

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

INVESTIGAÇÃO SOBRE O TORNEAMENTO DE ACABAMENTO DA LIGA DE
ALUMÍNIO 6262E-T6 UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE
APLICAÇÃO DE LUBRIRREFRIGERANTE

por

Giovani Rodrigues Pereira

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, dezembro de 2016.

INVESTIGAÇÃO SOBRE O TORNEAMENTO DE ACABAMENTO DA LIGA DE
ALUMÍNIO 6262E-T6 UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE
APLICAÇÃO DE LUBRIRREFRIGERANTE

por

Giovani Rodrigues Pereira

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. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: Elias Samuel Cristo Espindola

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner

Prof. Dr. Rodrigo Rossi

Prof. Dr. Tiago Becker

Porto Alegre, 06 de dezembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Em especial à minha mãe, Vera Lúcia Pereira.

Ao professor André João de Souza, pela orientação.

Ao coorientador Elias Samuel Cristo Espindola, pelo auxílio na realização do experimento e desenvolvimento do trabalho.

Ao mestrando Valmor Schirmann Filho, por fornecer os corpos de prova.

À Empresa Bondmann Química, pela doação do fluido biolubrificante FLUID B-90.

À Empresa Quimatic/Tapmatic, pela doação do sistema aspersionador Nebulizador IV e pela disponibilização do fluido integral sintético à base de água Quimatic Jet utilizado em aplicações com MQL.

À minha namorada, Thaís Brito, que me apoiou do início ao final desta graduação.

Ao meu pai e irmãos que sempre estiveram comigo.

PEREIRA, G. R. **Investigação sobre o torneamento de acabamento da liga de alumínio 6262E-T6 utilizando diferentes métodos de aplicação de lubrificante.** 2016. 22 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O estudo apresenta a influência de diferentes técnicas de aplicação de fluido de corte (em abundância, em quantidade reduzida e em mínima quantidade de lubrificante) no processo de torneamento de acabamento da liga de alumínio 6262E-T6 na combinação de diferentes valores de velocidade de corte (240 e 480 m/min), avanço (0,05 e 0,1 mm/volta) e profundidade de corte (0,6 e 1,2 mm). Para cada meio lubrificante aplicado foi realizada uma réplica totalizando seis corpos de prova com oito amostras de 10 mm. Em cada amostra foram adquiridas as componentes ortogonais da força de usinagem (força de corte F_c , força de avanço F_f e força passiva F_p) e o processo foi interrompido sistematicamente para a coleta do cavaco que foi analisado posteriormente. Ao término dos ensaios, os parâmetros de rugosidade média (R_a) e total (R_t) foram medidos em cada amostra, e imagens das superfícies usinadas captadas com o microscópio (ampliações de 50x) foram analisadas. Concluiu-se que não ocorreram variações significativas nas forças (F_c , F_f e F_p) e na geometria do cavaco entre diferentes métodos de lubrificação. A geração de cavacos contínuos em forma de fita foi incentivada principalmente pelo aumento na velocidade de corte de 240 para 480 m/min que devido ao aumento do calor gerado tornou o material mais dúctil e a quebra do cavaco mais difícil, favorecendo em diversas situações o emaranhamento contra a peça e a ferramenta. Avaliando os parâmetros de rugosidade, comparativamente aos valores teóricos, usualmente os valores de R_a apresentaram-se próximos ou abaixo e os de R_t acima dos calculados. No entanto, para ambos os parâmetros de rugosidade, a utilização do método com mínima quantidade de lubrificante gerou valores menores em comparação com a quantidade reduzida e em abundância, principalmente para a menor velocidade (240 m/min).

PALAVRAS-CHAVE: Liga de alumínio 6262-T6; Meios Lubrificantes; Rugosidade da superfície; Cavacos.

PEREIRA, G. R. **Investigation of the finishing turning of aluminum alloy 6262E-T6 using different coolant-lubricant applications.** 2016. 22 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

This study presents the influence of different techniques of coolant-lubricant applications (flood coolant, reduced quantity, and minimal quantity lubrication) in the finishing turning process of aluminum alloy 6262E-T6 using different combinations of cutting speed (240 and 480 m/min), feed rate (0,05 and 0,1 mm/rev) and deep of cut (0,6 and 1,2 mm). The experiment was replicated for each coolant-lubricant application, totalizing six specimens with eight samples of 10 mm each. For each sample the machining orthogonal forces components were captured (cutting force F_c , feed force F_f and passive force F_p), and the process was systematically interrupted to collect the chip that was later analyzed. At the end of the machining, the parameters of medium roughness (R_a) and total roughness (R_t) were measured for each sample and the images of the machined surfaces taken with microscope (50x magnification) were analyzed. There were no significant variations of any of the forces (F_c , F_f e F_p) neither of the geometry of the chips among the different coolant-lubricant applications. The generation of continuous chips in ribbon form was mainly due to the increase in the cutting speed from 240 to 480 m/min, which led to an increase in the temperature, resulting in a more ductile material and a chip harder to break, thus favoring the entanglement against the piece and the tool in several situations. Comparing the parameters of roughness to their theoretical values, the results obtained for R_a were usually close or below to the calculated values, while the values for R_t were usually above it. However, for both parameters of roughness, the use of the method with minimal quantity lubrication resulted in smaller values when compared to the other two methods - reduced quantity and flood coolant - especially at the lower speed (240 m/min) setting.

KEYWORDS: Aluminum alloy 6262E-T6; Coolant-lubricant types; Surface roughness; Chips.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1	Alumínio 6262E-T6.....	1
3.2	Material e Geometria da Ferramenta de Corte.....	2
3.3	Cavaco.....	3
3.4	Meio Lubrificante.....	4
3.4.1	Efeito nas Forças de Usinagem.....	5
3.5	Acabamento Superficial.....	5
4	METODOLOGIA.....	6
4.1	Caracterização dos Corpos de Prova.....	7
4.2	Caracterização da Ferramenta de Corte.....	7
4.3	Caracterização das Aplicações de Lubrificantes.....	7
4.4	Aquisição de Dados.....	8
4.5	Procedimento Experimental.....	9
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
5.1	Análise de Forças.....	10
5.2	Análise dos Cavacos	11
5.3	Qualidade Superficial.....	12
6	CONCLUSÕES.....	14
	REFERÊNCIAS.....	14
	APÊNDICE	16

1 INTRODUÇÃO

Entre os metais mais utilizados na indústria metal-mecânica estão o alumínio e suas ligas. Em sua forma pura o alumínio apresenta alta resistência a corrosão, alta condutividade térmica e elétrica e pequena relação entre densidade e resistência mecânica. Em forma de liga, onde são adicionados outros elementos em sua estrutura, consegue-se obter características únicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto. Somado a isto, alguns tipos de ligas permitem a realização de tratamento térmico para adquirir ainda mais resistência mecânica e durabilidade. Esses fatores acabaram por expandir suas aplicações às mais diferentes áreas, como por exemplo, médica, alimentícia, elétrica, automotiva e aeronáutica [ABAL, 2012].

De acordo com Diniz *et al.* (2013), na maior parte dos casos, o alumínio é facilmente usinado considerando que o mesmo possui baixa resistência mecânica de modo a exigir menos energia para remoção de material. Contudo, os autores afirmam que, em relação à rugosidade gerada e ao comportamento do cavaco, o alumínio não pode ser considerado de boa usinabilidade, pois a alta ductilidade de suas ligas faz com que o cavaco formado seja alongado e o acabamento superficial seja inferior em condições normais de usinagem.

Machado *et al.* (2011) explicam que a formação de cavacos longos é extremamente prejudicial ao acabamento da superfície, pois o mesmo pode se emaranhar na peça e atrapalhar a entrada do fluido na zona de corte. Além disso, o fato de o alumínio apresentar alta condutividade térmica faz com que o mesmo retenha grandes quantidades de calor inerentes aos processos, causando assim dilatações térmicas, prejudiciais em operações na qual o acabamento e as tolerâncias são importantes.

