



ANÁLISE DOS ERROS DE FORMA DE CIRCULARIDADE NA FURAÇÃO DO AÇO ABNT 1045

Ferreira, L. C.¹; Silva E. S.¹; Filho, M. S.¹; Silva, F. A. V.¹; Andrade, J. S.¹;
Queiroz, P. O.¹;

1 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Rua José
Antônio da Silva, nº 300, Jardim Oásis, Cajazeiras/PB 58900-000, Brasil.

cosmo.luan@academico.ifpb.edu.br

RESUMO

Este trabalho analisa como a variação da velocidade de corte (V_c) afeta a circularidade dos furos em aço ABNT 1045, considerando a importância da precisão na furação para evitar problemas como desalinhamento e falhas estruturais. Foram realizados dois experimentos com métodos de refrigeração por jorro e Mínima Quantidade de Líquido (MQL) em corpos de prova de 10 mm de espessura e 90 mm de diâmetro. Cada corpo foi perfurado com 10 furos a diferentes V_c , com avanço fixo, usando um centro de usinagem ROMI D 600 e uma broca helicoidal de 8 mm com revestimento de nitreto de titânio (TiN). A circularidade foi medida com uma Máquina de Medição de Coordenadas (MMC). Menores valores de circularidade foram obtidos em maiores velocidades de corte. O método MQL apresentou resultados mais consistentes com menor variabilidade. Todos os valores de circularidade obtidos estão dentro da tolerância da norma NBR ISO 2768-2.

Palavras-chave: Furação, erros de forma, precisão dimensional.

INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 tem exigido o constante desenvolvimento da produção industrial, buscando sempre a qualidade do trabalho e a fabricação de produtos com geometrias precisas. Para que os produtos desempenhem corretamente as funções para as quais foram destinados, eles não devem diferir do componente ideal além de certos limites permissíveis. Conseqüentemente, os requisitos e características de qualidade das máquinas com Comando Numérico Computadorizado (CNC), como

os centros de usinagem, tornam-se cada vez mais rigorosos. O nível técnico dessas máquinas influencia diretamente a qualidade do trabalho e a alta produtividade (1).

Nesse contexto, uma das formas de garantir que os centros de usinagem realizem operações com qualidade é a escolha adequada de indicadores de usinagem, uma tarefa desafiadora, dada a complexidade de selecionar os parâmetros corretos. Isso se deve à baixa margem para erros: velocidades e avanços excessivamente altos ou baixos podem comprometer a eficiência ou até causar a quebra da ferramenta. Além disso, as propriedades dos materiais das ferramentas e seus revestimentos estão em constante evolução. Essas mudanças, aliadas às particularidades no design das brocas e às técnicas de aplicação de fluidos de corte, tornam desatualizadas muitas das recomendações encontradas na literatura de referência (2).

Considerando que não há como eliminar de forma definitiva os erros de geometria, se busca fabricar peças com tolerâncias dimensionais admissíveis, pré-estabelecidos para cada tipo de componente, que pode ser definida como a variação permissível nas dimensões de uma peça. E não se pode evitá-las, pois é impossível fabricar peças que tenham exatamente as mesmas dimensões. Sendo assim, elas são importantes quando é necessário realizar o encaixe de uma peça com outra, para assegurar o funcionamento adequado (3).

Uma das formas de melhorar as tolerâncias dimensionais nas operações de corte é através da usinagem de alta velocidade, considerando que conforme a velocidade de corte é aumentada, a quantidade de calor removida pelo cavaco se torna maior e, conseqüentemente, a ferramenta de corte e a peça de trabalho permanecem próximas à temperatura ambiente (4).

A furação é uma das operações de usinagem que mais necessitam de aprimoramento, considerando que a maioria das peças que são fabricadas carecem de pelo menos um furo e apenas uma pequena parcela dessas peças são furadas durante o processo de obtenção da peça bruta. Dessa forma, grande parte dos furos das peças são realizados através da furação, o que mostra a relevância dessa operação dentro da indústria manufatureira, indicando a necessidade da busca pela otimização de seus parâmetros (5).

No processo de furação os erros de forma, como os de circularidade, são particularmente críticos em operações de furação. A circularidade é uma medida de precisão geométrica aplicada em duas dimensões, que determina o quanto uma

característica de um objeto pode se desviar da forma ideal de um círculo perfeito. Portanto, a precisão na forma circular é vital para a funcionalidade e desempenho dos componentes usinados (6).

