



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

ESTUDO DO ROSQUEAMENTO INTERNO DE LIGA DE ALUMÍNIO COM FLUIDO DE CORTE À ALTA PRESSÃO

Raphael Silva Lins, raphael.lins@ufu.br¹
Flaysner Magayver Portela, magayver@ufu.br¹
Breno Santos de Siqueira, breno.siqueira@emuge-franken.com.br²
Paulo Sérgio Martins, paulo.martins@prof.una.br²
Marcio Bacci da Silva, mbacci@ufu.br¹

¹Universidade de Federal de Uberlândia – Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica. Uberlândia-MG - CEP 38400-902.

² Centro Universitário UNA – Rua dos Aimorés, 1451 - Lourdes, Belo Horizonte – MG - CEP 30140-071.

Resumo. A liga de alumínio AA 6063-T6 é comumente usada em vários setores industriais, como a indústria automobilística, naval e aeroespacial. No rosqueamento interno, inúmeros fatores podem influenciar na quebra prematura de machos de roscar durante o processo. Dentre eles, alguns se destacam, como por exemplo: ductilidade do material, dureza, erro de sincronismo da máquina, velocidade de corte excessiva, erro dimensional, erro geométrico de furos, cavacos no fundo do furo, lubrificidade do óleo de corte empregado, revestimento das ferramentas e tipo de cabeçote de rosqueamento empregado. Considerando a dinâmica do processo de rosqueamento interno, os sistemas de lubrificação-refrigeração e os ângulos de hélice utilizando velocidades de corte altas, tem grande importância na qualidade e tempo de produção de roscas. A motivação deste estudo, que tem como objetivo analisar o efeito da alta pressão utilizando cabeçote de rosqueamento de compensação axial mensurando a força axial e o torque no rosqueamento em furos cegos. Os testes de usinagem foram realizados em um centro usinagem CNC, utilizando machos de roscar M8 x 1,25 mm, sem cobertura, com ângulo de hélice de 15° e 45°. A operação foi realizada com fluido de corte pressurizado com pressão de trabalho de 15 kgf/cm² e 35 kgf/cm² e duas velocidades de corte, 40 m/min e 60 m/min. Para realização dos testes foi utilizado um planejamento fatorial completo com 3 fatores e 2 níveis. De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que a pressão de aplicação do fluido e o ângulo de hélice combinados tem influência sobre a força axial e o torque no processo de rosqueamento interno.

Palavras chave: Ângulo de hélice, Alta pressão, Rosqueamento, Torque, Força axial.

Abstract. AA6063-T6 aluminum alloy is commonly used in various industrial sectors such as the automobile, marine and aerospace industries. In internal threading, numerous factors can influence the premature breakage of threading taps during the process. Among them, some stand out, such as: ductility of the material, hardness, machine timing error, excessive cutting speed, dimensional error, geometric error of holes, chips at the bottom of the hole, lubricity of the cutting oil used, coating of the tools and type of threading head used. Considering the dynamics of the internal threading process, lubrication-cooling systems and helix angles using high cutting speeds are of great importance in the quality and production time of threads. The motivation for this study, which aims to analyze the effect of high pressure using an axial compensation threading head, measuring the axial force and torque when threading in blind holes. The machining tests were carried out on a CNC machining center, using M8 x 1.25 mm taps, without cover, with helix angles of 15° and 45°. The operation was carried out with pressurized cutting fluid with working pressure of 15 kgf/cm² and 35 kgf/cm² and two cutting speeds, 40 m/min and 60 m/min. To carry out the tests, a complete factorial design was used with 3 factors and 2 levels. According to the results obtained, it can be concluded that the fluid application pressure and the helix angle combined have an influence on the axial force and torque in the internal threading process.

Keywords: Helix angle, High pressure, Threading, Torque, Axial force.

1. INTRODUÇÃO

O alumínio destaca-se como o metal não ferroso mais amplamente utilizado em processos industriais devido às suas propriedades mecânicas excepcionais. Devido à extensa aplicação das ligas de alumínio, as empresas que as usinam necessitam de um conhecimento mais profundo sobre o comportamento desses materiais durante os processos de fabricação. Dentre os diversos métodos de fabricação, a usinagem se destaca como um dos mais empregados na indústria. Gonçalves (2012) investigou a usinabilidade no torneamento cilíndrico externo de cinco ligas de alumínio-magnésio-

silício da série 6XXX (6082, 6351, 6005A, 6063 e 6061), analisando as três componentes da força de usinagem, rugosidade, grau de recalque e forma do cavaco, utilizando ferramentas de metal duro classe N. Através de um planejamento estatístico, foi avaliado o efeito dos parâmetros de corte: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Os resultados indicaram que a maior força de corte foi observada na usinagem da liga 6082. Quanto à rugosidade, os melhores resultados foram obtidos com a liga 6063, apesar de apresentar a pior usinabilidade devido aos cavacos de fita, que demonstraram os maiores graus de recalque entre as ligas estudadas.