Assim, o uso de fluidos de corte durante o processo de corte evita que as peças de alumínio absorvam calor, reduzindo efeitos de dilatação. Entretanto, aspectos econômicos, ambientais e relativos à saúde dos trabalhadores, incentivam a busca por alternativas visando limitar ou eliminar a utilização desses fluidos nos processos de usinagem. Braga (2001) cita que técnicas que visam reduzir drasticamente o uso dos mesmos (como a mínima quantidade de lubrificante) buscam abrir espaço na indústria seguindo tendências a favor do meio ambiente, como o cumprimento de normas nacionais e internacionais de gestão ambiental.

2 OBJETIVO

Realizar análise comparativa entre diferentes métodos de lubrificação refrigerada aplicados ao torneamento de acabamento da liga de alumínio 6262E-T6 com diferentes condições de corte através dos sinais de força, dos cavacos gerados e da textura da superfície usinada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Alumínio 6262E-T6

A composição química do alumínio e suas ligas trabalháveis devem obedecer a Norma ABNT NBR ISO 209 (2010), em que são especificadas tanto a densidade nominal quanto a composição química em porcentagem das ligas. A liga de alumínio 6262 deve apresentar densidade de 2720 kg/m³ e respeitar os limites de composição apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química em peso percentual apresentado em intervalos ou valor máximo para a liga 6262 [ABNT NBR ISO 209, 2010]

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Pb	Bi	Outros	Al
0,8-1,2	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,04-0,14	0,25	0,15	0,4-0,7	0,4-0,7	0,15	Restante

Segundo Alcoa (2010), a liga 6262E é uma das ligas de alumínio de mais fácil usinagem, sendo bastante recomendada para aplicações onde é requerida alta produtividade

com bom acabamento superficial. Outras características apresentadas por essa liga são alta resistência mecânica, alta resistência à corrosão e boa resposta à anodização¹. De acordo com Sapa (2016), a liga 6262E é utilizada na fabricação de componentes automotivos, hidráulicos, elétricos, de ar condicionado, e outros.

O magnésio (Mg) e o silício (Si) são os principais elementos de liga do Al 6262E-T6. A proporção de Mg e Si visa à formação da fase Mg_2Si , formando ligas tratáveis termicamente [Moreira, 2016]. O magnésio aumenta a dureza do cavaco e diminui o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta, enquanto o silício aumenta a abrasividade da peça, de forma a reduzir a vida da ferramenta com o aumento do tamanho da fase primária do Si [Diniz *et al.*, 2013]. Quanto à usinabilidade, ela diminui com o aumento do teor de Si. Inclusões duras e frágeis, como, por exemplo, o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o Si favorecem a quebra do cavaco; no entanto, aceleram o desgaste da ferramenta. Por este motivo, devem ser empregadas ferramentas de metal-duro [Klocke, 2011].

3.2 Material e Geometria da Ferramenta de Corte

As ferramentas de metal-duro são as mais importantes na indústria, pois permitem, através da alteração de sua composição, uma grande variabilidade na combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade. Trata-se de um produto advindo da metalurgia do pó que é formado basicamente por carboneto de tungstênio associado ou não a outros carbonetos para conferir dureza e resistência ao desgaste e um elemento aglomerante, em geral cobalto, responsável pela tenacidade [Diniz *et al.* (2013)].

Conforme Machado *et al.* (2011), a norma ISO 513 classifica os metais duros em classes P, M, K, N, H, S de acordo com o material a ser usinado. A classe N (metais não ferrosos, mais macios) inclui o alumínio e é subdividida através de um número de 01 a 40 que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta: quanto maior o número, menor deverá ser a resistência ao desgaste e maior a tenacidade.

Diniz *et al.* (2013) e Sandvik (2012) recomendam que para o corte de alumínio a ferramenta de metal-duro seja sem cobertura, pois além de não necessitar grande resistência ao desgaste, o titânio (Ti) contido na maioria das coberturas possui afinidade química com alumínio, podendo intensificar o desgaste por adesão e difusão. Além disso, a aresta para corte para alumínio deve ser muito afiada, o que pode ser difícil de ser obtido ao utilizar espessas camadas de cobertura. Os autores complementam que, para garantir o bom cisalhamento do cavaco e reduzir a chance de formação de aresta postiça de corte, além de ser afiada, a ferramenta deve ter ângulos de saída (γ) e de inclinação (λ) bastante positivos.

O ângulo de saída (γ) atua diretamente na força e potência de corte, no acabamento superficial e na temperatura de corte de forma que quanto maior o seu valor, menor será o trabalho de dobramento do cavaco. Ângulos γ mais positivos devem ser usados em materiais dúcteis, pois nestes casos evitam áreas de adesão que podem danificar a ferramenta. Ângulos de inclinação (λ) positivos fazem com que o cavaco escoe, afastando-se a superfície da peça usinada e reduzindo a possibilidade de emaranhar-se. A Figura 3.1 representa a saída do cavaco segundo o ângulo λ [Machado *et al.*, 2011; Stemmer, 1993].



Figura 3.1 – Saída do cavaco segundo o ângulo de inclinação [adaptado de Stemmer, 1993].

¹ Anodização é um processo eletrolítico que forma uma camada controlada e uniforme de óxido de alumínio na superfície do metal, com finalidades decorativa ou protetora [Alcoa, 2010].

A utilização de ferramentas com ângulo de posição ($\chi_r \cong 90^\circ$) faz com que a força passiva (F_p) seja reduzida tendendo a zero. O aumento no ângulo de inclinação (λ), se positivo, tende a reduzir a intensidade da força passiva (F_p) com o incremento na profundidade de corte [Gonçalves, 2012].

3.3 Cavaco

Machado *et al.* (2011) explicam que em condições normais de corte, a formação do cavaco se dá de maneira periódica, de forma que cada lamela gerada passa ciclicamente pelas etapas de recalque, deformação plástica, deslizamento e saída. O material da peça usinada é o principal elemento que define o tipo de cavaco formado, que pode ser contínuo, descontínuo ou segmentado. De acordo com Gonçalves (2012), os cavacos contínuos são formados na usinagem de materiais dúcteis, como aços de baixa liga, alumínio e cobre. Nesse caso, o metal cisalha na zona primária de cisalhamento com grandes deformações, no entanto, permanece homogêneo, sem fragmentação. Assim, a formação de cavaco em alumínio é considerada de difícil controle, pois são contínuos, de grande espessura e resistentes devido à estrutura CFC que permite maior deformação do metal antes da sua ruptura.

Além da definição em tipos, os cavacos podem ser diferenciados quanto a sua forma segundo a classificação da norma ISO 3685, mostrada pela Figura 3.2.

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco helicoidal tipo arruela	5- Cavaco helicoidal cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conectado		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			
							

Figura 3.2 – Formas de cavaco segundo a Norma ISO 3685 [Machado *et al.*, 2011].

Os parâmetros mais atuantes sobre a forma do cavaco são o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p) e suas influências estão representadas na Figura 3.3. A espessura (h) e a largura (b) do cavaco são modificadas em função do ângulo de posição da ferramenta (χ_r) de forma que se $\chi_r \cong 90$ então $h \cong f$ e $b \cong a_p$. [Diniz *et al.*, 2013]

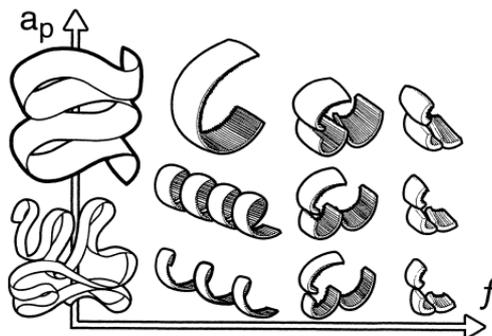


Figura 3.3 – Variação da forma do cavaco em função de a_p e f [Machado *et al.*, 2011].