Dessa forma, neste estudo, foi realizado o processo de furação do aço ABNT 1045 utilizando um centro de usinagem para perfurar corpos de prova com 90 milímetros (mm) de diâmetro e 10 mm de espessura, empregando uma broca de metal duro de 8 mm de diâmetro e revestimento de nitreto de titânio (TiN). O experimento utilizou dois métodos de resfriamento: jorro e Mínima Quantidade de Líquido (MQL), e variou a velocidade de corte (V_c) em 10 níveis diferentes, para um único nível de avanço (f). A circularidade dos furos foi medida com uma máquina de medição de coordenadas, fornecendo dados precisos para a análise. A norma NBR ISO 2768-2 foi adotada para analisar se a circularidade está dentro dos limites especificados. O objetivo é identificar os parâmetros de usinagem que minimizem esse erro de forma, contribuindo para a otimização do processo de furação e a melhoria da qualidade dos componentes usinados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o experimento, foi preparado um conjunto de instruções CNC (código G), elaborado para realizar 10 furos, em um raio de 30 milímetros (mm) a partir do centro dos corpos de prova, de modo que a distância entre um furo e outro é de 18,54 mm.

A V_c foi variada de 10 m/min a 82 m/min, em 10 níveis, com incrementos de 8 m/min, conforme exhibe a Tabela 2. Já o f foi mantido constante, em 0,13 mm/rot.

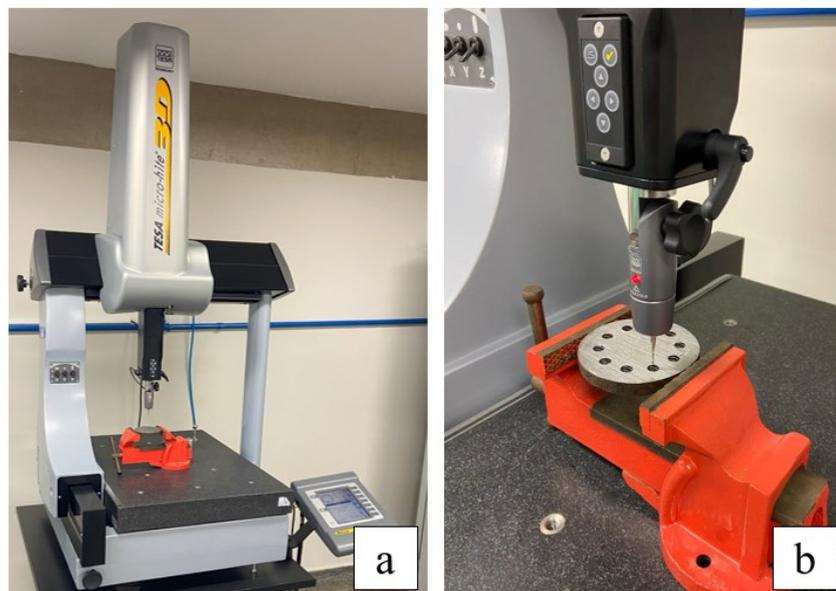
Os corpos de prova utilizados são de aço ABNT 1045, na condição de como fornecido pelo fabricante. Eles possuem 10 milímetros de espessura e 90 milímetros de diâmetro. Foi realizado um ensaio de dureza em uma das amostras, cujas medições foram realizadas em várias regiões do corpo de prova. O resultado foi uma dureza média de 12 Rockwell C (HRC).

Foram realizados dois experimentos para dois métodos de resfriamento, sendo um com aplicação de fluido refrigerante a jorro e outro utilizando a Mínima Quantidade de Líquido (MQL). Para garantir resultados consistentes, cada um dos experimentos foi replicado uma vez.

A máquina-ferramenta utilizada foi um centro de usinagem modelo ROMI D 600, com 7500 W de potência e um controlador Fanuc MC-0i. Se utilizou como ferramenta de corte uma broca de metal duro de 8 milímetros de diâmetro, com revestimento de nitreto de titânio (TiN), ângulo de ponta de 135° e comprimento igual 4 vezes o seu diâmetro ($L/D = 4$).

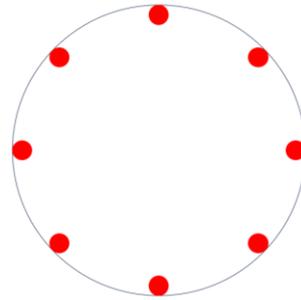
A circularidade dos furos foi analisada utilizando uma Máquina de Medição por Coordenadas, modelo TESA micro-hite 3D, que possui precisão de 1 μm . Sua fotografia encontra-se na Figura 1.

Figura 1: a) MMC TESA micro-hite 3D e b) sonda posicionada para medir circularidade de furos em corpo de prova preso na morsa.



As medições foram realizadas conforme ilustra o diagrama da Figura 2. Em cada um dos furos realizou-se medições em três planos distintos, sendo na altura mais alta, próxima da abertura do furo, na altura intermediária e na altura mais baixa, próximo da região de saída da broca. Posteriormente, a média aritmética da circularidade nas três regiões foi calculada.

Figura 2: Diagrama de pontos para medição de circularidade.



