

MONITORAMENTO DOS ERROS TÉRMICOS DE UM CENTRO DE USINAGEM DE 3 EIXOS

Luigi Possari Clementi ¹; Éd Claudio Bordinassi ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O objetivo deste trabalho foi monitorar os erros térmicos em um Centro de Usinagem. Foram levantados os pontos quentes da máquina através de um termômetro infravermelho e uma câmera termográfica após a máquina funcionar por cerca de 4h. Após esta primeira análise, foram inseridos termopares nos pontos quentes, que em geral, ficaram próximos aos rolamentos e porcas dos fusos de esferas. Estes termopares foram ligados a um sistema LORA, que monitorou as temperaturas da máquina por semanas, com acesso feito por um painel disponível na página do Instituto Mauá e também por relatórios baixados. Concluída esta fase as deformações foram medidas por um sistema de laser interferométrico com precisão de micron. As diferenças encontradas com a máquina aquecida, com relação à máquina fria ficou por volta de 0,3 mm.*

Introdução e Objetivo

No Século XXI, a indústria metal mecânica e a Indústria 4.0 estão continuamente crescendo, juntas. Cada vez mais, a tecnologia domina esse cenário atual, sendo necessário a implementação de novas tecnologia em maquinários mais antigos, para aprimorar a qualidade em produtos. Contudo, existem diversos erros que interferem nos processos de usinagem. De acordo com estatísticas, o erro de usinagem relacionado ao erro térmico é de aproximadamente 50-70% (MIAO et al., 2015). Quando a máquina-ferramenta está em operação, a deformação térmica é inevitável, pois a temperatura relacionada a movimentação das peças da máquina está dinamicamente afetando todo o processo (ZHOU et al., 2018). Geralmente, a temperatura da máquina é afetada por dois fatores, o calor interno gerado pelo trabalho dos motores da máquina, e da radiação e convecção térmica entre a máquina e o exterior (local onde a máquina se encontra) (ZHOU et al., 2018).

Para o estudo dos erros térmicos, torna-se necessário analisar alguns pontos importantes. Para diminuir ou eliminar os erros das máquinas-ferramentas, muitas tentativas e grandes esforços foram feitos durante as últimas décadas. Alguns fabricantes são capazes de alcançar uma alta precisão melhorando metodologias de design e avançando em tecnologias de materiais. É muito mais fácil monitorar ou medir a quantidade de imprecisões e compensar através de alterações na posição comandada de diferentes eixos, o que é especialmente aplicável às máquinas-ferramentas CNC (ZHAO, Bi, Ke, 2017). Outra maneira de reduzir o erro induzido por calor da máquina-ferramenta é 'aquecer' a máquina-ferramenta antes do processo de corte real. Quando o estado de equilíbrio térmico da máquina-ferramenta é atingido, a máquina-ferramenta pode ser usada para o corte real de peças. O processo de aquecimento é normalmente demorado, o que afeta a eficiência geral da usinagem e não é ecológico (ZHOU et al., 2018). Eixos. De acordo com Miao et al. (2015), a seleção dos pontos sensíveis à temperatura, que têm influência mais importante no erro térmico, se baseia em selecionar o menor número de sensores de temperatura para obter os melhores efeitos de ajuste e previsão e robustez forte para um modelo de erro térmico. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar a variação de temperatura em alguns pontos estratégicos distribuídos em um Centro de Usinagem ROMI e correlacionar estas temperaturas com as deformações nos respectivos eixos.

Materiais e Métodos

A máquina objeto do estudo é o Centro de Usinagem Romi, Discovery 560, ilustrada na Figura 1. Os dados principais da máquina são: Velocidade máxima: 7.500 rpm; Cursos: Curso longitudinal (eixo X): 560 mm; Curso transversal (eixo Y): 406 mm; Curso vertical (eixo Z): 508 mm; Mesa: Dimensões da mesa: 840 x 360 mm; Motor principal CA (30 min): 15 / 11 cv/kW; Potência total instalada: 20 kVA

Levantamento dos pontos quentes

Para visualização dos pontos quentes, foi utilizada uma câmera termográfica modelo FLUKE VT02, exibida na Figura 2.

Dados da Câmera: Emissividade: 0,95; Transmissão: 1,00;
Escala de calibragem: - 10 °C até 250 °C

Para auxiliar nas medições dos pontos quentes, foi utilizado um termômetro digital infravermelho com mira laser.