Além disso, de maneira geral, o aumento na velocidade de corte (v_c), a redução do avanço (f) e/ou aumento no ângulo de saída (γ) tendem a produzir cavacos em fitas (da direita para esquerda na Fig. 3.2) [Machado *et al.*, 2011].

Segundo Diniz *et al.* (2013), dentre as formas dos cavacos, os longos em forma de fita são mais críticos, pois o mesmo possui diversos pontos negativos com relação aos outros tipos, tais como a possibilidade de emaranhar-se na peça comprometendo o acabamento superficial, ocupar maior volume na máquina-ferramenta e gerar riscos ao operador. Santos e Sales (2007) acrescentam que a entrada regular do fluido de corte também é prejudicada por cavacos longos, pois podem encobrir a entrada do mesmo.

Schuitek (1997) verificou que na operação de torneamento com ferramenta de aço rápido ($\gamma = 25^\circ$) da liga 6262-T8 que, mesmo a liga contendo bismuto e chumbo que teoricamente facilitariam a quebra do cavaco, foram gerados cavacos dos piores tipos (emaranhados e fitas) independente da variação dos parâmetros de usinagem ($v_c = 63$ a 250 m/min; $a_p = 0,25$ a 4 mm e $f = 0,064$ a $0,512$ mm/volta). Entretanto, a redução de v_c apresentou pequena melhora na forma do cavaco, diferente das variações de a_p e f que não apresentaram alterações significantes.

3.4 Meio Lubrificadorrefrigerante

O desenvolvimento dos fluidos de corte e seus modos de aplicação contribuíram para atingir altos níveis de eficiência nos processos de fabricação. Na usinagem, os fluidos têm como principais funções a refrigeração, a lubrificação e o favorecimento na remoção dos cavacos. Como refrigerante, atua extraindo calor; como lubrificante, atua minimizando a geração do calor durante o corte, reduzindo a ocorrência de dilatações na peça e desgastes da ferramenta. Apesar de parecer simples, a escolha correta do lubrificante e seu modo de aplicação é de fundamental importância para obter um resultado eficiente [Klocke, 2011].

Santos e Sales (2007) indicam que, ao fazer uso de maiores velocidades de corte (v_c), a principal função do fluido é refrigerar, fazendo com que a temperatura média nas zonas de cisalhamento do cavaco seja reduzida. Assim, a ductilidade do material também é reduzida, elevando as forças de corte, o que pode causar piora na rugosidade da superfície usinada. Para baixos valores de v_c , a lubrificação é fundamental para evitar aderência do cavaco na ferramenta evitando formação de aresta postiça de corte (APC).

Machado *et al.* (2011) especificam que as possíveis direções de aplicação de fluidos de corte em torneamento são apresentadas na Figura 3.4.

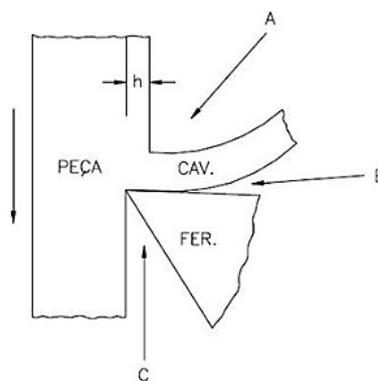


Figura 3.4 – Direções típicas de aplicação do fluido de corte [Machado *et al.*, 2011].

Tradicionalmente, a direção “A” é a mais utilizada. Provavelmente, a principal motivação está no fato de os sistemas de aplicação mais antigos serem rígidos e possuírem poucos graus de liberdade. Porém, a direção “A” é inadequada quando cavacos emaranhados são gerados, pois impedem o acesso do fluido à interface cavaco/ferramenta [Machado *et al.*, 2011].

Dentre os principais métodos de aplicação, o jato de fluido a baixa pressão é o mais utilizado, pois não necessita de dispositivos especiais para aplicação. Já para aplicação por

mínima quantidade de lubrificante (MQL) é necessário o uso de um sistema que permita misturar o fluido com ar comprimido [Santos e Sales, 2007].

Souza (2011) indica que na usinagem com ferramentas de geometria definida a aplicação de fluido em quantidade reduzida (QRF) é caracterizada por vazões menores que 120 litros por hora, enquanto para cortes com MQL a vazão deve ser, em geral, menor que 0,24 litros por hora. Dixit *et al.*, (2012) citam que as vantagens da aplicação do MQL sobre métodos convencionais são a necessidade de menos fluido e a possibilidade de alcançar mais facilmente a zona de corte na presença de cavaco.

Ao torneiar a liga 6262-T8 aplicando diversos tipos de fluidos, Schuitek (1997) constatou que não houve diferença significativa entre a utilização ou não de fluidos na forma do cavaco.

Diógenes (2011) avaliou o torneamento de acabamento a seco, em abundância e em MQL da liga de alumínio 6262 ($f = 0,4$ mm/volta; $v_c = 300$ m/min; $a_p = 0,5$ mm) e obteve menores valores de rugosidade média e total através do método MQL.

3.4.1 Efeito nas Forças de Usinagem

Segundo Machado *et al.* (2011), a redução das forças de usinagem pela utilização de fluidos é proporcional à eficiência de penetração do mesmo no contato cavaco-ferramenta. Klocke (2011) explica que a resistência de materiais dúcteis de baixa dureza é diminuída pelo aumento na temperatura causada pelo aumento da velocidade de corte. Assim, conforme Diniz *et al.* (2013), em altas velocidades, o efeito lubrificante é reduzido (dificuldade de penetração das gotículas de óleo nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça) e o efeito refrigerante é aumentado (remoção de calor da zona de corte). Consequentemente, tem-se um aumento das forças na usinagem desses materiais.

Schuitek (1997) avaliou a influência do fluido (emulsão de óleo 3%) em relação à usinagem a seco através do processo de torneamento da liga AA2011-T3 e verificou pequena redução nas forças de corte somente para avanços maiores que $f = 0,167$ mm/volta, mesmo em pequenas velocidades ($v_c = 63$ a 160 m/min).

3.5 Acabamento Superficial

O estado final da superfície é geralmente um dos fatores mais importantes dos processos de usinagem, pois possuem influência direta no desempenho de um componente.

As marcas geradas na superfície das peças usinadas podem ser caracterizadas por rugosidades, ondulações e falhas. Ondulações e falhas são geralmente consideradas como erros macrogeométricos de fabricação, enquanto que a rugosidade é definida por irregularidades microgeométricas resultantes dos parâmetros de entrada utilizados no processo de usinagem. As ondulações são identificadas por irregularidades superficiais e desvios geométricos (espaçamentos superiores aos considerados pela rugosidade) geralmente causados por vibrações, flexões na ferramenta, variação na temperatura de corte e erro de fixação da peça ou ferramenta. Falhas são identificadas por interrupções na topográfica da superfície causadas de forma não intencional, inesperada e/ou indesejada, podendo ser geradas por defeitos do material ou durante o processo de corte. Já a rugosidade é considerada um parâmetro especificável segundo a aplicação da superfície usinada [Machado *et al.*, 2011].

Souza (2015) menciona que os diferentes parâmetros que quantificam a rugosidade possuem vantagens e limitações segundo a superfície técnica a ser gerada e aponta que os mais utilizados são a rugosidade média (R_a), representada pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de medição L , e a rugosidade total (R_t), que indica a soma entre a maior altura de pico e a maior profundidade de vale do perfil no comprimento L conforme mostra a Figura (3.5).