Para o experimento com o método de resfriamento a jorro, a aplicação do fluido foi realizada por uma bomba de alta pressão integrada ao centro de usinagem. O fluido é composto de óleo mineral e, seguindo as orientações do fabricante, este foi diluído com água em uma concentração de 5%, sendo um litro de óleo para 19 litros de água.

Para o experimento com refrigeração em MQL, a aplicação do fluido foi realizada com um Nebulizador V Bifurcado, modelo Tapmatic NB5, instalado ao centro de usinagem. O fluido utilizado é composto de anticorrosivos, aditivos de lubricidade e água, de acordo com as especificações do fabricante. A vazão foi ajustada para 500 ml/h.

Para analisar se os furos produzidos atendem aos padrões de qualidade necessários, foi utilizada a NBR ISO 2768-2, de Tolerâncias geométricas para elementos sem indicação de tolerância individual, norma que faz parte da série ISO 2768 e especifica tolerâncias em três classes (H, K e L). As tolerâncias permissíveis pela norma e as suas classes para circularidade encontram-se na Tabela 1(7).

Tabela 1: Tolerâncias gerais para batimento circular (NBR ISO 2768-2)

Classe de tolerância	Tolerância para batimento circular
	(mm)
H	0,1
K	0,2
L	0,5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

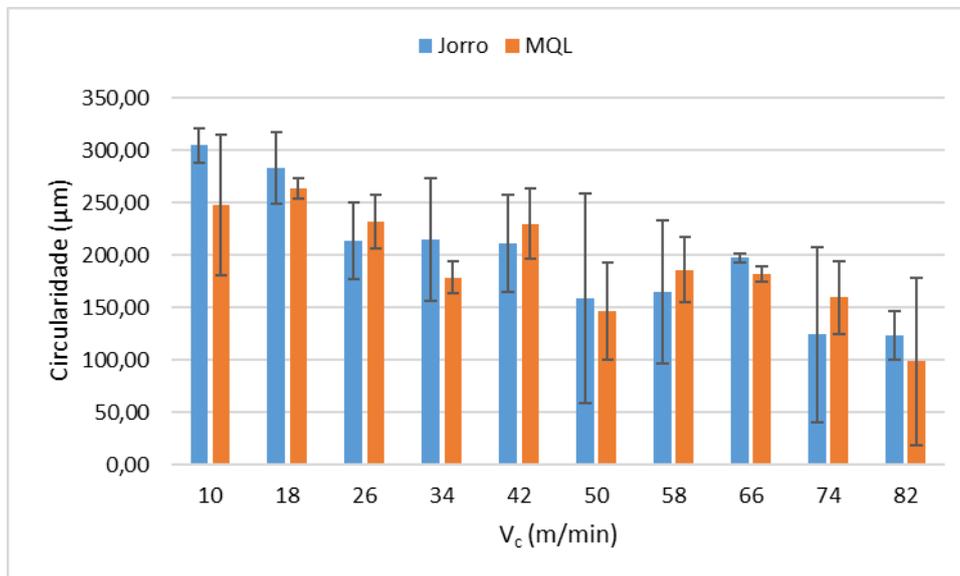
Os erros de circularidade e os Desvios Padrão (DP) para os experimentos com fluido de refrigeração a jorro e MQL podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Erros de circularidade em função de V_c para dois métodos de resfriamento

V_c (m/min)	Jorro (μm)		MQL (μm)	
	Circularidade	DP	Circularidade	DP
10	304,50	16,26	247,50	67,18
18	283,00	34,65	263,50	9,19
26	213,50	36,06	231,50	25,46
34	214,75	59,04	178,50	14,85
42	211,00	46,67	229,75	33,59
50	158,25	100,06	146,50	45,96
58	164,50	67,88	185,50	31,11
66	197,00	4,24	181,50	7,07
74	124,00	83,44	159,25	35,00
82	123,25	23,69	98,50	79,90

A Figura 3 exibe um gráfico com as médias de circularidade em função da V_c para os dois métodos de resfriamento utilizados com os dados da tabela.

Figura 3: Erros de circularidade em função de V_c para dois métodos de resfriamento



A análise revela que a circularidade é maior para baixas velocidades, especialmente na faixa de 10 a 18 m/min. Nesta região, o experimento com o fluido de refrigeração em MQL apresentou valores de circularidade superiores ao método de jorro em todas as velocidades.

Entre 34 e 66 m/min, a circularidade diminui e começa a se estabilizar, com uma tendência mais pronunciada no experimento com resfriamento por jorro. Valores discrepantes foram observados em 50 m/min para ambos os métodos de resfriamento. Em 42 m/min, a diferença entre os métodos é menor, embora o jorro ainda apresente valores ligeiramente superiores ao MQL, que mostra uma leve vantagem, especialmente em 66 m/min, onde os valores de circularidade no MQL são menores que os do jorro.

Para as maiores V_c no intervalo definido (74 e 80 m/min), a circularidade diminui significativamente para ambos os métodos, indicando uma melhoria na qualidade geométrica dos furos. Esse fenômeno está em conformidade com o que foi demonstrado por Kalpakjian e Schmid (4).

Todos os valores de circularidade estão dentro das classes de tolerância permitidas pela norma NBR ISO 2768-2. As medições indicam que, com o aumento da V_c , a circularidade melhora e se aproxima das tolerâncias mais rigorosas estabelecidas pela norma, o que confirma que os furos produzidos estão dentro dos limites aceitáveis.

O gráfico da Figura 3 também exibe o desvio padrão, que é maior para jorro e indica maior variabilidade nos resultados, enquanto MQL apresenta resultados mais consistentes com desvios padrão menores.

CONCLUSÃO

A análise dos resultados de circularidade em função da V_c revelou que, para velocidades baixas, o erro de forma é mais significativo, principalmente no experimento com fluido de refrigeração a jorro, onde a circularidade apresentou maiores valores, sugerindo maior instabilidade e variações na forma geométrica dos furos nessas condições.

O experimento realizado com o método de resfriamento em MQL demonstrou resultados de erros de forma de circularidade mais favoráveis na maior parte dos testes, especialmente em níveis intermediários e altos de V_c . Conforme a velocidade de corte aumenta, observa-se uma tendência de melhoria na circularidade, com valores mais baixos e consistentes em ambas as condições de refrigeração. Isso indica que o aumento na V_c favorece a estabilidade do processo, resultando em furos mais precisos.

Todos os valores de circularidade obtidos nas medições estão dentro das faixas admissíveis pela norma NBR ISO 2768-2 e, com o aumento da V_c , a circularidade melhora, se aproximando das tolerâncias mais rigorosas estabelecidas (Classe H).

O desvio padrão das medições também aponta que o MQL apresenta menor variabilidade nos resultados, sugerindo maior consistência e confiabilidade na obtenção de furos com menor desvio de forma. Portanto, o estudo destaca que a aplicação do fluido por MQL é mais vantajosa para a obtenção de furos com melhor circularidade, principalmente em velocidades de corte mais elevadas, sendo uma alternativa mais eficiente do que o método convencional por jorro.

Sugere-se a realização de novos experimentos que explorem variações no tipo de broca e em outros parâmetros de corte, como o avanço. Além disso, recomenda-se testar a realização de um pré-furo antes da perfuração principal, como uma possível estratégia para otimizar ainda mais o processo e reduzir os erros de circularidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia da Paraíba Camus Cajazeiras por conceder permitir a utilização de laboratórios, máquinas e equipamentos, indispensáveis para a realização dos experimentos.

REFERÊNCIAS

1. TIMKO, P. *et al.* Mapping of errors the geometric specification of the machining center. **Transportation Research Procedia**, v. 1, n. 55, p. 576-583, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.091>
2. ASTAKHOV, VIKTOR P. **Drills: Science and technology of advanced operations**. Boca Raton: Crc Press, 2014. 888 p. ISBN 978-1466584341.
3. KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 8. ed. Harlow: Pearson, 2023. 1312 p. ISBN 978-0-13-668165-6.

4. KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Processes for Engineering Materials**. 5. ed. New Delhi: Pearson Education India, 2014. 625 p. ISBN 978-8131705667.
5. DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2014. 272 P. ISBN 978-8587296016
6. PATIL, Vinod Thombre. **Metrology and quality control**. 5. ed. Pune: Nirali Prakashan, 2018. ISBN 978-9383971664.
7. ABNT. **NBR ISO 2768-2**: tolerâncias gerais Parte 2: Tolerâncias geométricas para elementos sem indicação de tolerância individual. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ANALYSIS OF CIRCULARITY FORM ERRORS IN DRILLING ABNT 1045 STEEL

ABSTRACT

This work analyzes how cutting speed (V_c) variation affects the circularity of holes in ABNT 1045 steel, considering the importance of precision in drilling to avoid issues such as misalignment and structural failures. Two experiments were conducted using jet cooling and Minimum Quantity Lubrication (MQL) methods on specimens 10 mm thick and 90 mm in diameter. Each specimen was drilled with 10 holes at different cutting speeds, with a fixed feed rate, using a ROMI D 600 machining center and an 8 mm carbide drill with a titanium nitride coating. Circularity was measured with a Coordinate Measuring Machine (CMM). Lower circularity values were achieved at higher cutting speeds. The MQL method showed more consistent results with lower variability. All obtained circularity values are within the tolerance of the NBR ISO 2768-2 standard.

Keywords: Drilling, Form Errors, Dimensional Precision.