

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO USO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE NA
FORÇA E NA RUGOSIDADE GERADOS PELO FRESAMENTO FRONTAL DA LIGA DE
ALUMÍNIO AISI 7075-T6.

por

Luis Eduardo Baccharin Matje

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2019

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO USO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE NA
FORÇA E NA RUGOSIDADE GERADOS PELO FRESAMENTO FRONTAL DA LIGA DE
ALUMÍNIO AISI 7075-T6

por

Luis Eduardo Baccarin Matje

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Heraldo José de Amorim, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. André João de Souza, Dr. Eng.

Comissão de Avaliação:

Prof. Heraldo José de Amorim

Prof. André João de Souza

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 05 de julho de 2019

*Aos meus amados e eternos avós
Hercolino e Libera Baccharin*

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e saúde.

Ao professor orientador Heraldo José de Amorim, pelos ensinamentos, amizade e ajuda na realização deste trabalho e nas disciplinas ministradas.

Ao professor coorientador André João de Souza, pelos ensinamentos e sugestões que foram fundamentais para realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Automação e Usinagem (LAUS) pelo fornecimento da infraestrutura, ao técnico Guilherme Vargas Schirmer pelos conselhos e auxílio prestado durante a realização dos experimentos, e ao colega Wilson Urasato pela ajuda prestada na realização dos experimentos.

À empresa Quimatic/Tapmatic, pelo Aspensor Quimatic IV e pelo fluido Quimatic Jet utilizado nos experimentos com MQL.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), professores, técnicos e servidores, por proporcionar um ensino sólido e de qualidade ao longo do curso.

Aos meus pais, Ilida e José, meus irmãos, tios e tias, pela motivação e incentivo ao longo do curso, e por não medirem esforços em proporcionar condições para uma busca constante pelo conhecimento.

À minha namorada Lethicia, por todo amor, carinho, amizade, apoio e incentivos ao longo de toda esta jornada.

Matje, L.E.B. **Análise da influência do uso de mínima quantidade de lubrificante na força e na rugosidade gerados pelo fresamento frontal da liga de alumínio AISI 7075-T6.** 2019. 24 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

Os processos de usinagem são amplamente utilizados para obtenção de peças complexas e como etapa final de acabamento. Neste processo se destaca o fresamento, capaz de produzir as mais variadas formas com alta taxa de remoção de material. Buscando aumento de produtividade, diminuição de forças e melhoria no acabamento das superfícies usinadas, fluidos de corte são muito utilizados, apesar de apresentarem riscos ambientais e à saúde do operador. Uma opção que vem sendo amplamente utilizada é a de mínima quantidade de lubrificante (MQL). Este trabalho estuda a aplicação desta técnica no fresamento frontal de uma liga de alumínio AISI 7075-T6. Como variáveis de entrada do processo utilizaram-se três níveis de velocidade de corte, de profundidade de corte e de avanço. As variáveis de saída analisadas foram força de usinagem e rugosidade superficial. Os resultados obtidos mostraram uma pequena contribuição do uso de MQL na diminuição da força de usinagem. Entretanto, não se observou redução na rugosidade quando comparada ao corte a seco: pelo contrário, o experimento realizado apresentou piora significativa do acabamento na usinagem com MQL. Assim, testes adicionais foram feitos em que se constatou que o MQL não apresenta, nas condições avaliadas, influência significativa sobre a rugosidade. Além disso, foi observada a possibilidade de as ferramentas de corte, embora de mesma especificação e fabricante, terem pequenas variações geométricas. Essas variações, possivelmente oriundas das tolerâncias de fabricação, podem ser responsáveis pelas diferenças observadas.

PALAVRAS-CHAVE: Fresamento, rugosidade, força de usinagem, mínima quantidade de lubrificante.

Matje, L.E.B. **Analysis of the influence of the minimum quantity lubricant on machining force and surface roughness in the end milling of AISI 7075-T6 aluminum alloy**. 2019. 24 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

Machining processes are widely used to obtain complex parts and as to provide the desired surface finish. In this process stands out the milling, capable of producing the most varied forms with a high material removed rate. Cutting fluids are used in machining processes, seeking to increase productivity with smaller forces and improved quality of the machined surfaces. One option that has been widely used is the minimum quantity lubricant (MQL). This work presents the application of this technique in the end milling of an AISI 7075-T6 aluminum alloy. The input variables, evaluated in three levels, are cutting speed, depth of cut, and feed rate. The response variables analyzed were machining force and surface roughness. The results obtained showed a small influence of MQL in the reduction of the machining force. However, no improvement was observed in the surface finish of the machined parts: actually, MQL tests presented a significant increase of the surface roughness when compared with dry cutting. Additional tests were performed, and MQL did not present a significant effect on surface roughness. Furthermore, it was observed an influence of the cutting tool used, suggesting that, despite the cutting tools used being of the same manufacturer and model, some slight geometrical variations occurred. These variations, probably acceptable considering the manufacturing tolerances, may be responsible for the discrepancies observed.

KEYWORDS: Milling, surface roughness, machining force, minimum quantity lubricant.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	1
2.1	Alumínio 7075-T6.....	1
2.2	Fresamento frontal e forças de usinagem	2
2.3	Rugosidade e acabamento superficial	3
2.4	Usinagem a seco e com mínima quantidade de lubrificante.....	4
3	MATERIAIS E MÉTODOS	5
3.1	Planejamento experimental.....	6
3.2	Análise experimental.....	7
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	7
4.1	Força de usinagem	8
4.2	Rugosidade.....	10
4.3	Testes adicionais	11
5	CONCLUSÕES.....	12
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13
	APÊNDICES	15
	I – Parâmetros encontrada na literatura para a usinagem da liga de alumínio 7075-T6	15
	II – Resultados das análises de variância realizadas para a F_u e R_a os cortes a seco e com MQL.....	16

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais empregados no mundo e está presente em praticamente todas as peças e componentes fabricados para as mais diversas finalidades. Esses componentes, muitas vezes, exigem alta precisão e elevado acabamento, requerendo controle dos parâmetros de processo e o entendimento de seus efeitos sobre as variáveis de resposta para esses que requisitos sejam atendidos.

Entre os diversos processos de usinagem destaca-se a operação de fresamento, que utiliza ferramentas multicortantes, chamadas fresas, proporcionando altas taxas de remoção de material e capacidade de gerar superfícies complexas. O fresamento pode ser classificado como tangencial ou frontal, diferindo entre eles o posicionamento dos dentes e do eixo da ferramenta em relação à peça. No fresamento frontal, a ferramenta tem seu eixo perpendicular em relação à peça usinada e os dentes estão na parte frontal da ferramenta, de modo que a superfície gerada possa ser menor ou igual ao seu diâmetro. Elevadas forças de cisalhamento podem ocorrer nas operações de usinagem, tanto no material usinado quanto na ferramenta. Devido a essas forças elevadas, tanto a ferramenta quanto a peça podem ser submetidas a elevadas temperaturas, que podem afetar de forma negativa a vida da ferramenta e as características do material usinado [Diniz et al., 2013].

A alternativa para reduzir os esforços e altas temperaturas geradas na usinagem é pelo uso de fluidos de corte. Comumente aplicados em grandes quantidades, um dos objetivos destes insumos é a lubrificação da região de corte, proporcionando a diminuição do atrito nas interfaces ferramenta-peça e ferramenta-cavaco [Diniz et al., 2013]. Uma técnica que vem sendo muito utilizada e que se mostra mais sustentável em relação à aplicação de grandes quantidades de fluido de corte, é a mínima quantidade de lubrificante (MQL). Esta técnica consiste em pulverizar, geralmente junto com ar comprimido, pequenas quantidades de óleo lubrificante na direção da interface ferramenta-peça. Além de ser mais sustentável, a técnica de aplicação de MQL também oferece redução de custos com a aquisição e descarte de fluidos de corte [Ekinovic et al., 2015; Machado et al., 2015].