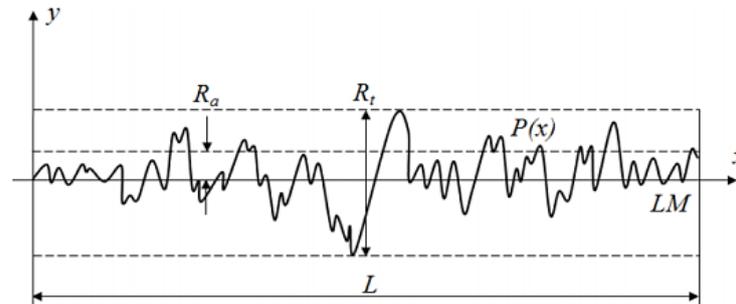


Figura 3.5 – Rugosidades média (R_a) e total (R_t) na superfície de uma amostra com comprimento L [Souza, 2015].

Souza (2011) apresenta uma classificação do acabamento da superfície usinada segundo o tipo de processo, indicando que a rugosidade média obtida em processos de torneamento de acabamento varia de 0,2 a 0,8 μm .

Em processos de torneamento, se o avanço (f) for menor que o raio de ponta (r_ϵ) da ferramenta, os valores dos parâmetros de rugosidade média (R_a) e total (R_t) podem ser obtidos teoricamente através das Equações (3.1) e (3.2) respectivamente.

$$R_a [\mu\text{m}] = \frac{1000 \cdot f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_\epsilon} = 32,075 \left(\frac{f^2}{r_\epsilon} \right) \quad (3.1)$$

$$R_t [\mu\text{m}] = \frac{1000 \cdot f^2}{8 \cdot r_\epsilon} = 125 \left(\frac{f^2}{r_\epsilon} \right) \quad (3.2)$$

Entretanto, devem-se utilizar os valores obtidos de forma teórica apenas como indicativo, pois o resultado real é afetado por diversos fatores tais como vibrações, desgastes na ferramenta, entre outros. [Machado *et al.*, 2011].

Gonçalves (2012) e Schuitek (1997) avaliaram a influência dos parâmetros de corte na operação de acabamento das ligas de alumínio. Ambos constataram variações insignificantes na rugosidade com a alteração de a_p e v_c . Acrescentam que o incremento de f faz com que a rugosidade aumente, porém em processos de acabamento pode sofrer maior influência de fatores que alteram a rugosidade de processo do que dos fatores de rugosidade cinemática.

4 METODOLOGIA

Para a realização dos experimentos foi utilizado o torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II, disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS), apresentado na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Torno CNC Mazak modelo QTN 100-II.

O estudo foi realizado através do processo torneamento longitudinal externo dos corpos de prova, empregando diferentes combinações de parâmetros de corte e técnicas de lubrificação. Ao final do procedimento experimental foram analisados os sinais de forças, cavacos gerados, imagens ampliadas das superfícies e parâmetros de rugosidade média e total.

4.1 Caracterização dos Corpos de Prova

Para o experimento foram utilizadas seis peças cilíndricas da liga de alumínio 6262E-T6 com comprimento de 170 mm e diâmetro de 31,5 mm. Nas peças foram produzidas nove regiões (amostras), cada uma medindo 10 mm de comprimento e divididas entre rebaixos de 3 mm. A nona região foi preparada para permitir a repetição de um dos passes caso houvesse necessidade. A geometria dos seis corpos de prova é apresentada na Figura 4.2.

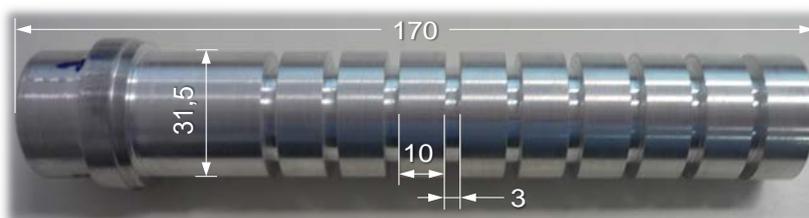


Figura 4.2 – Geometria do corpo de prova antes da usinagem.

A liga 6262E-T6 foi fornecida pela empresa Alcoa Alumínio S/A e apresenta a composição química certificada apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química da liga de alumínio 6262E-T6 [% massa].

Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Pb	Bi	Outros
96,5	1,04	0,63	0,43	0,32	0,04	0,05	0,02	0,02	0,32	0,44	0,19

4.2 Caracterização da Ferramenta de Corte

O inserto de metal-duro, sem cobertura, Iscar modelo VCGT 160404-AS classe IC20 (Fig. 4.3a) recomendado para o torneamento de alumínio foi utilizado nos experimentos. O inserto apresenta raio de ponta $r_e = 0,4$ mm, ângulo de folga $\alpha = 7^\circ$ e ângulos de saída (γ) e inclinação (λ) positivos.

O inserto foi montado no porta-ferramentas Black Tools modelo SVJBL-2020-K16 com ângulo de posição de $\chi_r = 93^\circ$ (Fig. 4.3b).



Figura 4.3 – Ferramenta para o torneamento do alumínio: (a) inserto VCGT 160404-AS IC20 [Iscar, 2016]; (b) porta ferramenta SVJBL-2020-K16 com inserto montado.

4.3 Caracterização das Aplicações de Lubrificação

O experimento contou com três diferentes situações de lubrificação utilizando dois tipos de lubrificantes.

A primeira condição consistiu na aplicação em abundância do fluido biolubrificante FLUID B90 da empresa Bondmann Química. Para isto foi utilizado o sistema convencional

existente na máquina-ferramenta aplicando-se uma vazão de 400 l/h a fim de gerar inundação em toda a zona de corte. Este é um fluido biodegradável desenvolvido com matérias primas de fontes renováveis, sendo isento de óleos, espumas e vapores tóxicos.

Para as outras duas condições – quantidade reduzida e em mínima quantidade de lubrificante – foi utilizado o fluido integral sintético à base de água Quimatic Jet da empresa Quimatic/Tapmatic. A primeira foi ajustada para uma vazão de 5 l/h e a segunda a uma vazão de 0,1 l/h. O fluido Quimatic Jet foi desenvolvido exclusivamente para aplicação por névoa pela mistura óleo/ar comprimido através do Nebulizador IV do mesmo fabricante (Fig. 4.4a). Apresenta ótima refrigeração e lubrificação com mínimo consumo de fluido, não contém solventes nocivos ou metais pesados – indicado para empresas que trabalham com sistemas de gerenciamento SMS (segurança, meio ambiente e saúde) ou que tem certificação ISO 14000 e/ou ISO 18000, eliminando a necessidade de descarte dos óleos solúveis.

Em todas as condições, os fluidos foram aplicados perpendicularmente à interface ferramenta-peça a uma distância de aproximadamente 17 mm, como mostra a Figura 4.4b.

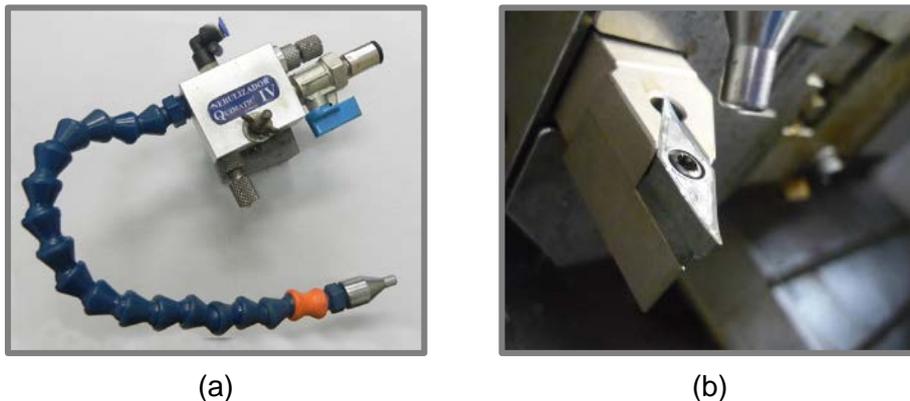


Figura 4.4 – Aplicação do Quimatic Jet: (a) nebulizador IV para aplicação do fluido; (b) detalhe da região de aplicação.