Os estudos dedicados à operação de rosqueamento são fundamentais por se tratar de um processo complexo, realizado por ferramentas com uma ou múltiplas arestas de corte, como machos de roscar, ou por conformação mecânica. O rosqueamento com machos de corte ou laminação é amplamente empregado na produção de filetes internos em furos, sendo uma ferramenta essencial na linha de produção automotiva. Trabalhos como os de Carvalho et al. (2012) e Ribeiro Filho et al. (2015) focaram na análise de parâmetros como torque, força axial e formação de rebarbas no rosqueamento interno com macho, considerando variáveis como tipo de processo, velocidade de corte e revestimento da ferramenta. Pereira (2014) complementou esses estudos investigando características como variação de espessura, comprimento rosqueado, passo e revestimento da ferramenta, observando que a carga de ruptura das roscas M10 x 1,5 mm laminadas e usinadas foi estatisticamente igual, com a rosca usinada demonstrando uma tendência a suportar maior esforço de tração do que as roscas laminadas.

Os cabeçotes de rosqueamento utilizados na usinagem de roscas internas em máquinas CNC visam aumentar a produtividade por meio de velocidades de corte elevadas. Dentre os tipos de cabeçotes existentes, como cabeçote fixo, auto reversível, flutuante e com compensação axial, todos têm como objetivo principal compensar erros de sincronismo e batimentos radial e axial que possam ocorrer durante o processo de rosqueamento, exceto o cabeçote fixo.

Siqueira et al. (2019) estudaram operações de rosqueamento utilizando cabeçote de rosqueamento com compensação axial e três tipos de machos de roscar (com hélice de 15° e 35° e canais retos 0°) em aço SAE 1020. Os autores mediram torque e força axial em furos roscados passantes, utilizando machos M8 x 1,25 mm revestidos com TiN, observando que a força axial diminuiu com o aumento da velocidade de corte em todos os experimentos. No entanto, o torque aumentou para valores mais altos de velocidade de corte. Machos com ângulo de hélice de 15° apresentaram maior força axial do que aqueles com ângulo de 35°, para todos os parâmetros de corte testados, enquanto machos com quebra-cavacos geraram maior torque em comparação aos sem quebra-cavacos.

A escassez de estudos sobre rosqueamento utilizando fluido de corte de alta pressão, especialmente em ligas de alumínio, e variando o ângulo de hélice das ferramentas, motivou o presente estudo. O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o comportamento de machos M8, sem revestimento, e a influência dos ângulos de hélice de 15° e 45° na operação de rosqueamento da liga AA 6063-T6.

2. Materiais e Métodos

O AA6063-T6 é uma liga Al-Si-Mg, sendo uma liga primária com baixo teor de silício, suficiente para formar silicatos de magnésio. Ligas de alumínio primárias são amplamente empregadas nos setores automotivo, naval e aeroespacial.

Os desgastes serão monitorados qualitativamente em microscópio eletrônico de varredura (MEV) após 300 e 600 corpos de prova roscados. O número máximo de roscas usinadas será limitado a 600 por ferramenta. O comprimento rosado será de 20 mm, equivalente a 16 filetes no comprimento de corte.

Foi avaliado o desempenho de dois tipos de machos de corte de aço rápido especial: HSS-E M8 X 1,25 mm com ângulo de hélice de 15°, canal de lubrificação interno tipo IKZ e chanfro tipo E (macho tipo 1); e macho HSS-E M8 x 1,25 mm com ângulo de hélice de 45°, canal de lubrificação interno tipo IKZ e chanfro tipo C (macho tipo 2). Os estudos das formas e mecanismos de desgaste das ferramentas serão realizados por meio de análise em MEV. As medições de desgaste incidirão na superfície de folga, bem como em toda a extensão da ferramenta, com foco nas arestas de corte ou fio de corte e no contra-fio ou calcanhar (STEMMER, 1992; OSG, 2005).

Para assegurar a integridade do experimento, as arestas de corte foram inspecionadas e identificadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo VEGA 3 LMU, fabricado pela Tescan. As imagens foram obtidas nos Laboratórios Multiusuários da Universidade Federal de Uberlândia (RELAM-UFU), em Uberlândia, MG, Brasil. Apresentado na Figura 1.

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 8%. O potencial hidrogeniônico (pH) foi monitorado durante todo o experimento para que se mantivesse entre 8,1 e 9, valores recomendados pelo fabricante.