A utilização de alumínio e suas ligas nas indústrias aeronáutica e automotiva vêm crescendo devido às características deste material. Com baixa densidade, e elevada resistência mecânica, o alumínio é utilizado na fabricação de uma alta gama de componentes para estas indústrias [Weingaertner e Schroeter, 1990]. Dentre as ligas, destaca-se a liga AISI 7075-T6, que possui elevada resistência mecânica.

O objetivo deste estudo é avaliar a influência da aplicação da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no fresamento frontal da liga de alumínio AISI 7075-T6. Para tanto, foram avaliadas as influências da velocidade de corte (v_c), da profundidade de corte axial (a_p) e do avanço por dente (f_z) sobre a força de usinagem e a rugosidade da superfície usinada para a condição de corte a seco e com o uso de MQL.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Alumínio 7075-T6

O alumínio é um metal não ferroso altamente utilizado em diversos ramos da indústria, em especial por aliar boa resistência mecânica com baixa densidade. Suas principais características incluem resistência à corrosão, boa relação resistência/peso, boa soldabilidade, e boa usinabilidade [Shigley e Mishke, 2005].

Classificado em séries que vão de 1xxx até 7xxx, o alumínio é versátil em sua utilização, sendo utilizado desde indústrias químicas e elétricas, passando pela construção civil, até a indústria aeronáutica. Dentre as ligas aeronáuticas destaca-se a série 7XXX, da qual faz parte a liga AISI 7075-T6, de elevada resistência mecânica e excelente usinabilidade. As ligas da série 7XXX são também conhecidas como ligas de alumínio-zinco, por terem esses elementos em sua composição. O teor de zinco pode chegar a 8% na composição da liga. Outro elemento adicionado é o magnésio, que proporciona a possibilidade de estas ligas serem termicamente tratáveis, como é o caso da liga AISI 7075-T6. Esta liga é amplamente utilizada na fabricação

de componentes para a indústria aeronáutica e automotiva, pois possui baixo peso e elevada resistência mecânica, sendo dentre as ligas da serie 7XXX a que possui a maior resistência mecânica, em torno de 576 MPa [Oliveira, 2015; Weingaertner e Schroeter, 1990].

A usinagem de alumínio pode ser realizada a grandes velocidades de corte, resultando em baixas forças de corte, baixíssimo desgaste da ferramenta, e acabamento excelente. Para isso deve-se selecionar adequadamente a ferramenta de corte, buscando ferramentas com o menor número de dentes, o que facilita a saída de cavacos, e com arestas de corte de bom acabamento e sem rebarbas [Weingaertner e Schroeter, 1990].

Suarez et al., 2007, e Suarez, 2008, utilizaram velocidades de corte que variam de 100 a 400 m/min, e profundidades de corte axial de até 6 mm na usinagem do alumínio AISI 7075-T6, além de usinar a seco, com uso de MQL e jorro dentro destes parâmetros. Para este mesmo material, Kannam, 2014, fixou a profundidade de corte axial em 0,5 mm e variou a velocidade de corte entre 60 e 180 m/min. Tosun, 2010, utilizou baixíssimas velocidades de corte, em torno de 8 m/min, na usinagem deste mesmo material. A Tabela A1 no APÊNDICE I traz todos os parâmetros usados por estes autores em seus trabalhos.

2.2 Fresamento frontal e forças de usinagem

A operação de fresamento tem por objetivo a obtenção de uma superfície através de uma ferramenta multicortante denominada fresa. A combinação da geometria da ferramenta e do movimento de avanço pode gerar superfícies complexas. O fresamento pode ser classificado como frontal ou tangencial [Diniz et al., 2013].

O fresamento frontal é caracterizado pelos dentes da fresa estarem na parte frontal da ferramenta, e a superfície usinada estar perpendicular ao eixo da fresa. O movimento relativo entre a peça usinada e a ferramenta descreve a operação, onde o corte ocorre devido a uma combinação da rotação da ferramenta e o movimento de avanço. O fresamento de rasgo ou de canal é onde a fresa tem sua penetração de trabalho a_e igual ao seu diâmetro, gerando uma superfície plana na peça usinada [Suarez, 2008]. A Figura 2.1 ilustra o fresamento frontal.

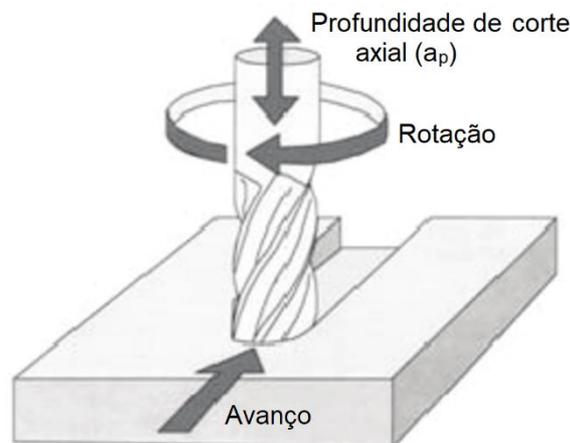


Figura 2.1 – Fresamento frontal [adaptado de Hayajneh et al., 2007]

A força de usinagem no fresamento frontal pode ser decomposta em três componentes ortogonais. As componentes da força nas direções radial (F_r), tangencial (F_t) e axial (F_a) são calculadas considerando-se a área da seção transversal de corte e as pressões específicas K_r , K_t e K_a para cada direção. A área da seção transversal de corte é calculada através dos parâmetros profundidade de corte axial a_p , avanço por dente f_z e o ângulo de contato (φ) entre o dente da ferramenta e a peça. O ângulo de contato do dente com a peça varia ao longo da rotação da ferramenta em relação à direção do avanço, fazendo com que o corte comece como discordante ($0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$) e termine como concordante ($90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$). [Machado et al., 2015; Lima et al., 2012]. A Figura 2.2 ilustra as componentes da força de usinagem, a variação do ângulo de contato (φ), e as Equações (2.1), (2.2) e (2.3) apresentam as relações para as forças radial (F_r), tangencial (F_t) e axial (F_a).

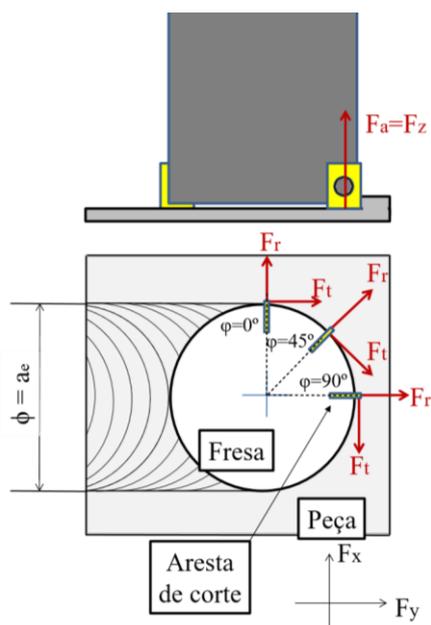


Figura 2.2 – Componentes da força de usinagem no fresamento frontal [Sória, 2016]

$$F_r = K_r \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (2.1)$$

$$F_t = K_t \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (2.2)$$

$$F_a = K_a \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (2.3)$$

A combinação destas três equações resulta na força de usinagem F_u , conforme Equação (2.4).

$$F_u = \sqrt{F_t^2 + F_r^2 + F_a^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2.4)$$

Onde F_x , F_y e F_z são as componentes das forças de usinagem nas direções ortogonais.

2.3 Rugosidade e acabamento superficial

O processo de fresamento, assim como todo processo de usinagem, apresenta irregularidades superficiais devido ao cisalhamento durante a retirada de material da peça. Além disso, outros fatores como geração de calor, deformações plásticas e vibrações podem influenciar na condição final da superfície usinada.