4.4 Aquisição de Dados

A aquisição dos sinais das componentes ortogonais de forças, representadas na Figura 4.5 como força passiva (F_p), força de corte (F_c) e força de avanço (F_f) e dispostas pelos eixos X, Y e Z respectivamente, foi realizada através de um dinamômetro piezelétrico Kistler modelo 9129AA. A carga elétrica gerada neste dispositivo durante a usinagem é convertida em tensão elétrica através de um condicionador e amplificador de sinais Kistler modelo 5070A. Os sinais analógicos adquiridos são transformados em sinais digitais em uma placa de aquisição de dados Measurement Computing modelo PCIM-DAS 1602/16. Por fim, o processamento e a visualização dos sinais de força são feitos utilizando o software LabView 8.6. No experimento, considerou-se uma taxa de aquisição de 1 kS/s (1000 pontos por segundo).

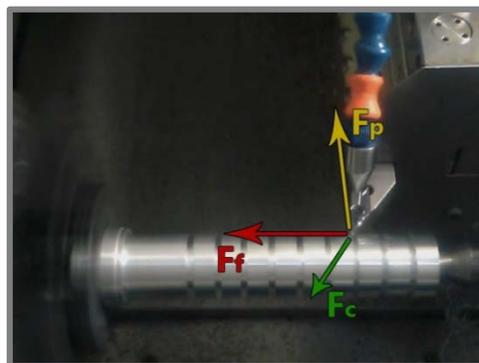


Figura 4.5 – Representação das forças geradas na usinagem do corpo de prova.

Para medição dos parâmetros de rugosidades e obtenção dos gráficos dos perfis foi utilizado o rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201 com resolução de $0,01 \mu\text{m}$. Seu apalpador é composto por uma agulha com ponta de diamante com raio de $5 \mu\text{m}$. Na medição foi empregado um comprimento de amostragem (cut-off) $\lambda = 0,8 \text{ mm}$ e um comprimento de medição $L = 5 \cdot \lambda = 4 \text{ mm}$. Para cada amostra foram realizadas quatro medições defasadas de 90° em torno do corpo de prova. A Figura 4.6a mostra a utilização do rugosímetro.

A análise óptica da superfície foi realizada a partir de imagens obtidas através do microscópio óptico digital Dino-Lite Pro modelo AM-413ZT com resolução de 1024×728 pixels e ampliação de $50\times$. A Figura 4.6b apresenta a aplicação do microscópio.



Figura 4.6 – Utilização dos equipamentos para avaliação do acabamento: (a) rugosímetro Mitutoyo SJ-201; (b) microscópio Dino-Lite Pro AM-413ZT.

4.5 Procedimento Experimental

Os valores de profundidade de corte (a_p) foram estabelecidos a partir do raio de ponta da ferramenta (r_ϵ), de maneira que o menor fosse $a_p = 0,6 \text{ mm}$ ($1,5 \cdot r_\epsilon$) e o maior fosse $a_p = 1,2 \text{ mm}$ ($3 \cdot r_\epsilon$).

Para o avanço (f) optou-se pelo menor valor recomendado pela fabricante do inserto ($f = 0,05 \text{ mm/volta}$), esperando-se, segundo o cálculo teórico (Eq. 3.1), valor de rugosidade média próximo do menor valor de acabamento em torneamento ($R_a \cong 0,2 \mu\text{m}$). Já o maior valor de avanço é intermediário ao recomendado ($f = 0,1 \text{ mm/volta}$) e segundo a Equação (3.1), espera-se um valor de rugosidade média próximo do maior esperado para o processo de acabamento por torneamento ($R_a \cong 0,8 \mu\text{m}$).

Por fim, a maior velocidade de corte (v_c) foi definida respeitando-se os limites de rotação do torno em relação ao diâmetro do corpo de prova ($v_c = 480 \text{ m/min}$) e, a partir desta, definiu-se a menor velocidade de corte ($v_c = 240 \text{ m/min}$).

Antes do início do ensaio de cada amostra, foi feito um passe com $0,25 \text{ mm}$ de profundidade a fim de corrigir possíveis erros de excentricidade gerados pelo movimento da peça. O ensaio consistiu em tornear as amostras (trechos com comprimento de 10 mm) empregando as diferentes combinações de parâmetros mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados em cada amostra.

Amostra	v_c [m/min]	f [mm/volta]	a_p [mm]
1	240	0,05	0,6
2			1,2
3		0,1	0,6
4			1,2
5	480	0,05	0,6
6			1,2
7		0,1	0,6
8			1,2

Durante o corte foram registradas as forças. O processo foi interrompido sistematicamente para a coleta dos cavacos de cada amostra. Como o procedimento foi realizado com réplica e foi utilizada uma condição de lubrificação para cada corpo de prova, totalizou-se a utilização de seis corpos de prova.

Após o final do processo de usinagem, foram medidas as rugosidades e adquiridas imagens ampliadas das superfícies torneadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise de Forças

As Figuras 5.1 a 5.3 apresentam os valores obtidos para as componentes ortogonais da força de usinagem, respectivamente, força de corte F_c , força de avanço F_f e força passiva F_p . Os resultados são apresentados através da média de duas amostras (ensaio e réplica) para as três aplicações de lubrificantes. As barras de erros representam as incertezas expandidas com nível de confiabilidade de 95,45%.

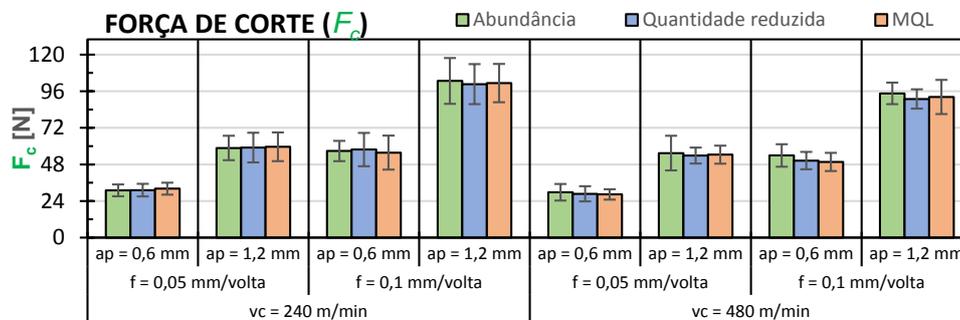


Figura 5.1 – Força de corte (F_c).

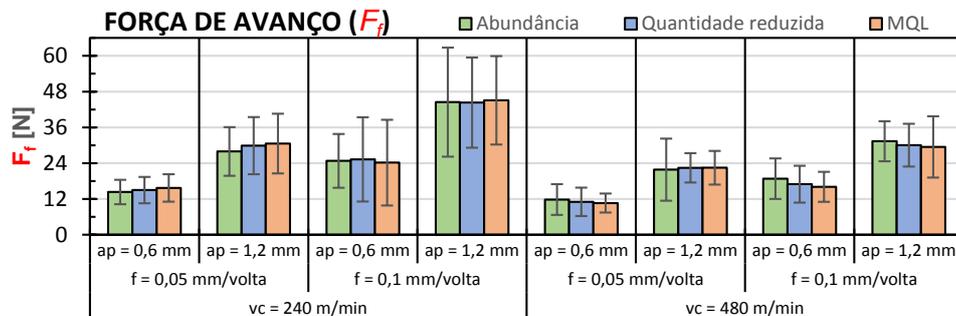


Figura 5.2 – Força de avanço (F_f).