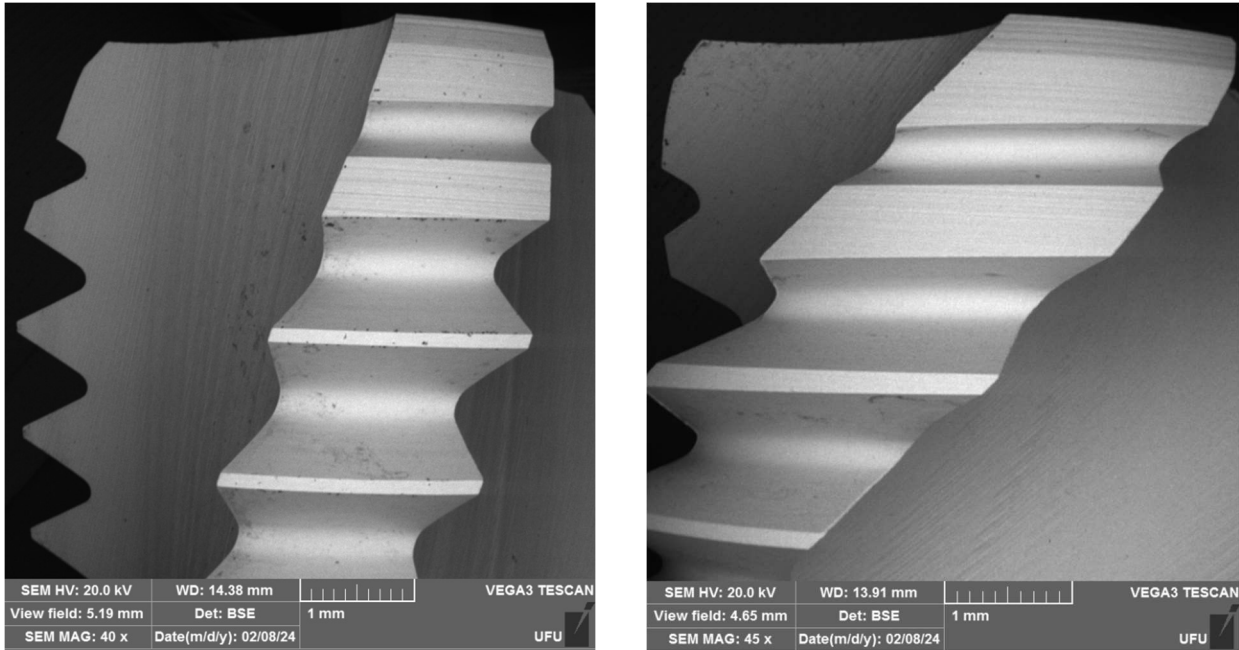


Figura 1. Análise de integridade de arestas de corte macho com ângulo de hélice 15° (esquerda); macho com ângulo de hélice 45° (direita);

Para o desenvolvimento dos testes, foi utilizado o dinamômetro de mesa KISTLER 9235B (estacionário), equipado com quatro células de carga que possuem cada cristal piezoelétrico. À medida que a força é aplicada, esse cristal se deforma e gera um sinal elétrico nas direções X, Y e Z, que a caixa de distribuição 5407 KISTLER distribui a um amplificador de sinal KISTLER MODELO 9441b (F_x e F_y), e envia a um amplificador KISTLER MODELO 5019 B130 o sinal correspondente a F_z . Os sinais elétricos amplificados são transformados em diferença de potencial. Posteriormente, os 3 sinais do amplificador passam por uma placa de aquisição NIUSB-6551 da National Instruments, chegando ao computador onde o sinal é capturado pelo software Signal Express LabView 7.6, utilizando uma taxa de 1 kHz. Os dados são processados e formatados com força em Newton (N) e momento torçor em Newton metro (N.m), como mostrado na Figura 1. Todos os testes terão suas repetições triplicadas para determinação da média e do desvio padrão, conforme ilustrado na Figura 2.

