

## AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FURAÇÃO À ALTA PRESSÃO NOS ERROS GEOMÉTRICOS DE CILINDRICIDADE E CIRCULARIDADE

Virgilio Pires Teixeira, d201810859@uftm.edu.br<sup>1</sup>

Augusto Carneiro e Caixeta, d20171133@uftm.edu.br<sup>2</sup>

Luciano Antônio Fernandes, luciano.fernandes@uftm.edu.br<sup>3</sup>

Raphael Silva Lins, raphael.lins@uftm.edu.br<sup>4</sup>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Av. Randolpho Borges Júnior, 2856 - Univerdecidade, Uberaba- MG. <sup>1</sup>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Av. Randolpho Borges Júnior, 2856 - Univerdecidade, Uberaba- MG. <sup>2</sup>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Av. Randolpho Borges Júnior, 2856 - Univerdecidade, Uberaba- MG. <sup>3</sup>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Av. Randolpho Borges Júnior, 2856 - Univerdecidade, Uberaba- MG. <sup>4</sup>

**Resumo.** O presente trabalho tem por finalidade investigar a influência dos fatores de entrada velocidade de corte (180, 200 e 220 m/min), avanço (0,1, 0,2 e 0,3 mm/rot) e aplicação de fluido de corte à alta pressão (35, 45 e 55 Kgf/cm<sup>2</sup>) na usinabilidade da liga de alumínio 6351 T6 submetida ao processo de furação com percurso de corte definido. A usinabilidade da liga foi avaliada a partir dos resultados de circularidade e cilindridade. A furação utilizada dispõe de uma broca de metal duro polida sem revestimento com diâmetro de 6,75 mm que possui haste cilíndrica e canais retos para saída dos cavacos e possibilidade de aplicação de lubrificação interna com alta pressão. A partir de um planejamento fatorial completo multinível composto por 3 níveis com 3 fatores, foi investigada a influência da velocidade de corte, avanço e pressão de aplicação do fluido de corte na furação da liga de alumínio sugerida. Atingiu-se o objetivo proposto através da elaboração de um planejamento de experimentos fatoriais (DOE - Design of Experiments) que mostrou a melhor configuração dos parâmetros de corte adotados para cada uma das variáveis de saída investigadas. Em suma os parâmetros de desvio geométricos analisados, o aumento da pressão de aplicação de fluido de corte causou aumento em todos eles.

**Palavras chave:** Furação, ligas de alumínio, usinabilidade, circularidade.

**Abstract.** The purpose of this study is to investigate the influence of the input factors cutting speed (180, 200, and 220 m/min), feed rate (0.1, 0.2, and 0.3 mm/rev), and high-pressure cutting fluid application (35, 45, and 55 Kgf/cm<sup>2</sup>) on the machinability of 6351 T6 aluminum alloy subjected to defined cutting path drilling process. The machinability of the alloy was assessed based on circularity and cylindricity results. The drilling process utilized an uncoated polished carbide drill bit with a diameter of 6.75 mm, featuring a cylindrical shank and straight flutes for chip evacuation, along with the capability for internal high-pressure coolant application. Through a full factorial multilevel design comprising 3 levels with 3 factors, the influence of cutting speed, feed rate, and cutting fluid application pressure on the drilling of the suggested aluminum alloy was investigated. The proposed objective was achieved by developing a factorial experimental design (DOE - Design of Experiments) that revealed the optimal configuration of the adopted cutting parameters for each investigated output variable. In summary, concerning the analyzed geometric deviations, an increase in cutting fluid application pressure led to an increase in all of them.

**Keywords:** Drilling, aluminum alloy, machinability, circularity.

### 1. INTRODUÇÃO

A intensa competição empresarial e as demandas dos consumidores por produtos finais de qualidade impulsionam a busca por flexibilidade, agilidade e redução de custos na produção. Isso requer pesquisa de materiais para produtos inovadores e compreensão de seu comportamento nos processos de acordo com sua funcionalidade (Valgas, et al. 2015). A automação dos processos de fabricação é crescente, visando aumentar volumes de produção com melhor qualidade e menor custo e tempo. Isso exige alto grau de monitoramento e controle, especialmente na usinagem, que tem visto significativas mudanças com a automação por CNC (Porto 2017).

A implementação de sistemas de monitoramento em processos de usinagem possibilita a produção de peças com maior qualidade, alinhando-se aos princípios da manutenção preditiva, que se baseia na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, com acompanhamento sistemático das falhas originadas de causas monitoráveis e passíveis de acompanhamento (Kardec 2015).