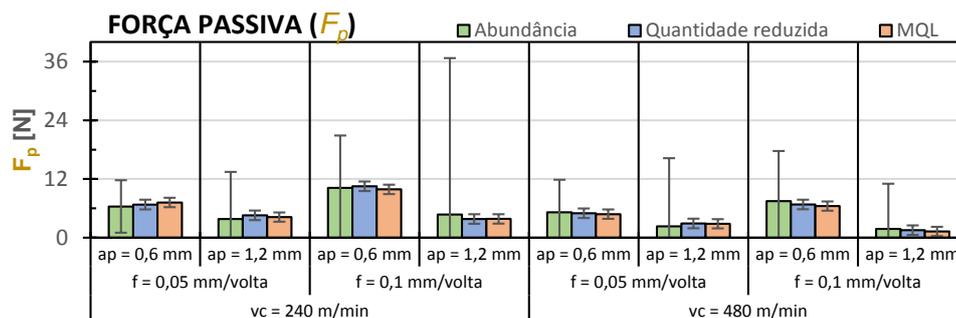


Figura 5.3 – Força passiva (F_p).

Analisando as forças no torneamento da liga AA6262-T6, não foram encontradas diferenças significativas nas componentes da força de usinagem (F_c , F_f e F_p) entre os diferentes tipos de lubrificação. A única diferença entre elas é em relação à variação das forças passivas (F_p) quando utilizada lubrificação abundante. Provavelmente a presença do cavaco gerou maior dificuldade de penetração do fluido na região de corte, reduzindo sua capacidade de lubrificação. Percebe-se, principalmente com menor velocidade, que o aumento na espessura (avanço) e/ou largura do cavaco (profundidade de corte) ocasiona maiores variações nas forças.

Ao dobrar a velocidade de corte (v_c) foi obtida uma redução nas forças de corte (F_c), avanço (F_f) e passiva (F_p) nas mesmas combinações de f e a_p . Esse resultado é esperado, visto que a resistência à penetração da ferramenta na peça é diminuída pelo aumento na temperatura na zona de corte.

Com relação à profundidade de corte (a_p) e ao avanço (f), o crescimento das componentes é diretamente proporcional à profundidade de corte, enquanto o aumento do avanço também gera acréscimo, no entanto em menor proporção. Este fato está relacionado a maior área da seção de corte proporcionada pelo aumento destes parâmetros [Klocke, 2011]. Assim, ao dobrar f , houve elevação nas três componentes. Já com o incremento de a_p , as componentes de corte (F_c) e avanço (F_f) sofreram acréscimo, pois o aumento do mesmo amplia as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário promovendo um acréscimo quase linear nas forças; porém, ao contrário de F_c e F_f , a força passiva (F_p) diminuiu, como descrito por Gonçalves (2012).

A partir da análise fatorial completa (DOE) realizada através do software Minitab®17 foi possível verificar o comportamento descrito e influência de cada parâmetro sob as componentes da força de usinagem (APÊNDICE).

5.2 Análise dos Cavacos

Pode-se dizer que a forma do cavaco teve como principais influências a alteração da velocidade de corte (v_c) e do avanço (f), pois a alteração na profundidade de corte (a_p) agiu basicamente sobre a largura do cavaco ($b \cong a_p$, pois $\chi_r = 93^\circ$). A Figura 5.4 ilustra o tipo de cavaco encontrado para cada uma das combinações de parâmetros.

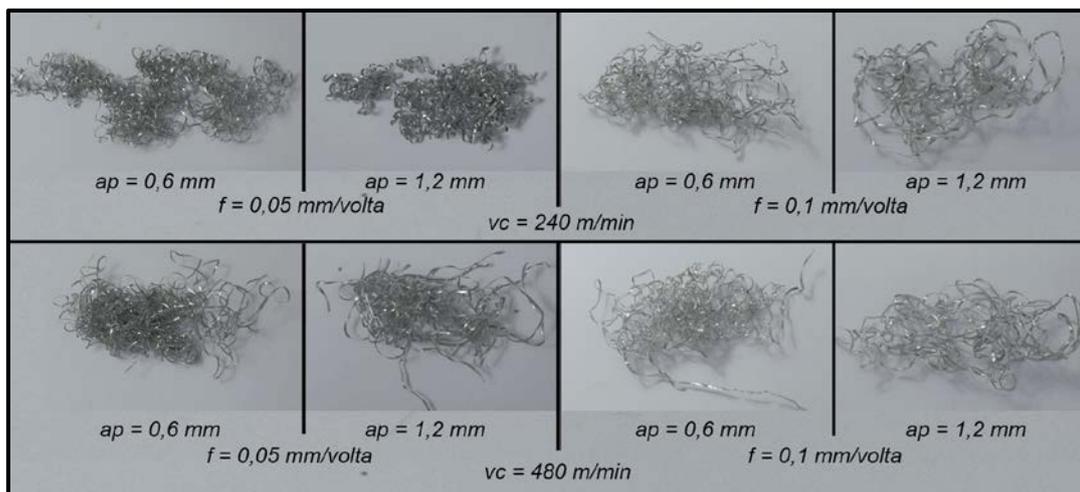


Figura 5.4 – Formas típicas dos cavacos na combinação de parâmetros.

De modo geral, quando utilizada a menor velocidade de corte ($v_c = 240$ m/min) combinada com o menor avanço ($f = 0,05$ mm/volta), o cavaco apresentou características tubulares emaranhado com tendência à formação de fita; no entanto, a mesma v_c com o maior avanço ($f = 0,1$ mm/volta) passou a apresentar cavaco mais alongado, provavelmente devido ao aumento da espessura do cavaco ($h \cong f$) associado com as propriedades do alumínio.

Apesar de os cavacos serem geralmente do mesmo tipo entre fluidos, ocorreu uma particularidade na combinação de parâmetros da amostra (4) quando lubrificada em abundância. Nesta combinação foi gerado cavaco tubular longo antes de transformar-se em fita (Fig. 5.5). Acredita-se que essa formação possa estar relacionada aos movimentos gerados pela variação da força passiva associados ao incremento dos parâmetros de corte (f e a_p).



Figura 5.5 – Cavaco da amostra (4) com lubrificação em abundância.

No presente trabalho foi possível avaliar o comportamento descrito por Schuitek (1997) para a ferramenta de metal-duro e com velocidade de até 480 m/min, que confirma a afirmação do autor, pois além de não variar significativamente com outros fatores, o incremento da velocidade incentivou a formação de fitas ainda mais longas que foram extremamente danosas devido ao emaranhamento (Fig. 5.6).

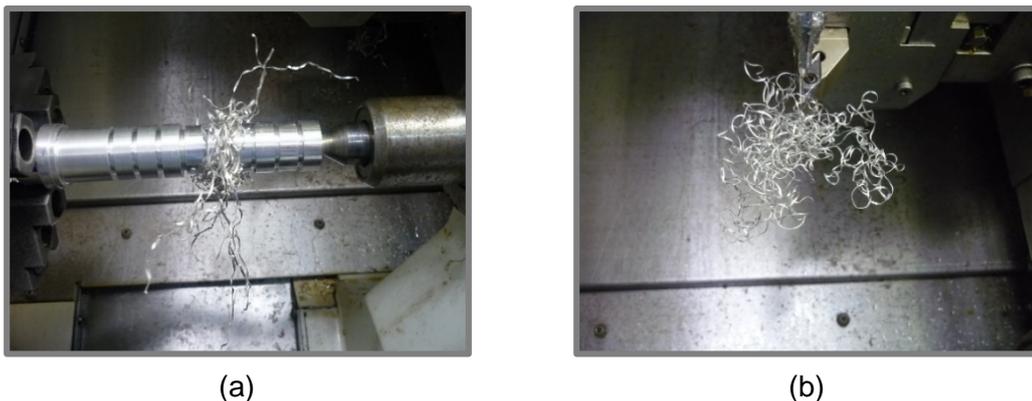


Figura 5.6 – Emaranhamento do cavaco: (a) sobre a peça; (b) sobre a ferramenta.

5.3 Qualidade Superficial

A representação dos valores médios de R_a e R_t para os diferentes meios lubrificantes são apresentados, respectivamente, pelas Figuras 5.7 e 5.8 através das médias dos valores obtidos com as respectivas incertezas expandidas com confiança de 95,45%.