Figura 1 - Centro de Usinagem ROMI



Fonte: Próprio Autor

Figura 2 - Câmera Fluke



Fonte: Próprio Autor

Para o levantamento dos pontos quentes, a máquina-ferramenta foi programada para ciclar por aproximadamente 4 horas, já que é o tempo necessário até a máquina atingir uma temperatura constante. Durante este tempo, em intervalos de 5, 15 e 30 minutos, foram registradas as temperaturas médias da máquina e foram registradas as imagens de cada mancal com a câmera termográfica FLUKE VT02. Os dados utilizados para ciclar a máquina foram: Avanço: de 12000 mm/min; Rotação: 5000 rpm; Cursos: 400 mm no eixo X, 300 mm no eixo Y, 150 mm no Eixo Z.

Medição dos pontos quentes

Para a coleta dos pontos quentes, foram utilizados termopares, que são sensores sensíveis a temperatura, na qual transformam temperatura em tensão através do efeito Seebeck. Segundo MELERO (2020), a geração de tensão elétrica a partir de um condutor ser exposto a um gradiente de temperatura é chamada a efeito Seebeck.

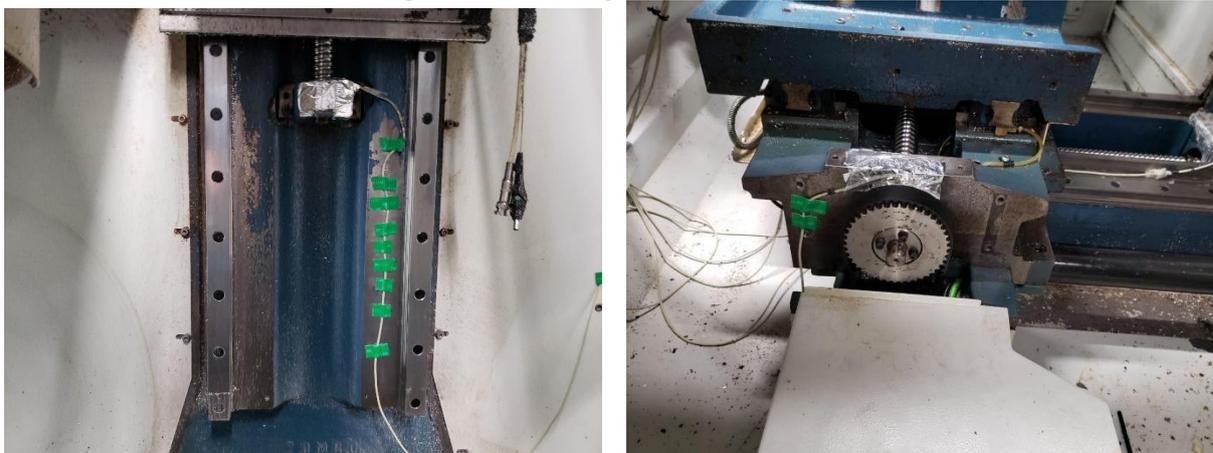
Antes da utilização dos termopares, foi feita uma verificação da variação das temperaturas registradas pelo sistema LORA. A certificação consistiu em mergulhar o termopar em um forno com o meio líquido agitado, aquecer o líquido e registrar a temperatura com um termo higrômetro digital. A temperatura (e o valor da resistência, medido com o auxílio de um multímetro) medida pelo termopar é comparada com a temperatura do líquido, e assim, é obtido o erro entre esses valores. O procedimento foi feito no Centro de Pesquisas do Instituto Mauá e mostrou valores adequados, aprovando os termopares para esta aplicação.

Para este trabalho na ponta de cada termopar, existe um resistor que mede a variação de temperatura, e o seu corpo foi revestido com uma massa epóxi, para fixação. Cada sensor foi conectado por um cabo de extensão ligado a um transmissor da rede LORA, infraestrutura existente no Campus do Instituto Mauá de Tecnologia. O LORA recebeu os dados, e os disponibilizou em tempo real, junto de um gráfico gerado através do tempo, além dos relatórios.

Para a instalação dos termopares, o maior desafio foi a parte da instalação nos mancais da máquina. Foram utilizados alguns materiais para fixação e isolamento como: pasta térmica, fita metálica para isolamento do calor, e fita dupla face para fixação.