Pequenas irregularidades e erros microgeométricos compõem a rugosidade da superfície usinada. A rugosidade é comumente usada como controle da qualidade da usinagem e mesmo como indicador de vida de ferramenta, uma vez que afeta características importantes como precisão e tolerâncias máximas na peça usinada, lubrificação entre componentes usinados e resistência à fadiga quando o componente usinado é submetido a cargas dinâmicas [Amorim, 2002]. Além disso, ondulações e falhas devem ser evitadas, pois são associadas a erros de fabricação [Machado et al., 2015].

A rugosidade pode ser avaliada através de diversos parâmetros. No entanto, o parâmetro mais utilizado é o da rugosidade média (Fig. 2.3), que corresponde à média das distâncias entre os picos e vales da superfície e a linha de centro. Por representar um valor médio a rugosidade R_a é considerada um parâmetro estável, menos suscetível a efeitos ocasionais [Machado et al., 2015; Santos e Sales, 2007].

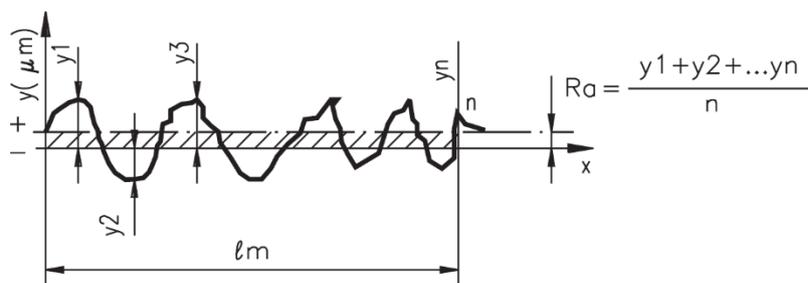


Figura 2.3 – Rugosidade média R_a [Carter, 2015]

A rugosidade pode ser afetada por diversos fatores presentes no processo de usinagem, como geometria da ferramenta, rigidez do sistema máquina-ferramenta, aplicação de fluidos de corte e parâmetros de processo [tais como profundidade axial de corte (a_p), avanço por dente (f_z) e velocidade de corte (v_c)]. Um aumento de a_p pode induzir vibrações na ferramenta e conseqüentemente piorar a qualidade superficial. O raio de ponta da ferramenta (r_ϵ) também tem influência sobre a rugosidade, inclusive sendo uma das variáveis presentes no cálculo da rugosidade teórica. A Equação (3.5) é utilizada para o cálculo teórico da rugosidade para a operação de fresamento frontal.

$$R_a = \frac{r_\epsilon}{2} - \sqrt{2 \cdot \left(\frac{r_\epsilon}{4}\right)^2 - \left(\frac{f_z}{4}\right)^2} \quad (2.5)$$

2.4 Usinagem a seco e com mínima quantidade de lubrificante

Nas operações de usinagem ocorrem elevadas forças de cisalhamento, tanto no material usinado quanto nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, o que resulta em forças elevadas e, por conseqüência, altas temperaturas. Temperaturas elevadas podem afetar de forma negativa a vida da ferramenta e as propriedades mecânicas do material usinado, além de comprometer a qualidade da superfície usinada, enquanto esforços elevados podem causar danos à ferramenta e à peça, e acarretam maior consumo energético. Uma abordagem bastante utilizada para reduzir esforços e temperaturas em usinagem é o uso de fluido de corte. Esses insumos buscam reduzir a temperatura, promover a lubrificação da região de corte e auxiliar na quebra/expulsão do cavaco e, quando selecionados e aplicados corretamente, podem aliar a redução de forças e temperaturas com o aumento da vida da ferramenta. A ação lubrificante do fluido depende de sua capacidade de agir na interface ferramenta-peça. Sob baixas velocidades, onde as temperaturas são menores, essa interação proporciona uma redução do atrito, e conseqüentemente pode haver diminuição das forças. Já a ação refrigerante é mais significativa na usinagem sob altas velocidades de corte, pois o uso de fluido de corte favorece a transferência de calor da região de corte, diminuindo a temperatura da ferramenta [Diniz et al., 2013].

Apesar dos benefícios do uso de fluidos de corte, esses elementos podem ser danosos ao organismo humano e ao meio ambiente, podendo causar danos ambientais e à saúde do operador. Além disso, a utilização abundante desses insumos acarreta em custos elevados para as empresas, podendo superar o custo com ferramentas empregadas na usinagem [Dhar et al., 2006]. Segundo Shokrani et al., 2012, comumente estes fluidos necessitam de um processamento para serem descartados corretamente, o que pode representar um custo de descarte até quatro vezes maior se comparado ao custo de sua aquisição.

Novas técnicas têm sido desenvolvidas visando diminuir ou até mesmo eliminar a utilização de fluidos de corte. Em termos de eficiência e sustentabilidade destacam-se o corte a seco e as técnicas de mínima quantidade de lubrificante (MQL). A usinagem a seco traz as vantagens de reduzir custos com descarte de fluido de corte, reduzir a poluição e atenuar os

risco à saúde do operador, se tornando a melhor opção do ponto de vista ambiental. Por outro lado, a ausência de fluido de corte pode ocasionar altas temperaturas, com efeitos deletérios na qualidade dos componentes produzidos e na vida da ferramenta. Devido à alta condutividade térmica de alguns materiais, pode ocorrer expansão térmica, com consequentes deformações e erros dimensionais na peça [Sreejith e Ngoi, 1999].

MQL é uma técnica onde pequenas vazões de lubrificante, entre 50 e 500 ml/h, são pulverizadas, geralmente com auxílio de ar comprimido, formando uma névoa que é direcionada para as interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça. Essas pequenas vazões de fluido de corte são de 10 a 100 vezes menores em relação à aplicação convencional [Ekinovic et. al, 2015; Tosun e Huseyinoglu, 2010].

O MQL tem sido empregado constantemente na usinagem de alumínio e suas ligas, uma vez que esse material exige uma lubrificação eficiente devido à maior tendência de ocorrer adesão de material à ferramenta e sua dureza mais baixa, quando comparados aos aços. As técnicas de MQL permitem uma lubrificação eficiente devido ao fato de as gotículas de fluido penetrarem com maior facilidade nas interfaces (cavaco-ferramenta e ferramenta-peça) em comparação à aplicação em abundância [Itoigawa et al., 2005; Wakabayashi, et al., 2007].

Tosun e Huseyinoglu, 2010, avaliaram que para valores maiores de rotação da ferramenta, o uso de MQL proporcionou uma menor rugosidade quando comparado à aplicação convencional de fluido de corte. Em geral, o uso de MQL proporciona uma qualidade superficial superior em relação ao corte a seco.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos testes, utilizaram-se corpos de prova (CP) de 150x70x12 mm, com furos para fixação no dinamômetro piezelétrico utilizado na aquisição dos dados de força.

Considerando o diâmetro da fresa utilizada nos ensaios, foi possível a determinação da quantidade e da posição das amostras a serem fresadas visando bom aproveitamento de material. O comprimento das amostras (passes) foi de 32 mm e a distância entre dois passes adjacentes foi de 4 mm. Este comprimento foi determinado de modo que a medição de rugosidade pudesse ser realizada em três pontos diferentes do canal, excluindo-se da zona de medição as zonas de entrada (meio diâmetro da ferramenta) e saída da ferramenta (diâmetro da ferramenta). As Figuras 3.1a e 3.1b mostram os corpos de prova antes e após os passes.

