

QUALIFICAÇÃO GEOMÉTRICA VIA INTERFEROMETRIA ÓPTICA DE UMA MESA DE COORDENADA CARTESIANA DEDICADA A USINAGEM DE PERFIS

Vinicius Haddad Andrade¹, vinicius_test@hotmail.com
Pedro Córdula de Sousa¹, pcorduladesousa@gmail.com
Erick Cardoso Costa¹, erick.cardoso.costa@posgrad.ufsc.br
Fabio Antonio Xavier¹, f.xavier@ufsc.br

¹Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC, Brasil

Resumo. Em virtude do aumento crescente de competitividade, o setor de manufatura encontra-se em uma constante busca de garantia de qualidade dos produtos agregada ao mínimo de custo, o que confere alto valor agregado ao cliente final. Dentre os diferentes fatores que influenciam a qualidade e afetam a competitividade industrial, estão o controle de produção no que tange a precisão dimensional e geométrica, bem como da qualidade de acabamento da superfície usinada. Como estratégia, deve-se assegurar que a máquina-ferramenta mantenha elevado desempenho concomitante a alta capacidade para a execução de operações de usinagem, o que demanda de caracterização metrológica para determinação dos desvios de trajetória. Nesse contexto, este trabalho visa determinar a exatidão e repetibilidade de posicionamento dos eixos X-Y controlados numericamente via microcomputador de um novo conceito de máquina-ferramenta dedicado a usinagem de perfis bidimensionais. Para tanto, foi aplicada uma abordagem experimental utilizando um laser interferométrico (Renishaw, XL 80) para execução de ensaios geométricos. Trajetórias lineares assíncronas com deslocamento intermitente foram empregadas para os eixos X-Y, conforme recomendações da ISO 230-2. A temperatura e humidade do sistema e dos motores de acionamento foram monitoradas. Foram usinadas amostras em arco e plano e estas foram caracterizados via máquina de medição por coordenadas (Zeiss, Micura 5/5/5) para qualificação da máquina-ferramenta. Como resultado, foi verificado um erro menor que 50 μm em um deslocamento de 40,00 mm para o eixo X. A partir disso, foi mensurado um erro médio bidirecional de 211,4 μm até alcançar o percurso de 100 mm. O erro global estimado para o eixo X foi de 2,1 $\mu\text{m/mm}$. Enquanto isso, o eixo Y apresentou um aumento linear dos valores de erro de deslocamento de modo que foi mensurado um erro bidirecional de até 855 μm com um erro global de 2,9 $\mu\text{m/mm}$. Para ambos os ensaios, os deslocamentos nos sentidos +X e +Y foram levemente menores quando comparados aos deslocamentos em -X e -Y. A temperatura das carcaças dos motores variou em um intervalo de 28 a 31°C, que está no intervalo de trabalho indicado pelos fabricantes. Foram observadas variações dimensionais nas peças em arco usinadas com fio diamantado, mas que mantiveram-se dentro da exatidão de medição unidirecional. O sistema de movimentação se mostrou satisfatório para obtenção de finas lâminas e peças em arco, de modo que os dados de erros obtidos possibilitam a implementação de um sistema com resposta instantânea para correção de movimentação síncrona dos eixos X-Y.

Palavras chave: mesa CNC, desvio de trajetória, laser interferométrico, ISO 230-2, metrologia geométrica.

1. INTRODUÇÃO

O setor tecnológico relacionado aos ímãs de Nd-Fe-B é emergente e tem se destacado devido à sua grande importância em equipamentos, como veículos híbridos e elétricos, geradores de energia eólica, aparelhos de medicina (ressonância magnética e marca-passo), dispositivos eletrônicos, como discos rígidos de alta capacidade, entre outros produtos (Mohapatra e Liu, 2018; Croat, 2018). No entanto, a manufatura de componentes magnéticos que apresentem geometrias complexas com tolerâncias estreitas é um desafio considerável, devido à natureza frágil e de difícil usinabilidade do Nd-Fe-B. Uma abordagem promissora para contornar esse problema é a utilização de corte com fio diamantado, que pode remover material com baixo esforço e temperatura na zona de corte, por meio do desgaste abrasivo entre dois corpos.

Devido à ampla aplicação dos ímãs de Nd-Fe-B e sua difícil usinabilidade, um projeto de doutoramento está sendo desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP-UFSC) para criar uma nova concepção de máquina-ferramenta, cuja finalidade é o corte de pequenas lâminas planas e arcos de ímãs permanentes à base de Nd-Fe-B, utilizando comando numérico computadorizado. No entanto, as limitações físicas sobre a manufatura de uma máquina-ferramenta, como erros geométricos, problemas de rigidez, efeitos térmicos e a cinemática do sistema de corte resultam

em ruídos, imprecisões e imperfeições no processo que se traduzem na peça final (Neugebauer et al., 2007). Apesar da lista de problemas que afetam a precisão do sistema se estender, é possível aplicar técnicas de caracterização que podem auxiliar na redução da influência que cada variável tem sobre o erro na peça final. Por exemplo, pode-se usar materiais que apresentam maior densidade de massa na estrutura do sistema para redução das vibrações, utilização de eixos de precisão, entre outras estratégias aplicadas durante o processo de projeto mecânico (Blaser et al., 2017).