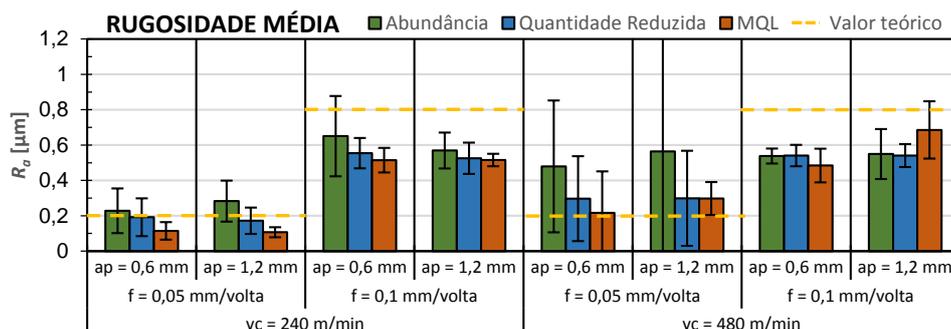


Figura 5.7 – Rugosidade média (R_a) das amostras geradas.

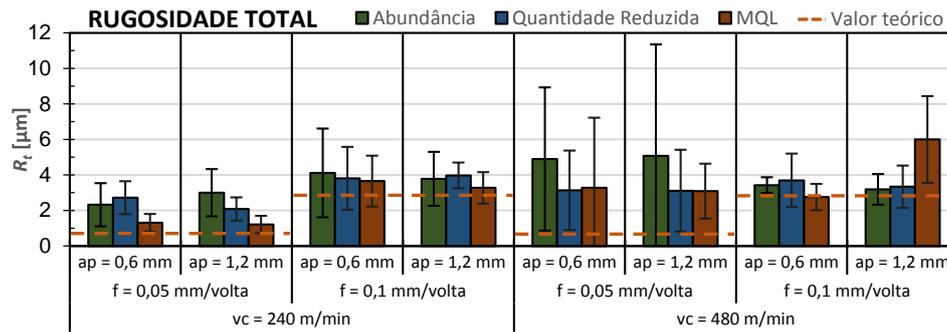


Figura 5.8 – Rugosidade total (R_t) das amostras geradas.

Como esperado, os valores de rugosidade média foram usualmente menores quando utilizado o menor avanço ($f = 0,05$ mm/volta). A combinação deste parâmetro com a menor velocidade ($v_c = 240$ m/min) resultou em valores de R_a próximos ou menores ao valor teórico ($0,11 \mu\text{m} \leq R_a \leq 0,28 \mu\text{m}$); em contrapartida, para rugosidade total (R_t), percebe-se maior variação entre os valores obtidos e calculado. Para ambos os parâmetros foi verificada melhora expressiva na utilização do método MQL.

Ao combinar o menor avanço ($f = 0,05$ mm/volta) com a maior velocidade de corte ($v_c = 480$ m/min), apesar de geralmente resultar em valores de rugosidade média próximos ao teórico ($0,21 \mu\text{m} \leq R_a \leq 0,29 \mu\text{m}$ para MQL e quantidade reduzida, porém $R_a \geq 0,49 \mu\text{m}$ para abundância); ao avaliar a rugosidade total (R_t) é perceptível valores muito maiores que o calculado, chegando a atingir médias próximas ou até maiores das obtidas com maior avanço ($f = 0,1$ mm/volta). Os menores valores foram obtidos pelos métodos de quantidade reduzida e MQL.

Para maior avanço ($f = 0,1$ mm/volta), todos os valores de R_a foram inferiores ao teórico ($0,48 \mu\text{m} \leq R_a \leq 0,69 \mu\text{m}$) independente de lubrificação e parâmetros de corte. Diferente do menor avanço, neste caso, o aumento da velocidade pouco alterou os resultados de R_a e R_t . Em geral, percebe-se novamente pequena vantagem da utilização do MQL; exceto, na combinação dos maiores parâmetros ($v_c = 480$ m/min; $f = 0,1$ mm/volta; $a_p = 1,2$ mm), onde o mesmo apresentou os piores resultados, o que pode estar relacionado a aleatoriedade das falhas devido ao emaranhamento do cavaco.

Apesar das variações associadas aos fluidos e formação de cavacos, pode-se dizer que a alteração da profundidade de corte não apresentou variações significativa nos parâmetros de rugosidade. Conforme verificado por Gonçalves (2012) e Schuitek (1997).

As incertezas apresentadas em R_a e R_t para os três meios lubrificantes podem ser ilustradas através da Fig. 5.9 que foram usinadas em condições iguais de parâmetros e lubrificação.

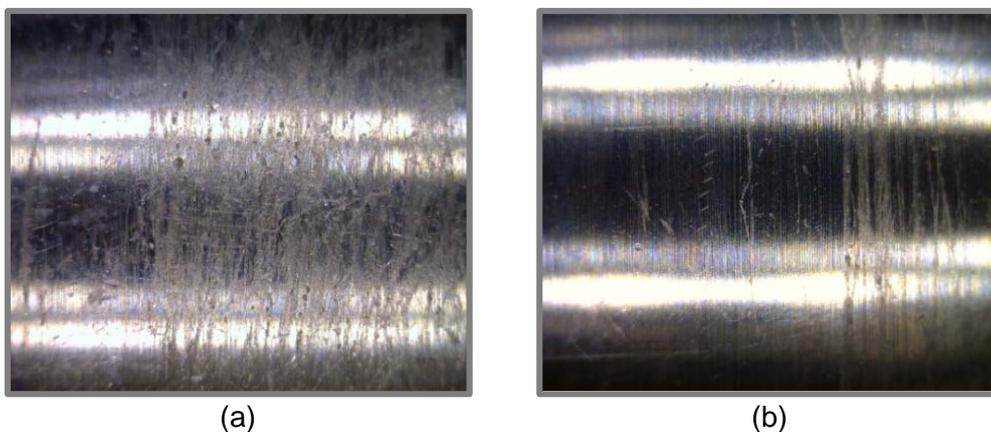


Figura 5.9 – Superfícies lubrificadas em abundância nas mesmas condições ($v_c = 480$ m/min; $f = 0,05$ mm/volta; $a_p = 1,2$ mm). Ampliação 50x.

O principal influente na piora do acabamento superficial com menor avanço ($f = 0,05$ mm/volta) foi a forma do cavaco devido ao aumento da velocidade de corte (v_c). A elevação da temperatura na região de corte reduziu a resistência ao cisalhamento do material fazendo com que o cavaco passasse a ter formato mais alongado e menos quebradiço, isto, associado à menor espessura do cavaco, favoreceu ainda mais o alongamento e emaranhamento contra a peça e conseqüentemente a geração de falhas na superfície.

Para o maior avanço ($f = 0,1$ mm/volta) os valores de R_a foram expressivamente menores que teórico e isto está associado ao tipo de material usinado. Esse comportamento para o aumento do avanço foi percebido por Gonçalves (2012) que associou esta reação à aderência de partículas ou rebarbas na superfície de forma a preencher os vales deixado pela ferramenta.

6 CONCLUSÕES

A liga de alumínio 6262E-T6 é considerada de boa usinabilidade quando se deseja bom acabamento; porém, de modo geral, não se comportou como esperado. Através das condições impostas nesta avaliação, o mesmo acabou produzindo somente cavaco dos piores tipos (fita e tubular emaranhado) independentemente dos parâmetros de corte e lubrificação aplicada. O emaranhamento do cavaco sobre a peça acabou prejudicando o acabamento em diversas situações, sobretudo em relação ao parâmetro de rugosidade total (R_t).

Para o parâmetro de rugosidade média (R_a), a liga de alumínio 6262E-T6 apresentou usualmente resultados próximos ao teórico na utilização do menor avanço e significativamente menores para o maior avanço, este fato é esperado visto que, em operações de acabamento das ligas de alumínio, o aumento do avanço tende a melhorar os valores de R_a .