Com o avanço da industrialização, as empresas buscam constantemente melhorar os processos de furação e reduzir custos para manter sua liderança em um mercado competitivo. Isso representa um desafio devido à complexidade dos

processos de furação e à importância dessa operação na fabricação, que corresponde a 20-25% do total de aplicação na indústria de usinagem. Portanto, é crucial dedicar atenção e recursos à pesquisa nessa área para aprimorar o entendimento e a eficiência dos processos de furação, incluindo a análise e quantificação de desvios geométricos e qualidade superficial dos furos realizados (Tito, et al. 2015); (Klocke 2011).

A furação é uma operação essencial na indústria automotiva, especialmente na fabricação de motores, onde ligas primárias de alumínio são frequentemente empregadas. Essa etapa serve como preparação para processos subsequentes, como alargamento e rosqueamento, nos quais é crucial garantir qualidade superficial e precisão dimensional e de forma dos furos, impactando diretamente na durabilidade não apenas das ferramentas utilizadas, mas também do sistema em funcionamento. As ligas de Alumínio-Silício (Al-Si) são amplamente adotadas nesse contexto, promovendo a redução de massa nos blocos de motores de automóveis e aeronaves. No entanto, a usinagem dessas ligas apresenta desafios devido às suas características abrasivas, que aumentam com o teor de silício, dificultando os processos de fabricação (E. R. Silva 2015).

A furação convencional em ligas de alumínio é complexa, especialmente sem o uso de brocas especiais com lubrificação interna, resultando em cavacos longos devido a condições críticas de usinagem, como baixa velocidade de corte, ductilidade do material e dificuldades na formação e remoção de cavacos, bem como a qualidade da superfície e tolerâncias geométricas da ferramenta. Estudos destacam que a furação a seco em alumínio e suas ligas gera uma tremenda pressão na aresta transversal e alta temperatura, levando à adesão do material à superfície da ferramenta em níveis superiores à energia de coesão do alumínio (Boopathi, Arulshri e Iyandural 2013).

Várias pesquisas mostram a importância de compreender o comportamento geométrico dos materiais em processos de fabricação como a furação. É de extrema importância avaliar as características de usinagem durante o processo de usinagem de ligas de alumínio com estratégias de resfriamento sustentáveis. (Gupta, et al. 2023) adotou-se uma nova abordagem de medição para avaliar aspectos geométricos críticos, como desgaste da ferramenta, rugosidade superficial, consumo de energia e microdureza, durante a usinagem da liga AA2024-T351 sob condições de resfriamento a seco, lubrificação com quantidade mínima de óleo (MQL), nitrogênio líquido (LN2) e dióxido de carbono (CO2). Os resultados destes estudos de medição confirmam que o resfriamento com LN2 e CO2 é benéfico para melhorar as características de usinagem da liga AA2024-T351. Em comparação com as condições a seco, os valores de rugosidade superficial para MQL, LN2 e CO2 foram reduzidos em 11,90%, 30,95% e 39,28%, respectivamente, e os valores de consumo de energia foram reduzidos em 3,11%, 6,46% e 11,5% para as condições de MQL, CO2 e LN2, respectivamente.

(Ba, et al. 2024) Investigaram a influência do avanço ( $f$ ), velocidade de corte ( $V_c$ ) e condição da ferramenta (com e sem revestimento DLC) no comportamento dos parâmetros de rugosidade  $R_q$ ,  $R_{sk}$  e  $R_{ku}$  durante a perfuração a seco de uma liga de alumínio. Os valores de  $R_{sk}$  e  $R_{ku}$  obtidos estiveram dentro da faixa de resultados de outros estudos. Foi verificada uma influência significativa da velocidade de corte em  $R_q$  e  $R_{sk}$ . O efeito do revestimento DLC na rugosidade não foi significativo. Foi confirmada a predominância do mecanismo de desgaste adesivo.

O avanço da ferramenta determina a taxa com que a ferramenta se move ao longo da peça durante a operação de usinagem. Um avanço maior pode resultar em uma remoção de material mais agressiva, levando a uma variação no diâmetro do furo ou da superfície cilíndrica. Se o avanço for excessivo, podem ocorrer vibrações excessivas ou desalinhamentos, o que pode comprometer a precisão e a uniformidade do diâmetro. Por outro lado, um avanço menor pode resultar em uma usinagem mais lenta, mas geralmente produzirá uma superfície mais uniforme e uma circularidade mais precisa (Gupta, et al. 2023).