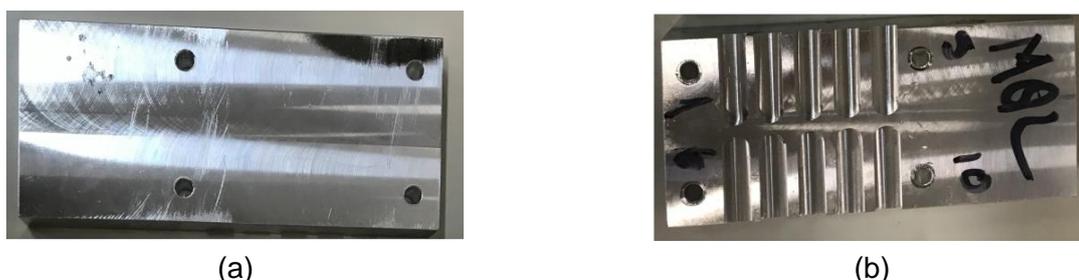


Figura 3.1 – (a) CP antes do fresamento; (b) CP após o fresamento.

Para a realização do fresamento foram utilizadas as instalações do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS). A máquina-ferramenta utilizada foi o centro de usinagem ROMI modelo Discovery 308, que possui como características uma rotação máxima disponível de 4000 rpm e potência máxima de 7,5 CV (5,5 kW).

As ferramentas de corte utilizadas foram duas fresas de topo reto de metal duro com duas arestas de corte marca YG, modelo G9424100, com diâmetro nominal de 10 mm. As fresas possuem haste curta, de modo que a distância entre a ponta da fresa e a fixação (balanço) utilizado foi de 35 mm. Verificou-se o erro de batimento radial das ferramentas na ponta de cada fresa, através de um relógio comparador, com valores inferiores a 0,01 mm para ambas as ferramentas. A Figura 3.2 ilustra o modelo de fresa de topo reto utilizado nos experimentos e suas especificações. Cada ferramenta foi utilizada para uma condição

lubrificante diferente: ferramenta A para corte a seco e ferramenta B para o corte com MQL.

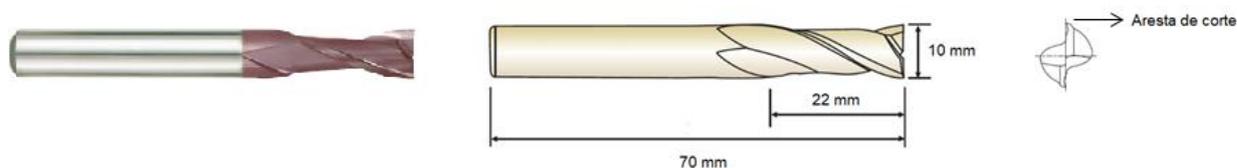


Figura 3.2 – Fresa de topo reto utilizada nos experimentos

Para o fresamento com MQL foi utilizado o fluido Quimatic Jet à base de água. A vazão utilizada foi de 360 ml/h, com uma pressão de 3 bar. A aplicação do fluido foi realizada através de um aspersor Quimatic IV, posicionado a 45° e a 15 mm de distância da ponta da fresa, com o fluxo do fluido de corte no sentido contrário ao movimento da fresa. É importante frisar que o jato está direcionado para a ponta da ferramenta. Portanto, conforme aumenta-se a_p , o jato acaba acertando primeiramente na peça, pois há um degrau entre a superfície do corpo de prova e a ponta da ferramenta. A Figura 3.3a apresenta o sistema MQL montado.

Para aquisição das forças de usinagem durante o fresamento, foi utilizado um dinamômetro piezelétrico KISTLER modelo 9129AA, no qual o corpo de prova foi fixado. Os sinais medidos pelo dinamômetro são enviados para o amplificador de cargas KISTLER modelo 5070A. Este condicionador envia os sinais analógicos obtidos, para as três componentes ortogonais de força medidas pelo dinamômetro, para um computador dedicado, onde está instalada a placa de aquisição PCIM-DAS 1602/16 da *Measurement Computing*. Durante a medição das forças utilizou-se uma taxa de aquisição de 5 kHz. Através do software LabVIEW™ 9.0, os sinais de força das três componentes são processados utilizando uma VI (*Virtual Instrument*) desenvolvida pelo LAUS para a visualização das forças. A Figura 3.3b ilustra o sistema para aquisição dos sinais de força.

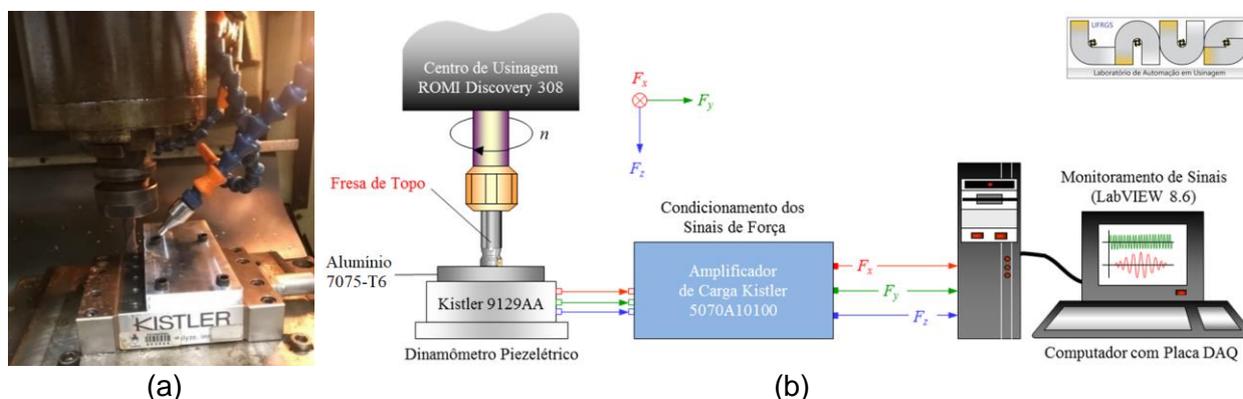


Figura 3.3 – (a) Montagem do sistema MQL; (b) Sistema para aquisição de forças [adaptado de Sória, 2016]

Após a obtenção de todas as amostras, tanto na usinagem a seco quanto com MQL, foi realizada a medição da rugosidade média dos corpos de prova com um rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201P, com resolução de 0,01 μm . Foram utilizados os comprimentos de amostragem $l_r=0,8$ mm e comprimento de avaliação $l_r=4$ mm, indicados pela norma NBR ISO 4288, 1996, para valores de rugosidade R_a de 0.1 até 2 μm .

3.1 Planejamento experimental

Os parâmetros utilizados nos experimentos foram definidos dentro de uma faixa de valores encontrados na literatura. Variou-se a velocidade de corte v_c [m/min], profundidade de corte axial a_p [mm] e avanço por dente f_z [mm/z], com três níveis distintos para cada parâmetro. Para a montagem do experimento utilizou-se o modelo Box-Behnken Design (BBD). Este

projeto de experimento apresenta a variação dos parâmetros em três níveis incompletos. O nível intermediário é replicado para a avaliação da repetitividade do experimento [Montgomery, 2013], correspondendo, neste estudo, à usinagem de três amostras. A Tabela 3.1 apresenta os valores utilizados para cada parâmetro.

Tabela 3.1 – Valores utilizados em cada um dos parâmetros

Parâmetros	Níveis		
	Baixo	Intermediário	Alto
	-1	0	1
Velocidade de corte v_c [m/min]	60	90	120
Profundidade de corte axial a_p [mm]	1	2	3
Avanço por dente f_z [mm/z]	0,050	0,075	0,100

Através do *software Statistica®* foi gerada a ordem das amostras a serem fresados, bem como a combinação de parâmetros para cada amostra. Ao total foram usinadas 30 amostras, sendo 15 a seco e 15 com MQL, seguindo a mesma ordem gerada pelo BBD para ambos os casos. A tabela 3.2. apresenta a configuração para cada amostra, bem como a aleatorização dos experimentos.