Outra abordagem ao problema de precisão é a utilização de um sistema controlado por comando numérico computadorizado (CNC), o qual já tem seu uso amplamente difundido em centros de usinagem por apresentar uma melhora significativa na velocidade de usinagem, viabiliza projetos de maior complexidade pelo movimento síncrono dos eixos de movimentação e apresenta um alto nível de precisão, o qual é essencial para o correto funcionamento de diversos equipamentos que requerem tolerâncias estreitas. Uma vez que os sistemas apresentam elevada precisão, torna-se viável o projeto de peças com geometria livres e complexas, o que gera maior valor agregado ao consumidor final (Altintas, 2011; Klocke, 2009). Para a garantia da confiabilidade de um sistema de precisão torna-se necessário a avaliação de um sistema máquina ferramenta o qual é definido pela ISO-230 a qual é composta por várias partes, cada uma de suas partes tem ênfase em uma fonte de erro ou na caracterização do resultado dessa fonte. As partes da ISO 230 são:

- ISO 230-1 (2012) – Define os erros geométricos da máquina-ferramenta sob a ausência de esforços agindo sobre o sistema ou em modo de operação quasi-estático;
- ISO 230-2 (2006) – Descreve os métodos para determinação dos erros de repetibilidade de posicionamento de uma mesa CNC;
- ISO 230-3 (2007) – Descreve os métodos para avaliação dos efeitos térmicos sobre os erros de deslocamento e deformações sobre a estrutura do sistema;
- ISO 230-4 (2022) – Define os ensaios para caracterização de erros de interpolação circular em máquinas CNC;
- ISO 230-5 (2000) – Caracteriza o nível de emissão de ruído de máquinas;
- ISO 230-6 (2006) – Determina a exatidão de posicionamento volumétrico por meio de testes de deslocamento diagonal;
- ISO 230-7 (2015) – Caracteriza exatidão geométrica para eixos rotativos;
- ISO 230-8 (2010) – Define os diferentes tipos de vibração que pode ocorrer entre o porta-ferramenta e o suporte da peça;
- ISO 230-9 (2005) – Estima as incertezas das medições das outras partes da norma;
- ISO 230-10 (2016) – Especifica os procedimentos para avaliar performance por sistemas de sonda de contato CNC;
- ISO 230-11 (2018) – Define os instrumentos de medição próprios para realizar os testes geométricos;
- ISO 230-12 (2022) – Define a exatidão de peças de teste finalizadas.

Considerando as informações supracitadas, o presente trabalho propõe qualificar e quantificar tanto os erros macrogeométricos das amostras usinadas, quanto determinar a exatidão e repetibilidade de posicionamento de eixos controlados numericamente de uma máquina-ferramenta projetada e construída em um trabalho de doutoramento no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP-UFSC) por meio de ensaios geométricos. Seguindo o escopo e as necessidades vigentes do projeto, ensaios foram realizados de acordo com a norma vigente ISO 230-2 (2006), norma que caracteriza os erros, define as equações pertinentes e metodologia aplicada ao estudo metrológico de sistema de movimentação CNC de máquinas-ferramentas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DA PEÇA UTILIZADO NA MÁQUINA-FERRAMENTA

A máquina-ferramenta consiste de um sistema de corte com fio diamantado contínuo, desenvolvida em um trabalho de doutoramento para possibilitar o corte de materiais que apresentem baixa tenacidade à fratura e elevada dureza com o mínimo de danos sobre a integridade da superfície. Essa máquina-ferramenta é composta, de maneira geral, por um comando numérico computadorizado (CNC) para movimentação da peça de trabalho, acionamento da ferramenta de corte por meio de um sistema motriz conectado ao eixo-árvore e um conjunto de polias, e de um sistema de lubrificação baseado em uma bomba de refrigeração e tranque para filtragem e recirculação. Com relação à mesa CNC, foco deste trabalho, a mesma é composta por guias lineares de precisão que permitem um deslocamento síncrono em ambas as direções referentes aos eixos X-Y. Os atuadores deste sistema consistem de guias lineares e fusos de esferas recirculantes de precisão que, acoplados aos motores elétricos que apresentam no eixo X apresenta uma resolução de 1,6 μm e uma capacidade dele é de 102,00 mm, e o eixo Y apresenta uma resolução de 1,2 μm e um comprimento total de 295,00 mm. Ambos sistemas são acionados por meio de uma unidade de controle CNC que

permite a interpretação de código-G por meio de uma interface homem-máquina desenvolvida *in-house*. A Fig. 1 mostra o interior da máquina-ferramenta com ênfase ao sistema de movimentação CNC da peça de trabalho.

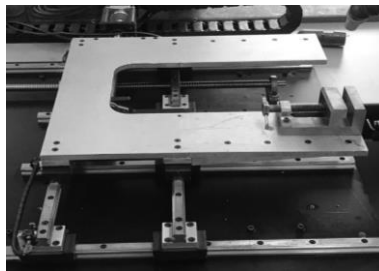


Figura 1. Sistema de movimentação CNC avaliada.

2.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA MÁQUINA-FERRAMENTA

2.2.1 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO PARA OS ENSAIOS GEOMÉTRICOS

Para os ensaios de erro geométrico, tomou-se como base a norma ISO 230-2 (2006) que descreve sobre a determinação da exatidão e repetibilidade de posicionamento dos eixos controlados numericamente, foi estabelecido a execução de 5 baterias para cada eixo de movimentação, considerando o deslocamento positivo e negativo no respectivo eixo. Utilizou-se um laser interferométrico da Renishaw modelo XL 80, calibrado com uma resolução de 1 nm e uma faixa nominal de 80 m, mostrado na Fig. 2a. O conjunto de medição é composto por uma fonte laser agregado a um conjunto de espelhos refletor que foram posicionados e alinhados para detecção do feixe laser e um microcomputador para interpretação e armazenamento dos dados de deslocamento e erros mensurados. Sensores de temperatura e de umidade também foram acoplados magneticamente sobre a base da máquina-ferramenta para avaliar as condições do ambiente, mostrados nas Figuras 2b e 2c. Para medição da temperatura das carcaças dos motores utilizados como atuadores da mesa CNC foi utilizado um conjunto de termopares para a medição da temperatura durante os ensaios.

Os dados adquiridos nos ensaios contemplam o erro de posicionamento, a dispersão de posicionamento, a histerese e o erro máximo de posicionamento linear dos eixos X-Y. O tratamento e representação gráfica dos dados foi efetuado com suporte do software *Microsoft Excel*®.