O método para a fixação foi muito cuidadoso, já que os termopares não podem ter contato direto com o óleo da máquina. Nos mancais do eixo X, existem pontos onde há uma maior passagem de óleo, por isso foi muito importante utilizar uma camada de plástico filme para a proteção dos termopares. A Figura 3 mostra a fixação de alguns termopares.

Figura 3 – Instalação dos termopares



Fonte: Próprio Autor

Medição das deformações

Para a medição das deformações obtidas nos eixos da máquina, foi utilizado um aparelho de interferometria a laser. O princípio básico da interferometria é, normalmente, um único feixe

de entrada proveniente de uma fonte de luz coerente será dividido em dois feixes idênticos pelo interferômetro de Michelson (O feixe laser é emitido pela fonte laser e é dividido em dois feixes no interferômetro. Estes feixes são refletidos de volta pelos dois retrorrefletores e recombinados no interferômetro antes de atingir o detector). Cada um desses feixes percorre uma rota diferente, chamado caminho, sendo em seguida recombinados antes de alcançar um detector. A diferença entre as distâncias percorridas por cada feixe cria uma diferença de fase entre eles. Assim, qualquer deformação no comprimento do eixo devido ao erro térmico, será medido com precisão pela interferometria a laser.

O aparelho utilizado para realizar a medição será a unidade laser RENISHAW XL-80 e o compensador RENISHAW XC-80. A figura 4 exibe os dois equipamentos:

Figura 4 - Aparelhos RENISHAW - (a) - Unidade laser XL-80, (b) - Compensador XC-80

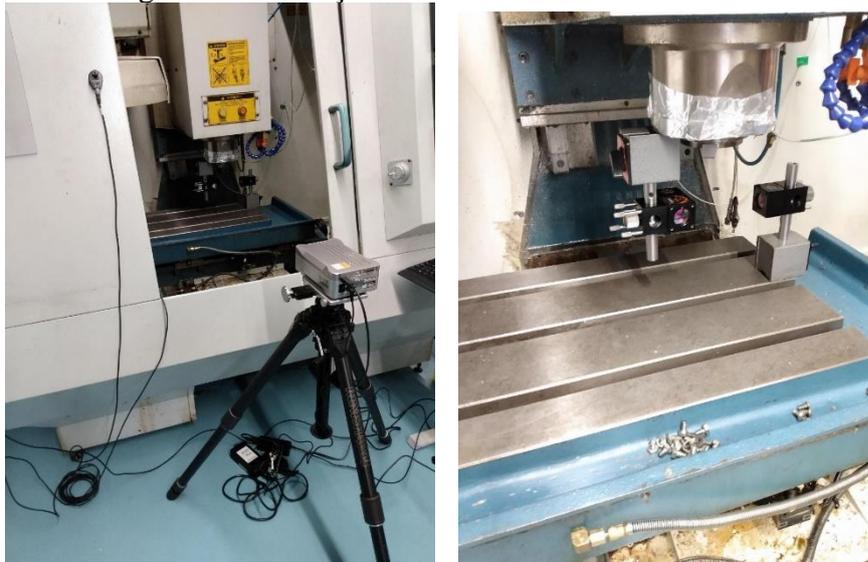


Fonte: RENISHAW

Para as medições das deformações dos eixos, a máquina realizou duas medições, uma com a máquina “fria”, e a outra com a máquina já “quente”. Para as medições da máquina quente foi considerado como referência o termopar 6. A máquina foi ciclada até este termopar atingir a temperatura de 40°C e o equipamento iniciou a varredura no eixo realizando a medição a cada 50mm. A varredura foi realizada continuamente até a temperatura do termopar chegar a 30°C. Este procedimento foi repetido para os 3 eixos.

A Figura 5 mostra o equipamento instalado do lado de fora da máquina e a instalação dos espelhos na mesa da máquina para medição das deformações no eixo X.

Figura 5 - Instalação da unidade laser RENISHAW



Fonte: Próprio Autor

Resultados e Discussão

Levantamento dos pontos quentes

No começo das medições, a máquina iniciou com uma temperatura ambiente de

aproximadamente 17,5 °C. O início do aquecimento foi monitorado para conhecer melhor o comportamento da máquina de 15 em 15 min. Após a estabilização da máquina que ocorreu após ~ 4 h as imagens dos pontos quentes foram fotografadas. A Tabela 1 mostra a variação de temperatura (inicial e final) para tomada dos pontos quentes nos 3 eixos.