Tabela 3.2 – Ordem dos experimentos e parâmetros do processo

Amostra	v_c [m/min]	a_p [mm]	f_z [mm/z]	Amostra	v_c [m/min]	a_p [mm]	f_z [mm/z]
#01	90	3	0,050	#09	90	1	0,050
#02	90	2	0,075	#10	60	2	0,100
#03	60	3	0,075	#11	60	1	0,075
#04	120	2	0,050	#12	90	2	0,075
#05	120	3	0,075	#13	90	3	0,100
#06	90	1	0,100	#14	120	1	0,075
#07	60	2	0,050	#15	120	2	0,100
#08	90	2	0,075				

3.2 Análise experimental

Para um melhor entendimento de como cada parâmetro influencia na força de usinagem F_u , foi feita uma análise de variância (ANOVA). A ANOVA permite avaliar estatisticamente os parâmetros e sua significância em relação aos resultados obtidos. Para que sua resposta seja confiável, admite-se como hipóteses a distribuição normal dos dados, aleatoriedade dos erros e a não correlação dos valores observados [Ribeiro e Caten, 2011]. O valor-p indica se a variável em questão foi significativa ou não. Quanto mais próximo de zero, mais significativa é a contribuição deste fator. Para a análise, considerou-se um nível de confiança de 95%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aqui serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para a força de usinagem (F_u) e para a rugosidade média (R_a) através da usinagem a seco e com MQL. A Tabela 4.1 mostra os valores gerados nestas condições. Como os esforços durante o fresamento variam em intensidade e direção de forma contínua, optou-se por analisar os valores efetivos (RMS).

4.1 Força de usinagem

Os valores de força de usinagem (F_u) para as condições avaliadas estão ilustrados pelo gráfico de colunas da Figura 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados de força de usinagem (F_u) e rugosidade (R_a)

Amostra	v_c [m/min]	a_p [mm]	f_z [mm/z]	Corte a seco		Corte com MQL	
				F_u [N]	R_a [μ m]	F_u [N]	R_a [μ m]
#01	90	3	0,050	148	0,26	135	0,45
#02	90	2	0,075	130	0,30	130	0,52
#03	60	3	0,075	189	0,45	187	0,51
#04	120	2	0,050	97	0,31	100	0,41
#05	120	3	0,075	186	0,31	196	0,60
#06	90	1	0,100	83	0,60	76	0,50
#07	60	2	0,050	97	0,28	91	0,35
#08	90	2	0,075	127	0,34	130	0,60
#09	90	1	0,050	53	0,34	52	0,34
#10	60	2	0,100	155	0,51	164	0,51
#11	60	1	0,075	72	0,34	59	0,46
#12	90	2	0,075	133	0,29	123	0,43
#13	90	3	0,100	237	0,67	228	0,61
#14	120	1	0,075	65	0,34	53	0,54
#15	120	2	0,100	163	0,63	155	0,54

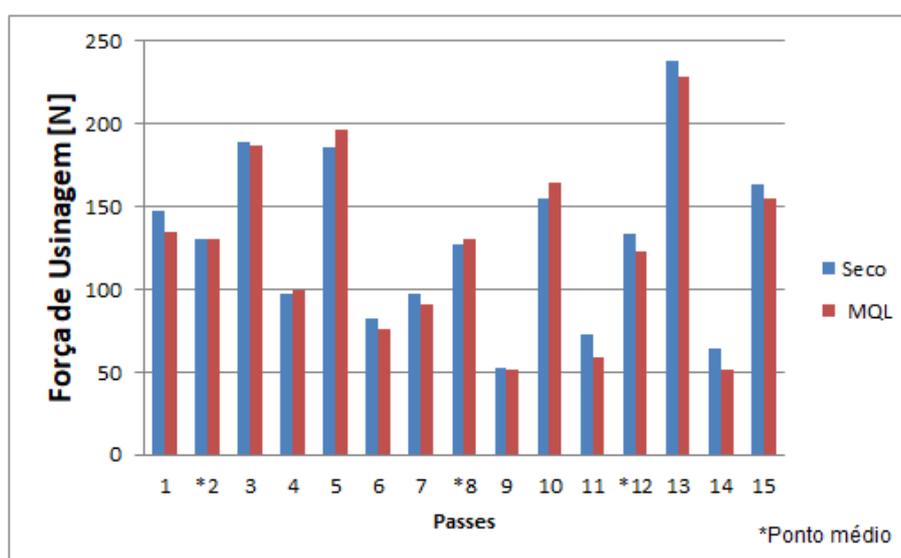


Figura 4.1 – Força de usinagem F_u .

Observa-se, numa análise inicial, que os valores de força de usinagem não apresentam grandes diferenças entre o corte a seco e com MQL.

Foi realizado a ANOVA a fim de identificar os parâmetros com maior influência sobre os resultados da força de usinagem. As tabelas com o resultado completo da ANOVA para a usinagem tanto dos passes a seco como dos passes com MQL é apresentada no Apêndice II, respectivamente nas Tabelas A.2 e A.3. Através da análise da ANOVA, identificou-se que a

combinação profundidade de corte axial (a_p) x avanço por dente (f_z) foi a única que apresentou influência significativa sobre a força de usinagem para uma confiança de 95%.

As maiores amplitudes da F_u , tanto para corte a seco quanto com MQL, foram observadas na usinagem da amostra #13 (238 N e 228 N, respectivamente). Os parâmetros utilizados correspondem aos maiores valores aplicados de a_p (3 mm) e f_z (0,100 mm/z), o que condiz com a literatura. Segundo Machado et al., 2015, o aumento de a_p em conjunto com f_z , eleva a quantidade de material a ser cisalhado, provocando um aumento da força. As usinagens das amostras #03 e #05 apresentam as maiores intensidades das F_u observadas após as da amostra #13. Estes dois passes foram efetuados com uma combinação do valor máximo de a_p (3 mm) e o valor intermediário de f_z (0,075 mm/z). Embora v_c tenha dobrado na usinagem da amostra #03 (60 m/min) para a amostra #05 (120 m/min), não se observa reflexo na F_u , reafirmando o entendimento de que este parâmetro de processo possui pouca influência sobre os esforços.

As menores amplitudes de F_u , tanto para o corte a seco quanto com MQL, foram observadas durante o passe #09 (53N e 52N, respectivamente), que corresponde à menor a_p (1 mm) associada ao menor f_z (0,050 mm/z). Isso corrobora, mais uma vez, com a literatura. As Figuras 4.2a e 4.2b ilustram a influência da profundidade de corte a_p e do avanço f_z na força de usinagem F_u para os cortes a seco e com MQL.