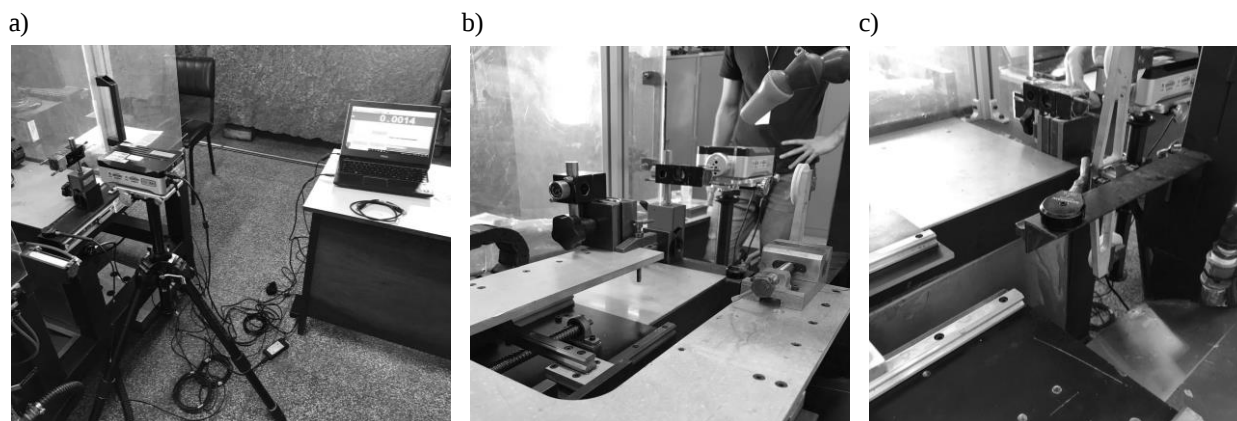


Figura 2. Sistema de medição de erro de movimentação via interferometria óptica.

2.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ERROS LINEARES DOS EIXOS X-Y

A caracterização dos erros dos eixos lineares foi realizada com base na norma ISO 230 (2012; 2006; 2007), que versa sobre a padronização dos métodos para avaliação da precisão de máquinas-ferramentas, com exceção de máquinas portáteis. Para execução dos ensaios, as magnitudes de deslocamento para cada eixo X-Y foram determinadas seguindo as diretrizes da ISO 230-2 (2006), o que possibilitou a escolha da quantidade de pontos e baterias de ensaios que compõem a aquisição de dados via interferometria óptica. As baterias de ensaios foram executadas a partir do deslocamento em ambos os sentidos positivo e negativo nas direções dos eixos X-Y, seguindo uma seleção de pontos sequenciados. Esses pontos foram selecionados utilizando a Eq. (1).

$$P_i = (i - 1) p + r \quad (1)$$

onde i é o número atual da posição-alvo, p é um intervalo nominal baseado em espaçamento uniforme dos pontos-alvo

sobre um intervalo e r é um número aleatório entre a amplitude positiva e negativa de possíveis erros. Na presente avaliação foi usado um $r = \pm 30\% p$.

Dadas essas definições, foram definidas as magnitudes de deslocamento para as 5 principais baterias de ensaios, cujo total foram de 11 pontos para cada eixo (X e Y), conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Pontos selecionados de cada eixo de movimentação.

Eixo X (mm)	9,00	16,00	27,00	36,00	47,00	56,00	65,00	74,00	81,00	92,00	101,00
Eixo Y (mm)	34,00	53,00	80,00	107,00	126,00	145,00	172,00	206,00	233,00	260,00	294,00

Para execução dos ensaios, a sala na qual a máquina-ferramenta está alocada foi mantida em uma temperatura de $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$, por um período de 24 horas antecedentes aos ensaios. Após o alinhamento e inicialização dos deslocamentos predefinidos, os dados foram registrados digitalmente pelo *software* agregado ao sistema laser interferométrico. Ao final de cada bateria de ensaio foram registrados os valores de temperatura mesurados na carcaça dos motores de passo. Ressalta-se que a presente metodologia foi aplicada para ambos os eixos X-Y.

2.2.3 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS ADQUIRIDOS

O tratamento estatístico dos dados foi automatizado por meio do sistema de células disponíveis no *software Microsoft Excel®*, o que permitiu aplicar as equações em múltiplos dados. As equações estatísticas seguiram as descrições contidas na norma ISO 230-2 (2006). Uma vez que os comprimentos máximos analisados para os eixos X e Y foram menores que 2000 mm, fez-se necessário definir os seguintes tópicos:

- Exatidão de medição bi-direcional e unidirecional de posicionamento dos eixos (A , $A_\uparrow$ e $A_\downarrow$ respectivamente):

Para a determinação dos valores da exatidão de medição unidirecional foram empregadas as Eq. (2) e Eq. (3):

$$A_\downarrow = \max.[x^-_\downarrow + 2Si_\downarrow] - \min.[x^-_\downarrow - 2Si_\downarrow] \quad (2)$$

$$A_\uparrow = \max.[x^-_\uparrow + 2Si_\uparrow] - \min.[x^-_\uparrow - 2Si_\uparrow] \quad (3)$$

As Eq. (2) e Eq. (3) representam o maior valor entre a média unidirecional positiva, o desvio padrão sobre um fator de abrangência de 2 subtraído do menor valor entre a média unidirecional e o desvio padrão sobre um fator de abrangência de 2. Os valores da exatidão de medição bidirecional são determinados de acordo com a Eq. (4).

$$A = \max.[x^-_\uparrow + 2Si_\uparrow; x^-_\downarrow + 2Si_\downarrow] - \min.[x^-_\uparrow - 2Si_\uparrow; x^-_\downarrow - 2Si_\downarrow] \quad (4)$$

Uma vez definidos os valores unidirecionais, é necessário calcular o valor bidirecional cujo resultado é equivalente ao maior valor no intervalo definido pela soma entre a média unidirecional positiva e o desvio padrão unidirecional positivo sobre fator de abrangência de 2, a soma entre a média unidirecional negativa e o desvio padrão unidirecional negativo sobre o fator de abrangência de 2 subtraído pelo menor valor no intervalo entre a da subtração da média unidirecional positiva e o desvio padrão unidirecional positivo sobre o fator de abrangência de 2 e a média unidirecional negativa subtraído do desvio padrão unidirecional negativo sobre o fator de abrangência de 2.

No que se refere à exatidão bidirecional, esta é um valor que contempla todos os erros do sistema e que possui a finalidade de determinar o maior erro que pode ocorrer durante o posicionamento dos eixos de movimentação (GRABOWSKI et al., 2022).

- O erro sistemático de posicionamento bidirecional e unidirecional do eixo (E , $E_\uparrow$ e $E_\downarrow$ respectivamente):

Para a aquisição dos valores do erro sistemático de posicionamento unidirecional foram empregadas as Eq. (5) e Eq. (6) que representam o maior valor das médias de erros unidirecionais subtraído do menor valor entre as baterias de ensaios.

$$E_\downarrow = \max.[x^-_\downarrow] - \min.[x^-_\downarrow] \quad (5)$$

$$E_\uparrow = \max.[x^-_\uparrow] - \min.[x^-_\uparrow] \quad (6)$$

Para o cálculo do erro sistemático de posicionamento bidirecional foi utilizada a Eq. (7), que representa o maior valor entre as médias unidirecionais subtraído do menor valor entre as médias dos erros lineares unidirecionais.

$$E = \max.[x^{\uparrow}; x^{\downarrow}] - \min.[x^{\uparrow}; x^{\downarrow}] \quad (7)$$

O erro sistemático de posicionamento representa o erro atribuído ao sistema de medição e de movimentação como um todo.

- A média do erro bidirecional de posicionamento do eixo (M):

Para sua determinação é utilizada a Eq. (8), sendo descrita pela subtração entre a menor média dos erros e a menor média dos erros bidirecionais, o que representa o maior desvio de pico-a-pico da curva gerada pelo valor das médias dos erros, indicando assim a média de erro de posicionamento de um eixo (GRABOWSKI et al., 2022).

$$M = \max.[x^-] - \min.[x^-] \quad (8)$$

- A repetibilidade bidirecional e unidirecional de posicionamento no eixo (R , $R^{\uparrow}$ e $R^{\downarrow}$ respectivamente):

Para determinar essa variável é necessário calcular a repetibilidade de posicionamento em todas as posições selecionadas previamente, conforme a Eq. (9).

$$R_i = \max.[2Si^{\uparrow} + 2Si^{\downarrow} + |Bi| ; Ri^{\uparrow}; Ri^{\downarrow}] \quad (9)$$

A Eq. (9) descreve a soma do maior valor entre a repetibilidade unidirecionais e respectivos desvios padrões unilaterais e o módulo do valor de reversibilidade em um ponto, de modo que o resultado é a multiplicação do desvio padrão unidirecional nos pontos pelo fator de segurança de 2. Com base nos valores da reversibilidade dos pontos analisados, o maior valor resultante representa a reversibilidade na direção dos eixos avaliados, o que indica o maior erro durante o posicionamento no mesmo ponto dividido nos sentidos positivo e negativo. Já para o sentido bidirecional pode ser representado pelo maior valor da repetibilidade nos pontos avaliados.

- Ademais, é necessário avaliar o valor de reversibilidade e a média desse valor de um determinado eixo de movimentação (B e $B^{\uparrow}$, respectivamente). Essa reversibilidade descreve como o sistema de posicionamento comporta-se quando o seu sentido de movimentação é invertido (GRABOWSKI et al., 2022).

Para determiná-lo é necessário calcular a reversibilidade média em cada ponto, sendo descrita pela subtração entre o desvio médio unidirecional nos sentidos positivo e negativo de movimentação dos eixos. A partir da seleção dos valores de cada posição tem-se o maior módulo desse valor. Dessa maneira, obtém-se o valor de reversibilidade no eixo de movimentação. Já para estimar a média desta variável basta aplicar uma média simples sobre os valores modulares dos erros de reversibilidade em cada ponto avaliado.

2.3 DETERMINAÇÃO DO ERRO MACROGEOMÉTRICO DA PEÇA USINADA

Para avaliar os erros macrogeométricos induzidos pelo sistema de movimentação CNC para correlacioná-los aos erros de movimentação, uma peça foi usinada para avaliar os erros induzidos pelo processo de corte. Para tanto, um arco foi usinado a fim de avaliar a movimentação síncrona dos eixos X-Y para avaliar a movimentação do sistema CNC da máquina-ferramenta sobre a peça. Como material da peça foi utilizada uma chapa de acrílico com espessura de 2,5 mm, uma vez que este material apresenta boa usinabilidade, baixo custo e atende a função para a validação dos erros macrogeométricos. O corte foi empregando as condições de corte de: velocidade de corte de $v_c = 10$ m/s e uma velocidade de avanço de $v_f = 3$ mm/min. As demais geometrias da peça são mostradas na Fig. 3a.

Para essa etapa, a trajetória da ferramenta de corte foi definida da seguinte maneira (ver Fig. 3b): (i) inicia no ponto P0 e segue por adentrar 0,20 mm para garantir que o fio diamantado penetre sobre o material; (ii) em seguida, inicia-se a usinagem do arco conforme o comando G02; (iii) uma vez que o fio diamantado é uma ferramenta de corte flexível devido ao seu comprimento livre que induz a uma deflexão, o comando G04 foi implementado para reduzir a deflexão da ferramenta de corte, de modo que o comando define um intervalo de pausa com tempo definido até que o processo de corte finalize o corte da peça; (iv) a utilização do comando G04 se repete em momentos em que a deflexão do fio ocorre de maneira mais severa (mudança de direção de deslocamento), representado nos pontos amarelos na Fig. 3a, e que causam a deflexão do fio sobre a trajetória do arco. Essa abordagem foi definida para mitigar os erros à geometria final da peça devido à característica da ferramenta de corte, permanecendo somente os erros induzidos pela movimentação da mesa de trabalho; (v) após finalizar o percurso do primeiro arco, a mesa foi movimentada para o eixo X+ a fim de garantir que a ferramenta permanecesse sem contato com a peça e em seguida movimenta-se em vazio,

seguindo o comando G00; (vi) para iniciar o corte do segundo arco, um *offset* de 5,35 mm em X- foi implementado, garantindo assim que o arco atinja 5 mm sem a interferência do diâmetro do fio diamantado que é de 0,35 mm; (vii) subsequentemente, executou-se a trajetória final do arco, finalizando com uma movimentação para retirar a peça. Por segurança, um comando G04 foi executado para assegurar que a deflexão do fio diamantado não comprometesse o corte da peça.

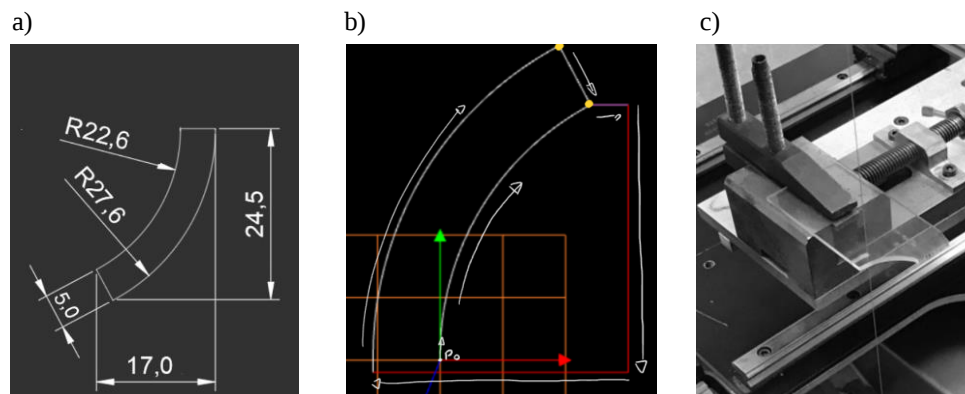


Figura 3. a) geometria e dimensões da peça; b) trajetória de usinagem do arco ; c) processo de corte.

A Fig. 3c mostra a disposição da peça de trabalho durante o processo de corte com fio diamantado. Após a usinagem da peça em arco, a mesma foi caracterizada a fim de determinar o erro macrogeométrico da amostra usinada. Para tanto, foi utilizada uma máquina de medição por coordenadas (MMC) da marca Zeiss modelo Micura 5/5/5 cuja precisão é de 0,1 μm , possui uma faixa nominal de 500 mm x 500 mm x 500 mm. Tendo em vista os objetivos de verificar a concentricidades e a precisão da movimentação bidirecional da mesa de trabalho, foram utilizado os raios internos e externos do arco usinado (ver Fig. 3c). Os dados foram adquiridos utilizando com um apalpador de rubi com raio de 1,5 o *software Calypso 5.4*[®].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ERROS LINEARES DOS EIXOS X-Y

As Tabelas 2 e 3 mostram os resultados obtidos para os ensaios geométricos com laser interferométrico. De acordo com os dados, foi possível identificar a magnitude dos erros para cada eixo de movimentação analisado, eixos X e Y, respectivamente. Os maiores valores de erros estão associados ao erro sistemático de posicionamento e da exatidão de medição, localizados no eixo Y em relação ao eixo X. Quando comparados, o eixo Y apresenta um erro aproximadamente 3 vezes maior que o eixo X e o erro sistemático de posicionamento bidirecional apresentou-se cerca de 2,6 vezes maior. Baseado nos valores obtidos, o erro global estimado a partir da média do erro bidirecional de posicionamento pelo comprimento do eixo analisado resultou em valores de 2,1 $\mu\text{m}/\text{mm}$ para o eixo X e de 2,9 $\mu\text{m}/\text{mm}$ para o eixo Y.

Tabela 2. Resultados para o eixo X

Erro de eixo (mm)	Unidirecional +	Unidirecional -	Bidirecional
Valor de reversibilidade B	Não aplicável	Não aplicável	0,02 mm
Média de Reversibilidade B'	Não aplicável	Não aplicável	0,13 mm
A média do erro bidirecional de posicionamento do eixo M	Não aplicável	Não aplicável	0,22 mm
O erro sistemático de posicionamento do eixo E	0,24 mm	0,24 mm	0,25 mm
Repetibilidade de posicionamento R	0,04 mm	0,05 mm	0,05 mm
Exatidão de posicionamento A	0,22 mm	0,24 mm	0,25 mm

Tabela 3. Resultados para o eixo Y

Erro de eixo (mm)	Unidirecional +	Unidirecional -	Bidirecional
Valor de reversibilidade B	Não aplicável	Não aplicável	0,06 mm
Média de Reversibilidade B'	Não aplicável	Não aplicável	0,02 mm
A média do erro bidirecional de posicionamento do eixo M	Não aplicável	Não aplicável	0,58 mm
O erro sistemático de posicionamento eixo E	0,67 mm	0,58 mm	0,67 mm
Repetibilidade de posicionamento R	0,02 mm	0,03 mm	0,03 mm
Exatidão de posicionamento A	0,67 mm	0,58 mm	0,67 mm

Os gráficos das Fig. 4a e 4b mostram erro de deslocamento com suas barras de erros com a incerteza expandida e respectivo desvio para o eixo X, respectivamente. Percebe-se que o desvio médio aumenta linearmente de acordo com a trajetória total de 101,00 mm. Em função dos sentidos de deslocamentos, foram observados valores máximos de 199 μm no sentido X- e 222 μm no sentido X+, apresentando um valor médio bidirecional na ordem de -211 μm (ver Fig. 4a). O desvio padrão atingiu um valor máximo de $\sigma = \pm 10 \mu\text{m}$ na posição de 101,00 mm, conforme mostrado na Fig. 4b.