A pressão do fluido de corte também desempenha um papel importante na circularidade total. O fluido de corte é utilizado para resfriar e lubrificar a região de corte durante o processo de usinagem. Uma pressão inadequada do fluido de corte pode resultar em uma dissipação ineficiente do calor gerado durante a usinagem, levando a distorções térmicas na peça e, conseqüentemente, afetando a circularidade do furo ou da superfície cilíndrica. Além disso, uma pressão excessiva do fluido de corte pode causar deformações plásticas no material, resultando em variações indesejadas no diâmetro e na circularidade (Machado 2015).

O presente estudo se concentra na liga de alumínio 6351, conhecida como "alumínio comercial", devido à sua ampla aplicabilidade na indústria metal-mecânica. O objetivo principal é investigar a influência dos parâmetros de corte (velocidade, avanço e aplicação de fluido de corte à alta pressão) na usinabilidade desta liga durante o processo de furação com percurso de corte definido. A usinabilidade é avaliada considerando, circularidade, cilíndricidade. O processo de furação empregado utiliza uma broca de metal duro polida sem revestimento, com diâmetro de 6,75 mm, caracterizada por haste cilíndrica e canais retos para saída dos cavacos, além da possibilidade de aplicação de lubrificação interna com alta pressão (A. M. Silva 2010).

Os resultados obtidos revelam disparidades na usinabilidade dos corpos de prova constituídos pela liga de alumínio 6351, demonstradas através das medições de circularidade e cilíndricidade.

## 2. OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo aprofundar o entendimento sobre o processo de furação na liga de alumínio 6351T6 utilizando brocas de canais retos, focando em métodos para aprimorar o acabamento superficial das peças usinadas. Para isso, será empregada a metodologia de planejamento fatorial, visando a otimização das condições de usinagem. A pesquisa

irá analisar o acabamento geométrico (cilindricidade e circularidade) da superfície usinada, considerando a variação dos principais parâmetros de corte, como a velocidade de corte e o avanço da ferramenta, além da pressão do fluido de corte.

A metodologia adotada envolve a realização de testes experimentais seguidos de uma análise estatística rigorosa, baseada em teorias estabelecidas na literatura científica. Espera-se que, através desta abordagem, seja possível obter uma compreensão aprofundada das influências desses parâmetros no processo de furação com brocas helicoidais, culminando em melhorias significativas na qualidade do acabamento superficial do aço inoxidável.

### 3. METODOLOGIA

Este trabalho investiga a influência dos parâmetros de corte definidos (velocidade de corte, avanço e aplicação de fluido de corte à alta pressão) na usinabilidade da liga de alumínio 6351 submetida ao processo de furação com percurso de corte definido. O material utilizado é disposto em barras de seção circular com bitola de 5/8 " (15,87 mm). Na Tabela 1 consta a composição química assegurada pelo fabricante da liga utilizada.

De acordo com (Machado 2015) para se analisar a usinabilidade, que pode ser entendida como a facilidade em usar um material em um sistema de usinagem, ou seja, com uma ferramenta de corte (material e geometria específica), sob determinada condição de corte (parâmetros), com uma máquina-ferramenta específica realizando um processo de usinagem determinado. Portanto é de suma importância o desenvolvimento de pesquisas que envolvam o entendimento do índice de usinabilidade das ligas metálicas e as aplicações que o material usinado terá. Logo, no presente trabalho para avaliar a usinabilidade será realizado análises de rugosidade, cilindricidade e da circularidade das cavidades cilíndricas produzidas.

Tabela 1- Composição química liga de alumínio 6351 assegurada pelo fabricante

Análise Química [%]							
Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
96,8	0,1000	0,5000	0,6000	0,600	1,0000	0,2000	0,2000

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do alumínio 6351

Limite de Resistência [MPa]	Limite de Escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Dureza [HB]
290	225	8,00	90,00

Foram utilizadas duas barras extrudadas, com comprimento de 1000 mm e 15,87 mm de diâmetro. Os corpos de prova para os ensaios de furação foram preparados com medidas de 25 mm de comprimento e 15,87 mm de diâmetro. A usinabilidade das amostras foi avaliada em termos dos resultados de circularidade, cilindricidade.