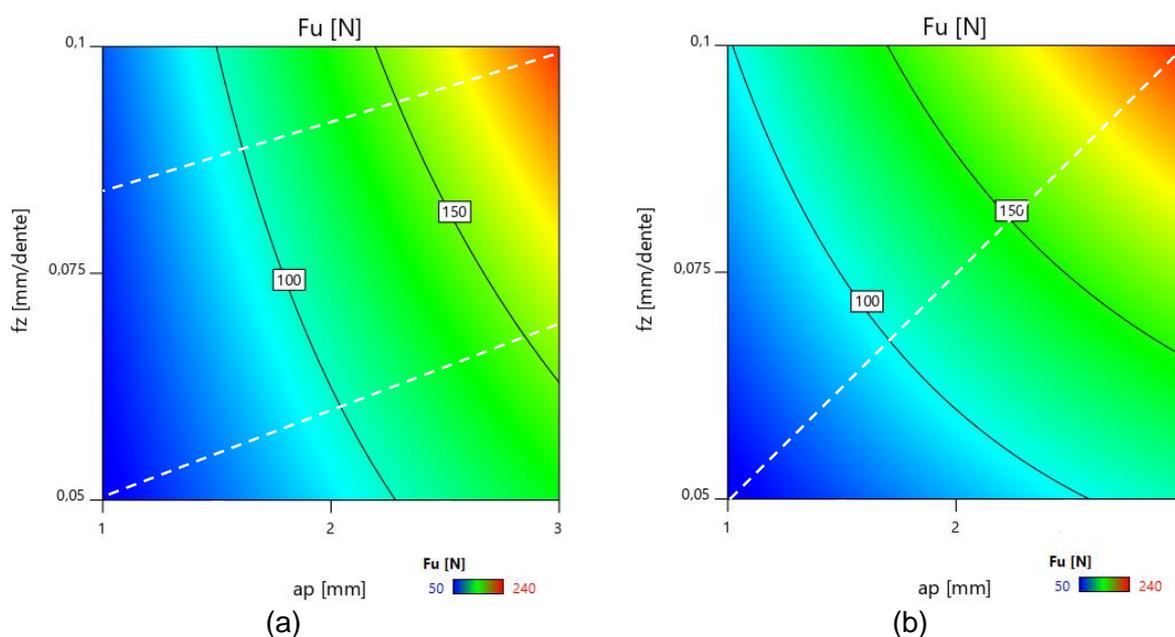


Figura 4.2 – Influência da profundidade de corte e do avanço em relação à força de usinagem no fresamento: (a) a seco; (b) com MQL

Analisando a Figura 4.2, observa-se, através da linha branca tracejada, que no corte a seco a força não apresenta um aparente crescimento linear. Conforme se aumenta o avanço, mantendo-se a mesma profundidade é possível perceber que a força praticamente não tem elevadas variações no corte a seco, embora seja superior, considerando-se as mesmas condições, em relação ao corte com MQL. No corte com MQL, o crescimento da força conforme aumentam-se os parâmetros é nitidamente linear, e com valores máximos menores em relação ao corte a seco. Esse comportamento provavelmente foi ocasionado devido ao fato de o MQL proporcionar uma diminuição da pressão específica de corte K_s promovendo esse comportamento linear mais evidente.

Em relação ao efeito do MQL nos experimentos, a maioria dos passes gerou valores semelhantes ou ligeiramente menores de força de usinagem. Os passes #11 e #14 apresentaram diferenças maiores de F_u entre o corte a seco e com MQL (cerca de 20% menores). Ambos os passes possuem o menor a_p utilizados neste estudo (1 mm). Um aumento de a_p provavelmente dificulta a penetração do fluido de corte, uma vez que há uma barreira

entre a ponta da ferramenta e o sistema de aplicação de MQL (ver Fig. 3.3a). Dessa forma, menores a_p podem ter possibilitado um melhor acesso do lubrificante à interface ferramenta-peça, proporcionando uma diminuição do atrito nesta região e a consequente redução da pressão específica de corte K_s , resultando em uma maior redução de F_u .

Nota-se uma diferença de amplitude das forças geradas nos passes #03 e #05 com o uso de MQL: o #05 mostrou ligeiro aumento de F_u . Como supracitado, ambos diferiram somente pela velocidade de corte. Embora já se tenha sido dito que v_c não tem influência relevante sobre as forças, neste caso é possível que a maior v_c tenha contribuído para aumentar a dificuldade de acesso do fluido de corte às interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça devido ao maior deslocamento de ar se opondo ao acesso do MQL à região de corte, fazendo com que o passe #05 tenha uma força de usinagem maior.

4.2 Rugosidade

Os valores de rugosidade média (R_a) obtidos para o corte a seco e com MQL são apresentados no gráfico de colunas da Figura 4.3.

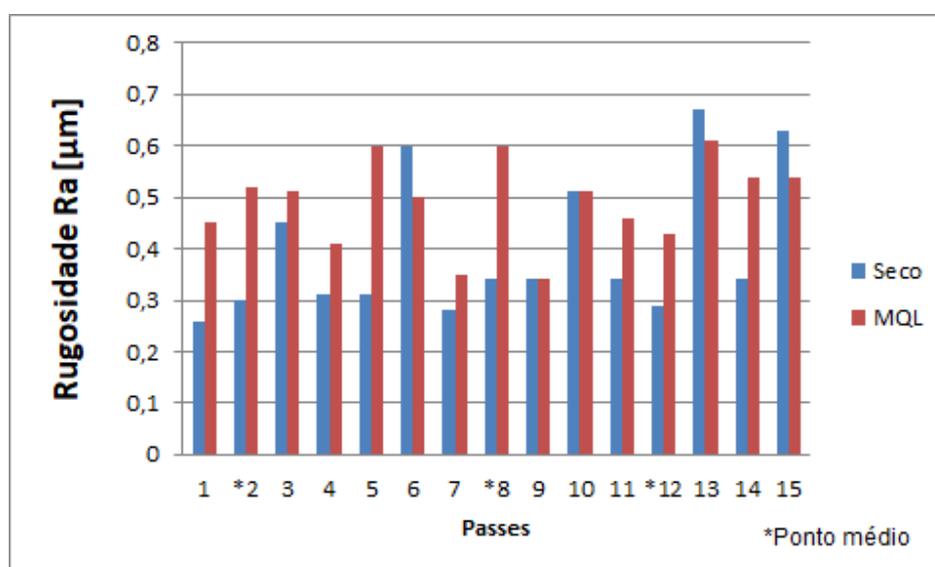


Figura 4.3 – Rugosidade média

Realizou-se novamente a ANOVA buscando saber o nível de significância de cada parâmetro. As Tabelas A.4 e A.5 no APÊNDICE II apresentam o resultado completo da ANOVA tanto para as rugosidades nos passes usinados a seco quanto para os passes usinados com MQL. Segundo a ANOVA, o parâmetro mais significativo é o avanço f_z (conforme esperado), seguido por seu efeito quadrático, tanto para o corte a seco quanto para o corte com MQL. Os demais parâmetros apresentaram pouca influência sobre o valor de R_a , indo ao encontro da literatura, em que f_z e r_e são por isso utilizados para estimar a rugosidade R_a teórica na operação de fresamento, conforme Equação (2.5) [Machado et. al, 2015].

No corte a seco, observam-se os maiores valores medidos de R_a nas amostras #13 e #15. Estas possuem como parâmetro de entrada o maior f_z usado neste estudo (0,1 mm/z), reforçando a teoria. Por outro lado, o menor valor medido foi observado na amostra #01, que, conforme esperado, foi gerada com $f_z = 0,050$ mm/z. Segundo Machado et al., 2015, um aumento do avanço provoca um aumento da altura dos picos e profundidades dos vales, proporcionando maiores marcas deixadas pelo avanço na superfície usinada da peça.

Nas amostras #06 e #13, que diferem somente no nível de a_p , observa-se que ocorreu um pequeno aumento do valor medido de rugosidade. A menor a_p do passe #06 (1 mm) resultou em menor R_a da superfície usinada. A maior a_p do passe #13 (3 mm) pode ter induzido maiores forças e consequentemente maiores vibrações, ocasionando um pior acabamento na superfície usinada desta amostra.

No corte com MQL, observa-se um comportamento similar ao descrito para o corte a seco, ou seja, as rugosidades medidas apresentaram forte influência de f_z . Entretanto, a análise da Figura 4.3 mostra um aumento considerável nas rugosidades das amostras usinadas com auxílio de MQL, algo que não é comumente encontrado na literatura. Apenas as amostras #06, #13 e #15 mostraram resultados conforme se esperava, ou seja, um melhor acabamento em relação ao corte a seco. A maior a_p da amostra #13 pode ter dificultado a penetração do fluido na interface ferramenta-peça (degrau entre a ponta da ferramenta e o bico aspersor de MQL), proporcionando menor ação lubrificante e conseqüente pior acabamento desta amostra em relação às demais. Diante disso, testes adicionais foram propostos para avaliar se essa diferença foi realmente influenciada pela condição lubrificante usada ou por características de cada ferramenta.