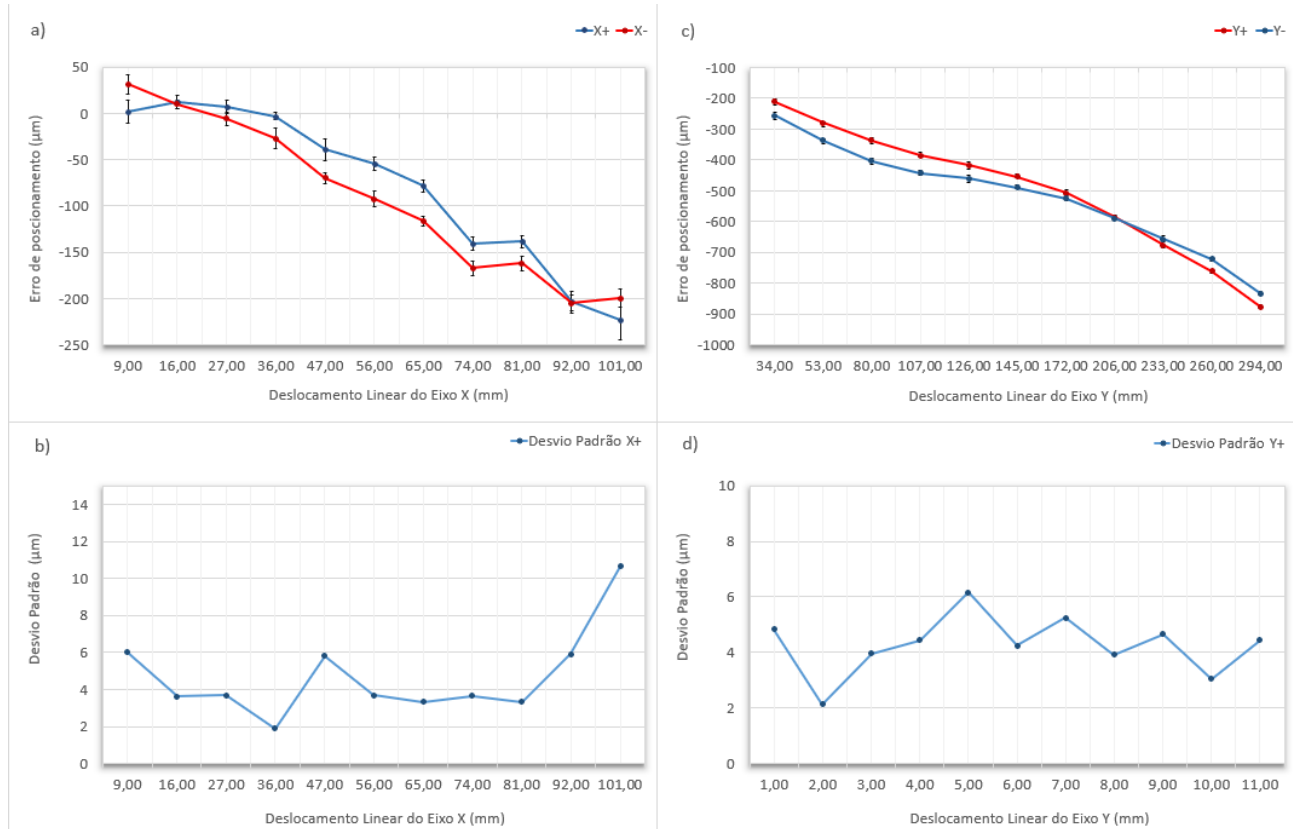


Figura 4. a) Erro de deslocamento do eixo X; b) Desvio padrão no eixo X; c) Erro de deslocamento do eixo Y; d) Desvio padrão no eixo Y.

Adiante, as Figuras 4c mostra o comportamento do erro de deslocamento, por conta da escala do gráfico o a barra de erro com a incerteza expandida não se torna aparente, tendo a distribuição de pontos ao redor da faixa de erro melhor representado no gráfico da Figura 4d, o qual mostra o desvio padrão para o ensaio geométrico do eixo Y. Conforme destacado no gráfico da Figura 4c, os erros de deslocamento máximo para as movimentações unidirecionais foram de 833 μm para o sentido do eixo Y- e de 876 μm no sentido do eixo Y+. O desvio médio bidirecional foi de 855 μm para um comprimento de análise de 295,00 mm, o que resulta em um erro global de 2,9 $\mu\text{m}/\text{mm}$. De acordo com o gráfico da Figura 4d, o desvio padrão apresentou um comportamento estável, cujos valores variaram dentro do intervalo de 2 μm até 6 μm em oposição o gráfico da Figura 4b permaneceu constante mas tendo uma maior variação do erro de deslocamento durante as baterias nos últimos pontos do deslocamento positivo do eixo.

Conforme os gráficos referentes aos desvios médios dos eixos X e Y (ver Fig. 4), percebe-se que as maiores magnitudes para as análises unidirecional foram obtidas para os sentidos dos eixos X+ e Y+. Ademais, observou-se que o erro se repetiu de uma maneira muito mais uniforme em cada ponto das baterias dos ensaios. Isso possibilita a integração dos valores dos erros obtidos nesse estudo no sistema de comando e posicionamento do sistema de movimentação CNC, permitindo a correção *in-process*, garantindo a redução dos erros de movimentação e erros macrogeométricos das peças usinadas.