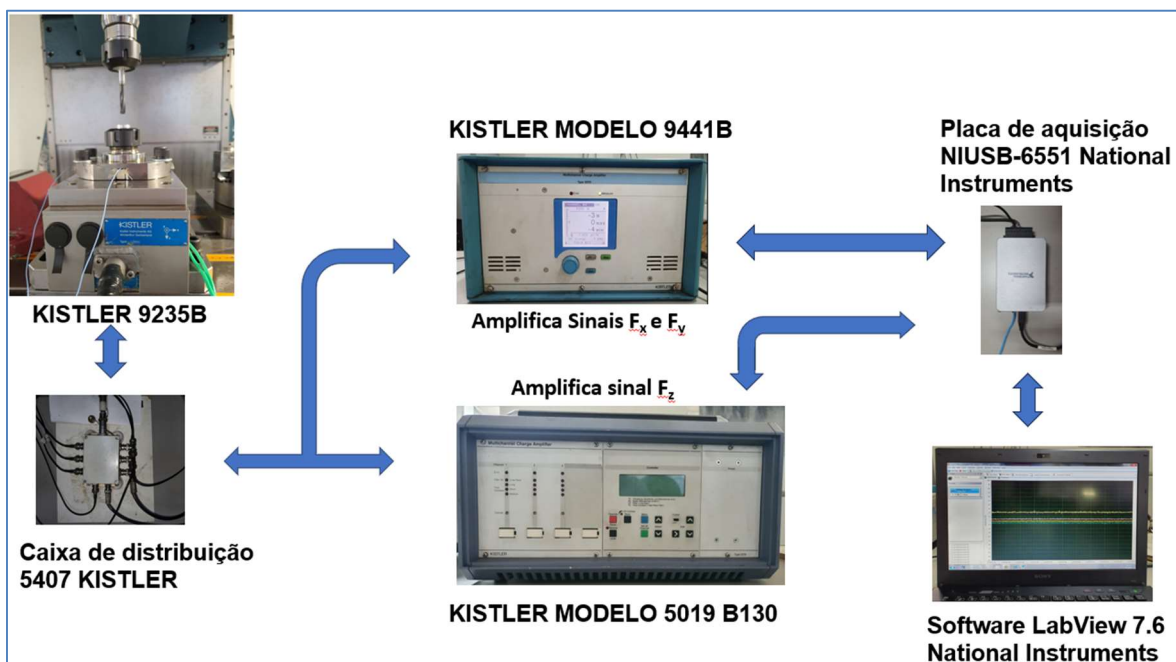


Figura 2. Medição de Torque e Força Axial F_z no avanço e no retorno durante o rosqueamento.

Para a primeira etapa do trabalho, foram consideradas 3 variáveis independentes ou de entrada. A velocidade de corte alta (60 m/min) e moderada (40 m/min); fluido de corte com alta pressão 15 Kgf/cm² e 35 Kgf/cm²; utilizando dois

madris de rosqueamento distintos, denominado Cabeçote D1 Softsynchro® Modular, fabricante EMUGE-FRANKEN, ângulo de hélice do macho, de 15° e 45°, ambos em revestimento. Para análise estatística, será utilizado um planejamento fatorial com 3 fatores e 2 níveis com ampla aplicação industrial. Essas condições permitem a avaliação em separado dos efeitos individuais e dos efeitos de interação dos fatores num experimento no qual todos os fatores variam simultaneamente num padrão de tentativas cuidadosamente organizado. A Tabela 1 mostra resumidamente as variáveis e níveis a serem utilizados na primeira etapa.

Tabela 1: Variáveis utilizadas na primeira etapa do planejamento estatístico

Variável	Valor	Valor codificado (Fatorial 2 ⁴)
Velocidade de Corte (Vc)	A1 = 40 m / min	-1
	A2 = 60 m / min	1
Angulo de Hélice	B1 = 15°	-1
	B2 = 45°	1
Pressão	C1 = pressão de 15 Kgf/cm ²	-1
	C2 = pressão de 40 Kgf/cm ²	1

Será investigada influência do ângulo de hélice, comparando com os torques e força axial obtidos durante o processo de fabricação das rosca internas. O controle de qualidade do processo será feito com calibrador passa ou não passa M8 x 1,25 mm H6, fabricante Mitutoyo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 mostra os resultados obtidos para força e torque. Observa-se que a força axial média tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte para os dois cabeçotes de compensação radial e axial. Já para os machos de rosca com ângulo de hélice de 45°, observa-se um efeito contrário: para maiores velocidades de corte, houve aumento da força axial, ao contrário do ângulo de hélice de 15°.

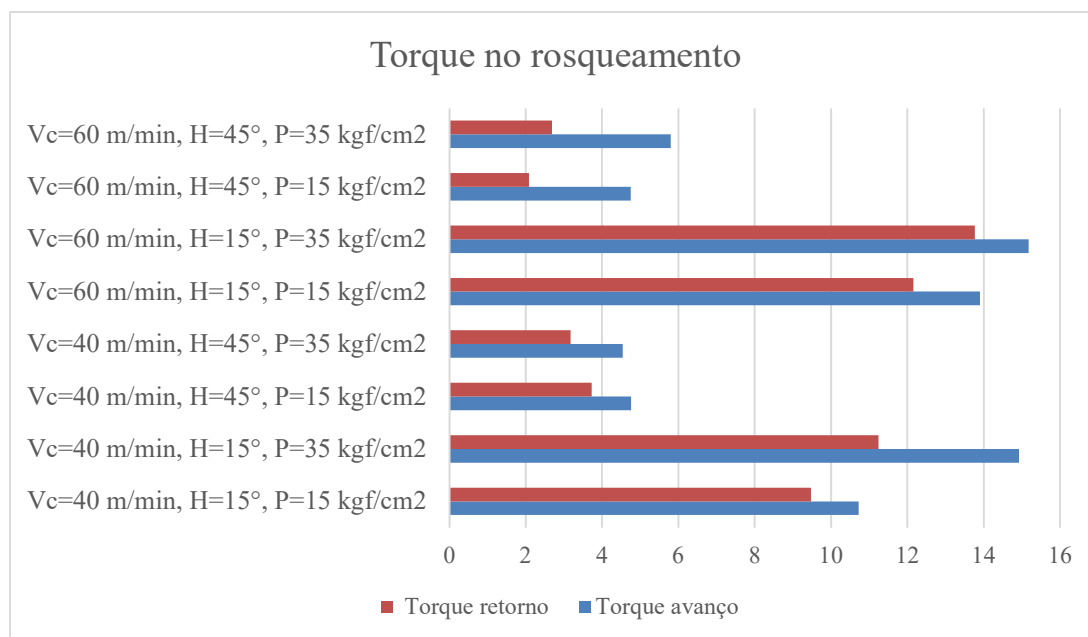


Figura 3. Comparação entre os resultados do torque de pico médio durante o avanço e o retorno de corte da ferramenta

Observa-se que, para as condições de corte utilizadas neste experimento, o cavaco é contínuo em forma de fita e não se cisalha ao longo do comprimento de corte de 20 mm. A pressão de aplicação do fluido de corte de 15 kgf/cm² não se mostrou eficiente para expulsar o cavaco da superfície de saída do macho de corte com ângulo de hélice de 45°, resultando no emaranhamento do cavaco na hélice da ferramenta de rosca. Dessa forma, foi necessário realizar, em alguns experimentos, a remoção manual do cavaco da superfície de saída da ferramenta para o prosseguimento dos testes definidos na corrida experimental.

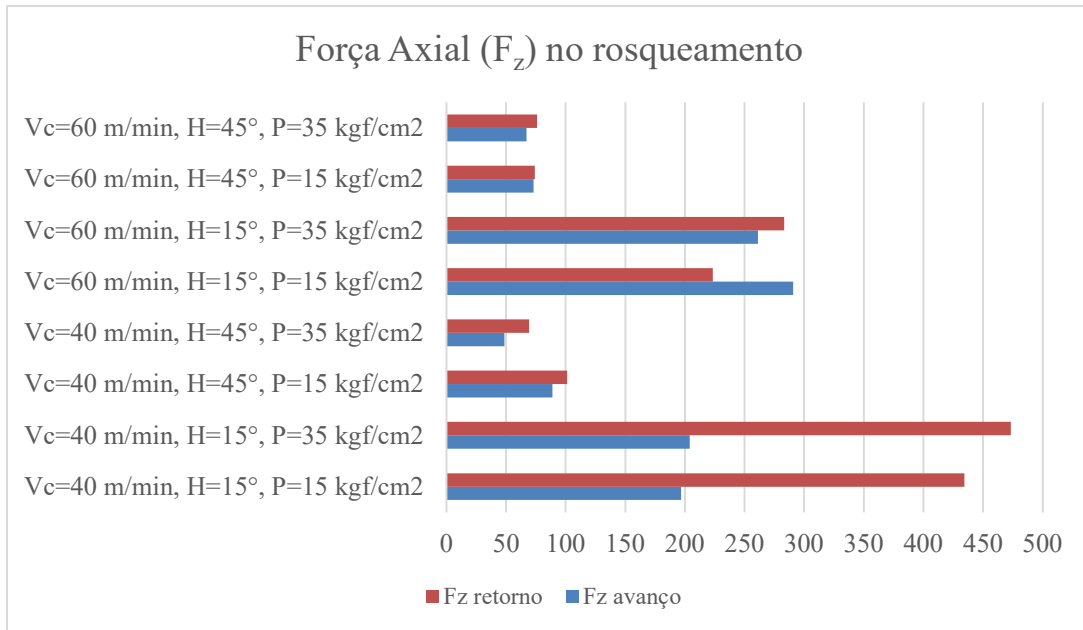


Figura 4. Comparação entre os resultados da força axial média durante o avanço e o retorno de corte da ferramenta

Utilizando o planejamento experimental e a análise estatística ANOVA, determinou-se a influência no valor de F padronizado através do gráfico de Pareto e a interação dos fatores de entrada para cada resultado de saída. A Tabela 4 apresenta a diferença estatística e o valor de F das comparações das variáveis de saída em função dos fatores de entrada (V_c , Pressão e Ângulo de Hélice). Para valores de p -value menores ou iguais ao índice de significância (p -value $\leq 0,05$), os fatores de entrada influenciaram nos parâmetros de resposta.

Tabela 2: Análise de Variância para torque no avanço

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	315,370	45,0529	58,51	0,000
Linear	3	10,979	3,6597	4,75	0,035
V_c	1	5,825	5,8252	7,57	0,025
Pressão	1	7,181	7,1807	9,33	0,016
Hélice	1	1,647	1,6467	2,14	0,182
Interações de 2 fatores	3	6,417	2,1392	2,78	0,110
V_c *Pressão	1	3,929	3,9285	5,10	0,054
V_c *Hélice	1	4,523	4,5231	5,87	0,042
Pressão*Hélice	1	6,177	6,1771	8,02	0,022
Interações de 3 fatores	1	4,252	4,2518	5,52	0,047
V_c *Pressão*Hélice	1	4,252	4,2518	5,52	0,047
Erro	8	6,160	0,7700		
Total	15	321,530			

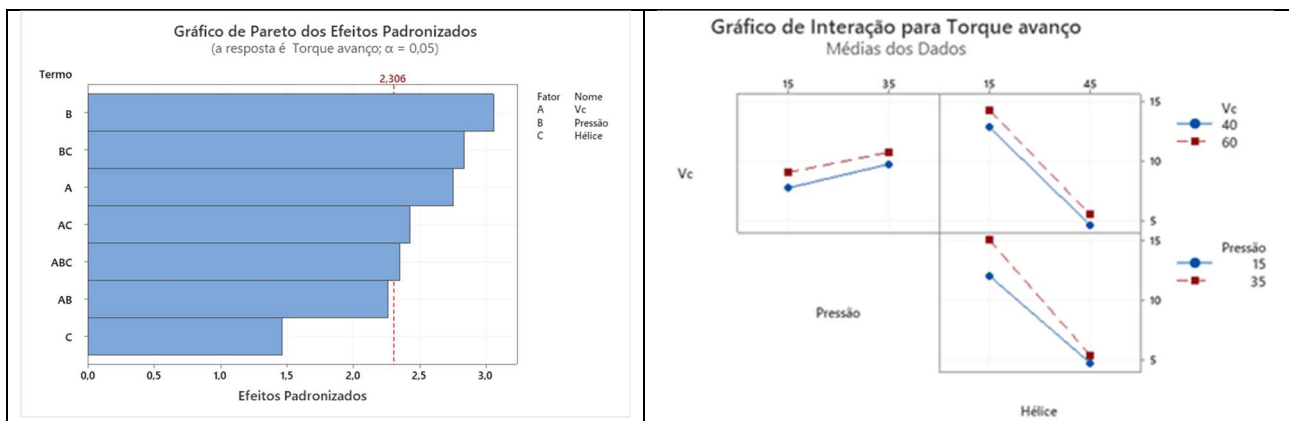


Figura 5. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para torque no avanço (esquerda), Gráfico de Interação para as médias para torque no avanço (direita).

A velocidade de corte, a pressão de aplicação e o ângulo de hélice, quando combinados, tiveram influência significativa no torque durante o avanço de corte no processo de rosqueamento interno. A pressão de aplicação de 35 kgf/cm² se destacou, apresentando os menores valores de torque no avanço de corte da ferramenta, conforme mostrado na Figura 5.

Tabela 3: Análise de Variância para torque no retorno

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	327,870	46,8385	392,68	0,000
Linear	3	8,486	2,8285	23,71	0,000
Vc	1	3,302	3,3024	27,69	0,001
Pressão	1	0,649	0,6490	5,44	0,048
Hélice	1	0,937	0,9374	7,86	0,023
Interações de 2 fatores	3	9,994	3,3312	27,93	0,000
Vc*Pressão	1	0,137	0,1370	1,15	0,315
Vc*Hélice	1	3,909	3,9093	32,77	0,000
Pressão*Hélice	1	0,952	0,9519	7,98	0,022
Interações de 3 fatores	1	0,439	0,4389	3,68	0,091
Vc*Pressão*Hélice	1	0,439	0,4389	3,68	0,091
Erro	8	0,954	0,1193		
Total	15	328,824			

A velocidade de corte combinada com o ângulo de hélice e a pressão de aplicação combinada com o ângulo de hélice tiveram influência significativa no torque durante a reversão do corte no processo de rosqueamento interno. O ângulo de hélice de 15° apresentou os maiores valores de torque durante o retorno do macho de roscar, Figura 6.

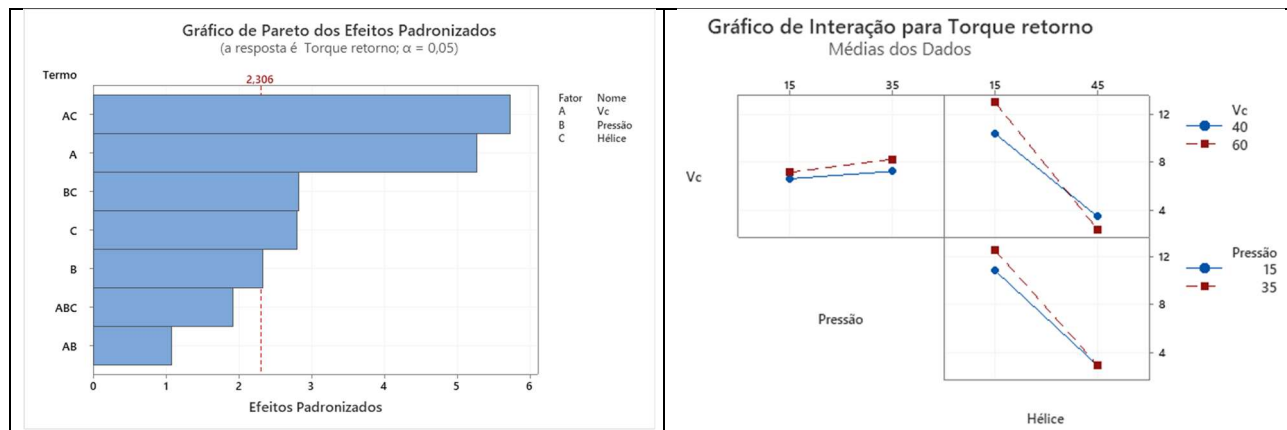


Figura 6. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para torque no retorno (esquerda), Gráfico de Interação para as médias para torque no retorno (direita).

Tabela 4: Análise de Variância para F_z

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	128208	18315	242,97	0,000
Linear	3	121258	40419	536,21	0,000
Vc	1	5942	5942	78,83	0,000
Pressão	1	1163	1163	15,43	0,004
Hélice	1	114153	114153	1514,35	0,000
Interações de 2 fatores	3	5677	1892	25,10	0,000
Vc*Pressão	1	1	1	0,02	0,905
Vc*Hélice	1	5532	5532	73,39	0,000
Pressão*Hélice	1	144	144	1,91	0,205
Interações de 3 fatores	1	1272	1272	16,88	0,003
Vc*Pressão*Hélice	1	1272	1272	16,88	0,003
Erro	8	603	75		
Total	15	128811			

A Figura 7 apresenta que os fatores de entrada que tiveram influência significativa na força axial F_z durante o avanço de corte, foram velocidade de corte, a pressão de aplicação e o ângulo de hélice combinados no processo de rosqueamento interno. O ângulo de hélice de 15° se destacou apresentando os maiores valores de F_z no avanço de corte da ferramenta.

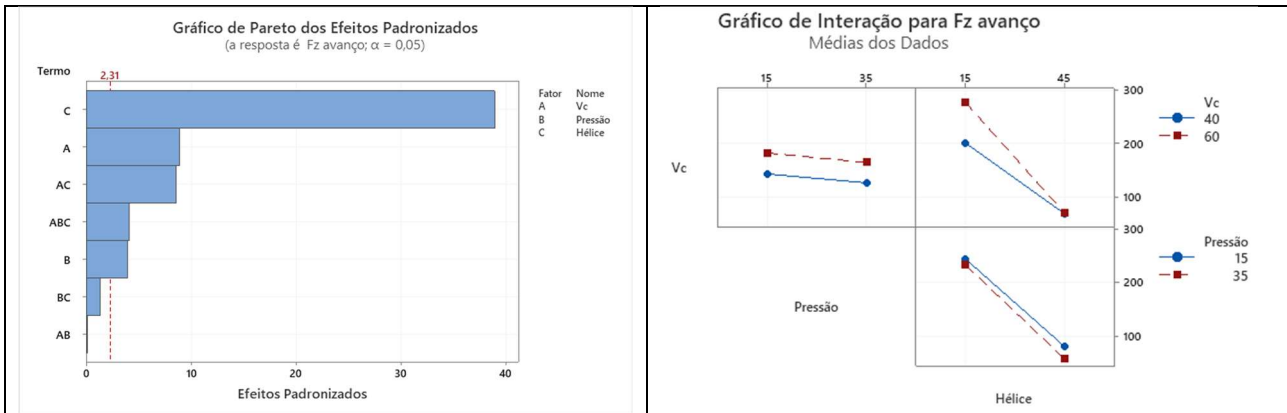


Figura 7. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para F_z (direita), Gráfico de Interação para as médias para r_q (esquerda).

Tabela 5: Análise de Variância para $F_{z\text{retorno}}$

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	389739	55677	155,51	0,000
Linear	3	359197	119732	334,42	0,000
Vc	1	35377	35377	98,81	0,000
Pressão	1	45	45	0,13	0,732
Hélice	1	323775	323775	904,31	0,000
Interações de 2 fatores	3	29416	9805	27,39	0,000
Vc*Pressão	1	0	0	0,00	0,989
Vc*Hélice	1	28065	28065	78,39	0,000
Pressão*Hélice	1	1350	1350	3,77	0,088
Interações de 3 fatores	1	1126	1126	3,14	0,114
Vc*Pressão*Hélice	1	1126	1126	3,14	0,114
Erro	8	2864	358		
Total	15	392603			

A velocidade de corte combinada com o ângulo de hélice teve influência significativa na força axial durante o retorno ($F_{z\text{retorno}}$) do corte no processo de rosqueamento interno. O ângulo de hélice de 15° apresentou os maiores valores de $F_{z\text{retorno}}$ durante a reversão do macho de rosquear, conforme mostrado na Figura 8.

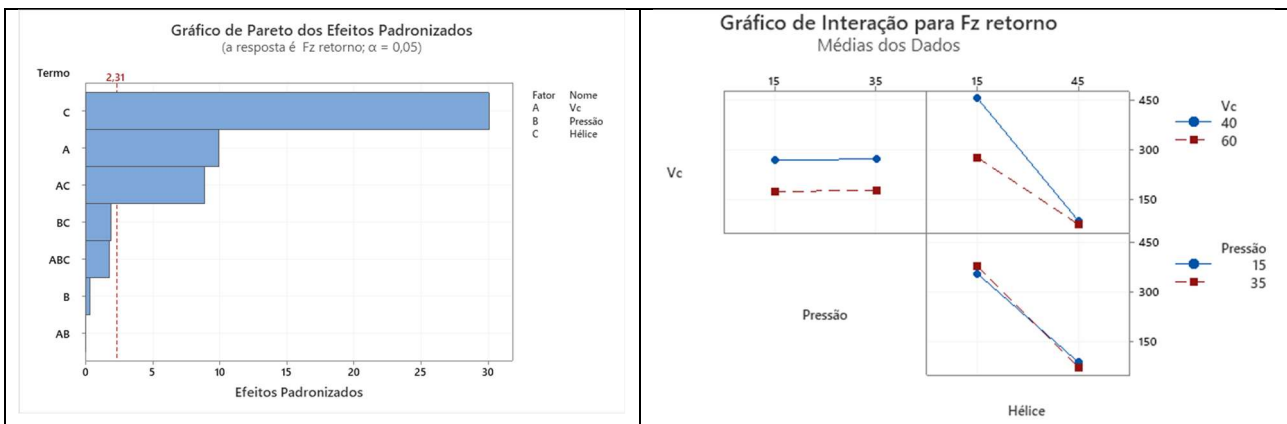


Figura 8. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para $F_{z\text{retorno}}$ (direita), Gráfico de Interação para as médias para $F_{z\text{retorno}}$ (esquerda).

Ao término dos experimentos, constatou-se que as forças de corte envolvidas no processo de rosqueamento interno estão diretamente relacionadas com a capacidade do macho de corte de cisalhar o cavaco e com a capacidade de remoção deste cavaco pelo fluido de corte aplicado sob alta pressão. Desta forma, evidencia-se que, para o alumínio AA6063-T6, a melhor ferramenta de roscar interno possui ângulo de hélice de 45°, com fluido de corte aplicado a 35 kgf/cm². Essa configuração destacou-se com torques no avanço de corte entre 4,0 e 5,0 Nm, com F_z em torno de 50 e 75 N. Os torques durante a reversão ficaram entre 2,0 e 3,3 Nm, com $F_{z\text{retorno}}$ em torno de 61 e 77 N, caracterizando-se como os menores valores de torque e força axial encontrados nos experimentos realizados.

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos nos testes experimentais de rosqueamento à alta pressão, com macho de corte M8 x 1,25 mm, sem revestimento, na liga de alumínio AA6063-T6, têm-se as seguintes conclusões:

1. O comportamento da força axial no avanço e no retorno é influenciado pelo ângulo de hélice. Os valores de $F_{z\text{retorno}}$ são sempre maiores que os valores de F_z , caracterizados por um erro de sincronismo da máquina causado pela tenacidade do material investigado e pela dificuldade de cisalhamento e remoção do cavaco do furo roscado.
2. A pressão de aplicação do fluido de corte de 15 kgf/cm² não se mostrou eficiente para expulsar o cavaco da superfície de saída do macho de corte com hélice a 45°, ficando emaranhado na hélice da ferramenta em alguns testes.
3. A velocidade de corte, a pressão de aplicação e o ângulo de hélice combinados tiveram influência significativa no torque durante o avanço, apresentando valores maiores para o ângulo de hélice de 15° nas duas pressões investigadas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos Laboratórios Multiusuários da Universidade Federal de Uberlândia (RELAM-UFU) pelo fornecimento dos equipamentos e suporte técnico para experimentos envolvendo microscopia eletrônica (bolsa FAPEMIG APQ-02391-22). Ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFU, à empresa Oerlikon Balzers Revestimentos Metálicos Ltda, à empresa Emuge Franken Ferramentas de Precisão LTDA.

6. REFERÊNCIAS

- Carvalho A.O., Brandão L.C., Panzera T.H., Lauro C.H. “Analysis of Form Threads Using Fluteless Taps in Cast Magnesium Alloy (AM60)”. *J Mater Process Technol* 212:1753–1760
- Fernandes G, Lopes G, Barbosa L, Martins P, Machado A. “Wear Mechanisms of Diamond-Like Carbon Coated Tools in Tapping of AA6351 t6 aluminium alloy”. *Procedia Manufacturing*. 53. 293-298. 10.1016/j.promfg.2021.06.032.
- Gonçalves, R.A., “Investigação da Usinabilidade das Ligas de Alumínio da Série 6XXX”. 2012. 107p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Pereira, I. C. “Comparação entre os Processos de Rosqueamento Interno por Usinagem e Laminação”. 2014. 121p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Ribeiro Filho S.L.M., Oliveira J.A., Arruda E.M., Brandão L.C. “Analysis of Burr Formation in Formtapping in 7075 aluminum alloy. *J Mater Process Technol* 212(4):766–775
- Siqueira B.S., Freitas S.A., Pereira R.B.D., Brandão L.C., 2019, “Influence of chip breaker and helix angle on cutting efforts in the internal threading process”. *Int J Adv Manuf Technol* 102:1537– 1546.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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