4.3 Testes adicionais

Como foi constatada uma grande diferença nos valores medidos de rugosidade média (R_a) entre os cortes a seco e com MQL, foram realizados testes adicionais buscando esclarecer se o MQL teve influência significativa na rugosidade da superfície usinada.

Para realização destes testes, os parâmetros do ponto médio do experimento Box-Behnken foram utilizados. O experimento foi montado segundo um experimento fatorial simples de dois fatores a dois níveis, também chamado de 2^k .

Visando identificar uma possível interferência da ferramenta de corte nos resultados experimentais, foi proposto intercalar a ferramenta A (usada inicialmente nos experimentos de corte a seco) com a ferramenta B (usada com MQL). Também foram usadas as duas condições lubrificantes para ambos os testes. Ao total foram realizadas 12 amostras. A Tabela 4.2 mostra a configuração em que foram dispostos os testes.

Tabela 4.2 – Configurações dos testes adicionais

Testes Adicionais		
Amostras usinadas	Ferramenta	Condição
1-3	A	a seco
4-6	A	com MQL
7-9	B	a Seco
10-12	B	com MQL

Após a execução dos testes, as medidas de força de usinagem (F_u) e de rugosidade média (R_a) foram feitas de maneira análoga aos testes originais. Os resultados foram calculados utilizando a média dos três passes para cada combinação de ferramenta e condição lubrificante. Estes resultados são apresentados na Tabela 4.3

Tabela 4.3 – Resultados obtidos nos testes adicionais para a força de usinagem F_u e para a rugosidade R_a .

Ferramenta A				Ferramenta B			
Condição a seco		Condição com MQL		Condição a seco		Condição com MQL	
F_u [N]	R_a [μ m]	F_u [N]	R_a [μ m]	F_u [N]	R_a [μ m]	F_u [N]	R_a [μ m]
130	0,28	134	0,31	134	0,54	128	0,50

Analisando os dados da Tabela 4.4 referentes à ferramenta A, observa-se que quando o MQL foi utilizado nos testes adicionais, obteve-se um pequeno aumento de F_u . Em relação aos resultados obtidos com a ferramenta B, F_u gerada no corte a seco é ligeiramente maior que a gerada com MQL. O comportamento da ferramenta B segue a mesma tendência observada nos testes originais, onde o MQL teve uma contribuição para a diminuição da F_u .

Em relação à rugosidade R_a , nos dados apresentados na Tabela 4.3, a ferramenta A não apresentou diferenças significativas no valor da rugosidade quando foi utilizada com MQL. Ambos os valores de rugosidade continuaram baixos. O mesmo se observou com a ferramenta B, em que o MQL não alterou a rugosidade. Entretanto, a ferramenta B apresentou rugosidades cerca de 75% maiores em comparação à ferramenta A.

Para validar esta análise de R_a , a ANOVA para dois fatores foi realizada. O fator X é a ferramenta de corte (A ou B), e o fator Y é o meio lubrificante (seco ou MQL). A Tabela 4.4 apresenta os resultados encontrados utilizando as rugosidades medidas nos testes adicionais.

Conforme a Tabela 4.4, o fator X (ferramenta de corte), apresentou influência significativa sobre a rugosidade, corroborando a percepção de que a ferramenta B interferiu nos resultados. Além disso, é importante notar que nem mesmo a interação entre ferramenta e MQL foi estatisticamente significativa, sendo somente a ferramenta de corte responsável pelos resultados obtidos nos testes originais e adicionais.

Tabela 4.4 – Resultados da análise de variância (ANOVA) para os testes adicionais.

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	F tab.	Signif.?
SQX	0,15	1	0,154	186,83	5,32	SIM
SQY	0,00	1	0,000	0,16	5,32	NÃO
SQXY	0,00	1	0,003	4,04	5,32	NÃO
Erro	0,01	8	0,001			
Total	0,16	11				

Nota: SQ = Soma dos quadrados; GDL = Graus de liberdade; MQ = Média dos quadrados

O resultado chama atenção, pois não foram observados desgastes significativos nas ferramentas utilizadas, inclusive pelo baixo número de passes, robustez da ferramenta e por se tratar de um material considerado de boa usinabilidade.

Segundo Weingaertner e Schroeter, 1990, o principal efeito do desgaste da ferramenta é o cegamento da aresta de corte, que ocasiona um aumento na força de usinagem (F_u). Porém este aumento na F_u não foi observado nos experimentos, visto que as forças, anteriormente discutidas, tiveram resultados condizentes com os testes originais. A partir disto, cogita-se então que as fresas podem ter variações na geometria, devido às tolerâncias de fabricação.

5 CONCLUSÕES

Os parâmetros de maior influência sobre as forças de usinagem, tanto para corte a seco como para corte com MQL, foram a combinação da profundidade de corte axial (a_p) e o avanço por dente (f_z). Os passes que apresentavam essa combinação de parâmetros, com seus valores máximos, foram aqueles em que se observaram as maiores forças de usinagem. Por outro lado, quando estes parâmetros estavam combinados com seus valores mínimos, observaram-se as menores forças de usinagem.

O MQL demonstrou pequena contribuição na redução da força de usinagem na maior parte das condições avaliadas. Maiores profundidades dificultam a penetração do fluido de corte nas interfaces ferramenta-peça e ferramenta-cavaco devido ao degrau entre a ponta da ferramenta e o bico aspersor do MQL. Dessa maneira, nos passes com menores profundidades de corte, a redução da força de usinagem foi mais evidente.

Conforme esperado, observou-se forte influência de f_z sobre a rugosidade média (R_a). Maiores avanços resultam em maiores rugosidades, enquanto avanços mais baixos proporcionam melhor acabamento da superfície usinada.

Não foi observada influência significativa do uso de MQL sobre a rugosidade nas condições avaliadas. Os testes adicionais corroboraram esse fato, uma vez que as duas fresas foram submetidas ao corte a seco e com MQL, e a rugosidade teve mínimas variações.

Devido às elevadas diferenças de valores medidos para rugosidade entre o corte a seco e o corte com MQL, observou-se que as ferramentas de corte influenciaram fortemente o acabamento das amostras produzidas. O motivo mais provável para tanto é que as fresas podem apresentar pequenas diferenças construtivas, talvez até mesmo dentro das tolerâncias do fabricante, mas que acabaram por afetar as amostras produzidas. Essas tolerâncias construtivas das ferramentas costumam ser ignoradas nas operações de usinagem. Porém, podem influenciar os parâmetros de saída medidos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amorim, H. J. de **“Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro”**, Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, UFRGS, 2002.
- Carter, M. A., **“Telecurso 2000 – Metrologia – Profissionalizante – Aula 19”**, Disponível em: Acesso em: 08/07/2019.
- Dhar, N.R., Kamruzzaman, M., Ahmed, M., **“Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 Steel”** Journal of Materials Processing Technology, pp. 299-304, 2006.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. **“Tecnologia da Usinagem dos Materiais”**, 8 ed., São Paulo, Artliber, 2013, 270p.
- Ekinovic, S., Prcanovic, H., Begovic, E., **“Investigation of influence of MQL machining parameters on cutting forces during MQL turning of carbon steel St52-3”** Mesic, pp. 608-614, 2015.
- Hayajneh, M.; Tahat, M. S.; Bluhm, J., **“A Study of the effects of machining parameters on the surface roughness in the end-milling process”**, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 1-5, 2007.
- Itoigawa, F., Childs, T.H.C., Nakamura, T., Belluco, W., **“Effect and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy”**, pp. 339-344, 2005.
- Kannan, S., Ghosh, A., **“Dry machining of AA7075 by H-DLC coated carbide end mill”**, Procedia Materials Science 5, pp. 2615-2621, 2014.
- Lima, D. O., Araujo, A. C., Silveira, J. L. L. **“Influência da profundidade de corte e do avanço na força de corte no fresamento de faceamento”**, 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VII CONEM), 31 Jul. - 03 Ago., São Luís, MA, 2012, 10p
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B. **“Teoria da Usinagem dos Materiais”**, 3.ed., São Paulo, Blucher, 2015, 371p.
- Montgomery, D. J. **Design and analysis of experiments**. Arizona State University, 2013.
- NBR ISO 4288 **“Especificações geométricas de produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade”**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996.
- Oliveira, J. F. de **“Estudo do fresamento de acabamento da liga de alumínio aeronáutico 7075-T6”** Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá-MG - UNIFEI, 2015, 115p