3.2 ANÁLISE DO ERRO GEOMÉTRICO

Para a análise do erro geométrico, as peças usinadas foram mensuradas em uma MMC com uma tiragem de 50 pontos e 3 ciclos e os resultados são mostrados na Tabela 4. Os resultados mostram que a largura do arco variou significativamente quando comparada à largura nominal, conforme evidenciado na Figura 5a. Com relação ao arco nominal cuja largura foi de $L = 5,00 \text{ mm}$, a dimensão obtida para o arco usinado foi de $L = 3,61 \text{ mm}$. Essa discrepância

pode ser atribuída majoritariamente a deflexão do fio diamantado durante a usinagem, uma vez que a ferramenta de corte é flexível de modo que haja a formação dessa deflexão devido aos esforços envolvidos no processo de corte (COSTA et al., 2022b; LIEDKE e KUNA, 2011). A compensação da deflexão do fio na movimentação dos eixos exige a parametrização da taxa de remoção do material para diferentes condições de corte e materiais.

Tabela 4. Dados e erros macro geométricos da peça em arco retirados na MMC

Raio menor	23,2720 mm $\pm$ 0,0001 mm
Raio maior	26,8811 mm $\pm$ 0,0001 mm
Erro de Concentricidade	3,2952 mm $\pm$ 0,0001 mm

Comparando as dimensões nominais (ver Figura 5a) com os valores mensurados e representados na Figura 5b, foi possível inferir uma correlação com os erros lineares de posicionamento quando utilizada a movimentação assíncrona dos eixos X-Y. Para o caso da movimentação do eixo X foi implementada um padrão de referência no código-G para configuração da trajetória inicial considerando o diâmetro externo nominal da ferramenta de corte ($\varnothing_{ext} = 0,35$ mm). Dessa forma, após o referenciamento do zero-peça utilizando a tangente ao diâmetro do fio diamantado, foi efetuado um deslocamento de 13,00 mm na direção do eixo X, conforme apresentado na Figura 5a. Após a usinagem do arco, uma análise indireta foi efetuada por meio da medição da largura do “arco 1”, cujo resultado foi de $L = 12,86$ mm. Uma vez que a fenda de trabalho (região onde efetivamente há remoção de material) é equivalente ao diâmetro externo do fio diamantado, a largura final da peça deve exibir um valor na ordem de $L = 12,65$ mm. Conforme mostrado na Figura 5b, para o arco 1 foi mensurado um valor de $L = 12,86$ mm, o que exibe um erro de posicionamento dentro do previsto pelo valor da exatidão de medição unidirecional negativa na do eixo X que é de 0,24 mm.

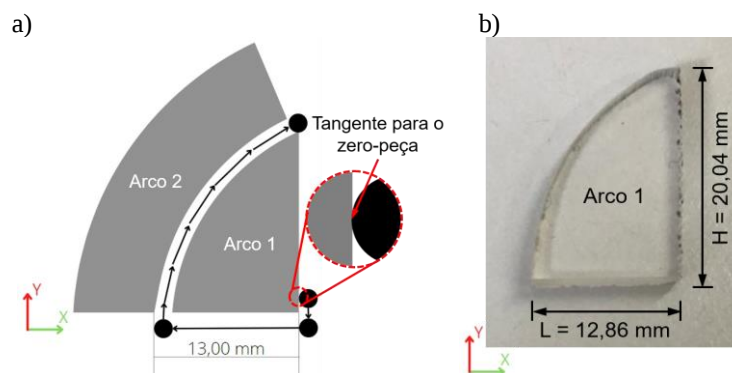


Figura 5. a) trajetória do arco considerando o fio diamantado; b) arco de acrílico usinado.

Subsequentemente, uma análise similar foi efetuada para a movimentação linear na direção do eixo Y. Ainda na Figura 5a, o deslocamento final após a usinagem do arco foi programado no código-G com um valor de $H = 20,40$ mm. Após a usinagem, a altura resultante da peça de trabalho foi de $H = 20,04$ mm (ver Figura 9b). Considerando que o vetor tangente do fio diamantado utilizado para o zero-peça continua oposto a geometria do arco 1, a posição absoluta para o valor de H foi de 20,05 mm na direção do eixo Y. Comparando-o com o valor mensurado obtêm-se um erro de 0,10 mm, que também está dentro do intervalo de exatidão de medição unidirecional positiva para o eixo Y de 0,68 mm. A disparidade do erro com relação a exatidão também pode ser atribuída a deflexão do fio diamantado, o que impossibilita uma análise unicamente dos erros lineares do eixo Y.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho objetivou qualificar os erros lineares de movimentação dos eixos X-Y de uma máquina ferramenta experimental utilizando a técnica de interferometria óptica. De acordo com a norma ISO 230-02, deslocamentos intermitentes e assíncronos de cada eixo foi avaliado sob distâncias e velocidade de avanço conhecidas. Complementarmente, os erros de movimentação foram avaliados de acordo com as dimensões mensuradas de uma peça em arco usinada com fio diamantado e os valores foram comparados aos nominais inseridos em um código-G. Baseados nos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- Para o eixo X, foi verificado um erro menor que 50 μ m até um deslocamento de 40,00 mm. A partir disso, foi mensurado um erro médio bidirecional de 211 μ m até alcançar o percurso total de 100,00 mm.
- O eixo Y apresentou um aumento linear dos valores de erro de deslocamento de modo que foi mensurado um erro bidirecional de até 855 μ m no percurso total de 295,00 mm.

- Os erros globais estimados para os eixos X e Y foram de 2,1 $\mu\text{m}/\text{mm}$ e de 2,9 $\mu\text{m}/\text{mm}$, respectivamente.
- Para ambos os ensaios, os deslocamentos nos sentidos +X e +Y foram levemente menores quando comparados aos deslocamentos nos sentidos -X e -Y.
- A repetibilidade de posicionamento do eixo X foi calculada como 0,05 mm de forma análoga, a repetibilidade do eixo Y é de 0,03 mm.
- Os dados mostraram discrepâncias nos raios menor com 0,67 mm e maior com 0,72 mm, bem como uma de concentricidade 3,29 mm.
- Foram observadas variações dimensionais de largura e comprimento de uma peça em arco usinada com fio diamantado. Apesar da variação dimensional, as magnitudes mantiveram dentro da exatidão de medição unidirecional mensurada para ambos os eixos avaliados.

De maneira geral, o sistema de movimentação se mostrou satisfatório para obtenção de finas lâminas e peças em arco, de modo que os dados de erros obtidos possibilitam a implementação de um sistema com resposta instantânea para correção de movimentação síncrona dos eixos X-Y.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI), à Fundação CERTI-Florianópolis pela colaboração durante os ensaios de avaliação dos erros lineares e ao LABMAT-UFSC pelo suporte com os equipamentos de caracterização de erros macrogeométricos das peças.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO, 2012. “ISO 230-1 Test code for machine tools Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions”. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR ISO, 2006. “ISO 230-2 Test code for machine tools Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes”. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR ISO, 2007. “ISO 230-3 Test code for machine tools Part 3: Determination of thermal effects”. Rio de Janeiro.
- Altintas, Y., 2011. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. 2nd Edition, Cambridge University Press.
- Blaser, P., Pavlicek, F., Mori, K., Mayr, J., Weikert, S. e Wegener, K., 2017. “Adaptive learning control for thermal error compensation of 5-axis machine tools”. *Journal of Manufacturing System*, vol. 44, p. 302-309,.
- Costa, E. C., Santos, C. P., Carvalho, V. O. e Xavier, F. A., 2022. “Study on surface integrity and ductile cutting of PV polycrystalline silicon and wear mechanisms of electroplated diamond wire”. *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 122, p. 1539–1553.
- Costa, E. C., Xavier, F. A., Knoblauch, R., Binder, C. e Weingaertner, W. L., 2020. “Effect of cutting parameters on surface integrity of monocrystalline silicon sawn with an endless diamond wire saw”. *Solar Energy*, vol. 207, p. 640–650.
- Costa E.C., Weingaertner, W.L. e Xavier, F.A., 2022. “Influence of single diamond wire sawing of photovoltaic monocrystalline silicon on the feed force, surface roughness and micro-crack depth”. *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 143:106525.
- CROAT, J. J., 2018. *Rapidly Solidified Neodymium-Iron-Boron Permanent Magnets*. 1. ed. United Kingdom: Elsevier.
- Grabowski, A., Diez, P. e Schulze, B., 2022. *This Is How PI Does Measuring - Part II, Positioning Accuracy, Repeatability, and similar Measurements: Measurement Procedure and Data Preparation at PI*.
- Klocke, F., 2009. *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*. Editor Springer, pp. 452.
- Liedke, T. e Kuna, M., 2011. “A macroscopic mechanical model of the wire sawing process”. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, vol. 51, p. 711–720.
- MOHAPATRA, J. e LIU, J. P., 2018. *Rare-Earth-Free Permanent Magnets : The Past and Future*. 1. ed. Arlington, Texas, United States: Elsevier B.V.
- Neugebauer, R., Denkena, B. e Wegener, K., 2007. “Mechatronic system for machine tools”. *CIRP Annals*, vol. 56, p. 657-686.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

QUALIFICATION OF A CNC WORKTABLE APPLIED TO THE 2D PROFILES MACHINING THROUGH OPTIC INTERFEROMETRY

Vinicius Haddad Andrade¹, vinicius_test@hotmail.com
Pedro Córdula de Sousa¹, pcorduladesousa@gmail.com
Erick Cardoso Costa¹, erick.cardoso.costa@posgrad.ufsc.br
Fabio Antonio Xavier¹, f.xavier@ufsc.br

¹Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC, Brasil

Abstract. *Due to the increasing competitiveness, the manufacturing sector is in a constant search to guarantee the quality of the products added to the minimum cost, which gives high added value to the final customer. Among the different factors that influence quality and affect industrial competitiveness are production control in terms of dimensional and geometric precision, as well as the quality of finish on the machined surface. As a strategy, it must be ensured that the machine tool maintains high performance concomitantly with high capability for the execution of machining operations, which demands metrological characterization to determine trajectory deviations. In this context, this work aims to determine the accuracy and repeatability of positioning the X-Y axes numerically controlled via microcomputer of a new concept of machine tool dedicated to the machining of two-dimensional profiles. For that, an experimental approach was applied using an interferometric laser (Renishaw model XL 80) to perform geometric tests. Asynchronous linear trajectories with intermittent displacement were used for the X-Y axes, as recommended by ISO 230-2. The temperature and humidity of the system and the drive motors were monitored. Arc and plane samples were machined and characterized via a coordinate measuring machine (Zeiss, Micura 5/5/5) to qualify the machine tool. As a result, an error smaller than 50 μm was verified up to a displacement of 40 mm for the X axis. From this, an average bidirectional error of 211.4 μm was measured until reaching a path of 100 mm. The estimated global error for the X axis was 2.11 $\mu\text{m}/\text{mm}$. Meanwhile, the Y axis showed a linear increase in displacement error values so that a bidirectional error of up to 855.0 μm was measured with an overall error of 2.91 $\mu\text{m}/\text{mm}$. For both tests, displacements in the +X and +Y directions were slightly smaller when compared to displacements in -X and -Y. The temperature of the motor housings varied in a range of 28 to 31 °C, which is within the working range indicated by the manufacturers. Dimensional variations in the flatness of machined blades and in the radius of the arc pieces were observed. The movement system proved to be satisfactory for obtaining thin blades and arc pieces, so that the error data obtained which allow the implementation of a system with instantaneous response to correct the synchronous movement of the X-Y axes.*

Keywords: CNC worktable, trajectory detour, laser interferometer, ISO 230-2, geometric metrology

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.