

ANÁLISE DA QUALIDADE DE FUROS NÃO PASSANTES EM LIGA DE ALUMÍNIO AA 6063-T6 COM O USO DE FLUIDO DE CORTE A ALTA PRESSÃO.

Raphael Silva Lins

Luciano Antônio Fernandes

Virgílio Pires Teixeira

Tobias Anderson Guimarães

Universidade Federal do Triângulo Mineiro – Av. Frei Paulino, 30 - Nossa Sra. da Abadia, Uberaba - MG, 38025-180.

raphael.lins@ufu.br; raphael.lins@uftm.edu.br; luciano.fernandes@uftm.edu.br; d201810859@uftm.edu.br;

tobias.guimaraes@uftm.edu.br

Paulo Sérgio Martins

Centro Universitário UNA – Rua dos Aimorés, 1451 - Lourdes, Belo Horizonte - MG, 30140-071.

paulo.martins@prof.una.br

Márcio Bacci da Silva

Universidade de Federal de Uberlândia – Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica. Uberlândia-MG - CEP 38400-902

mbacci@ufu.br

Resumo: A liga de alumínio AA 6063-T6 é comumente usada em vários setores industriais, como a indústria automobilística por exemplo, devido às suas excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Porém, esta liga pode apresentar índice de usinabilidade baixo em operações de furação devido a sua ductibilidade, caracterizado por cavacos longos que podem proporcionar quebra da ferramenta. Assim, é importante investigar os efeitos das principais variáveis para melhorar o desempenho do processo de furação desta liga. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo analisar a qualidade de furos usinados nesta liga. Foram utilizadas brocas de metal duro polidas sem revestimento com diâmetro de 6,75 mm com haste cilíndrica e canais retos com aplicação de fluido de corte à alta pressão por canais internos. Utilizou-se um planejamento de experimentos em dois níveis e com 3 fatores, ou variáveis, que são: velocidade de corte (200 e 240 m/min); avanço (0,2 e 0,3 mm/rot) e pressão de aplicação de fluido de corte (35 e 60 kgf/cm²). Em todos os testes foram usinados furos continuamente sem estratégia para quebra do cavaco por um percurso de avanço de 18 mm. Os resultados obtidos passam por análise de variância e são apresentados em gráficos de interação para determinar se há diferença entre as médias de cada condição de corte utilizada. Também é utilizado análise de Pareto para verificar os efeitos dos parâmetros de corte (v_c , f e pressão de aplicação do fluido de corte). A qualidade dos furos foi avaliada pela rugosidade R_q , erro de cilindridade, diâmetro do furo, análise de cavacos e formação de rebarbas. Os resultados mostram que a velocidade de corte e a pressão de aplicação de fluido são os fatores mais influentes na qualidade dos furos e rebarbas formadas.

Palavras chave: Furação; Alta pressão; Qualidade de furos; Acabamento superficial; Desvios de forma.

1. INTRODUÇÃO

O processo de fabricação por furação é uma das operações de usinagem mais utilizadas na indústria automotiva. Especificamente na fabricação de motores, que utilizam ligas primárias de alumínio. A furação é utilizada também como um processo preparatório para processos de usinagem posteriores, como alargamento e rosqueamento. A qualidade superficial e as tolerâncias dimensional e de forma do pré furo definem a qualidade final do furo ou rosca, além de influenciar a vida das ferramentas e o desempenho e durabilidade da peça final.

As ligas Al-Si (alumínio-silício) têm sido amplamente utilizadas na indústria automotiva e aeroespacial, como por exemplo nos blocos dos motores, principalmente para redução de massa. Contudo, os componentes feitos com essas ligas impõem certa dificuldade na usinagem, devido as características abrasivas que aumentam proporcionalmente com a quantidade de silício (SILVA, 2015).

A furação convencional em ligas de alumínio, sem o uso de brocas especiais com lubrificação interna, é um processo que possui um certo grau de complexidade. Principalmente devido à formação de cavacos longos e às condições críticas de usinagem, como velocidade de corte relativamente baixa, alta ductibilidade do material e a dificuldade de escoamento do cavaco. Além disso, o comprimento em balanço da ferramenta e a rugosidade da superfície de saída, além das tolerâncias geométricas da ferramenta convencional, são parâmetro que influenciam o desempenho no processo. Boopathi *et al.* (2013), constataram que na furação sem uso de fluido de corte de alumínio e suas ligas, a alta pressão na aresta transversal gera altas temperaturas que causam a adesão do alumínio à superfície de saída da ferramenta, em níveis superiores a própria energia de coesão do material. Gonçalves (2012) avaliou a usinabilidade das ligas de alumínio 6063,

6082, 6351, 6005A e 6061 no processo de furação. As maiores forças de avanço foram obtidas para a liga 6063 em velocidades de corte acima de 200 m/min. Os autores atribuíram esse resultado ao maior grau de recalque, que se deve ao fato desta liga possuir uma menor quantidade dos principais elementos de liga Mg e Si e apresentar um tamanho de grão maior que as demais ligas avaliadas no trabalho.

As brocas de canais retos, Fig. 1, são utilizadas principalmente para furação profunda de ferros fundidos do tipo GG, GGG e ligas de alumínio AlSi, sendo seu uso limitado a furos com profundidade de 15 vezes o diâmetro da broca (GÜHRING, 1997; STEMMER, 2001). Esse tipo de broca se caracteriza por apresentar uma boa resistência à torção.



Figura 1. Brocas de canais retos e sistema refrigeração interna para sistema de aplicação de fluido de corte à alta pressão (SCHROETER, R.B. *et al.*, 2003).

As brocas de canais retos de metal-duro integral com canais internos de refrigeração possuem uma geometria característica, com algumas variações em relação às brocas helicoidais. Neste caso, o fluido de corte tem que ser aplicado em alta pressão para atingir a zona de corte. Os principais ângulos de afiação de uma broca de canal reto são resumidos na Figura 2.

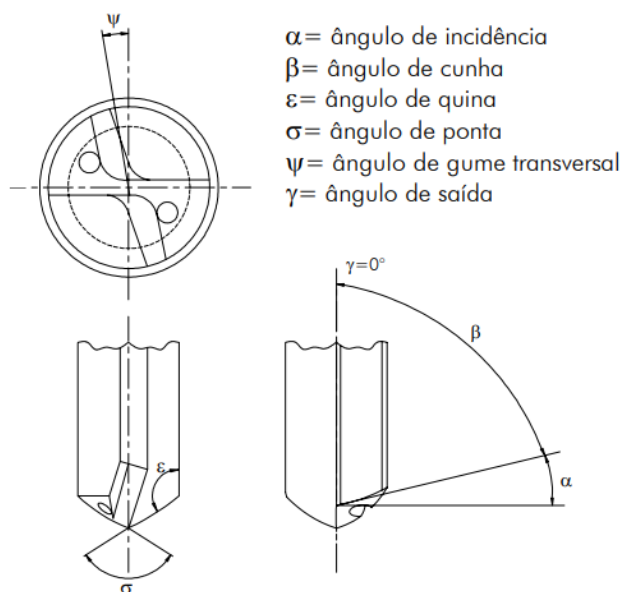


Figura 2. Geometria de uma broca de canais retos (SCHROETER, R.B. *et al.*, 2003).

A usinagem assistida por jato de alta pressão tornou-se uma técnica mais eficiente para conduzir o fluido de corte a zona de escorregamento e aumentar à eficiência da produção. As principais vantagens desta técnica, como muitas pesquisas têm mostrado, são o melhor controle dos cavacos, maior vida útil da ferramenta, menor temperatura de corte e melhor integridade da superfície (NAVES, 2013). Estudos recentes empregando esta técnica em aplicações de usinagem relataram aumentos significativos na produtividade em comparação com os métodos convencionais de aplicação de fluido de corte por jorro ou por mínima quantidade de fluido. Além de um efeito de resfriamento mais eficaz em velocidades de corte mais altas, o refrigerante sob alta pressão também pode atuar como um quebra-cavacos, ajudando assim a controlar a formação de cavacos (CRAFOORD *et al.*, 1999; DINIZ e MICARONI, 2007; KAMRUZZAMAN e DHAR, 2009).

Segundo Trent e Wright (2000), a aplicação de fluido de corte em alta pressão tem como principal objetivo encurtar o comprimento de contato cavaco ferramenta e assim, reduzir as forças de corte e avanço.

A penetração do fluido de corte em alta pressão na interface ferramenta-cavaco reduz o gradiente de temperatura e reduz a zona de escorregamento, oferecendo uma lubrificação adequada na interface com redução significativa do atrito (DAHLMAN e KAMINSKI, 1999; EZUGWU *et al.*, 2005).

Alves *et al.* (2008) ao investigar o processo de furação profunda com broca helicoidal com inserto de metal duro com diâmetro de 15,6 mm com canais de refrigeração interna e pressão de 40 bar em aço SAE 1045 forjado, concluíram que houve um aumento da vida útil do inserto da ferramenta em até 40% se comparado com a pressão de 4,5 bar.

El-Khabeery *et al.* (1991) investigaram o processo de furação de aços de médio e baixo carbono com broca com canal reto e um inserto de corte e dois insertos de alisamento de metal duro sem revestimento utilizando pressão de 70 kgf/cm². Os autores concluíram que uma combinação de alta velocidade de corte, baixa taxa de avanço com uma pequena relação comprimento-diâmetro, implicou em uma melhora significativa da rugosidade superficial. Análise da superfície usinada mostrou evidências de considerável fluxo plástico. Marcas devido ao atrito do cavaco contra a parede do furo também foram observadas. A microdureza na superfície usinada aumenta com a velocidade de corte e o avanço.

Castillo *et al.* (2005) realizaram experimentos em linha de produção e em laboratório, utilizando brocas de metal-duro integral com canais retos e com canais de refrigeração. Foram realizadas operações de furação profunda em ferro fundido cinzento GG25. O fluido de corte utilizado foi emulsão de óleo semi-sintético, em concentração de 8%. A pressão de injeção do fluido foi mantida constante em 25 bar para todos os ensaios. Os desvios dimensionais dos furos são claramente influenciados pelos parâmetros de usinagem, principalmente avanço e velocidade de corte. Os desvios de forma em termos de cilindridade dos furos mostraram-se sensíveis nas condições extrema utilizada (avanço de 0,2 mm/volta e velocidade de corte de 125 m/min).

Apesar do grande número de estudos relacionados à aplicação de fluido de corte, há poucas informações na literatura sobre a vantagem de usar o fluido lubrificante a alta pressão na usinagem de ligas de alumínio com ferramentas de metal duro polidas e sem revestimento. O processo de furação à alta pressão, é uma operação muito utilizada na fabricação de blocos de motores em alumínio. Aliado a este fato, a falta de pesquisas sobre comportamento das ligas Al-Si (Alumínio-Silício) no processo de furação a alta pressão motivou este trabalho.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro. O equipamento utilizado foi um Centro de Usinagem CNC modelo 1250D, fabricado pela ROMI, com 18 kW de potência no eixo principal e rotação máxima de 12.000 rpm. Foi utilizado o fluido de corte solúvel MV AQUA 180, fabricado pela VCI, numa concentração de 5%. O potencial hidrogeniônico (pH) foi monitorado durante todo o experimento para que se mantivesse entre 8,1 e 9, segundo recomendação do fabricante.

Foram utilizadas brocas de metal duro polidas sem revestimento, com diâmetro de 6,75 mm, haste cilíndrica, canais retos e com canais de lubrificação interna. As brocas possuem ângulo de ponta $\sigma = 134^\circ$, ângulo de saída $\gamma = 0^\circ$ e ângulo de incidência $\alpha = 22^\circ$ com comprimento útil de 26 mm. Além disso, são escalonadas com diâmetro maior de 9 mm com ângulo de 45° , com um balanço total de 35 mm e um batimento de 0,005 mm, fabricadas pela GUHRING código DK460 UF 21311021 GB1098 CT080 004.

Foi utilizado um planejamento fatorial de 2 níveis e 3 fatores, que são: velocidade de corte (200 e 240 m/min); avanço (0,2 e 0,3 mm/rot) e aplicação de fluido de corte à alta pressão (35 e 60 kgf / cm²), conforme mostra a Tab. 1. Os furos foram realizados continuamente sem estratégia para quebra do cavaco por um comprimento de 18 mm. Foi feita réplica para todas as condições apresentadas no planejamento da Tab.2.

Tabela 1. Parâmetros de corte e os seus respectivos níveis

Níveis	Fatores		
Testes	v_c [m/min]	f [mm/rot]	Pressão do fluido [kgf/cm ²]
-	200	0,2	35
+	240	0,3	60

Tabela 2. Matriz de experimentos

Condições	v_c [m/min]	f [mm/rot]	Pressão do fluido
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

O parâmetro de rugosidade medido foi a desvio médio quadrático (Rq). Para isso foram feitas 3 leituras aplicando um filtro gaussiano e o *cut-off* de 0,8 mm e comprimento de amostragem de 4,0 mm. O equipamento utilizado para as medições foi o perfilômetro modelo Form Talysurf 5.0, fabricante Taylor Hobson®.

Para medição dos desvios de forma em termos da cilindridade, foi utilizado o circularímetro modelo Talyrond 131C da Taylor Hobson. Os parâmetros para quantificar os desvios de forma são definidos pela norma ISO 12180-1 e ISO 1101.

Neste estudo, foi necessária a medição de circularidade em 4 planos paralelos na direção vertical espaçados em 4mm, não sendo possível medir por toda a extensão do furo por limitação do diâmetro do furo e apalpador. Dentre os inúmeros parâmetros fornecidos pelo equipamento foi escolhido o parâmetro batimento total do cilindro (CYLt) por ser o mais comumente usado. Este parâmetro era anteriormente referido como a diferença entre o maior pico e o maior vale (*peak-to-valley*), que define a separação entre dois cilindros coaxiais com o eixo do cilindro de referência segundo ISO 1101, que se assemelha a definição presente na ISO 12180, conforme Figura 3.

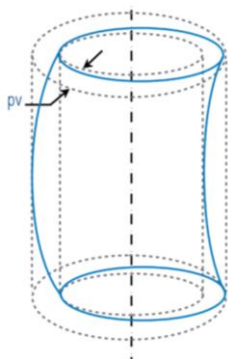


Figura 3. Geometria de forma de um furo: cilindridade -CYLt – CYLtt (TAYLOR HOBSON, 2011).

Durante a medição da circularidade e cilindridade foi necessário que cada furo estivesse centralizado e nivelado, conforme Figura 4a. Para tanto, foi desenvolvido um dispositivo para aumentar a capacidade de centralização, e fixação do furo no equipamento. Através de relógios comparadores no sentido radial e axial foi possível garantir uma pré-centralização, para que o contato do apalpador mantivesse a pressão de contato uniforme para realizar a medição.

O critério adotado para a análise foi a circularidade total (RONt), que é o parâmetro mais comumente usado. Este parâmetro era denominado como "pico para vale" (*peak-to-valley*), e é definido como a separação de dois círculos concêntricos com o centro de referência do círculo informando a distância máxima encontrada entre o maior pico e o maior vale encontrado durante a medição.

Para medição de rebarba na entrada do furo foi necessário confeccionar um tampão cilíndrico de prolipropileno, com diâmetro de 6,70 mm, para ser alojado dentro do furo, conforme mostrado na Figura 4 b. Para medir a altura da rebarba, foi utilizado um perfilômetro Rugosurf – 90 G, fabricante TESA, com comprimento de medição igual a 10 mm. Para cada furo, as rebarbas foram medidas em quatro posições ao longo do diâmetro, 0°, 90°, 180° e 270°. Para efeito de análise foi considerada a média das quatro medições.

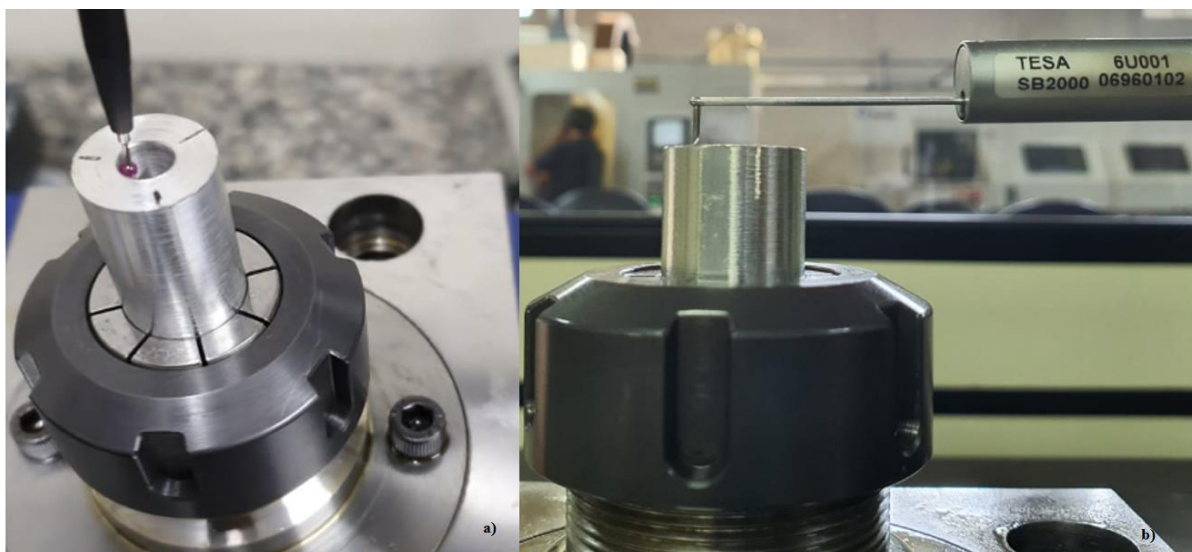


Figura 4. Medição de cilindridade e conicidade do cilindro (a); medição de rebarba na face (b).

Para medição do diâmetro interno do furo foi utilizado um micrômetro interno de três contatos com resolução de 0,001 mm fabricante TESA com capacidade de medição de 6 a 8 mm.

Para o cálculo do grau de recalque R_c , foi medida a espessura do cavaco h' com paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. A espessura de corte h foi considerada com sendo igual ao avanço.

O grau de recalque, R_c , é definido pela equação (1):

$$R_c = \frac{h'}{h} \quad (1)$$

Foram realizadas análise de variância ANOVA, obtidos os gráficos de Pareto dos efeitos padronizados e gráficos de interação para determinar se há diferença entre as médias para cada condição de corte. Foram obtidos também os gráficos que mostram a rugosidade em função da velocidade de corte, avanço e pressão do fluido de corte (P). Desta forma determinou-se quais parâmetros de corte possibilitaram furos não passantes com melhor qualidade em termos de rugosidade R_q , cilindridade, grau de recalque R_c e rebarbas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o planejamento experimental e a metodologia descritos anteriormente foi possível coletar e gerar os dados apresentados nesta seção. A Tabela 3 apresenta os resultados médios de cilindridade, rugosidade R_q , diâmetro interno e altura de rebarba e respectivo desvio padrão.

O diâmetro médio dos furos foi de $6,81 \pm 0,003$ mm, que corresponde a uma classe de qualidade IT5, de acordo com a norma de sistemas de tolerâncias e ajustes (NBR 6158 ,1995).

Tabela 3. Médias das medidas das variáveis de saída do experimento

Condições	Diamêtro do furo [mm]	Desvio padrão	R_q [μ m]	Desvio padrão	Cilindridade [μ m]	Desvio padrão	Rebarba [mm]	Desvio padrão
1	6,810	0,00081	2,136	0,02993	16,7	1,187	0,18175	0,02535
2	6,814	0,00124	2,049	0,07850	26,06	4,241	0,11925	0,01532
3	6,812	0,00081	2,136	0,02993	16,49	1,772	0,172	0,01396
4	6,813	0,00081	1,916	0,27181	36,66	4,575	0,12575	0,02357
5	6,810	0,00081	2,223	0,11484	35,94	3,875	0,1655	0,00502
6	6,815	0,00163	2,877	0,18508	23,72	0,775	0,13125	0,01813
7	6,812	0,00163	2,551	0,15217	22,17	0,475	0,225	0,02324
8	6,814	0,00124	2,869	0,04477	33,81	1,633	0,11475	0,00843

A Tabela 4 apresenta a diferença estatística e os efeitos das comparações das variáveis de saída em função dos fatores de entrada (v_c , f e pressão). Para valores p -value menores que o índice de significância (p -value $\leq \alpha$), os fatores de entrada influenciaram nos parâmetros de resposta. Os fatores influentes estão destacados em negrito na tabela 4. A influência pode ser visualizada através dos gráficos de Pareto e gráficos de interação que foram analisados em conjunto com os três fatores de entrada.

Tabela 4. Diferença estatística e o efeito das comparações entre os resultados em relação aos fatores de entrada

Resultados		v_c	F	P	v_c*f	v_c*P	$P*f$	v_c*f*P
Diâmetro [mm]	p-value	0,014	0,273	0,001	0,086	0,273	0,455	0,046
	Efeito	0,002	0,00075	0,0032	0,0012	0,00075	0,0005	0,0015
Altura da Rebarba [mm]	p-value	0,267	0,221	0,000	0,150	0,778	0,787	0,498
	Efeito	0,0126	0,014	0,0619	0,0169	0,00309	0,00297	0,0075
Grau de Recalque	p-value	0,008	0,000	0,001	0,0,316	0,957	0,870	0,828
	Efeito	0,2583	0,8125	0,4000	0,0792	0,0042	0,0125	0,0167
Desvio médio quadrático (R_q) [μ m]	p-value	0,003	0,064	0,601	0,776	0,006	0,133	0,351
	Efeito	0,3577	0,1818	0,0461	0,0250	0,3139	0,1414	0,351
Batimento Total / Cilindridade	p-value	0,007	0,849	0,323	0,335	0,001	0,158	0,599
	Efeito	8,99	0,49	2,61	2,54	11,76	3,86	1,36

Com base nos dados da Tabela 3, têm-se os gráficos de Pareto para efeitos padronizados (à esquerda) e gráficos de Interação (à direita), de acordo com as Figuras 5 a 11.

As Figuras 5 e 6 mostram que a velocidade de corte (v_c) e a combinação da velocidade de corte com a pressão do fluido de corte (P) influenciaram na rugosidade R_q , assim como na cilindridade ou batimento total.

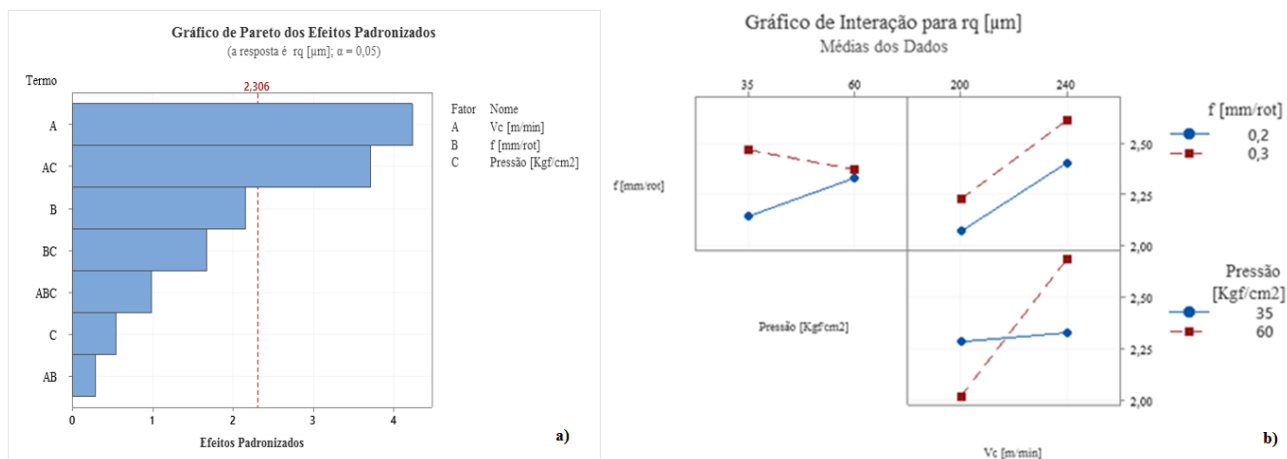


Figura 5. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para R_q (a) e Gráfico de Interação para R_q (b).

A menor rugosidade, R_q , 1,916 μm , foi obtida quando se utilizou pressão de 60 kgf/cm^2 e velocidade de corte de 200 m/min (Fig 5-b). Este resultado muito provavelmente pode ser atribuído a uma menor zona de aderência. O aumento da velocidade de corte na usinagem de materiais dúcteis, acima da velocidade crítica de formação de aresta postiça de corte, leva a uma maior zona de aderência. Maior zona de aderência implica em maior dificuldade de ter resultados positivos com aplicação de altas pressões de fluido de corte, tanto que o desvio médio quadrático R_q aumentou quase 50% ($R_q=2,869$), quando se utilizou velocidade de corte de 240 m/min, mantendo as outras condições. Entretanto, com a redução da velocidade de corte, até certo ponto, proporcionará um aumento na instabilidade no fluxo do cavaco sobre a superfície de saída e maior será a zona de escorregamento na qual a aplicação de alta pressão de fluido de corte tem vantagem em conduzir o cavaco para fora do furo. Os canais retos atuaram como arestas alisadoras, a média da rugosidade R_q de todos os furos foi de 2,3446 μm , sendo que o tempo de corte médio de 2,5 segundos por furo.

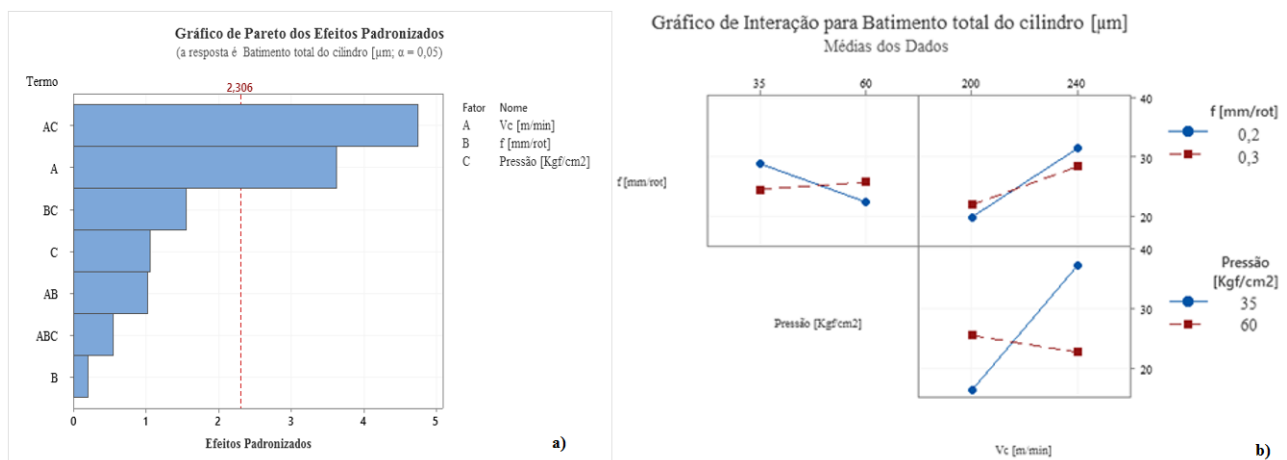


Figura 6. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Cilindricidade (a), Gráfico de Interação para Cilindricidade (b).

A Figura 6 demonstra que a menor cilindridade, 16,7 μm , foi obtida para o teste que utilizou pressão de 35 kgf/cm^2 e velocidade de corte de 200 m/min. A análise, neste ponto, consiste em termos, mais do aumento da velocidade de corte que está diretamente relacionada com maior taxa de deformação do cavaco, do que da pressão de aplicação do fluido de corte, uma vez que, os eventos máximo e mínimo ocorrem a 35 kgf/cm^2 . Desta forma, infere-se que o cavaco encruado tem mais efeito sobre o desvio de forma, cilindridade, do que impactos sobre a rugosidade, para a mesma pressão de aplicação. A baixa pressão de aplicação de fluido de corte atua no aumento do desvio de circularidade por não expulsar o cavaco efetivamente do furo o que proporciona maior tempo em contato deste cavaco encruado contra as paredes do furo determinando o aumento do erro geométrico de cilindridade.

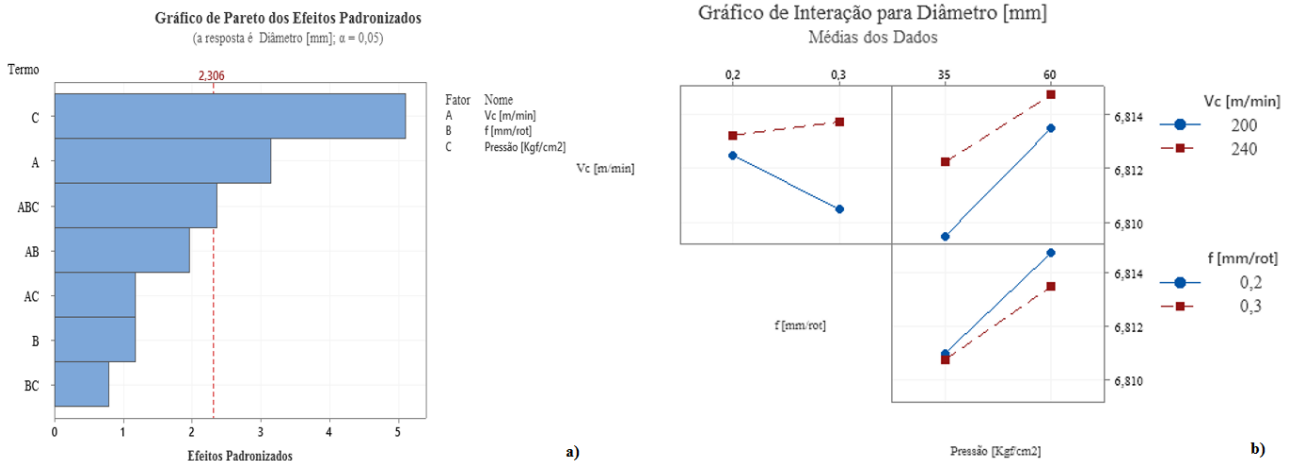


Figura 7. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para diâmetro (a), Gráfico de Interação para diâmetro (b).

A Figura 7 mostra que dois fatores (P e v_c), apresentaram valor p -value menor que o índice de significância, mais pronunciados, e que as combinações das três variáveis de entrada também influenciaram nos resultados do diâmetro dos furos. As considerações sobre os resultados do diâmetro seguem a mesma linha de raciocínio dos já discutidos em resultados de circularidade.

Entretanto, chama a atenção o fato que para duas condições extremas, $v_c = 200$ m/min, $P = 35$ kgf/cm² e $f = 0,2$ mm/rotação e $v_c = 240$ m/min, $P = 60$ kgf/cm² e $f = 0,3$ mm/rotação observou-se diâmetros médios muito próximos, respectivamente $6,812 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ e $6,814 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$. Tal resultado se deve em parte ao instrumento de medição. A parte do contato do micrômetro interno com a parede do furo se dá ao longo de um segmento de reta para cada um dos três contatos o qual obtêm como que a média dos diâmetros em várias seções do furo, o que reduz a variabilidade do diâmetro do furo em questão.

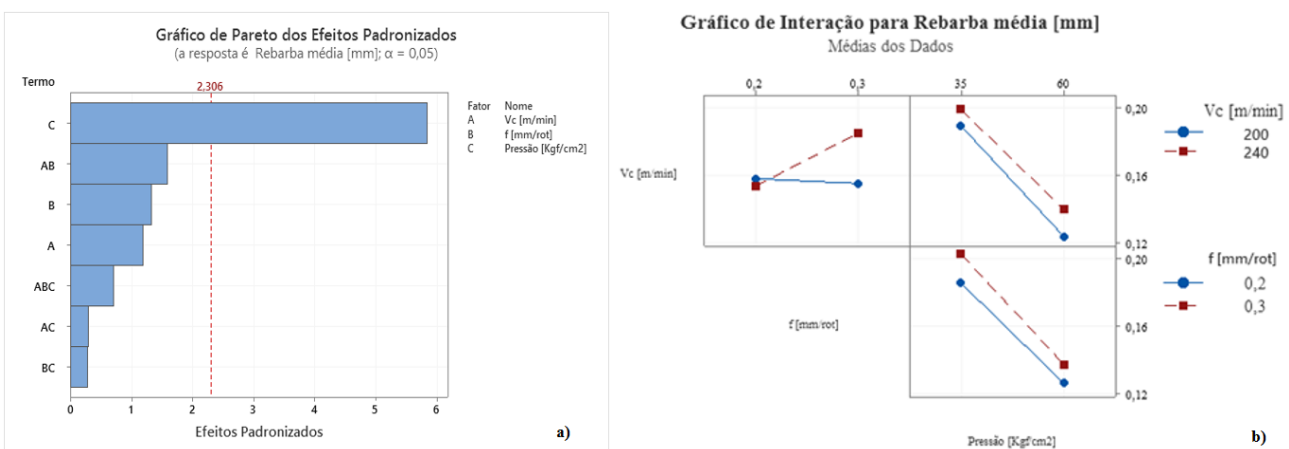


Figura 8. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para rebarba (a), Gráfico de Interação para as médias de rebarba (b).

A Figura 8 demonstra que a pressão do fluido de corte (P) apresentou valor p -value menor que o índice de significância, sendo a única variável de entrada que influenciou na altura da rebarba, mesmo o avanço de corte (f) e a velocidade de corte (v_c) fatores influentes para outros parâmetros de saída. A Pressão do fluido de corte de 60 kgf/cm^2 apresentou os menores índices de altura de rebarba. Para $v_c = 240 \text{ m/min}$ e $f = 0,3 \text{ mm/rot}$, a altura média das rebarbas ficou em torno de $0,144 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ tem-se as maiores rebarbas. Para $v_c = 200 \text{ m/min}$ e $f = 0,2 \text{ mm/rot}$, a altura média foi de $0,12 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, uma redução de quase 30%. Nas máximas condições de corte tem-se as maiores taxas de deformação e devido a este fato material da peça pode ser projetado para as bordas do furo. Apesar do batimento axial da broca ser relativamente pequeno tem-se uma instabilidade no momento da entrada na peça e uma transição de esmagamento para cisalhamento nas arestas de corte o que também contribuem para a formação de rebarbas.

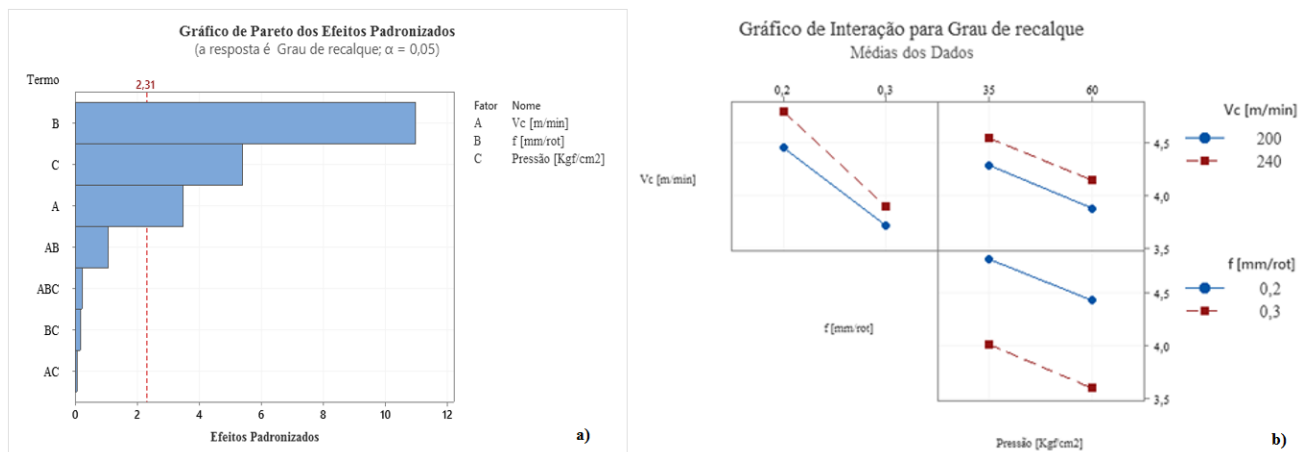


Figura 9. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Rc (a), Gráfico de Interação para Rc (b).

A Figura 9 demonstra que os três fatores (v_c , f e P), apresentaram valor p -value menor que o índice de significância, desta forma estas três variáveis de entrada influenciaram no grau de recalque (R_c). O menor grau de recalque foi de 3,45 para $v_c = 200$ m/min, $P = 60$ kgf/cm² e $f = 0,3$ mm/rotação. O maior grau de recalque, 5,125, foi obtido para $v_c = 240$ m/min, $P = 35$ kgf/cm² e $f = 0,2$ mm/rot. O valor do grau de recalque, R_c está associado ao ângulo de cisalhamento, ϕ , e é uma indicação da quantidade de deformação dentro da zona de cisalhamento primária (MACHADO et al., 2009). Pequenos valores de ϕ (altos valores de R_c) significarão grande quantidade de deformação no plano de cisalhamento primário, e vice-versa.

Além do que foi exposto acima, seguem algumas conclusões a respeito do trabalho de forma geral. Para as condições de corte utilizadas neste trabalho, o cavaco é longo, tipo fita, e que não se quebra para o comprimento de avanço de 18 mm. Os furos produzidos têm diâmetro em média a $6,81 \pm 0,003$ mm, apresentando um padrão de qualidade IT5, de acordo com a norma de sistemas de tolerâncias e ajustes NBR 6158 ,1995.

4. CONCLUSÕES

Desta forma pode-se enumerar a influência de cada fator de entrada nos resultados obtidos, a seguir:

- Os fatores de entrada que influenciaram de maneira significativa na determinação do diâmetro do furo, foram: v_c com p -value = 0,014; P com p -value = 0,001; $v_c * f * P$ com p -value = 0,046. A $v_c = 200$ m/min, $P = 35$ kgf/cm² e $f = 0,2$ mm/rot produziram furos com diâmetro médio igual a $6,811 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.
- Para determinação da altura da rebarba o fator de entrada que influenciou foi P com p -value = 0,000, com $P = 60$ kgf/cm² encontrou-se as menores alturas de rebarba independente dos valores de v_c e de f , utilizados no processo de fabricação por furação à alta pressão, sendo a altura de rebarba média igual a $0,122 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.
- Os fatores de entrada que influenciaram de maneira significativa na determinação do desvio médio quadrático, foram: v_c com p -value = 0,003; $v_c * P$ com p -value = 0,006. A $v_c = 200$ m/min, $P = 35$ kgf/cm² e $f = 0,2$ ou $0,3$ mm/rot produziram furos com R_q médio igual a $2,168 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,050 \text{ } \mu\text{m}$.
- Os fatores de entrada que influenciaram de maneira significativa na determinação da cilindricidade, foram: v_c com p -value = 0,007; $v_c * P$ com p -value = 0,001. A $v_c = 200$ m/min, $P = 35$ kgf/cm² e $f = 0,2$ ou $0,3$ mm/rot produziram furos com R_q médio igual a $21,825 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,500 \text{ } \mu\text{m}$.
- Os fatores de entrada atuaram de forma independente, para influenciar de maneira significativa, na determinação do grau de recalque (R_c) do cavaco, foram: v_c com p -value = 0,008; f com p -value = 0,000 e P com p -value = 0,001. A $v_c = 200$ m/min, $P = 60$ kgf/cm² e $f = 0,3$ mm/rot produziram cavacos com grau de recalque médio igual a $3,5 \pm 0,05$.

Através de análise de variância ANOVA, dentre os fatores de entrada testados, em relação aos resultados encontrados, pode-se inferir estatisticamente que o melhor parâmetro de corte é $v_c = 200$ m/min, $f = 0,3$ mm/rot e $P = 35$ kgf/cm² para a liga de alumínio AA6063-T6. Propõe-se para trabalhos futuros outros parâmetros de corte associados à alta pressão e análise da mudança de estratégia de furação com um processo intermitente para quebra do cavaco.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM, aos órgãos de fomento CAPES, CNPQ e Fapemig, à empresa Gühring Brasil LTDA, ao apoio técnico do grupo Stellantis e à Universidade Federal de Uberlândia – UFU.

6. REFERÊNCIAS

- Alves S.M., Domingues J., Muller W. Utilização do fluido de corte em alta pressão no processo de furação profunda. Revista do Instituto Superior Tupy, v.8 n.9, p.68-77, 2008. Disponível em: <http://rist.unisocietec.com.br/index.php/rist/article/view/253>. Acesso em: 05 set. 2022.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6158: Sistemas de tolerâncias e ajustes. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- Boopathi, M., Shankar, S., Kumar, SM, Ramesh, R., 2013. Investigação experimental de furação por fricção em latão, alumínio e aço inoxidável. Procedia Eng. 64, 1219e1226.
- Craford R., Kaminski J., Lagerberg S., Ljungkrona O. A Chip control in tube turning using a high-pressure water jet, Proceedings of the IMechE 213 (Part B) (1999) 761–767.
- Diniz A.E., Micaroni R., Influence of the direction and flow rate of the cutting fluid on tool life in turning process of AISI 1045 steel, International Journal of Machine and Manufacture 47 (2007) 247–254.
- El-khabeery M. M., Saleh S.M., Ramadan M.R. Some observations of surface integrity of deep drilling holes. Elsevier, Wear, v.142, p.331-349, 1991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004316489190173R>. Acesso em: 05 set. 2022.
- Ezugwu E.O., Da Silva R.B., Bonney J., Machado A.R. Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti–6Al–4V alloy with high pressure coolant supplies, International Journal of Machine Tools and Manufacture 45 (2005) 1009–1014. [11] J. Kaminski, P. Dahlman, Chip-forming possibilities in high-pressure jet assisted turning, in: Proceedings of the International Symposium on New Applications of Water Jet Technology, Ishinimaki, Japan, 1999.
- Ferraresi, D. “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1970, 751 pgs.
- Gonçalves, R.A., Investigação da Usinabilidade das Ligas de Alumínio da Série 6XXX. 2012. 107f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- GÜHRING – Die ratiobohrer und ihre praxisgerechte anwendung. Catálogo do fabricante. Albstadt, Alemanha, 1997. 156 p.
- Naves, V.T.G.; Da Silva, M.B. ; DA SILVA, F.J. . Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel. Wear (Lausanne), v. 302, p. 1201-1208, 2013.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Da Silva m. b. Teoria da Usinagem dos Materiais. 1ª ed. São Paulo: Editora Blücher, 2009.
- M. Kamruzzaman, N.R. Dhar, The influence of high pressure coolant on temperature tool wear and surface finish in turning 17CrNiMo6 and 42CrMo4 steels, Asian Research Publishing Network—ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 4 (6) (2009)
- Schroeter, R.B. et al. Otimização do processo de furação e acabamento guias de válvulas. Florianópolis: UFSC, 2003. 86 p. (1º Relatório – Projeto VerdeAmarelo).
- Da 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.
- TAYLOR HOBSON LIMITED. Exploring Surface Texture. 2 New Star Road, List No. 600-14/03.7th edition. England, Leicester LE4 9JQ: AMETEK-ultra precision technologies, 2011.
- Trent, E.M.; Wright, P.K. Metal Cutting. 4th Edition, Butterworths – Heinemann. 2000, 446 p.
- Castillo, W. J. G. ; Schroeter, R. B.; Stoeterau, R. *Deep drilling in gg25 gray cast iron using tungsten carbide drills with straight flutes*. In: 18th International Congress of Mechanical Engineering, 2005, Ouro Preto. DEEP DRILLING IN GG25 GRAY CAST IRON USING TUNGSTEN CARBIDE DRILLS WITH STRAIGHT FLUTES, 2005.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF QUALITY OF BLINDE HOLES IN AA 6063-T6 ALUMINUM ALLOY USING HIGH PRESSURE CUTTING FLUID.

Raphael Silva Lins

Luciano Antonio Fernandes

Virgílio Pires Teixeira

Tobias Anderson Guimarães

Universidade Federal do Triângulo Mineiro – Av. Frei Paulino, 30 - Nossa Sra. da Abadia, Uberaba - MG, 38025-180.

raphael.lins@ufu.br; raphael.lins@uftm.edu.br; luciano.fernandes@uftm.edu.br; d201810859@uftm.edu.br;

tobias.guimaraes@uftm.edu.br

Paulo Sérgio Martins

Centro Universitário UNA – Rua dos Aimorés, 1451 - Lourdes, Belo Horizonte - MG, 30140-071.

paulo.martins@prof.una.br

Márcio Bacci da Silva

Universidade de Federal de Uberlândia – Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica. Uberlândia-MG - CEP 38400-902

mbacci@ufu.br

Abstract. AA 6063-T6 aluminum alloy is commonly used in various industrial sectors such as civil construction, automobile industry, among others, due to its excellent mechanical properties and corrosion resistance. However, it has a low machinability index in drilling operations due to its ductility and the long chips that can lead to drill breakage. The present work aims to analyze the quality of holes, through the geometric deviations and surface roughness. The drilling process uses a 6.75 mm diameter uncoated polished carbide drill with a cylindrical shank and straight flutes for chip exit and the possibility of applying high pressure internal lubrication and cooling. We propose 2 independent variables with 3 factors, which are: cutting speed (200 and 240 m/min); advance (0.2 and 0.3 mm/rev) and application of cutting fluid at high pressure (35 and 60 Kgf/cm²). The holes were drilled continuously without chip breaking strategy for a length of 18 mm, all tests were replicated. Through ANOVA analysis of variance using interaction graphs to determine if there is a difference between the means of each cutting condition, Pareto graphs were obtained to analyze the effects of the cutting parameters (Vc, f and Pressure) in the machining of non-through holes with better quality in terms of *rq* roughness, roundness, cylindricity, hole diameter, chip and burr analysis.

Keywords: Drilling; High pressure; Quality of holes, Surface finish; Shape deviations.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.