Tabela 1 - Temperaturas inicial e final para tomada dos pontos quentes nos eixos

Mancal	Posição	Temperatura dos Pontos Quentes	
		1º medição (°C)	2º medição (°C)
Y	1	14,00	28,70
	2	14,00	27,23
Z	3	14,00	33,87
	4	14,00	31,24
X	5	14,00	25,51
	6	14,00	29,97

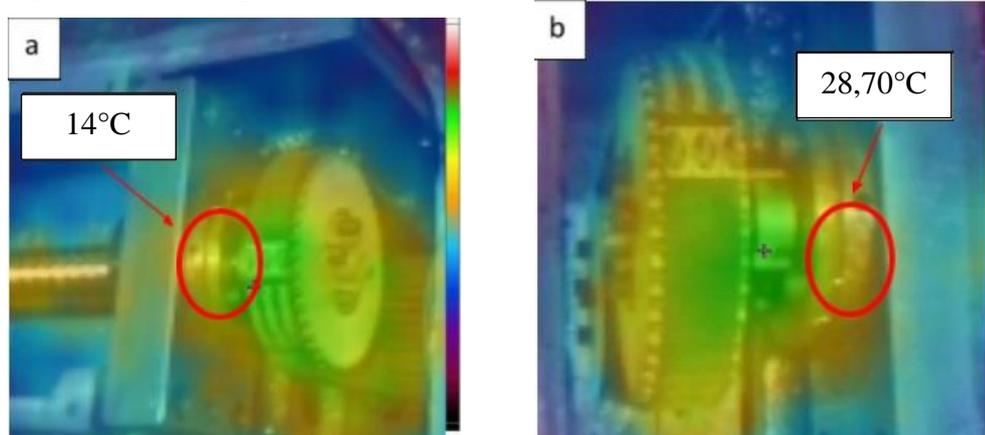
Fonte: Próprio Autor

Imagem dos pontos quentes

As figuras a seguir mostram as temperaturas registradas pela câmera termográfica. Nelas, é possível notar a evolução de temperatura em cada mancal, e no cabeçote. Em alguns mancais, a diferença de temperatura não está nítida, como o eixo Y. Nas imagens, existe uma cruz vermelha indicando o ponto quente. Porém, em alguns lugares, esta cruz está no eixo ou na correia dentada, impossibilitando a colocação do termopar. Assim, o local do ponto quente que possibilita posicionar o termopar está simbolizado por um círculo vermelho, e a sua temperatura indicada ao lado. Ao lado direito de cada figura, está expressa a escala termográfica (Cor Vermelha > Cor Roxo).

A Figura 6 mostra o exemplo das imagens obtidas na câmera termográfica. O mancal na figura 6 é o dianteiro do eixo Y, com suas respectivas temperaturas iniciais e finais.

Figura 6 - Pontos quentes no mancal dianteiro do eixo Y - (a) inicial - (b) final

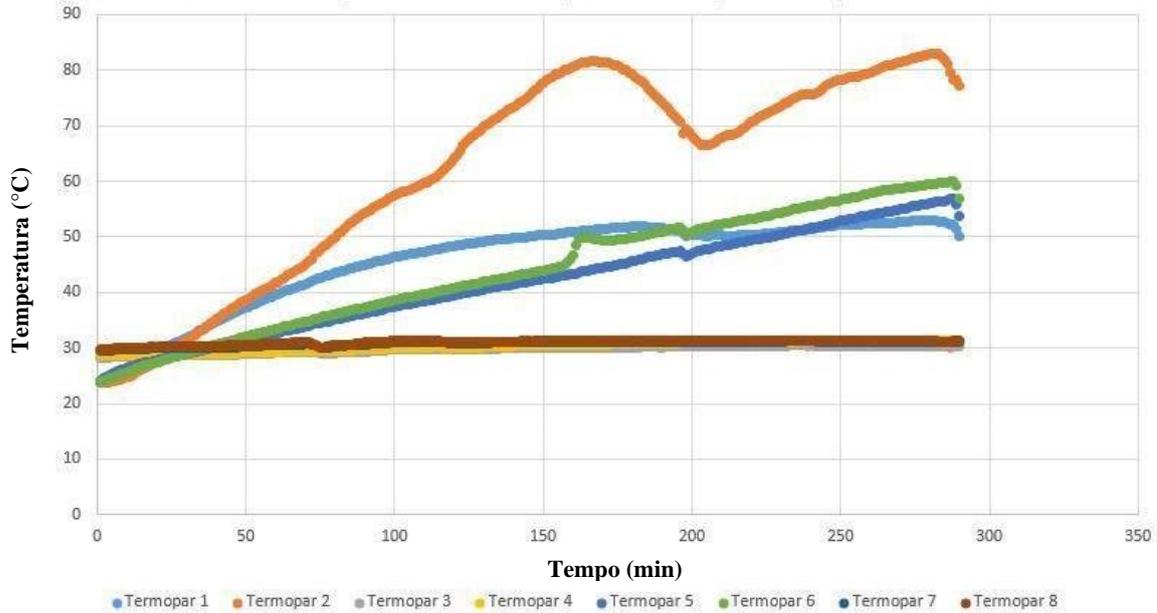


Fonte: Próprio Autor

Medições das temperaturas com os termopares

A Figura a seguir mostra uma das medições realizadas, no dia 02/10/2019, com uma velocidade de 12000 mm/min, com início das 12:15, e final às 17:20.

Figura 7 - Temperatura dos termopares obtida em função do tempo



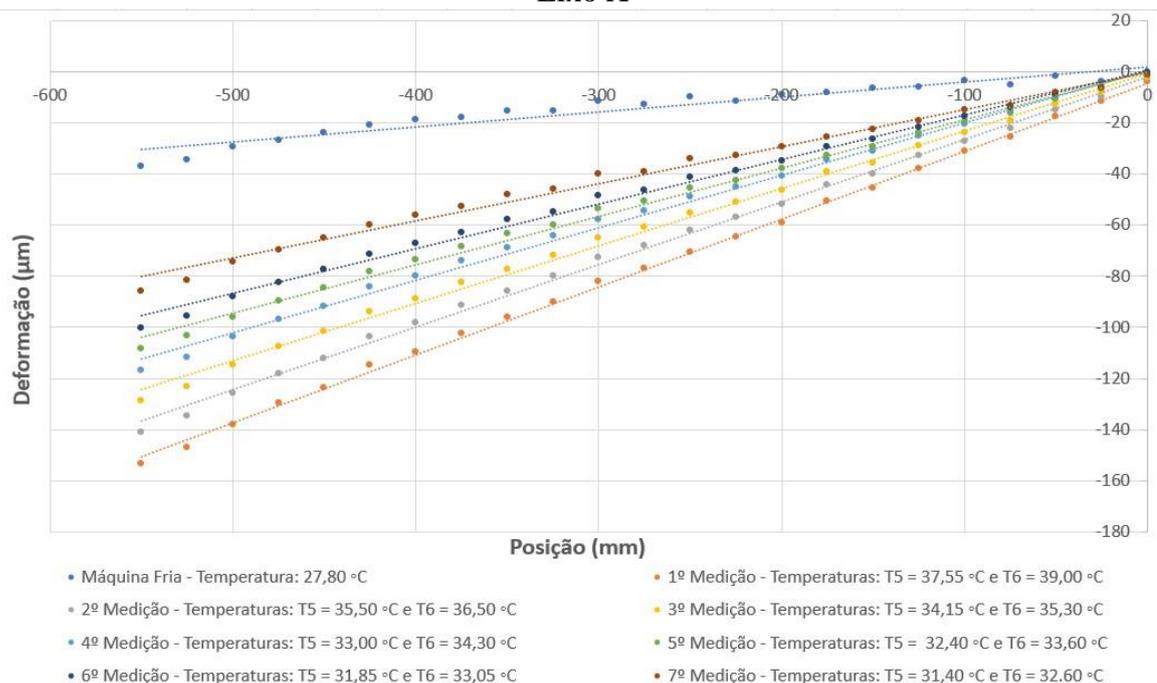
Fonte: Próprio Autor

Medições das deformações

A seguir serão apresentados os resultados compilados em uma única imagem para melhor visualização dos resultados.

A Figura 8 mostra os resultados obtidos para o eixo X da máquina. Este é o eixo com maior curso e conseqüentemente maiores deformações. A maior diferença chegou a 150 μm , que equivalem a 0,15 mm. Para se ter uma ideia de quanto representa este número na prática, para uma tolerância corriqueira na fabricação de peças, por exemplo, H7 a variação permitida na dimensão de 450 a 500 mm é de 0,063 mm, ou seja, só a variação da máquina sem contar os outros fatores que podem interferir na usinagem, já está quase 3 vezes maior que uma tolerância convencional, o que dificulta enormemente a obtenção de dimensões com precisão.

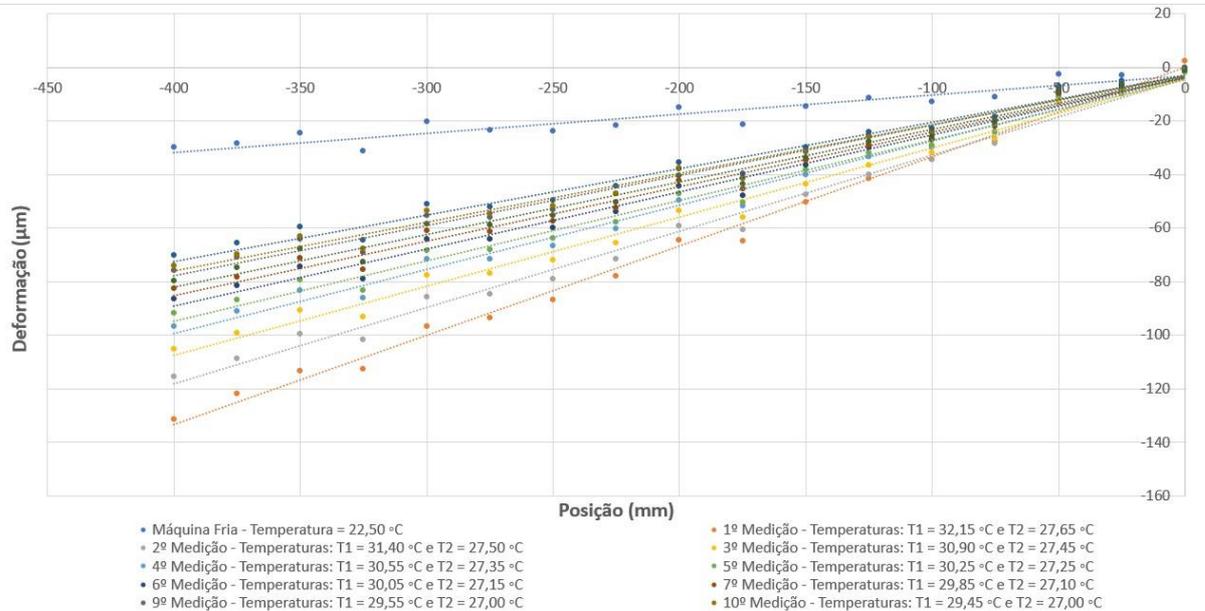
Figura 4 - Deformação em função da posição para diferentes medições de temperatura do Eixo X



Fonte: Próprio Autor

A Figura 9 mostra os resultados obtidos para o eixo Y da máquina. O curso neste eixo é menor que o anterior, mas as variações foram maiores para o mesmo curso. No meio do trabalho os rolamentos deste eixo foram trocados e seu fuso de esferas, reparado. Imaginava-se que os resultados seriam melhores do que os apresentados e apesar dos rolamentos novos com menor aquecimento, as deformações para o curso de 400 mm chegaram a 130 μm , contra 110 μm do eixo X.

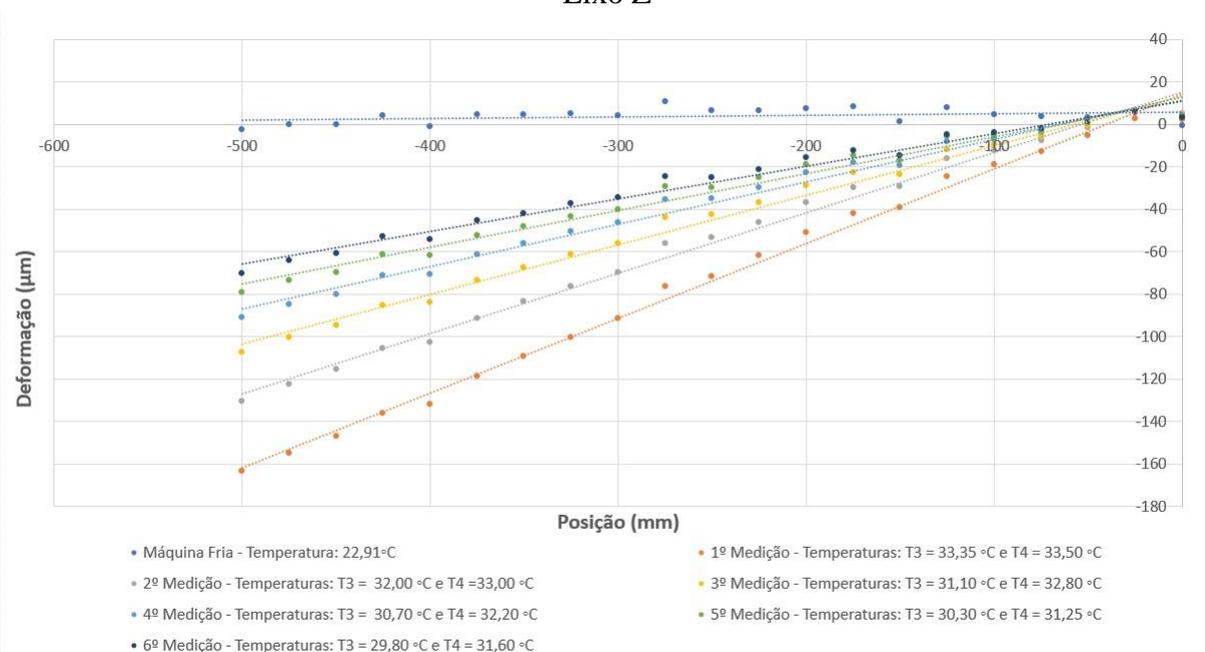
Figura 9 – Deformação em função da posição para diferentes medições de temperatura do Eixo Y



Fonte: Próprio Autor

A Figura 10 mostra os resultados para o eixo Z da máquina. Para a máquina fria praticamente não ocorreram variações e para a máquina quente, as variações encontradas foram próximas aos 2 eixos anteriores, com valor máximo = 160 μm .

Figura 10 - Deformação em função da posição para diferentes medições de temperatura do Eixo Z



Fonte: Próprio Autor

Conclusões

As temperaturas monitoradas nos testes variaram de 25 °C à aproximadamente 30 °C. Alguns termopares, como por exemplo, 5 e 6, obtiveram uma variação maior.

As deformações máximas variam de 0,120 mm a 0,160 mm, e foram para cada eixo de: Eixo X = 0,150 mm; Eixo Y = 0,130 mm; Eixo Z = 0,160 mm. O gráfico deformação em função da temperatura mostrou um comportamento linear e a medida que temperatura diminuía, esta reta se aproximava da temperatura da máquina fria. Ou seja, quanto menor a temperatura, menor a deformação do fuso.

Referências

- Gurauskis, D., Kilikevičius, A., Borodinas, S., & Kasparaitis, A. (2019). Analysis of geometric and thermal errors of linear encoder for real-time compensation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 296, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.06.055>
- Junior, O. H. (2014). Protótipo de um microgerador termoelétrico para captação de energias residuais baseado no efeito seeback co sistema de transferência de calor intercambiável.
- Junior, V. M. (2020). *ELETRICIDADE - Nota de aula complementar*. Fonte: <http://imt.mrooms.net>
- Miao, E., Liu, Y., Liu, H., Gao, Z., & Li, W. (2015). Study on the effects of changes in temperature-sensitive points on thermal error compensation model for CNC machine tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.
- RENISHAW. (2020, 05 04). Retrieved from RENISHAW: www.renishaw.com.br
- Zhang, B., & Wu, J. (2019, April). Modeling and optimizing. *Journal of Engineering Manufacture*, pp. 1-14.
- Zhao, D., Bi, Y., & Ke, Y. (2017). An efficient error compensation method for coordinated CNC five-axis machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.08.007>
- Zhou, H., Hu, P., Tan, H., Chen, J., & Liu, G. (2018). Modelling and compensation of thermal deformation for machine tool based on the real-time data of the CNC system. *Procedia Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.150>