Para os testes de medição de torque e força na ferramenta de corte, bem como de rugosidade, circularidade, cilindricidade, forma dos cavacos, grau de recalque e valores médios dos diâmetros dos furos realizados, foi realizado um experimento planejado utilizando o software Minitab®. Um planejamento fatorial completo multinível 3<sup>3</sup> (3 níveis e 3 fatores) foi desenvolvido para este fim. Os fatores deste estudo incluem velocidade de corte (Vc), avanço (f) e pressão do fluido de corte (P), cada um com três níveis diferentes. Com base nos níveis e fatores apresentados na Tabela 3, foi desenvolvido um quadro experimental aleatorizado, utilizando o software Minitab. O experimento consistiu em 27 testes realizados em réplica, totalizando 54 testes. As variáveis de resposta incluem a circularidade total (RONt [µm]), cilindricidade (CYLt [µm]), e conicidade do cilindro (CYLtt [µm]).

Tabela 3 - Níveis dos valores de referência

Fator	Nível inferior	Nível intermediário	Nível superior
Vc [m/min]	180	200	220
f [mm/rot]	0,1	0,2	0,3
P [kg/cm <sup>2</sup> ]	35	45	55

Os valores coletados das variáveis de resposta mencionadas foram preenchidos, possibilitando a realização de análises gráficas para determinar os fatores influentes para cada uma delas. A identificação dos fatores de influência foi conduzida por meio dos gráficos Half Normal e Pareto, enquanto as análises gráficas foram realizadas utilizando gráficos de Superfície de Resposta, Efeitos Principais e Interação. Os experimentos de usinagem foram conduzidos no Laboratório de Processos de Fabricação da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, utilizando um centro de usinagem CNC modelo 1250D, fabricado pela ROMI, com potência de 18 kW no eixo principal e rotação máxima de 12.000 rpm. O

fluido de corte empregado foi o solúvel MV AQUA 180, fabricado pela VCI, um protetivo anticorrosivo aplicado durante a usinagem, com lote de fabricação 09027001001, composto por uma mistura de água e fluido numa concentração de 5%, medida com refratômetro da ATC. O pH do fluido foi monitorado durante todo o experimento para garantir que permanecesse entre 8,1 e 9, conforme recomendado pelo fabricante.

Para a usinagem, foi utilizada uma broca de metal duro polida sem revestimento com diâmetro de 6,75 mm, com haste cilíndrica e canais retos para remoção de cavacos, com capacidade de aplicação de lubrificação e refrigeração interna sob alta pressão. A ferramenta apresenta um escalonamento no diâmetro de 9 mm e ângulo de  $45^\circ$ , fabricada pela GUHRING com o código DK460 UF 21311021 GB1098 CT080 004. A escolha dessa broca se deve à escassez de estudos sobre sua geometria.

A broca possui um ângulo de ponta de  $\sigma = 134^\circ$ , ângulo de saída de  $\Upsilon = 0^\circ$  e ângulo de incidência de  $\alpha = 22^\circ$ . Para visualização detalhada da geometria, foi utilizado um microscópio digital USB modelo US1000, com resolução de 2.0 MP e aumento de 1000 vezes, conforme mostrado na Figura 3.4, destacando-se a mudança de inclinação da aresta principal de corte formando o ângulo de incidência. Os furos usinados no estudo possuem uma profundidade de 16 mm.

Para a medição da circularidade total (RONt [ $\mu\text{m}$ ]), cilindridade (CYLt [ $\mu\text{m}$ ]) e conicidade do cilindro (CYLtt [ $\mu\text{m}$ ]) dos furos usinados, foi utilizado um circularímetro modelo Talyrond 131C, fabricado pela Taylor Hobson. Para medir a cilindridade e conicidade, foi necessário medir a circularidade em 5 planos paralelos entre si na direção vertical, com espaçamento de 2 mm, devido às limitações impostas pelo diâmetro do furo e apalpador. O valor final de circularidade de cada teste foi obtido pela média dos 5 valores medidos em cada plano mencionado. O suporte utilizado para fixar o corpo de prova na pinça foi usinado no centro de usinagem antes do início das medições dos desvios geométricos destacados.

#### 4. RESULTADOS

Os gráficos presente na Figura 1 mostra a relação entre as variáveis de entrada e a variável de saída (RONt). O avanço e a pressão do fluido de corte são fatores significativos que afetam a qualidade da superfície usinada, representada pela variável RONt.

Ao analisar os gráficos dos Efeitos Principais e Superfície de Resposta na Figura 1, verifica-se que o aumento do avanço de 0,2 para 0,3 mm/rot resulta em um aumento significativo nos valores de RONt, que representa a circularidade total. Esse efeito pode ser compreendido pelo impacto que um avanço maior exerce sobre o processo de usinagem. Especificamente, um avanço mais elevado implica em uma remoção de material mais rápida e intensa, o que pode gerar forças de corte e vibrações mais pronunciadas. Essas condições adversas tendem a comprometer a estabilidade do processo de furação, causando variações na trajetória da ferramenta e, conseqüentemente, um desvio maior da circularidade ideal da peça usinada. Assim, o aumento do avanço não apenas influencia a rugosidade da superfície, mas também contribui para uma maior irregularidade na forma geométrica, refletindo-se nos valores elevados de RONt.

Além disso, os valores de RONt também aumentam significativamente com o aumento da pressão de aplicação do fluido de corte de 45 para 55 kgf/cm<sup>2</sup>. Isso pode ser atribuído ao aumento da eficácia do resfriamento e lubrificação da zona de corte com o aumento da pressão do fluido de corte, o que pode reduzir o atrito e o desgaste da ferramenta, mas também pode influenciar na formação de cavacos e na evacuação de calor, afetando a qualidade da superfície usinada.

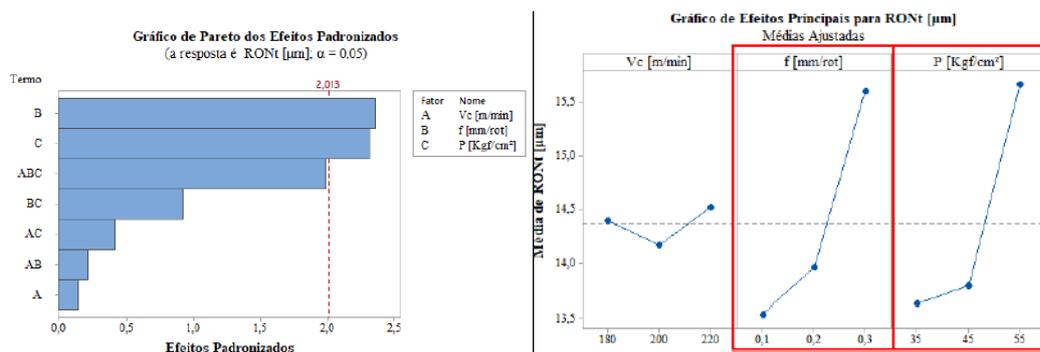


Figura 1 - Gráfico de efeitos padronizados e efeitos principais para variável RONt

De acordo com a figura 1, o gráfico de pareto dos efeitos padronizados mostra que a variável de pressão do fluido de corte juntamente como o avanço da ferramenta foram a variável que mais influenciou variável de saída CYLt. Segundo (Manickam 2019) A pressão em kgf/cm<sup>2</sup> pode influenciar na variável de cilindridade do furo devido aos efeitos que exerce sobre o processo de furação e a formação do furo. A cilindridade de um furo é uma medida da uniformidade do diâmetro ao longo de seu comprimento, e variações nessa uniformidade podem ocorrer devido a várias razões, incluindo a pressão aplicada durante o processo de furação.

Quando a pressão do fluido de corte é aumentada, há uma maior força exercida sobre a região de corte, o que pode resultar em uma melhor remoção de cavacos e em uma dissipação mais eficiente do calor gerado durante o processo. Isso pode levar a uma redução da temperatura na zona de corte, minimizando o desgaste da ferramenta e melhorando a qualidade superficial da peça (A. M. Silva 2010). No entanto, um aumento excessivo na pressão do fluido de corte pode causar problemas, como a deformação excessiva do material devido à alta pressão hidrostática, o que pode resultar em uma variação dimensional indesejada na peça usinada. Além disso, a pressão mais alta pode aumentar o atrito entre a ferramenta de corte e o material, o que pode resultar em um aumento na força de corte e, conseqüentemente, em uma maior deformação elástica do material, afetando a cilindricidade do furo e, portanto, os valores de CYLt.

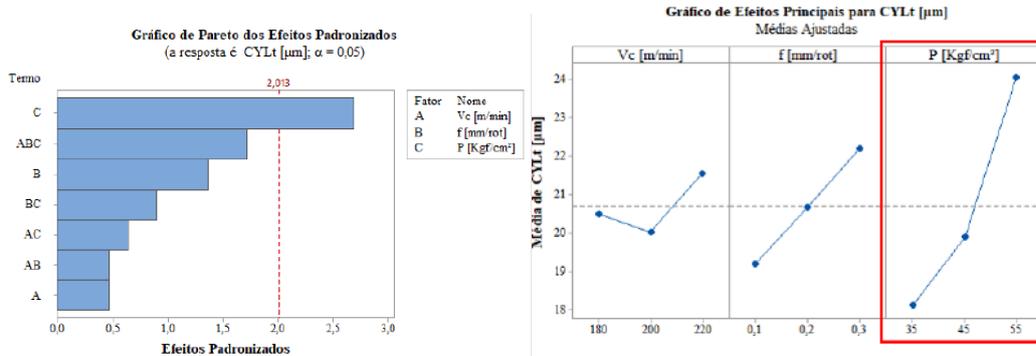


Figura 2 - Gráfico de efeitos padronizados e efeitos principais para variável CYLt

De acordo com o gráfico dos efeitos principais, é possível notar o efeito na variável de saída com o aumento da pressão do fluido de corte, ocasionando instabilidades na peça e deteriorando o grau de acabamento. (Castillo 2005) verificou que a cilindricidade dos furos é sensível principalmente aos parâmetros de avanço e velocidade de corte. A partir da Figura 2 pode observar que os resultados de cilindricidade também se mostraram influenciados pela variação dos valores de avanço e velocidade de corte, todavia o aumento da pressão de aplicação do fluido é ainda mais influente que os demais parâmetros.

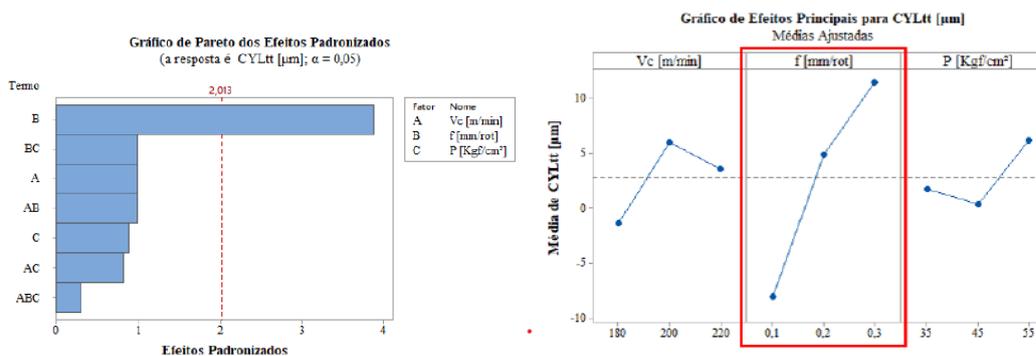


Figura 3 - Gráfico de efeitos padronizados e efeitos principais para variável CYLtt

De acordo com a figura 3, o gráfico de pareto dos efeitos padronizados nos mostra que a variável de avanço por rotação foi a variável que mais influenciou variável de saída CYLtt. Quando a velocidade de avanço é aumentada, ocorrem alterações no processo de corte que podem afetar a geometria do furo e, conseqüentemente, a conicidade do cilindro. Em velocidades de avanço mais altas, a taxa de remoção de material aumenta, o que pode resultar em um maior atrito entre a ferramenta de corte e o material sendo usinado. Esse aumento de atrito pode gerar temperaturas mais altas na região de corte, levando a um aumento da deformação plástica do material e a uma maior probabilidade de formação de rebarbas ao redor do furo (Diniz, Marcondes e Coppini 2013).

Além disso, velocidades de avanço muito altas podem causar vibrações excessivas na ferramenta ou na peça, levando a uma qualidade de acabamento inferior e a variações na geometria do furo. Por outro lado, velocidades de avanço muito baixas podem resultar em uma remoção de material insuficiente, levando a um aumento do tempo de usinagem e à necessidade de passos adicionais de acabamento (Machado 2015).

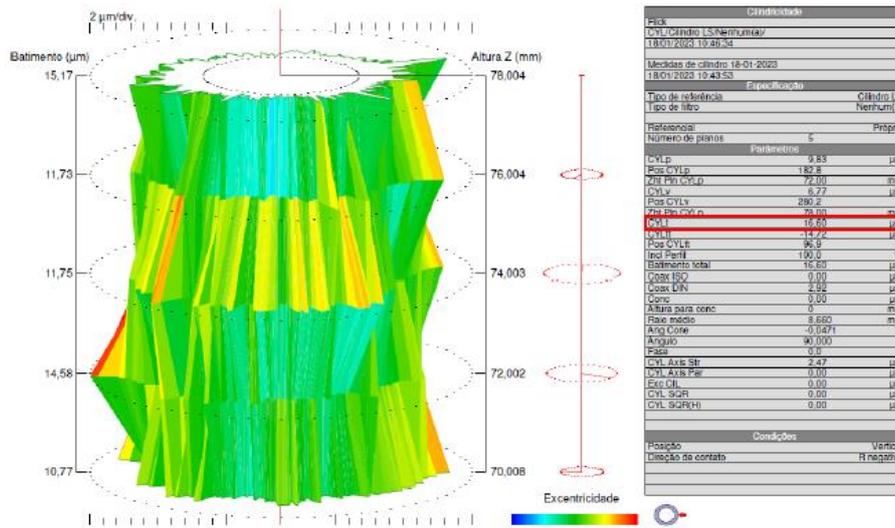


Figura 4 - Perfil do cilindro encontrado a partir de: 200 m/min, 0,1 mm/rot e 35 kgf/cm<sup>2</sup>

Ao analisar as Figuras 4 e 5, observa-se que os valores para a variável de saída CYLt (cilindricidade total) variam significativamente entre a pior e a melhor configuração, com valores de 16,6 µm e 25,99 µm, respectivamente. Além disso, essas figuras mostram os valores de desvio radial máximo e mínimo encontrados nos perfis de cilindros correspondentes às melhores e piores condições de usinagem. No melhor perfil de cilindro, o desvio radial máximo é de 15,17 µm, enquanto no pior perfil, o desvio radial mínimo é de 13,88 µm. Esses resultados elucidam a disparidade nos valores de CYLt evidenciados. Tal fenômeno pode ser atribuído ao potencial aumento das forças de usinagem conforme os parâmetros de corte são ampliados, provocando instabilidades no processo que afetam adversamente o acabamento final da peça. (Gonçalves, da Silva e Costa 2018) estudaram a influência do teor de cobre na usinabilidade da liga de alumínio Al-Si-Mg (6351). A usinabilidade dessa liga foi avaliada por meio de medidas de torque e força de avanço da ferramenta de corte, rugosidade superficial dos furos, diâmetro, circularidade, cilindricidade e modificações superficiais durante o processo de alargamento. Os resultados mostraram uma influência significativa do teor de cobre na usinabilidade desta liga de alumínio. Menores valores de torque e força de avanço, melhor acabamento superficial, menor circularidade e desvio de cilindricidade foram obtidos aumentando o teor de cobre na liga de alumínio Al-Si-Mg (6351).

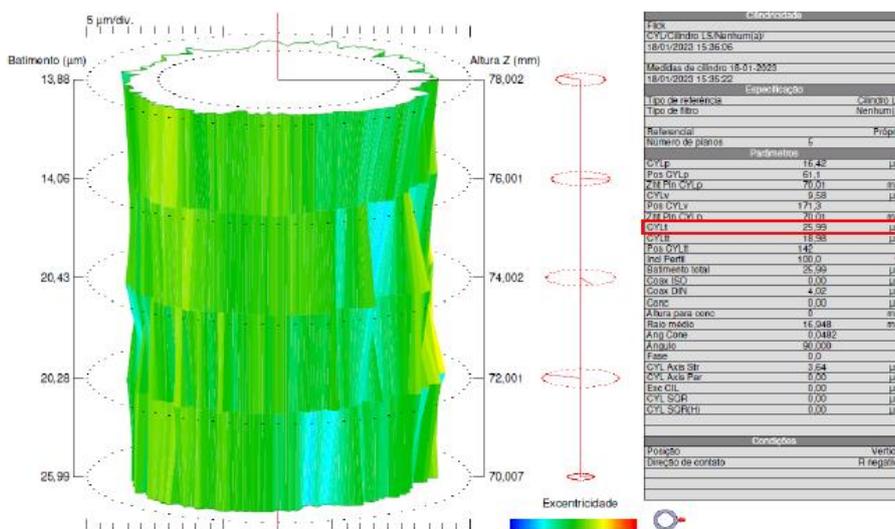


Figura 5 - Perfil do cilindro encontrado a partir de: 220 m/min, 0,3 mm/rot e 55 kgf/cm<sup>2</sup>

A análise das Figuras 6 e 7 revela a variação na conicidade do cilindro em diferentes configurações, conforme mensurado pela variável CYLtt. A conicidade de um cilindro é uma medida crucial na fabricação de componentes mecânicos, pois afeta diretamente o desempenho e a precisão das peças. No caso em questão, a configuração que resulta no menor valor de CYLtt (11,80 µm) indica uma menor variação nos diâmetros das circunferências em diferentes cotas do cilindro. Isso sugere uma forma mais uniforme e próxima do ideal de um cilindro perfeito. Por outro lado, a configuração que resulta no maior valor de CYLtt (28,51 µm) mostra uma variação mais pronunciada nos diâmetros das



geométrica. Esses resultados sugerem que o avanço maior e a maior pressão do fluido de corte causam remoções de material mais agressivas e instáveis, resultando em desvios geométricos maiores da forma circular ideal.

Os dados indicaram que a cilíndricidade foi adversamente afetada pelo aumento da pressão do fluido de corte. Quando a pressão foi elevada de 45 para 55 kgf/cm<sup>2</sup>, os valores de CYLt aumentaram, evidenciando que a superfície da peça se desviou mais da forma cilíndrica ideal. Assim como na circularidade, maiores valores de CYLt indicam maior imprecisão geométrica. Isso ocorre porque a alta pressão do fluido de corte pode gerar instabilidades durante a usinagem, levando a uma forma cilíndrica menos precisa. Os resultados mostraram que o aumento do avanço da ferramenta de corte influencia negativamente a conicidade. Com o avanço crescente, a peça tende a desenvolver um formato mais cônico, com uma maior variação de diâmetro entre as extremidades. Esse efeito é linear, indicando que conforme o avanço aumenta, a discrepância na conicidade também aumenta. Isso compromete a uniformidade do diâmetro ao longo da peça, o que é um resultado indesejável na maioria das aplicações.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ba, Elhadji Cheikh , Paulo Sérgio Martins , Carlos Eduardo Dos Santos , Luis Henrique Andrade Maia , Jorge Wanderson Barbosa , e Marcello Rosa Dumont . “Study of the behavior of skewness (Rsk) and kurtosis (Rku) parameters in the dry drilling process of Al-Mg-Si alloy 6351 T6 using a Diamond-Like Carbon coated high-speed steel tool .” *Tribology International*, 2024: 109-149.
- Boopathi, M, K P Arulshri, e N Iyandural. “Evaluation of Mechanical Properties of Aluminium Alloy2024 Reinforced with Silicon Carbide and Fly Ash Hybrid Metal Matrix Composites.” *American Journal of Applied Sciences*, 2013.
- Castillo, W. J G. “Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos.” *Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina*, Florianópolis, 2005.
- De Castro, P. R A. “Aspectos Tecnológicos da Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte na Furação com Broca Helicoidal.” *Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis*, 2001.
- Diniz, A E, F C Marcondes, e N L Coppini. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. Ed. Artiliber, 2013.
- El-Khabeery, M M, S M Saleh, e M R Ramadan. “Some observations os surface integrity of deep milling hole.” *Wear*, 1991: 331-339.
- Gonçalves, R A, M B da Silva, e E S Costa. “Statistical analysis of cutting forces and hole accuracy in reaming an Al-Si-Mg alloy (6351) with diferent copper contents.” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018: 40:544.
- Gupta, Munish Kumar , P Niesłony, Murat Sarikaya, Mehmet Erdi Korkmaz, Mustafa Kuntoğlu, e G M Królczyk. “Studies on Geometrical Features of Tool Wear and Other Important Machining Characteristics in Sustainable Turning of Aluminium Alloys.” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2023: 943-957.
- Kardec, A. *Manutenção – Função Estratégica 4ª ed*. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora,, 2015.
- Klocke, F. *Manufacturing Processes 1 – Cutting*. Berlin: Springer-Verlag, 2011.
- Machado, A R. *Téoria da Usinagem dos Materiais* . São Paulo: Blucher, 2015.
- Manickam, C P. “Optimization of drilling parameters in AISI SS317L stainless steel material using Taguchi methodology.” *Materials Today: Proceedings*, 2019: p. 1-6.
- Porto, J. ,F B. “Metodologia para detecção de falhas em uma broca geradas durante a furação de chapas de aço inoxidável AISI 304 através da análise de dispersão dos sinais monitorados de força e torque.” Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica), Porto Alegre, 2017.
- Silva, A M. *Aços e Ligas Especiais*. São Paulo : 3ª ed. Edgard. Blücher Ltda, 2010.
- Silva, E R. *Contribuição ao estudo do desgaste de bedames na usinagem de ligas de Alumínio-Silício*. Universidade Estadual Paulista, Campus Ilha Solteira, São Paulo, 2015.
- Tito, J V, O J Aparecido, A É Mandrilles , R. F S Moni, e B L Cardoso. “Influência da afiação de brocas hss no processo de furação da liga de alumínio 7075.” *8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)*. Universidade Federal de São João del-Rei, 2015.
- Valgas, S D, B D Ochoas, N F Ozanan, e S A Chaves. “Avaliação da vida da broca de metal duro na furação do ferro fundido vermicular.” *8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)*. Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ), 2015.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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