhamento dos eixos, uso de acoplamento e juntas, degradação de superfícies de guias. Esses desvios interferem nas dimensões finais da peça e também no seu formato, pois a posição relativa entre ferramenta de corte e peça são afetadas e com isso há diferença dimensional nos dois quesitos citados anteriormente. Os erros nas máquinas cinco eixos não são lineares devido a cinemática existente. A qualidade final da peça fabricada para ser montada na máquina-ferramenta também é responsável pelos erros ocasionados no equipamento (LOCALLE, 2009).

Os erros geométricos dependentes da posição (PDGE) são os erros de movimento presentes na máquina, sendo que para cada eixo, tanto linear quanto angular, existem seis erros para cada um deles. Para os eixos de translação são dois erros de linearidade, dois de posicionamento e três de angularidade, já para eixos rotativos há um de indicação linear, dois radiais, um angular de posição e dois angulares de rotação, totalizando 30 PDGEs em uma máquina cinco eixos (XIANG, 2016). Para a existência desses erros é necessário que o equipamento esteja em movimentação e os mesmos são gerados devidos a rotação dos eixos rotacionais (DING, 2016). Na figura 2 é possível identificar os PDGEs em uma máquina-ferramenta cinco eixos, onde o que difere os erros dos eixos lineares (X, Y e Z) é a coordenada principal, e para os eixos rotativos, como os indicados A e B, é o centro do eixo.

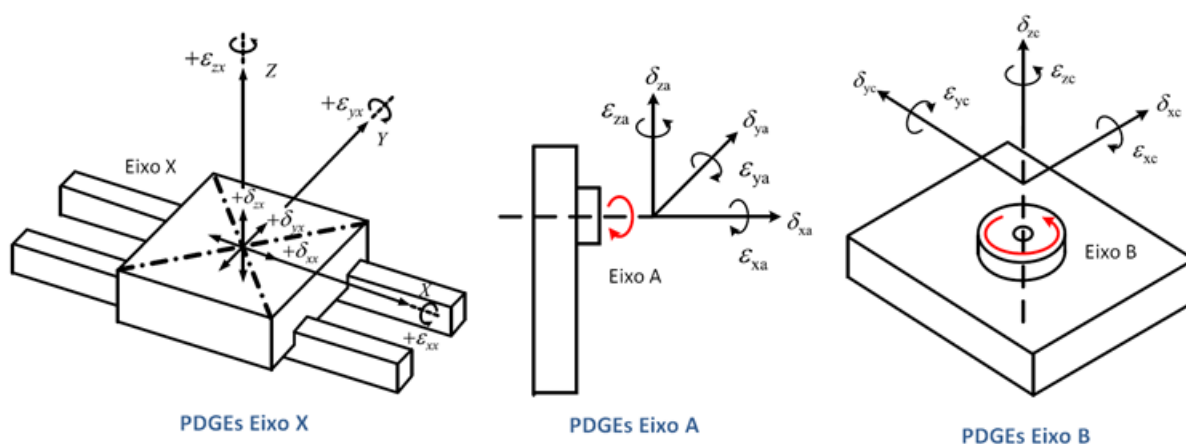


Figura 2 – Definição dos PDGEs – Adaptado. Fonte: Xiang (2016)

Os erros geométricos independentes da posição (PIGE) são os erros existentes nos eixos lineares e angulares devido a localização e orientação da ponta da ferramenta. Para cada eixo linear, há apenas um erro, que é o de perpendicularidade em relação ao eixo, e para cada eixo rotativo há quatro erros, que são os angulares entre eixos, totalizando 11 PIGEs para a máquina (XIANG, 2016). A figura 3 apresenta os PIGEs presentes na máquina do estudo, sendo que para os eixos lineares os desvios são mostrados como o ângulo entre o eixo ideal e o real, e nos eixos rotativos há a relação dos mesmos, porém em conjunto com os lineares.

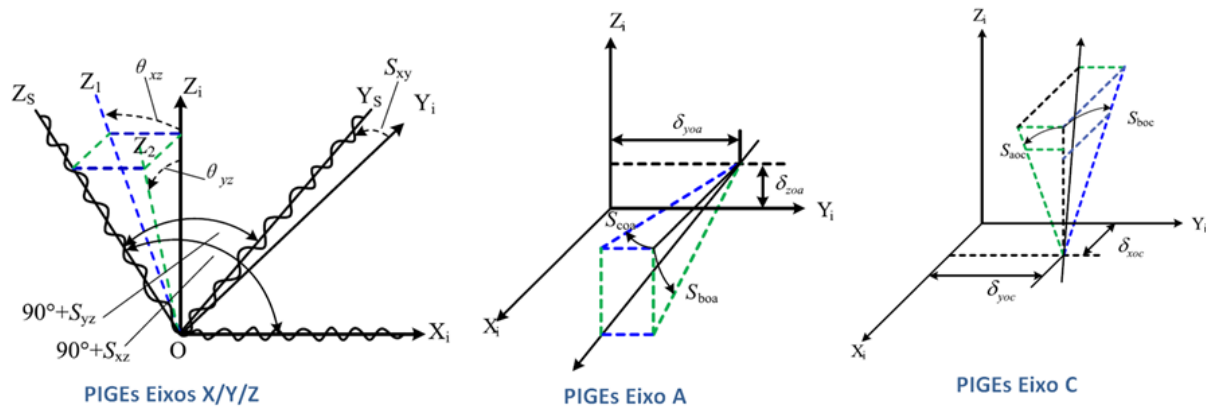


Figura 3 – Definição dos PIGs – Adaptado. Fonte: Xiang (2016)

Considerando os erros de PDGEs e os de PIGs para as máquinas-ferramenta cinco eixos há o total de 41 tipos de desvios.

Em uma máquina-ferramenta o erro térmico é ocasionado por diferenças de temperatura em todo sistema que envolve o equipamento, desde os elementos que fazem parte de todo o conjunto da máquina até ao ambiente em que se localiza a operação. Há grande influência da temperatura ambiente, sendo que até o horário que o processo é realizado pode influenciar, desse modo a operação executada pode ter valores de dilatação diferentes quando realizada pela manhã, pela tarde ou pela noite. O aquecimento do motor do eixo árvore interfere diretamente no comportamento térmico da máquina, que também pode estar relacionado ao avanço da mesma e a quantidade de cavacos produzidos (LACALLE, 2009).

Em uma máquina-ferramenta cinco eixos os erros gerados pela deformação térmica também estão associados com a existência de sistema refrigeração do cabeçote, tipo de material usados na construção das peças e simetria de peças, que podem ser analisados durante a fase de desenvolvimento do projeto da máquina (BITAR-NEHME, 2016; MAYR, 2015). Outro fator que também pode influenciar diretamente no desvio devido a temperatura é o calor provocado durante o processo de usinagem (MAYR, 2015). Para ser possível identificar o erro térmico dos conjuntos é necessário coletar os dados por meio de sensores de temperatura, e também a temperatura ambiente que a máquina se encontra (ZHANG, 2017).

Outro tipo de erro que também pode existir em uma máquina-ferramenta é o dos servomotores, os quais são responsáveis pela movimentação dos eixos lineares e angulares do equipamento, e quando ocorre a movimentação dos eixos rotativos os erros ocasionados são significativos (DING, 2016b).

Já os erros cinemáticos presentes em centro de usinagem cinco eixos são uns dos mais importantes fatores de desvios de todo o equipamento, o qual o centro da coordenada é alterado devido aos fatores de desvios angulares entre os eixos lineares e rotativos, desvios de esquadro entre eixos lineares e o erro linear do eixo rotativo ao longo da direção (IBARAKI, 2010).

3. Método de pesquisa

O desenvolvimento deste estudo se deu por meio de um estudo conceitual-teórico, que busca apresentar os estudos já realizados e com isso proporcionar uma discussão referente ao objetivo do artigo que está sendo feito, porém não cria um novo conceito do objeto de estudo.

Os pontos que são de maior enfoque nesse tipo de pesquisa é apresentar como foi feito determinado trabalho e o que foi realizado nele, de modo qualitativo, já os pontos de quem fez,

quando e onde fez são citados, porém sem muita relevância quando comparado com os quesitos anteriores. Esse tipo de pesquisa pode ser de caráter empírico, e o autor passa a ter responsabilidade pela discussão abordada (WHETTEN, 1989).

O estudo conceitual-teórico aqui desenvolvido apresenta os tipos de erros em máquinas-ferramenta cinco eixos, visando e relacionando esses desvios com a qualidade final de um processo de fabricação, no caso a usinagem de peças, e também os estudos realizados para correção desses erros.

Para o desenvolvimento do estudo, foram realizadas buscas de artigos na base de dados do Scopus, analisando artigos recentes, com menos de dez anos, e com pesquisa feita pelas palavras “five AND axis AND machine AND tools AND errors” (erros máquina-ferramenta cinco eixos), a qual apresentou 455 artigos.

4. Resultados e discussões

Os tipos de desvios estudados neste artigo contribuem para a existência de um conjunto de erros quando uma máquina-ferramenta de cinco eixos é considerada como um sistema único. Dessa maneira, podem ser observados diversos tipos de modelos de compensação de erros em máquinas-ferramenta cinco eixos, que são considerados eficientes e resultam na minimização desses erros e consequentemente na melhoria da qualidade da peça.

Uma das maneiras de compensação dos desvios é por meio de medição dos erros geométricos. Esta coleta de dados pode ser feita com o auxílio de interferômetro laser para avaliar os erros estáticos, e por meio de um *ballbar* para avaliar os erros dinâmicos. Para a correção destes erros, pode-se comparar os resultados obtidos com o MCS (Machine Coordinate System), que permite identificar a diferença existente entre os dois valores, e as correções são adicionadas via CNC no momento da construção da geometria da máquina. No estudo aqui avaliado, cujo resultado é apresentado na Figura 4, os erros dos eixos lineares X, Y e Z passaram de 55 μ m, 25 μ m e 55 μ m respectivamente, para 5 μ m, 1 μ m e 2 μ m após a aplicação da compensação. Na figura 5 é possível notar que a correção também pode ser aplicada a eixos angulares para minimizar estes erros (XIANG, 2016).

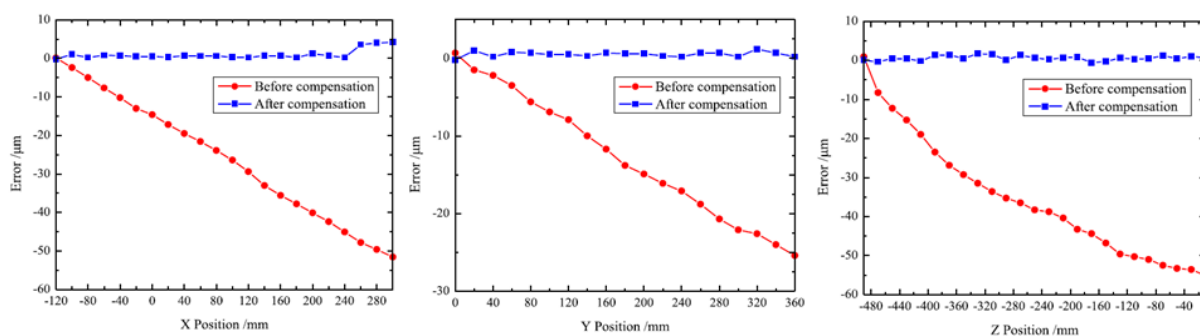


Figura 4 – Resultados experimental de compensação de erros dos eixos lineares. Fonte: Xiang (2016)

A Figura 4 mostra os erros gerados devido a movimentação dos três eixos lineares da máquina com compensação e sem compensação. O sistema tem melhor desempenho quando o equipamento tem a correção de erros aplicada, uma vez que os erros não ultrapassaram de 5 μ m para a máquina do estudo do autor.

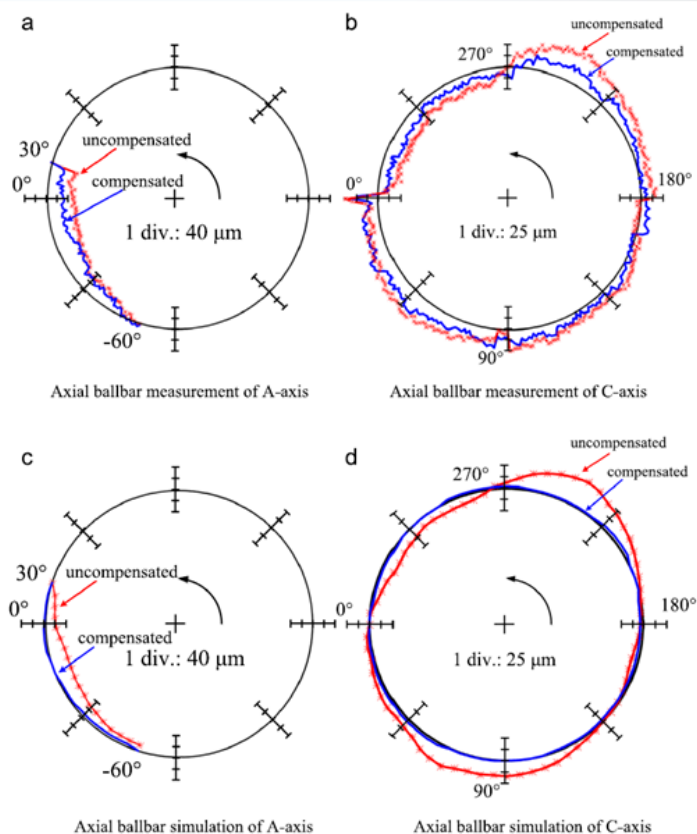


Figura 5 - Compensação de erros dos eixos angulares. (a) (b) medição do ballbar com e sem compensação de posicionamento angular dos erros, (c) (d) simulação de compensação dos 41 erros. Fonte: Xiang (2016)

É possível observar na Figura 5 que quando há correção de todos os 41 erros presentes na máquina-ferramenta a interferência de erros nos eixos rotativos será a mínima possível, sendo que a movimentação real dos eixos será muito próxima a programada. Já quando é compensado apenas erros angulares dos mesmos eixos, os rotativos, embora há redução de erros, o resultado final de movimentação ainda é distante do ideal.

Para a avaliação dos erros térmicos é possível fazer testes simultâneos, que movimentam os eixos lineares e rotativos, sendo os que de maiores importâncias são os rotativos, o qual também inclui o eixo rotacional do *spindle*, pois quando há ciclos de trabalho ocorre deformação dos conjuntos devido a variação térmica, e o alongamento dos mesmos interfere no posicionamento real de peça e ferramenta (BITAR-NEHME, 2016). A Figura 6 apresenta um exemplo desta avaliação.

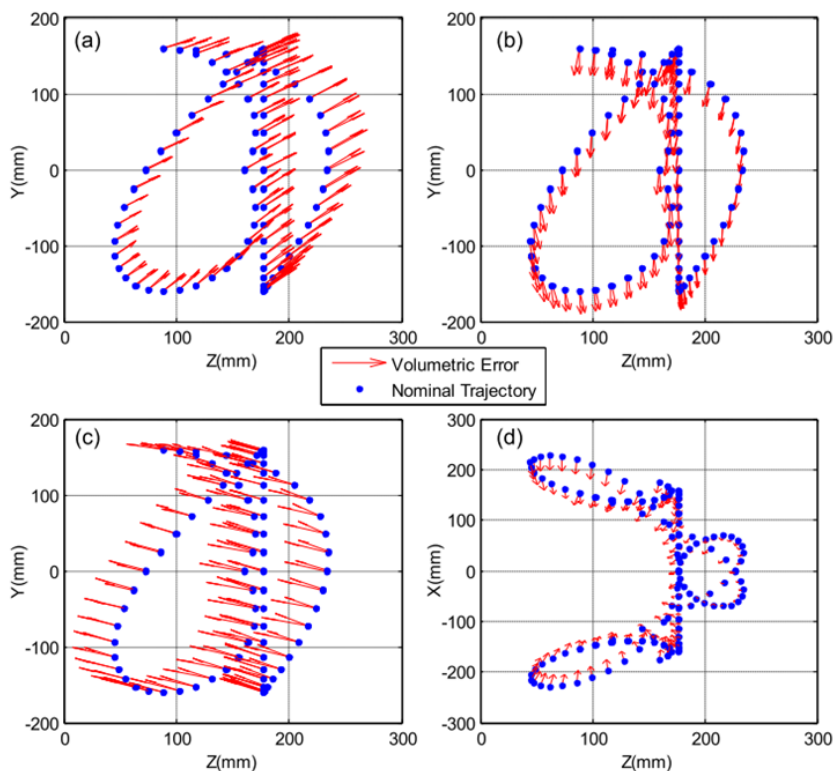


Figura 6 – Erro térmico volumétrico em centro de usinagem (a) eixo Z, (b) e (d) eixo rotativo B e (c) spindle.
Fonte: Bitar-nehme (2016)

Conforme se observa na Figura 6, o eixo rotativo B para o centro de usinagem horizontal cinco eixos, possui erros térmicos significativamente inferiores se comparados com o eixo Z e o *spindle*, o qual esse último pode estar relacionado pela elevada rotação durante os testes. Quando há ocorrência de erro térmico em eixo rotativo, consequentemente o eixo linear será afetado pelo desvio, pois é devido ao fator térmico, e em uma análise desse tipo os demais eixos também devem ser analisados (BITAR-NEHME, 2016).

A existência de erros em um centro de usinagem interfere na geometria final da peça, uma vez que o conjunto que apoia a peça a ser usinada ou até mesmo o conjunto de fixação da ferramenta de trabalho têm suas coordenadas alteradas em relação ao ponto ideal. Na figura 7 é possível identificar a alteração angular do posicionamento da mesa de trabalho, e consequentemente o deslocamento da peça.

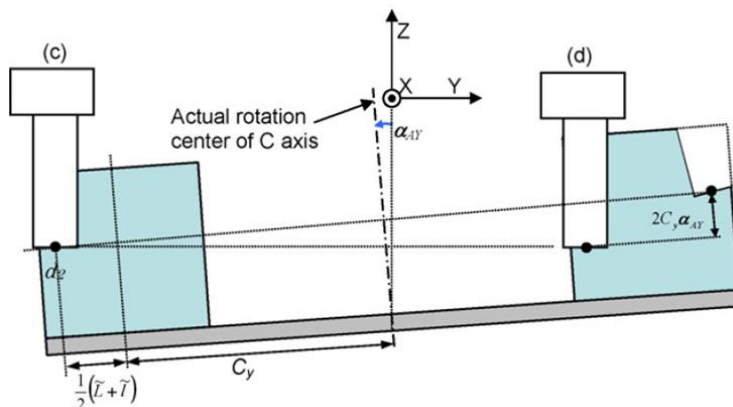


Figura 7 – Representação de erro ocasionado em peça. Fonte: Ibaraki (2010)

A figura 7 representa a interferência que os erros presentes na máquina-ferramenta causam durante a usinagem de uma peça, a qual é deslocada de maneira angular perante a ferramenta de trabalho, devido ao possível erro angular do eixo rotativo, o mesmo é responsável e interfere o centro de rotação do eixo angular, que pode ser deslocado por causa do desvio.

Para resumir os tipos de erros e as soluções que já foram propostas na literatura, o Quadro 1 apresenta um panorama geral dos estudos com estas propostas.

Autor	Artigo	Objetivo de estudo	Contribuição
(Creamer, J., Sammons, P.M., Bristow, D.A., (...), Freeman, P.L., Easley, S.J., 2017)	Table-Based volumetric error compensation of large five-axis machine tools	Compensação de erros da mesa de trabalho da máquina	Estudo com dois modelos de compensação: grau de liberdade no erro cinemático e erros no eixo de comando
(Liu, Y., Zhang, H., Wang, X., 2017)	Analysis on influence of perpendicularity error of five axis NC machine tool error modeling accuracy and complexity	Compensação de erros de perpendicularidade	Estudo baseado em erro de síntese de modelamento quando erro vertical é como o erro de translação modelado
(Ding, S., Huang, X., Yu, C., Wang, W., 2016a)	Actual inverse kinematics for position-independent and position-dependent geometric error compensation of five-axis machine tools	Compensação de erros dependente e independente da posição utilizando cinemática inversa	Método de compensação de modo de tempo real por meio de expressão analítica
(Gu, J., Agapiou, J.S., Kurgin, S., 2016)	Error compensation and accuracy improvements in 5-axis machine tools using the global offset method	Compensação de erros dependente e independente da posição	Modelo de compensação simples para ser adicionado em máquina cinco eixos
(Guo, Q., Zhao, G., Cheng, X., Qi, X., 2016)	Research on volumetric error compensation of two turntable five-axis machine tools	Compensação de erros volumétricos	Modelo de compensação experimental para duas mesas de trabalho
(Lee, K.-I., Yang, S.-H., 2016)	Compensation of position-independent and position-dependent geometric errors in the rotary axes of five-axis machine tools with a tilting rotary table	Compensação de erros dependente e independente da posição	Método de compensação de erros geométricos por meio dos erros dependente e independente de posição
(Xiang, S., Altintas, Y., 2016)	Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools	Compensação de erros volumétricos	Compensação dos 41 erros presentes na máquina, utilizando modelo cinemático da máquina
(Li, J., Xie, F., Liu, X.-J., 2016)	Geometric error modeling and sensitivity analysis of a five-axis machine tool	Compensação de erros geométricos	Erros mapeados pelas origens e posicionamento da ferramenta, e modelados no <i>multi-body system</i> (MBS)
(Givi, M., Mayer, J.R.R., 2016)	Optimized volumetric error compensation for five-axis machine tools considering relevance and compensability	Compensação de erros volumétricos	Erros podem se compensados e otimizados na máquina via código G
(Ding, S., Huang, X., Yu, C., Liu, X., 2016)	Identification of different geometric error models and definitions for the rotary axis of five-axis machine tools	Compensação de erros geométricos	Erros geométricos dos eixos rotativos, e utilização de dois modelos para compensação.

Quadro 1 – Estudos atuais e propostas de correção de erros

Os artigos apresentados no Quadro 1 mostram os tipos de pesquisas recentes que estão sendo realizadas para compensação de erros em máquinas-ferramentas cinco eixos, os quais abordam os diversos tipos de erros que podem estar presentes nesse tipo de equipamento, e em conjunto contribuem com um tipo de análise e compensação para os objetos de estudo. Para alguns

autores o foco dos estudos é baseado em erros geométricos, para outros em erros volumétricos, cinemáticos e também devido aos erros de posicionamento. Possivelmente o estudo é mais voltado para esses tipos de desvios pelo fato de serem relacionados com mais de um eixo ao mesmo tempo, para os volumétricos pelo menos os dois eixos rotativos, e já os PDGEs e PIGEs são um conjunto de erros presentes em todos os eixos do equipamento.

5. Conclusão

Os resultados deste estudo mostraram que a presença de erros em máquinas-ferramentas cinco eixos causam grandes desvios no momento da usinagem, que são eles ocasionados por diversos fatores, desde a fabricação de peças utilizadas na construção do equipamento como também as alterações decorrentes em erros de posicionamento da máquina e até mesmo variações térmicas dos conjuntos presentes no equipamento.

Estudos realizados com análise de erros dos cinco eixos da máquina mostraram que são mais significativos quando comparados com entendimento dos erros de um único eixo, pois a realização da usinagem, na maioria das vezes utiliza-se mais de um eixo simultaneamente.

Os desvios observados nos estudos tendem a ter como sistema de correção a integração de diversos fatores que influenciam nesses erros, onde busca relação entre o sistema de trabalho real da máquina e o sistema ideal apresentado no programa de usinagem, que é interpretado pelo CNC do equipamento. Quando há o uso de sistemas que corrigem esses erros, a máquina trabalha de maneira mais precisa e estável, e com maior assertividade em conformidade das peças produzidas, que dependendo dos erros há redução para valores muito próximos dos ideais e podendo considerar um sistema com baixo índice de erro ou quase zero.

Os estudos que relacionam erros em máquinas com o tipo de compensação estão voltados para os desvios volumétricos e geométricos, contudo são analisados os fatores que influenciam diretamente nesses erros e são estudados o melhor meio para compensação dos mesmos.

Esses sistemas de correção de erros estão sendo cada vez mais aplicados pelos fabricantes de máquinas-ferramenta, tornando seu produto mais preciso e de melhor eficiência no cliente final.

Durante a realização do estudo conceitual-teórico apresentado foram observados que há tendência de correção dos erros dos eixos rotacionais em máquina-ferramenta cinco eixos, e que também muitos deles buscam fazer experimentos práticos ao invés de somente simulação para ser possível melhor análise dos objetos de estudo e até mesmo a validação de um modelo, de modo que seja comparado o estudo teórico e o prático. Foram observados o grande número de pesquisas desenvolvidas na área, porém eles mostram de maneira sucinta quais são os fatores que impactam nos erros.

Referências

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

CREAMER, J. et al. *Table-Based volumetric error compensation of large five-axis machine tools.* Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 139, 2016.

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

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

GIVI, M.; MAYER, J. R. R. *Optimized volumetric error compensation for five-axis machine tools considering relevance and compensability.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 12, p. 44–55, 2016.

GU, J., AGAPIOU, J.S., KURGIN, S. *Error compensation and accuracy improvements in 5-axis machine tools using the global offset method.* Journal of Manufacturing Systems, v.44, p. 324–331, 2017.

IBARAKI, S. et al. *Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools.* Precision Engineering, v. 34, n. 3, p. 387–398, 2010.

LACALLE, L.N. L. de; LAMIKIZ, A. *Machine tools for high performance machining.* Londres: Springer-Verlag, 2009.

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

LIU, Y.; ZHANG, H.; WANG, X. *Analysis on Influence of Perpendicularity Error of Five Axis NC Machine Tool Error Modeling Accuracy and Complexity.* Procedia Engineering, v. 174, p. 557–565, 2017.

MAYR, J. et al. *Thermal error compensation of rotary axes and main spindles using cooling power as input parameter.* Journal of Manufacturing Systems, v. 37, p. 542–549, 2015.

XIANG, S.; ALTINTAS, Y. *Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 101, p. 65–78, 2016.

WHETTEN, D. A. *What Constitutes a Theoretical Contribution?* Academy of Management Review, v. 14, n. 4, p. 490–495, 1989.

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.