Existem situações onde os valores de rugosidade total (R_t) são mais importantes. De modo geral, os valores obtidos para este parâmetro foram maiores que o valor teórico, principalmente associado ao menor avanço. Portanto estas condições de usinagem não devem ser recomendadas para componentes que devem ter alta resistência à fadiga, pois a presença de falhas podem ser extremamente prejudiciais para o seu desempenho.

Quanto aos diferentes meios lubrificantes, foi notável a melhor capacidade do método MQL na obtenção de melhores parâmetros de rugosidade (R_a e R_t). Isto provavelmente está associado a maior facilidade da névoa em atingir a interface cavaco-ferramenta na presença de cavaco, facilitando a lubrificação e resfriamento da região de corte. Além disso, o fato da utilização MQL não alterar as forças de usinagem, torna a sua utilização ideal neste caso, pois além do fator econômico, o mesmo está associado à redução dos danos ambientais e relativos a saúde dos trabalhadores. Porém, deve-se atentar que a aleatoriedade dos danos causados devido ao emaranhamento do cavaco pode ser um risco para o acabamento independentemente do tipo de lubrificação.

REFERÊNCIAS

ABAL, 2012, **“Fundamentos e Aplicações do Alumínio”**, Associação Brasileira do Alumínio, São Paulo, 68p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas); **“NBR ISO 209 – Alumínio e suas ligas – Composição Química”**, Rio de Janeiro, 2010.

Alcoa, 2010, **“Perfis Extrudados de Alumínio: Ligas e Têmperas de Extrusão”**, São Paulo, p.38-39.

Braga, D. U., 2001, **“A técnica de mínima quantidade de fluido de corte aplicada no processo de furação de uma liga de alumínio-silício”**, Tese (doutorado) em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 178p.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L.; **“Tecnologia da Usinagem dos Materiais”**, 8 ed., São Paulo: Artliber, 2013, 270p.

Diógenes, A. C. **“Estudo da usinagem por torneamento de ligas de alumínio”**, Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011, 69p.

Dixit, U. S., Sarma, D. K., Davim, J.P.; **“Environmentally Friendly Machining”**, London, Springer-Verlang, 2012, 86p.

Gonçalves, R. A., **“Investigação da usinabilidade das ligas de alumínio da série 6xxx”**, Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2012, 107p.

Iscar, 2016, **“VCGT-AS”**, Disponível em: <www.iscar.com/eCatalog/>. Acesso em: 19 set. 2016.

Klocke, F.; **“Manufacturing Processes 1: Cutting”**, RWTH-Aachen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 504p.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B.; **“Teoria da Usinagem dos Materiais”**, 2.ed., São Paulo, Blucher, 2011, 397p.

Moreira, M. F. **“Ligas de Alumínio Conformadas: Alumínio e Suas Ligas”**. Disponível em: <<http://www.dalmolim.com.br/educacao/materiais/biblimat/aluminioconf.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2016.

Santos, S. C., Sales W. F., 2007, **“Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais”**, São Paulo, Artliber, 2007, 246p.

Sapa, 2016, **“Extruded Aluminum Alloy 6262”**. Sapa Industrial Extrusions. Disponível em: <www.sapagroup.com/pages/494853/Brochures/Sapa%20Alloy%206262.pdf>. Acesso em: 03 out. 2016.

Sandvik, 2012, **Manual Técnico de Usinagem**. São Paulo: Sandvik Coromant.

Schuitek, A., J.; **“Usinabilidade de Ligas de Alumínio Tratáveis Termicamente”**, Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997, 117p.

Souza, A. J.; **“Monitoramento de Processos de Usinagem”**, GPFAI-DEMEC-UFRGS, Apostila, 2015, 47p.

Souza, A. J.; **“Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 2: Acabamento da superfície usinada”**, UFRGS, Apostila, 2011, 126p.

Stemmer, C. E., **“Ferramentas de corte I”**, 3.ed., Editora da UFSC, Florianópolis, 1993, 249p.

APÊNDICE

O *Design of Experiments* (DOE) ou Projeto e Análise de Experimentos (PAE) é um método eficiente na análise dos efeitos de dois ou mais fatores em procedimentos experimentais. O mesmo está associado a um método de otimização estatística capaz de correlacionar os efeitos principais dos fatores sobre as variáveis de resposta, assim como os efeitos das interações entre os fatores.

O estudo relacionado aos efeitos dos parâmetros de usinagem nas forças de usinagem é apresentado na Figura A1.

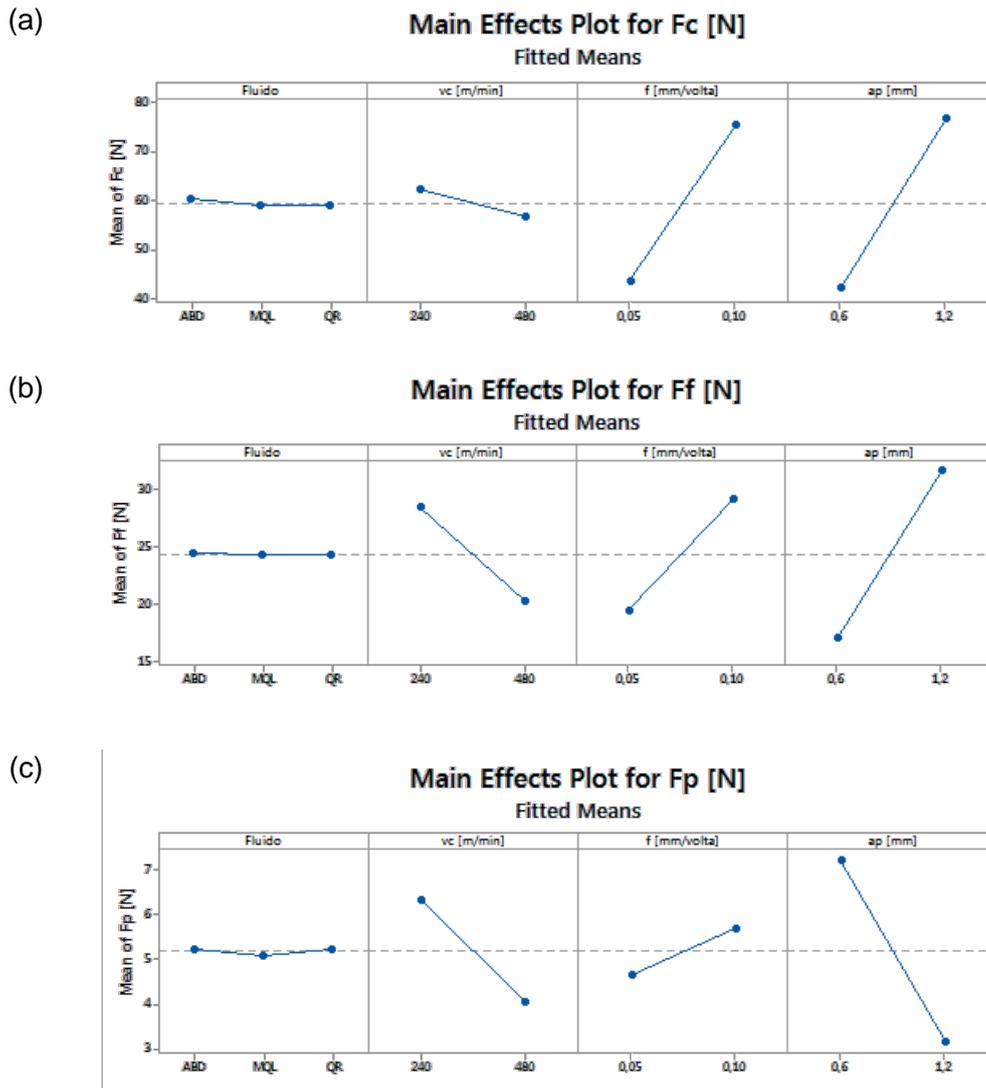


Figura A1 – Resultado da análise fatorial utilizando o Minitab®17: (a) força de corte; (b) força de avanço; (c) força passiva.