- Ribeiro, J.L.D., Caten, C.S. ten., **“Série Monográfica de Qualidade – Projeto de Experimentos”** PPGEF- UFRGS, Apostila, 2011, 153p.
- Santos, S.C., Sales,W.F. **“Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais”**, 1 ed., São Paulo, Artiber Editora, 2007, 246p.
- Shigley, J.E; Mishke, C.R.; **“Projeto de Engenharia Mecânica”**, Bookman, 7ª edição, 2005.
- Sória, B. S., **“Estudo do comportamento das vibrações em fresamento frontal do aço inoxidável AISI 316 utilizando transformada de Wavelet”**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, UFRGS 2016.
- Shokrani, A., Dokia, V., Newman, S.T., **“Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids”**. Int. J. Mach. Tools Manuf. 57, pp. 83-101, 2012.
- Sreejith, P.S., Ngoi, B.K.A., **“Dry machining: Machining of the future.”** Journal of Materials Processing Technology, pp 287-291, 1999.
- Suarez, P. M., Machado, A.R., Silva, É.C., **“Precisão dimensional e acabamento na superfície do alumínio aeronáutico 7075-t7 no processo de fresamento de topo”**,17º PosMec, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- Suarez, P. M. **“Fresamento de canais da liga de alumínio aeronáutico 7075-T7”**, Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2008, 125p.
- Tosun, N. e Huseyinoglu, M. **“Effect of MQL on Surface Roughness in Milling of AA7075-T6”**, Materials and Manufacturing Processes,pp. 793-798, 2010.
- Wakabayashi, T., Suda, S., Inasaki, I., Terasaka, K., Musha, Y., Toda, Y., **“Tribological action and cutting performance of MQL media in machining of aluminum “**, Annals of the CIRP vol 56/1/2007, pp. 97-100, 2007.
- Weingaertner W. L.; Schroeter, R.B. **“Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas”**, São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1990, 80p.

APÊNDICES

I – Parâmetros encontrada na literatura para a usinagem da liga de alumínio 7075-T6

Tabela A.1 – Parâmetros encontrados na literatura para usinagem da liga de alumínio 7075-T6

Artigo	v_c	RPM	a_p	f_z / v_z	Lubrificante
Tossun (2010)**	8,2 m/min	260	1 mm	20 mm/min	MQL (9:10)
Kannan (2014)*	60, 120 e 180 m/min	1911, 3822 e 5732	0,5 mm	100 e 200 mm/min	Seco
Suarez (2008)*	115 e 165 m/min	3662 e 5255	3 a 5	0,08 e 0,12 mm/rev	Seco, MQL e Jorro
Suarez et al. (2007)*	100 e 400 m/min	3185 e 12738	Até 6 mm	-	Seco, MQL e Jorro

* Metal duro

** Metal duro e Aço rápido

II – Resultados das análises de variância realizadas para a F_u e R_a nos cortes a seco e com MQL

Tabela A.2 – Resultado da ANOVA realizada para a F_u no corte a seco

Fator	SQ	GDL	MQ	Valor F	Valor-p
Modelo	38128,3	9	4236,48	252,99	<0,0001
Vc	0,6983	1	0,6983	0,0417	0,8462
ap	15,75	1	15,75	0,9408	0,3766
fz	3,83	1	3,83	0,2289	0,6525
Vc x ap	7,7	1	7,7	0,4599	0,5278
Vc x fz	19,4	1	19,4	1,16	0,3309
ap x fz	903,4	1	903,4	53,98	0,0007
Vc x Vc	16,58	1	16,58	0,9898	0,3655
ap x ap	0,0088	1	0,0088	0,0005	0,9826
fz x fz	0,096	1	0,096	0,0057	0,9426
Erro	83,73	5	16,75		
Falta de ajuste	62,35	3	20,78	1,94	0,3573
Erro puro	21,37	2	10,69		
Total	38212	14			

Nota: SQ: Soma dos quadrados; GDL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados

Tabela A.3 – Resultado da ANOVA realizada para a F_u no corte com MQL

Fator	SQ	GDL	MQ	Valor F	Valor-p
Modelo	41298,38	9	4588,71	97,44	<0,0001
Vc	2,23	1	2,23	0,0474	0,8362
ap	31,55	1	31,55	0,6699	0,4503
fz	12,8	1	12,8	0,2718	0,6244
Vc x ap	74,39	1	74,39	1,58	0,2643
Vc x fz	82,36	1	82,36	1,75	0,2433
ap x fz	1198,54	1	1198,54	25,45	0,004
Vc x Vc	0,0039	1	0,0039	0,0001	0,9931
ap x ap	75,94	1	75,94	1,61	0,26
fz x fz	1,06	1	1,06	0,224	0,8868
Erro	235,47	5	47,09		
Falta de ajuste	198,7	3	66,23	3,6	0,2248
Erro puro	36,77	2	18,39		
Total	41533,86	14			

Nota: SQ: Soma dos quadrados; GDL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados

Tabela A.4 – Resultado da ANOVA realizada para a R_a no corte a seco

Fator	SQ	GDL	MQ	Valor F	Valor-p
Modelo	0,2523	9	0,028	9,52	0,0116
Vc	0,0001	1	0,0001	0,044	0,8421
ap	0,0032	1	0,0032	1,08	0,3464
fz	0,0352	1	0,0352	11,96	0,0181
Vc x ap	0,0049	1	0,0049	1,66	0,2535
Vc x fz	0,002	1	0,002	0,6876	0,4447
ap x fz	0,0056	1	0,0056	1,91	0,2255
Vc x Vc	0,0002	1	0,0002	0,0705	0,8012
ap x ap	0,0067	1	0,0067	2,26	0,1927
fz x fz	0,0488	1	0,0488	16,58	0,0096
Erro	0,0147	5	0,0029		
Falta de ajuste	0,0133	3	0,0044	6,35	0,1392
Erro puro	0,0014	2	0,0007		
Total	0,267	14			

Nota: SQ: Soma dos quadrados; GDL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados

Tabela A.5 – Resultado da ANOVA realizada para a R_a no corte com MQL

Fator	SQ	GDL	MQ	Valor F	Valor-p
Modelo	0,0831	9	0,0092	2,73	0,1404
Vc	0,0006	1	0,0006	0,1629	0,7031
ap	0,0001	1	0,0001	0,0358	0,8574
fz	0,0153	1	0,0153	4,54	0,0863
Vc x ap	0,0000	1	0,0000	0,0074	0,9348
Vc x fz	0,0002	1	0,0002	0,0666	0,8066
ap x fz	0,0000	1	0,0000	0,0000	1,0000
Vc x Vc	0,0001	1	0,0001	0,0372	0,8547
ap x ap	0,0010	1	0,0010	0,3036	0,6054
fz x fz	0,0126	1	0,0126	3,72	0,1117
Erro	0,169	5	0,0034		
Falta de ajuste	0,0024	3	0,0008	0,1118	0,9456
Erro puro	0,0145	2	0,0072		
Total	0,1000	14			

Nota: SQ: Soma dos quadrados; GDL: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados