

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

ANÁLISE DO PROCESSO DE FRESAMENTO DO AÇO AISI D6 ENDURECIDO
UTILIZANDO MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE

por

Adilio Felipe

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

Porto Alegre, Junho de 2016.

ANÁLISE DO PROCESSO DE FRESAMENTO DO AÇO AISI D6 ENDURECIDO
UTILIZANDO MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE

por

Adilio Felipe

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

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Flavio José Lorini

Prof. Dr. Gilberto Dias da Cunha

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 24 de junho de 2016.

AGRADECIMENTOS

Ao professor André João de Souza, pela orientação.

Ao técnico de Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS). Guilherme Vargas Schirmer, pelo apoio.

À empresa Quimatic/Tapmatic, pelo Nebulizador V e pelo fluido Quimatic Jet utilizado nos experimentos.

À empresa LESI INDÚSTRIA DE FERRAMENTAS LTDA, pelo fornecimento da ferramenta para a realização dos ensaios.

Aos colegas Instrutores do CFP SENAI Lindolfo Collor pela colaboração na realização dos ensaios.

À minha esposa Manuela, pelo incessante apoio em todos os momentos desta longa jornada.

Felipe, A. **Análise do processo de fresamento do aço AISI D6 endurecido utilizando mínima quantidade de lubrificante.** 2016. 22f. 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 trabalho apresenta uma avaliação comparativa entre os efeitos da utilização da técnica de usinagem com mínima quantidade de lubrificante (MQL) e da usinagem a seco sobre a rugosidade da superfície usinada e sobre os desgastes da ferramenta de corte gerados pelo fresamento frontal do aço AISI D6 endurecido a 57 HRC. No processo utilizou-se uma fresa com insertos de metal-duro com cobertura em duas camadas (nitreto de titânio-alumínio (Ti, Al)N e nitreto de titânio (TiN)) por deposição física de vapor (PVD). Além das duas condições de lubrificação, os parâmetros de corte (dois avanços por dente e duas profundidades axiais de corte) foram escolhidos conforme recomendações do fabricante da ferramenta, totalizando oito combinações. Os valores de rugosidade e os respectivos perfis foram obtidos a partir de um rugosímetro portátil, enquanto que o desgaste da ferramenta foi avaliado com auxílio do microscópio digital. Os resultados mostraram que o uso da técnica de usinagem com MQL produziu menores valores de rugosidade e menores desgastes no flanco da ferramenta quando comparados aos obtidos pela usinagem a seco. Os perfis de rugosidade gerados com MQL mostraram uma redução da amplitude dos picos e, principalmente dos vales. Também houve a redução da formação de rebarba na usinagem com MQL. Portanto, é possível concluir que a usinagem com MQL pode ser uma boa alternativa no fresamento de aços endurecidos, principalmente no que diz respeito à rugosidade superficial e vida da ferramenta de corte.

PALAVRAS-CHAVE: aço AISI D6 endurecido, mínima quantidade de lubrificante, rugosidade da superfície fresada, desgaste da fresa.

Felipe, A. **Analysis of AISI D6 hardened milling process applying minimum quantity of lubricant**. 2016. 22f. 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 paper presents a comparative evaluation between the effects of using minimum quantity lubrication (MQL) technique and dry machining over machined roughness surface and cutting tool wear generated by face milling of hardened steel AISI D6 at 57 HRC. In the process, it was used a carbide milling cutter with double coating (Titanium Aluminum Nitride (Ti, Al)N and Titanium Nitride (TiN)) by physical vapor deposition (PVD). In addition to the two cooling/lubricating conditions, the cutting parameters (two feed per tooth and two axial depths of cut) were chosen according to the manufacturer's recommendations, totalizing eight combinations. The surface roughness values and their related profiles were obtained from a portable rugosimeter, while the tool wear was evaluated using a digital microscope. The results showed that the use of the MQL technique in machining produced the smallest roughness values and lowest flank wear on cutting tool when compared with the dry machined. The roughness profiles generated with MQL showed an amplitude reduction on peaks, and mainly on valleys. Also, there was a reduction of burr with MQL machining. It is possible to conclude that the MQL machining can be a good alternative in hardened steel milling, especially with regard to the surface roughness and cutting tool life.

KEYWORDS: AISI D6 hardened steel, minimum quantity of lubricant, milling surface roughness, milling tool wear.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS.....	1
2.1	Objetivo Principal.....	1
2.2	Objetivos Específicos	2
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	2
3.1	Processo de Fresamento	2
3.2	Usinagem de Moldes e Matrizes.....	3
3.3	Aço AISI D6	4
3.4	Mínima Quantidade de Lubrificante	4
4	MATERIAIS E MÉTODOS	5
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	8
5.1	Análise da Rugosidade da Superfície Fresada	8
5.1.1	Análise do perfil de rugosidade e estado da superfície	10
5.2	Análise do Desgaste da Ferramenta de Corte	12
6	CONCLUSÕES	14
	REFERÊNCIAS.....	14
	ANEXO	16

1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem por fresamento envolve algumas variáveis independentes de entrada (que se pode interferir) que são fundamentais para a condição da peça produzida, além da condição da máquina e ferramental após o processo ser concluído. Segundo Souza, 2011, esse conjunto de variáveis envolve o material da peça, o material e a geometria da ferramenta, os parâmetros de corte e a máquina-ferramenta.

O processo de fresamento tem suma importância na produção de superfícies planas e esquadrejadas, uma vez que permite obter peças nos mais variados tamanhos e geometrias (cilíndricas, côncavas, convexas). Isso se deve ao fato de a ferramenta (fresa) possuir os diversos formatos, garantido versatilidade ao processo. Outro aspecto importante é a grande capacidade de remoção de material [Diniz *et al.*, 2013; Dib *et al.*, 2015]

A operação de acabamento tem papel importante em fresamento, uma vez que é realizada na etapa final de transformação, onde a peça possui um grande valor agregado. Alguns parâmetros de corte têm maior influência sobre o acabamento da superfície fresada: avanço por dente (f_z), raio de ponta da ferramenta (r_ϵ), profundidade de corte axial (a_p) e rotação do eixo-árvore (n) [Souza, 2011].

Durante a usinagem ocorrem eventos complexos tais como atrito, deformações plásticas e ruptura do material [Dib *et al.*, 2015]. Estes eventos causam danos à ferramenta de corte que, embora deva possuir dureza superior à do material da peça e tenacidade suficiente para absorver os impactos (choques, colisões, vibrações) inerentes ao processo, necessita muitas vezes de uma cobertura que lhe confira maior resistência ao desgaste [Seco, 2014].

Ao considerar a necessidade constante de aperfeiçoamento em processos de usinagem, o alto custo atribuído às ferramentas de corte e a sua influência sobre a operação de acabamento tem impacto significativo. Por isso, faz-se necessário estudar e desenvolver novas técnicas que proporcionem um aumento de sua vida útil sem prejudicar a eficiência do processo. Outro fator determinante a ser avaliado é a utilização de fluidos de corte que também tem alto custo envolvido, tanto pela sua aquisição quanto pelo seu descarte adequado. Por outro lado, o descarte inadequado tanto dos fluidos quanto dos cavacos contaminados implica em sérios danos à natureza, além de riscos à saúde dos profissionais envolvidos [Feres, 2009].

De acordo com Bonfá, 2013, aços temperados são geralmente usinados na condição a seco, pois a aplicação de uma refrigeração geralmente conduz a uma falha prematura da ferramenta. Assim, o calor gerado durante o processo, que ajuda o cisalhamento, é reduzido pela ação refrigerante do fluido.

Materiais com alta resistência mecânica como o aço-ferramenta AISI D6 – que tem sua aplicação voltada principalmente para a fabricação de moldes para injeção de plásticos – exigem da ferramenta de corte grande resistência ao desgaste, tenacidade e dureza a quente. As dificuldades intrínsecas ao processo de usinagem de aços de alta resistência e alta dureza podem ser atenuadas mediante as escolhas corretas do meio lubrificante e dos parâmetros de corte aplicados ao processo [Menezes, 2014].

Busca-se, portanto, informações sobre a viabilidade técnica do processo de fresamento de moldes e matrizes utilizando a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) quando comparado ao corte a seco na operação de acabamento do aço AISI D6 endurecido.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 Objetivo Principal

Verificar a influência da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no fresamento frontal de superfícies planas do aço AISI D6 endurecido levando em consideração os seus efeitos sobre a rugosidade da superfície, o aspecto visual da mesma e os desgastes da ferramenta.

2.2 Objetivos Específicos

Analisar comparativamente nas situações de corte a seco e utilizando a técnica MQL:

- o desgaste da ferramenta de corte (fresa);
- a geração dos diferentes perfis de rugosidade das superfícies planas fresadas;
- o aspecto visual das superfícies usinadas, tais como entrada e saída da ferramenta e formação de rebarbas;
- a comparação da rugosidade média (R_a) gerada para os dois casos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Processo de Fresamento

A operação de fresamento caracteriza-se pela ferramenta de corte, movimento de corte e movimento de avanço. A ferramenta de corte denominada fresa é provida de uma ou mais arestas cortantes de geometria definida, dispostas simetricamente em relação ao seu eixo. O movimento de corte é gerado pela rotação da fresa em torno do seu próprio eixo onde cada uma das arestas cortantes é responsável pela retirada de porções de material de forma intermitente. O movimento de avanço é executado geralmente pela mesa da máquina, na qual está fixada a peça através de morsa ou dispositivos de fixação específicos e que permitem que a peça passe pela ferramenta em rotação [Diniz *et al.*, 2013].

Segundo Menezes, 2014, o que diferencia o processo de fresamento dos demais processos com rotação da ferramenta, como furação, roscamento e alargamento é a possibilidade de movimentação tanto da peça quanto da ferramenta durante o corte.

A posição do eixo-árvore da máquina-ferramenta classifica o fresamento quanto horizontal (quando o eixo-árvore trabalha na posição horizontal), vertical (quando o eixo-árvore trabalha na posição vertical) ou ainda inclinado. A disposição dos dentes ativos da fresa classifica a operação em tangencial ou frontal sendo que no primeiro o eixo da fresa é paralelo à superfície fresada, enquanto que no fresamento frontal o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada [Diniz *et al.*, 2013].

O fresamento frontal é utilizado principalmente para operações de faceamento, com o intuito de produzir uma superfície plana; também é aplicado para abertura de canais e rebaixos em peças, sendo os dois últimos executados com fresas de topo. As fresas de topo possuem dentes de corte tanto na extremidade quanto na lateral. Assim, a superfície gerada durante o fresamento frontal é caracterizada pela presença de raias deixadas pelos dentes de acordo com o avanço por dente f_z da fresa, como mostra a Figura 3.1.

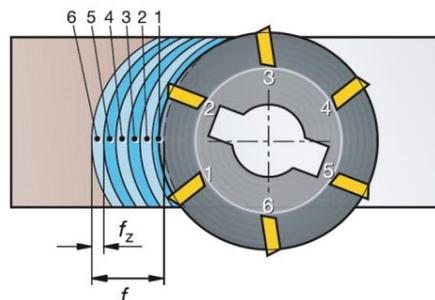


Figura 3.1 – Marcas de avanço deixadas pelos dentes da fresa [Sandvik, 2012].

No fresamento de topo com fresas que utilizam inserts redondos o diâmetro de trabalho (D_w) é diferente do diâmetro nominal da fresa (D_c), uma vez que o primeiro depende da profundidade de corte (a_p), e o raio de ponta da ferramenta (r_ϵ) como ilustrado na Equação (3.1) e na Figura 3.2 [Seco, 2014].

$$D_w = D_c + 2 \cdot \sqrt{r_\epsilon^2 - (r_\epsilon - a_p)^2} \quad (3.1)$$

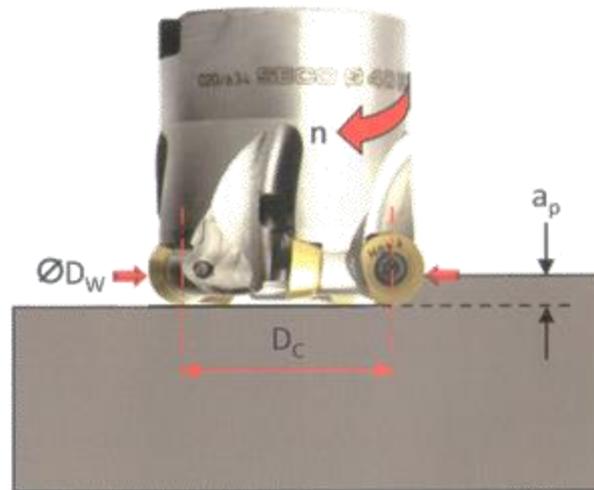


Figura 3.2 – Influência da profundidade de corte (a_p) sobre o diâmetro de trabalho (D_w) [Seco,2014].

No fresamento frontal, a profundidade de corte radial (a_e) é consideravelmente maior do que a profundidade de corte axial (a_p). Embora seja possível utilizar a profundidade de corte radial (a_e) equivalente ao diâmetro efetivo da fresa de topo esférico (d_n), é aconselhável usar com apenas 66% do contato radial, uma vez que essa redução tende a aumentar a vida útil da ferramenta uma vez uma parcela dos inserts não estarão realizando o corte durante uma volta completa da fresa. [Fitzpatrick, 2013].

3.2 Usinagem de Moldes e Matrizes

As técnicas de fabricação de moldes e matrizes têm passado por algumas alterações principalmente nas duas últimas décadas devido ao desenvolvimento de produtos com geometrias cada vez mais complexas. Destaca-se também a necessidade de implantar processos mais produtivos e capazes de gerar produtos de alta qualidade [Oliveira, 2007].

A utilização de técnicas empregando gabaritos, fresadoras copiadoras, pantógrafos e usinagem através eletroerosão por penetração já foram as mais aplicadas na produção de moldes e matrizes. Além de necessitarem de mão-de-obra altamente qualificada e grande experiência, as técnicas anteriores demandam ainda altos tempos de produção devidos principalmente às baixas taxas de remoção de material e limitações para fabricação de geometrias complexas [Fitzpatrick, 2013].

O emprego combinado das técnicas CAD (*Computer-Aided Design*), CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) e CNC, juntamente com o desenvolvimento de ferramentas de alta resistência e versatilidade, têm trazido resultados significativos ao processo de usinagem. Outro aspecto importante é aplicação da técnica HSM (*High-Speed Machining*), que de acordo com Vicente Neto, 2012, permite altas taxas de remoção de cavaco, redução do tempo de usinagem, baixos esforços de corte, grande dissipação do calor, aumento da precisão e capacidade de gerar superfícies com alto grau de acabamento.

Segundo Menezes, 2014, a usinagem de aços de altas durezas é complexa, pois em geral os materiais passam por tratamentos térmicos que podem elevar sua dureza para faixas de até 62 HRC. Portanto, além de técnicas de usinagem avançadas, é necessário que as ferramentas de corte possuam boa tenacidade. Algumas coberturas são adicionadas, como TiN, TiCN e TiAlN, que têm como características a resistência ao desgaste, aumentando a vida da ferramenta. As ferramentas para este tipo de usinagem devem possuir preferencialmente os maiores diâmetros possíveis para que ocorra uma alta taxa de remoção de cavaco além de contribuir com a rigidez da ferramenta para reduzir as deflexões com a redução da relação comprimento/diâmetro (L/D_c).

3.3 Aço AISI D6

Os aços-ferramenta, utilizados na fabricação de moldes e matrizes, possuem como característica a grande dificuldade de usinagem. Esses aços são compostos geralmente de altos teores de carbono (C), cromo (Cr), molibdênio (Mo), vanádio (V) e tungstênio (W). A combinação desses elementos forma compostos à base de carbonetos que apresentam elevada dureza e resistência ao desgaste e à abrasão [Callister, 2012].

Na fabricação de matrizes e punções para trabalho a frio geralmente são aplicados os aços AISI A2, D2, D3, D4, D6 e W2, enquanto que na produção de moldes que irão executar trabalhos a quente, como injeção de plásticos e ligas de alumínio e também fundição, os materiais recomendados são AISI H11, H12, H13, P20 e P21 [Menezes, 2014].

O aço AISI D6 é amplamente utilizado da fabricação de ferramentas para corte a frio como matrizes e punções. Também pode ser aplicado na produção de ferramentas para forjamento e lâminas para corte de madeira e chapas de aço de baixa espessura. Segundo Villares, 2009, suas características mais importantes são a excelente resistência à abrasão e alta estabilidade dimensional. A Tabela 3.1 indica de forma comparativa algumas características importantes de aços aplicados na fabricação de moldes e matrizes e a Tabela A1 (Anexo) apresenta a ficha técnica do aço VC131 (similar ao AISI D6 conforme Villares, 2009).

Tabela 3.1 – Características de aços de alta resistência [adaptada de Menezes, 2014]

Decrescem: Resistência ao choque e usinabilidade Crescem: Profundidade de têmpera, resistência ao amolecimento pelo calor				
Cresce: a resistência à abrasão Decresce: a resistência ao choque		Trabalho à frio Deformação na têmpera é fator secundário	Trabalho à frio Deformação na têmpera é importante	Trabalho à quente Baixa deformação (resistência ao calor é o principal fator)
	Máxima resistência à abrasão	F2, W1, W2	D2, D3, D6	M2, M3, T5, T8
	Média resistência à abrasão (ferramentas de corte em geral)	W1, W2	A2, 07	M1, M2, T1
	Baixa resistência à abrasão (matrizes em geral)	W1, W2	01, 02, L6	E2365, H21, H12, H13
	Ferramentas resistentes ao choque	S1, E2542, E2550	S5, E2542	H11, H12, H13, E2714

3.4 Mínima Quantidade de Lubrificante

Durante os processos de usinagem podem ocorrer problemas devido à lubrificação e/ou refrigeração deficientes, que afetam tanto a peça como a integridade da ferramenta de corte gerando trocas constantes de ferramenta, baixa produtividade e problemas com o acabamento usinado. Entretanto, o uso abundante de fluido lubrificante traz problemas como o descarte de resíduos, contaminação dos cavacos e riscos à saúde do operador [Feres, 2009].

Segundo Scandiffio, 2000, uma solução alternativa ao uso da técnica de usinagem com fluido abundante e nas situações onde não há viabilidade do corte completamente a seco é a utilização da técnica de usinagem com mínima quantidade de lubrificante (MQL). Nessa prática um volume muito pequeno de óleo é pulverizado nas interfaces peça/ferramenta/cavaco em um fluxo de ar comprimido com a finalidade de reduzir principalmente o coeficiente de atrito.

A vazão mínima de óleo na mistura pode chegar a valores bastante baixos, em torno de 2,0 ml/h de acordo com Bonfá, 2013. Já para valores superiores, Scandiffio, 2000, cita valores que podem chegar a 200 ml/h. Em vazões mais altas podem ocorrer problemas tais como o surgimento de vapores, névoa e fumaça, demandando um sistema de exaustão eficiente instalado junto ao equipamento. Algumas empresas têm produzido fluidos de corte integrais sintéticos com propriedades biodegradáveis para serem utilizados especificamente com a técnica MQL, além de disponibilizar o próprio dispositivo para aplicação (Fig. 3.3).



Figura 3.3 – Nebulizador IV Tapmatic [Quimatic, 2016].

Durante operações de fresamento em baixas rotações, a lubrificação das interfaces peça/ferramenta/cavaco fica facilitada, pois para que isso ocorra efetivamente, o fluido deve penetrar nas interfaces em um fluxo contrário ao fluxo da peça e do cavaco. Já em altas rotações, o fluido tem maior dificuldade em penetrar nas interfaces. Assim, a função primária do fluido passa a ser a refrigeração, pois o calor gerado nas interfaces aumenta com o aumento da rotação [Bonfá, 2013; Diniz *et al.*, 2013].

Com a utilização de MQL, as gotículas de fluido são aceleradas pelo fluxo de ar comprimido e têm uma maior facilidade de penetração nas interfaces acima citadas devido às baixas velocidades relativas entre ferramenta/peça e ferramenta/cavaco, cumprindo seu papel mais importante neste caso que é de lubrificação [Diniz *et al.*, 2013].

Dentre os principais benefícios gerados pela utilização de MQL estão a redução da contaminação do cavaco pelo fluido e problemas logísticos ligados ao preparo da mistura e descarte do fluido contaminado, além da melhora do desempenho da ferramenta quando comparada à usinagem a seco [Bonfá, 2013]. Outro ponto positivo citado por Bonfá, 2013, é a redução do coeficiente de atrito durante a operação de torneamento de aço. Conforme Scandiffio, 2000, a utilização de MQL tem uma aplicação voltada geralmente para furação e mandrilamento em ferro fundido, além de fresamento de acabamento em ligas de alumínio.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de fresamento foram realizados em um centro de usinagem Romi modelo Discovery 560, com capacidade rotação máxima de 12000 rpm e potência máxima de 10 cv (7,35 kW) disponível no Centro de Formação Profissional SENAI Lindolfo Collor em São Leopoldo, RS (Fig. 4.1a). Cada peça foi usinada com fixação de forma individual, sendo fixada com o auxílio de morsa de precisão presa à mesa da máquina facilitando a troca rápida e mantendo as referências estabelecidas durante a preparação da máquina (Fig. 4.1b).



(a)



(b)

Figura 4.1 – Setup experimental: (a) centro de usinagem Romi Discovery 560; (b) sistema para fresamento.

Para o experimento foram utilizados oito corpos de prova em aço AISI D6 temperado e revenido a uma dureza de (57 ± 2) HRC e dimensões de 15,88 x 75 x 150 mm. Em cada peça foram executados 14 passes de fresamento frontal (sete passes em cada lado) com profundidade de corte radial de 100% da ferramenta, ou seja, a_e igual ao diâmetro nominal da fresa (d_n).

A Figura 4.2 mostra o desenho do corpo de prova antes da usinagem e a imagem de um corpo de prova usinado como teste preliminar.

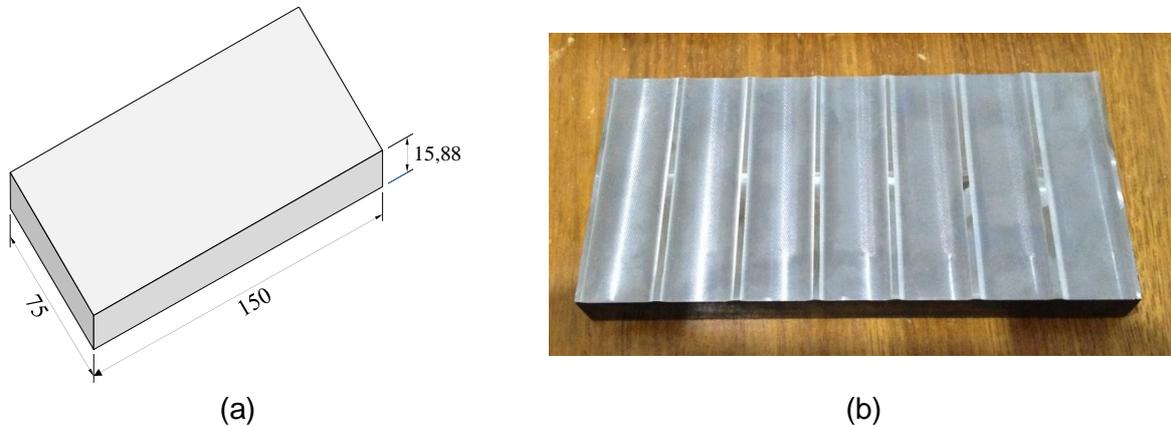


Figura 4.2 – Corpo de prova: (a) croqui antes da usinagem; (b) imagem após a usinagem.

A experimentação foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa, quatro corpos de prova foram usinados completamente a seco. Na segunda, foi utilizada a técnica de MQL para os quatro corpos de prova restantes.

Para a aplicação do óleo integral em MQL (sistema aspessor) foi utilizado o Nebulizador IV Tapmatic apresentado na Figura 4.3 juntamente com o sistema montado. O equipamento foi acoplado ao sistema de saída de ar comprimido do centro de usinagem e a pressão de ar comprimido utilizada na aspensão foi de 5 bar.



Figura 4.3 – Sistema experimental destacando o Nebulizador IV Tapmatic.

A fixação do Nebulizador IV ao cabeçote da máquina foi feita através de base magnética (imã), facilitando o posicionamento. O ar comprimido foi aplicado junto ao fluido de corte integral sintético a base d'água QUIMATIC JET desenvolvido especialmente para este tipo de aplicação. A vazão de fluido foi regulada próximo aos 80 ml/h, ficando entre valores citados pela literatura.

A ferramenta de corte utilizada para os ensaios é uma fresa de aço temperado SECO modelo R 217.29 – 2525.3 – 05.3.050 com diâmetro nominal de 25 mm e capacidade para três pastilhas redondas intercambiáveis conforme Figura 4.4. A fixação da fresa foi feita com sistema Weldon e a montagem na árvore se deu através de cone ISO 40 com fixação pneumática.

Já os inserts intercambiáveis são classe H (para materiais endurecidos) também da marca SECO, modelo RDKW 10T3MOT – MD06, F15M redondos com diâmetro de 10 mm (vide Fig. 4.4b) e coberturas de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) e nitreto de titânio (TiN) por deposição física de vapor (PVD).

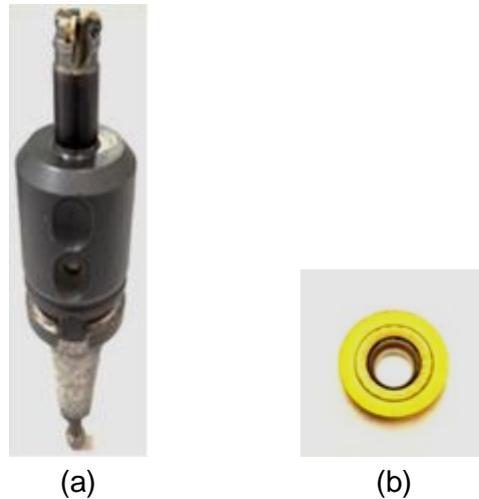


Figura 4.4 – Ferramenta de corte: (a) conjunto montado; (b) pastilha intercambiável.

Cada corpo de prova (14 passes) foi usinado utilizando uma aresta de corte (de um mesmo conjunto de pastilhas) identificada utilizando um lápis elétrico para gravação; após o término de cada peça, uma nova aresta foi identificada e posicionada para a usinagem da peça seguinte. A Figura 4.5 mostra um dos inserts utilizados indicando as regiões da pastilha onde estão as arestas de corte que realizaram a usinagem dos corpos de prova (CP1 a CP4). Os inserts utilizados nos demais corpos de prova (CP5 a CP8) foram identificados da mesma forma.

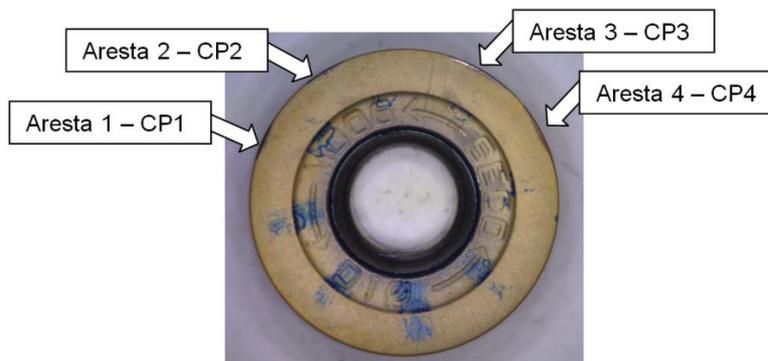


Figura 4.5 – Inserto com identificação das arestas utilizadas.

Os parâmetros de corte utilizados para a usinagem seguiram a recomendação do fabricante da ferramenta. Como variáveis independentes de entrada foram consideradas a profundidade de corte axial (a_p), o avanço por dente (f_z) e a condição de lubrificação (corte a seco e com MQL) totalizando oito combinações diferentes. Além disso, em todos os passes, manteve-se a velocidade de corte constante ($v_c = 55$ m/min). A Tabela 4.1 mostra os dados e a ordem de execução dos passes sobre cada corpo de prova (CP).

Após a usinagem, as 14 superfícies fresadas (passes) nos oito corpos de prova foram submetidos à medição da rugosidade com auxílio de um rugosímetro digital portátil Mitutoyo modelo SJ-201 (Fig. 4.6a) disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS). No caso, foi avaliada a evolução da rugosidade ao longo de cada passe executado pela ferramenta. Além da medição dos valores de rugosidade média (R_a) e total (R_t), os gráficos dos perfis de rugosidade (textura primária) também foram gerados.

Tabela 4.1 – Parâmetros de usinagem.

Corte a seco			Corte com MQL (80 ml/h)		
Corpo de Prova	a_p [mm]	f_z [mm/dente]	Corpo de Prova	a_p [mm]	f_z [mm/dente]
CP1	0,5	0,140	CP5	0,5	0,140
CP2	0,5	0,105	CP6	0,5	0,105
CP3	0,7	0,140	CP7	0,7	0,140
CP4	0,7	0,105	CP8	0,7	0,105

Visando identificar a marca de desgaste de flanco (VB) ao final do último passe e buscar uma relação entre as variáveis de entrada (a_p , f_z e lubrificante) e saída do processo (rugosidades e desgastes), o desgaste da ferramenta de corte foi avaliado com auxílio do microscópio digital Dino-Lite modelo AM-413 ZT (Fig. 4.6b) também disponível no LAUS.



Figura 4.6 – Equipamentos para avaliação do acabamento da superfície usinada: (a) Rugosímetro SJ-201; (b) Microscópio digital Dino-Lite AM-413 ZT.

Além da medição do desgaste no flanco da ferramenta, o microscópio digital Dino-Lite AM-413 ZT também foi utilizado na avaliação qualitativa da superfície usinada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos durante a usinagem foram analisados seguindo basicamente dois aspectos: 1) Análise comparativa da rugosidade média (R_a) e também os estados das superfícies usinadas para ambos os casos (a seco e com MQL); e 2) análise do desgaste gerado na ferramenta de corte ao final da usinagem de cada corpo de prova.

5.1 Análise da Rugosidade da Superfície Fresada

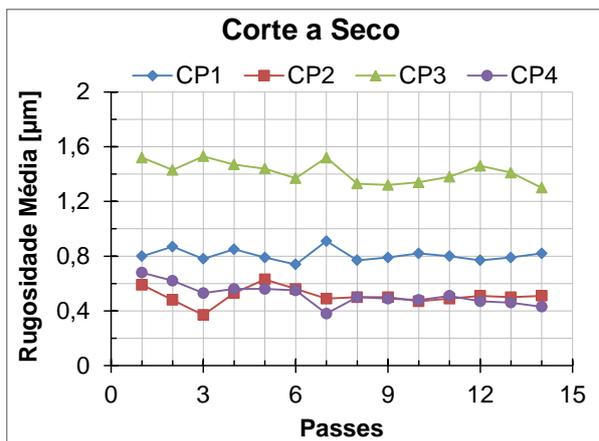
A Tabela 5.1 apresenta os valores da rugosidade média (R_a) obtidos para cada um dos 14 passes realizados nos oito corpos de prova utilizando a usinagem a seco e com MQL.

Na Figura 5.1 pode-se identificar um comportamento já esperado e indagado na literatura [Diniz *et al.*, 2013], mostrando que para a mesma condição de usinagem, o aumento do avanço f_z provoca um aumento da rugosidade superficial da peça. Observa-se também que o aumento da profundidade de corte a_p conduz a um aumento da rugosidade R_a que pode estar relacionado com o aumento das forças de corte, que por sua vez aumenta as possibilidades de deflexão da ferramenta [Machado *et al.*, 2013].

Ao comparar a usinagem a seco e com MQL (Fig. 5.1), percebe-se que existem diferenças entre as rugosidades geradas nos dois casos mantidos os parâmetros de corte para o processo.

Tabela 5.1 – Valores de rugosidade média R_a [μm] medidos.

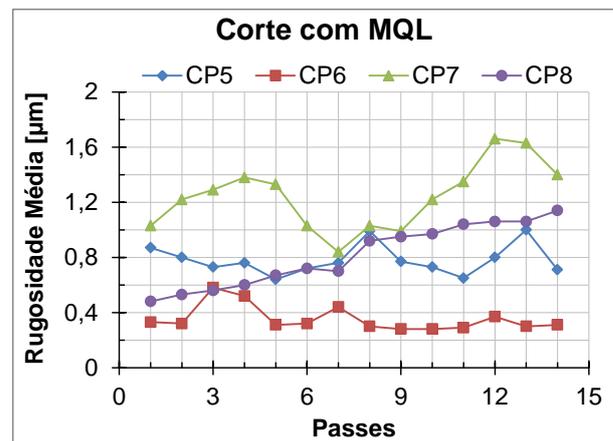
Passe	Usinagem a Seco				Passe	Usinagem com MQL			
	CP1	CP2	CP3	CP4		CP5	CP6	CP7	CP8
1	0,80	0,59	1,52	0,68	1	0,87	0,33	1,03	0,48
2	0,87	0,48	1,43	0,62	2	0,80	0,32	1,22	0,53
3	0,78	0,37	1,53	0,53	3	0,73	0,58	1,29	0,56
4	0,85	0,53	1,47	0,56	4	0,76	0,52	1,38	0,60
5	0,79	0,63	1,44	0,56	5	0,64	0,31	1,33	0,67
6	0,74	0,56	1,37	0,55	6	0,72	0,32	1,03	0,72
7	0,91	0,49	1,52	0,38	7	0,76	0,44	0,84	0,70
8	0,77	0,50	1,33	0,50	8	0,99	0,30	1,03	0,92
9	0,79	0,50	1,32	0,49	9	0,77	0,28	0,99	0,95
10	0,82	0,47	1,34	0,48	10	0,73	0,28	1,22	0,97
11	0,80	0,49	1,38	0,51	11	0,65	0,29	1,35	1,04
12	0,77	0,51	1,46	0,47	12	0,80	0,37	1,66	1,06
13	0,79	0,50	1,41	0,46	13	1,00	0,30	1,63	1,06
14	0,82	0,51	1,30	0,43	14	0,71	0,31	1,40	1,14



$f_z = 0,140$ mm/dente (CP1, CP3, CP5, CP7)

$a_p = 0,5$ mm (CP1, CP2, CP5, CP6)

(a)



$f_z = 0,105$ mm/dente (CP2, CP4, CP6, CP8)

$a_p = 0,7$ mm (CP3, CP4, CP7, CP8)

(b)

Figura 5.1- Comparação dos valores de R_a gerados na usinagem: (a) a seco; (b) com MQL.

No caso do corte a seco, observam-se poucas variações de rugosidade com os passes realizados, uma vez que a durabilidade dos inserts exigiria um grande número de passes para que houvesse um desgaste significativo. Já no corte com MQL, foram notadas variações significativas, principalmente para a situação com maior profundidade axial de corte a_p (CP7 e CP8). Uma possível causa do fenômeno observado em CP7 seria a vibração gerada pelo maior valor de a_p associada com a alteração do coeficiente de atrito pela aplicação de MQL. Outra hipótese associada ao visto em CP7 seria a mudança na condição de deformação sofrida pelo cavaco em função da refrigeração promovida pelo ar comprimido (pressão de 5 bar). Para o CP8 a explicação seria a falha progressiva da ferramenta (lascamentos sucessivos) que pode ter provocado o aumento da rugosidade. A Figura 5.2 mostra uma imagem da aresta de corte que comprova a avaria na ferramenta. A falha está localizada no limite da aresta ativa de corte e pode ter sido a causa do aumento progressivo da rugosidade.

Para a combinação 1 ($a_p = 0,5$ mm e $f_z = 0,140$ mm/dente), ao se considerar a ferramenta nova (três primeiros passes), pode-se observar que a redução dos valores das rugosidades médias para o corte a seco e com MQL são discretas, enquanto que para as combinações 2

($a_p = 0,5$ mm e $f_z = 0,105$ mm/dente), 3 ($a_p = 0,7$ mm e $f_z = 0,140$ mm/dente) e 4 ($a_p = 0,7$ mm e $f_z = 0,105$ mm/dente), as diferenças foram mais expressivas (respectivamente 15%, 21% e 14%).

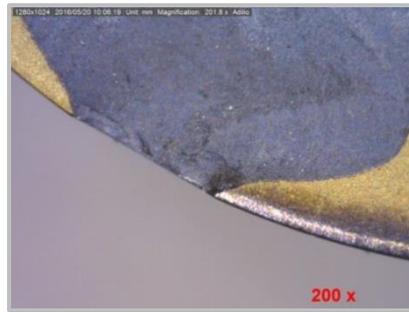


Figura 5.2 - Imagem da superfície de saída da ferramenta de corte utilizada no CP8 apresentando avaria (em cinza).

5.1.1 Análise do perfil de rugosidade e estado da superfície

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram, respectivamente, os perfis de rugosidade e as imagens da superfície dos corpos de prova usinados CP1 (a seco) e CP5 (com MQL) para o passe 1.

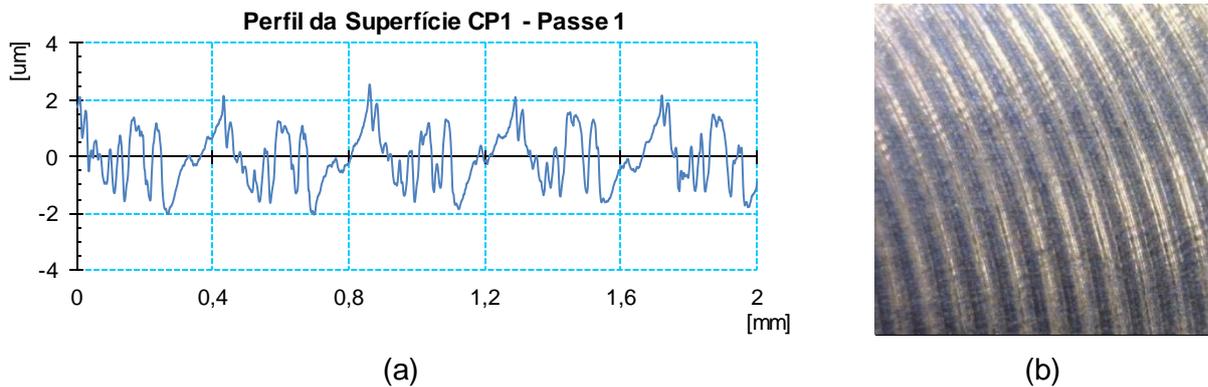


Figura 5.3 – Caracterização da superfície do CP1 para o passe 1: (a) perfil de rugosidade; (b) imagem da superfície (ampliação 50x).

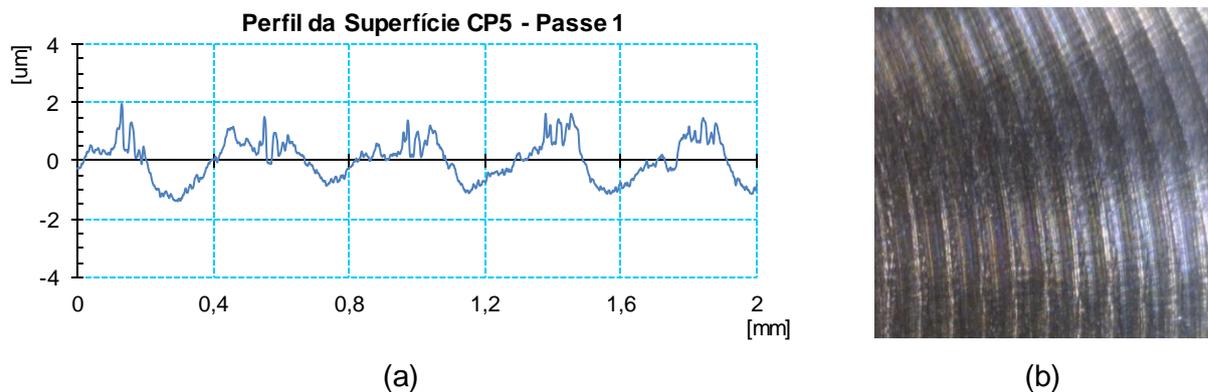


Figura 5.4 – Caracterização da superfície do CP5 para o passe 1: (a) perfil de rugosidade; (b) imagem da superfície (ampliação 50x).

Apesar de apresentarem praticamente o mesmo valor de rugosidade média R_a , os perfis são diferentes. É possível identificar que há uma diferença entre a altura dos picos e profundidade dos vales quando as técnicas (a seco e MQL) são comparadas. Para a usinagem a seco (CP1), a altura dos picos é maior e tem a geometria definida no topo sendo aguda,

enquanto que na usinagem com MQL (CP5), a altura dos picos é menor e sua geometria não está bem definida, apresentando uma série de pequenos picos e vales, gerando um novo micro perfil de rugosidade. Nos vales ocorre que a profundidade se apresenta maior na usinagem a seco, enquanto para a usinagem com MQL o perfil do fundo dos vales se apresenta de forma mais definida. Uma possível causa para os picos de rugosidade seria a facilidade de corte do material ocasionada pela presença do fluido durante o corte com MQL, uma vez que o fluido reduz o coeficiente de atrito na interface ferramenta/peça tornando a superfície melhor definida. As imagens indicam a maior uniformidade para a peça na técnica com MQL (textura mais lisa).

Ao comparar os perfis de rugosidade dos corpos de prova usinados com os parâmetros de corte mais baixos - Combinação 2 ($a_p = 0,5$ mm e $f_z = 0,105$ mm/dente), pode-se identificar a partir das Figuras 5.5 e 5.6 que há uma geometria da superfície mais uniforme no corte a seco; porém, para o mesmo corpo de prova, há uma maior incidência de rebarbas na superfície.

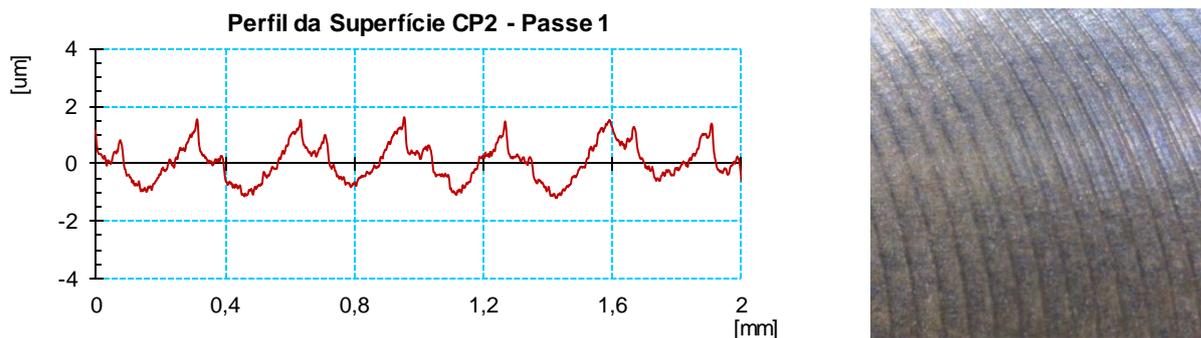


Figura 5.5 – Caracterização da superfície do CP2 para o passe 1: (a) perfil de rugosidade; (b) imagem da superfície (ampliação 50x).

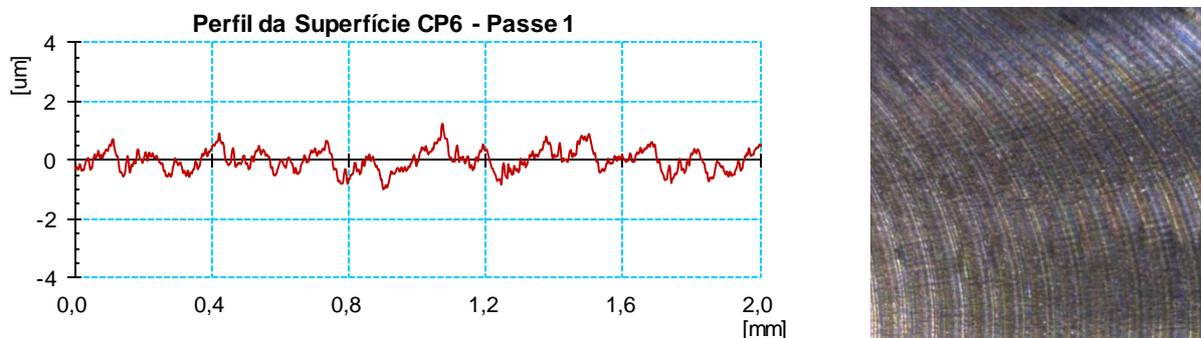


Figura 5.6 – Caracterização da superfície do CP6 para o passe 1: (a) perfil de rugosidade; (b) imagem da superfície (ampliação 50x).

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram, respectivamente, os perfis de rugosidade e as imagens da superfície dos corpos de prova usinados CP3 (a seco) e CP7 (com MQL) para o passe 1 (aresta de corte nova). Pode-se observar que os perfis geométricos são bastante semelhantes, possuindo geometrias bem definidas. Ocorre também para os dois casos a possível presença de rebarbas (picos de rugosidade) ao final do ciclo de uma volta completa da ferramenta.

Como era de se esperar, o corpo de prova CP4 ($a_p = 0,7$ mm e $f_z = 0,105$ mm/dente), teve o perfil da rugosidade com perfil bastante similar ao do CP2 ($a_p = 0,5$ mm e $f_z = 0,105$ mm/dente), ambos para o passe 1 (aresta de corte nova). No entanto, o valor de rugosidade média de CP4 foi ligeiramente maior ao do CP2. O mesmo pode-se dizer para o CP8 em relação ao CP6. A única diferença observada foi uma maior amplitude dos picos de rugosidade do perfil em CP8.

Já para o passe 14 do CP8, onde foi observado o lascamento da aresta (vide Fig. 5.2), pode-se notar que o perfil de rugosidade mostra a formação de picos (possíveis rebarbas) que podem ter sido causados pela lacuna gerada pelo lascamento da aresta (Figura 5.9).

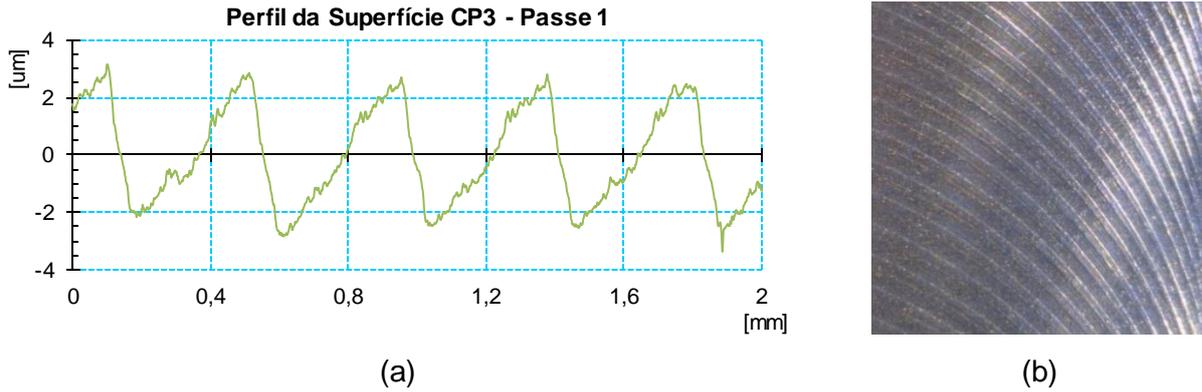


Figura 5.7 – Caracterização da superfície do CP3 para o passe 1: (a) perfil de rugosidade; (b) imagem da superfície (ampliação 50x).

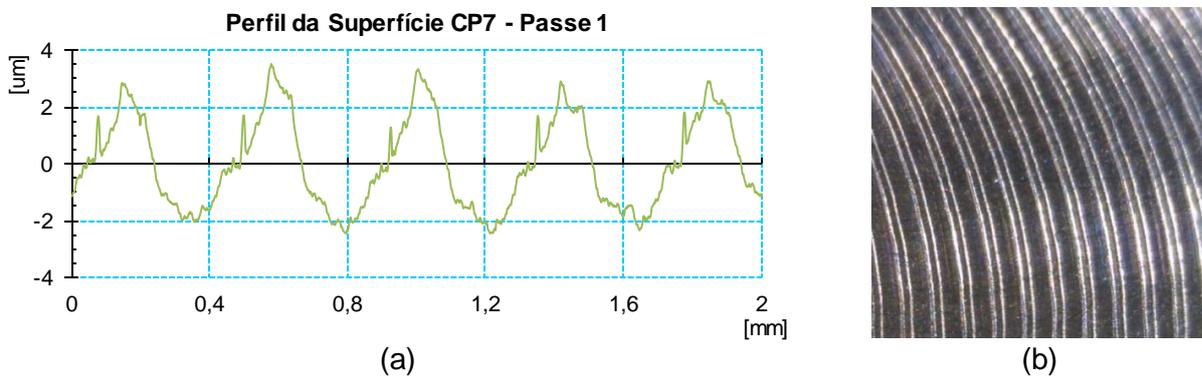


Figura 5.8 – Caracterização da superfície do CP7 para o passe 1: (a) perfil de rugosidade; (b) imagem da superfície (ampliação 50x).

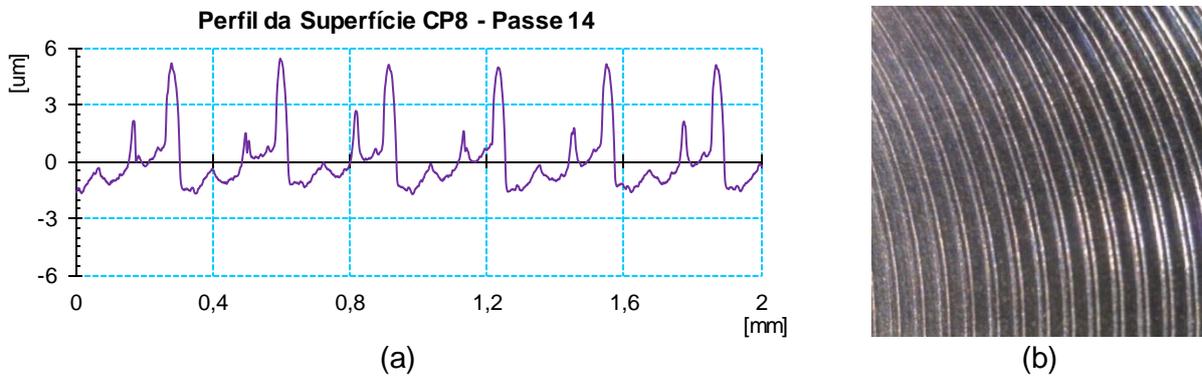


Figura 5.9 – Caracterização da superfície do CP8 para o passe 14: (a) perfil de rugosidade; (b) imagem da superfície (ampliação 50x).

5.2 Análise do Desgaste da Ferramenta de Corte

As Figuras 5.10a e 5.10b apresentam imagens da aresta de corte utilizada para o fresamento utilizando o método a seco e a técnica MQL, respectivamente, na qual está indicado o desgaste de flanco máximo apresentado pelo inserto após o último passe. As duas arestas foram utilizadas com a Combinação 2 ($a_p = 0,5$ mm e $f_z = 0,105$ mm/dente). Na primeira está indicada a área de um lascamento ocorrido na aresta de corte. É possível concluir que o desgaste ocorrido no fresamento a seco é mais severo, tendo um valor máximo que pode chegar ao dobro do desgaste na técnica MQL. Outro aspecto é a não ocorrência de lascamento na segunda (utiliza a técnica do MQL).

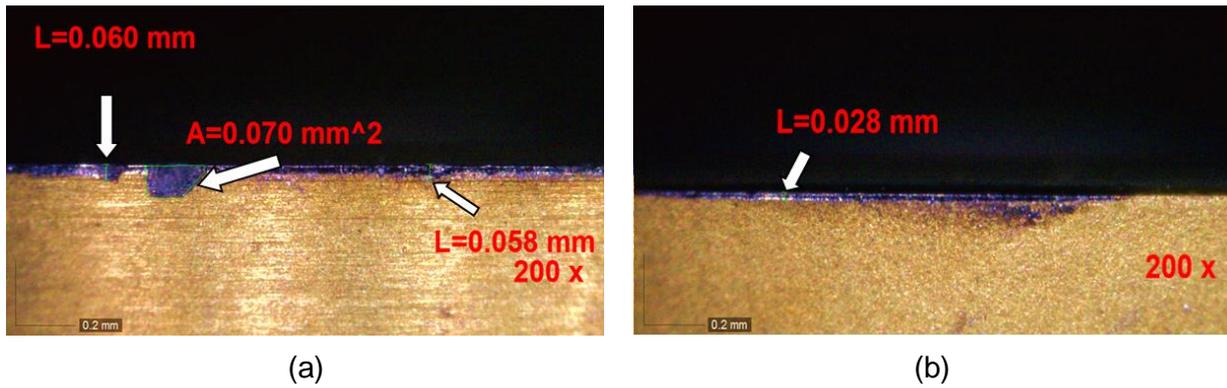


Figura 5.10 – Imagem da superfície de folga da ferramenta de corte para a aresta utilizada na combinação 2 após o passe 14: (a) a seco; (b) com MQL.

A partir das Figuras 5.11a e 5.11b é possível identificar os efeitos do desgaste e da avaria sobre o inserto utilizado na condição de corte mais severa e usinagem a seco – Combinação 3 ($a_p = 0,7$ mm e $f_z = 0,140$ mm/dente). Na primeira, observa-se a presença de trincas térmicas (perpendiculares à aresta de corte) que podem ter levado à quebra da ferramenta. Na segunda, tem-se um lascamento da aresta de corte.

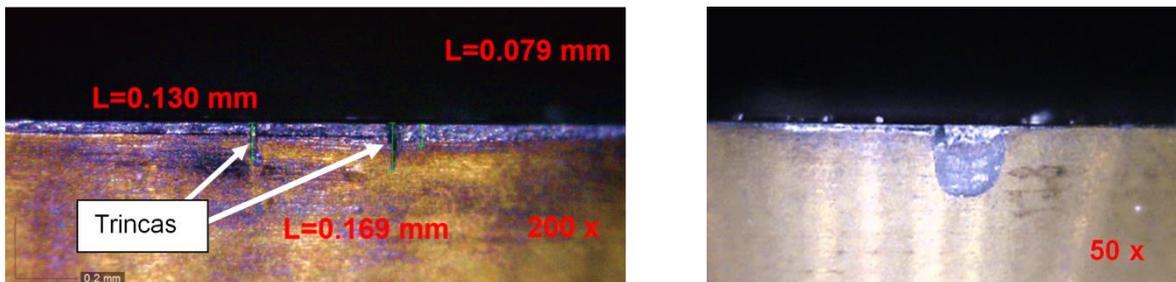


Figura 5.11 – Imagem da superfície de folga da ferramenta de corte para a aresta utilizada na combinação 3 a seco: (a) ampliação 200x; (b) ampliação 50x.

As Figuras 5.12a e 5.12b indicam a presença de desgaste na superfície de saída da ferramenta na combinação 3 ($a_p = 0,7$ mm e $f_z = 0,140$ mm/dente), tanto para a usinagem a seco quanto com MQL.

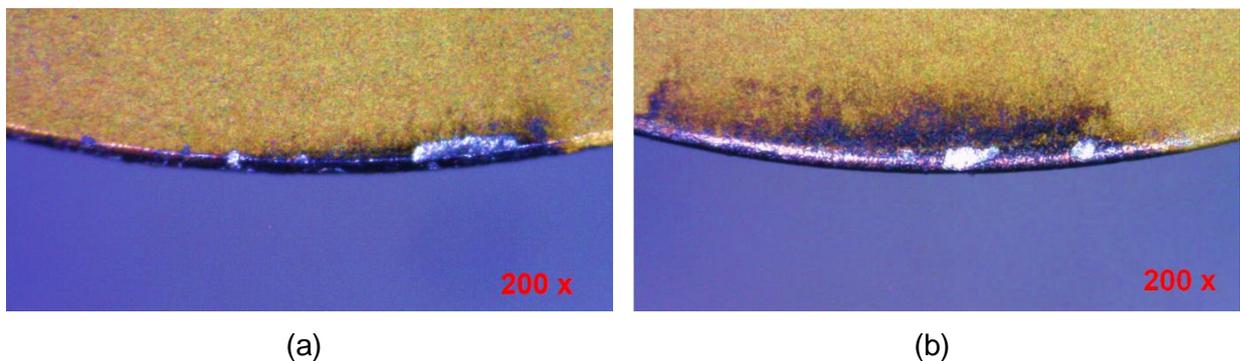


Figura 5.12 – Imagem da superfície de saída da ferramenta de corte com ampliação 200x para a aresta utilizada na combinação 3: (a) a seco; (b) com MQL.

Segundo Machado *et al.*, 2013, a marca de desgaste indicada na Figura 5.12 pode ter sido gerado a partir do mecanismo de aderência e arrastamento (*attrition*), já que a usinagem deu-se em baixas velocidades de corte (55 m/min). Embora o desgaste (aderência) tenha acontecido nos dois insertos, a sua ocorrência apresenta-se de forma menos concentrada na aresta usada com MQL, indicando redução do coeficiente atrito na interface ferramenta/ cavaco.

Já a combinação 4 ($a_p = 0,7$ mm e $f_z = 0,105$ mm/dente) indica que o desgaste máximo de flanco é maior quando a usinagem a seco é utilizada. Isto pode ser constatado pelas Figuras 5.13a e 5.13b, mostrando tal desgaste gerado após o passe 14.

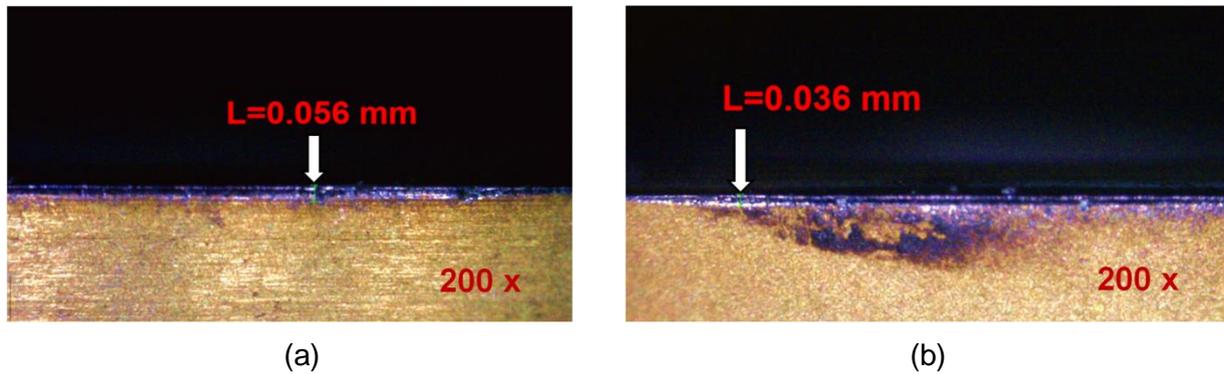


Figura 5.13 – Imagem da superfície de folga da ferramenta de corte com ampliação 200x para a aresta utilizada na combinação 4: (a) a seco; (b) com MQL.

6 CONCLUSÕES

Através da análise dos dados experimentais é possível concluir que o uso da técnica de usinagem com MQL no aço AISI D6 endurecido tem influência sobre a rugosidade da superfície, sendo que o método produziu valores de rugosidade inferiores quando comparados aos obtidos pela usinagem a seco (sendo obedecidos os mesmos parâmetros). Para os corpos de prova CP6 e CP7 a redução da rugosidade média (R_a) em relação aos corpos de prova CP2 e CP3 chegou em média a 15% e 21% respectivamente.

Através dos gráficos dos perfis de rugosidade apresentados, é possível constatar na comparação do corte a seco com o corte com MQL uma aparente redução da amplitude dos picos, mas principalmente dos vales (especialmente nas combinações 1 e 2). Outro aspecto a ser considerado é a redução da formação de rebarba na usinagem com MQL.

Quanto ao desgaste da ferramenta de corte, embora não se tenha chegado ao fim de vida é possível concluir a partir das imagens obtidas e correlacionando com as rugosidades medidas que o uso de fluido adicionado ao ar comprimido ocasionou um menor desgaste de flanco no inserto, além da redução de outros danos como lascamentos e adesão, na comparação com o corte a seco. Essa redução pode ter sido motivada pelo efeito lubrificante exercido pelo fluido, reduzindo o coeficiente de atrito na interface peça/ferramenta/cavaco.

Portanto, constata-se a partir dos dados que a usinagem com MQL pode ser uma boa alternativa no fresamento de aços endurecidos, principalmente no que diz respeito à rugosidade superficial e vida da ferramenta de corte.

Como trabalho futuro, sugere-se a variação da vazão do MQL para uma análise mais criteriosa sobre os perfis de rugosidade e sobre a formação do cavaco.

REFERÊNCIAS

Bonfá, M. M. “**Torneamento do aço endurecido AISI D6 utilizando mínima quantidade de fluido de corte**”, Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, 122p.

Callister, W. D. “**Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**”, 8 ed., Rio de Janeiro, LTC, 2012. 817p.

Dib, M. H. M., Benjamin, G. M., Jasinevicius, R. G., 2015, “**Uma análise experimental do fresamento discordante e concordante**”, Revista Iluminart, v. 7, n. 13, p.113-128.

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

Feres, F., 2009, **“Conheça o que é tendência em refrigeração: métodos que proporcionam segurança aos operadores e preservam o meio ambiente são o caminho futuro”**. Revista O Mundo da Usinagem, v. 61, n. 7, p.14-18.

Ferrari, C., 2015, **“Análise comparativa dos métodos MQL, MQL/Água e convencional na retificação cilíndrica do aço ABNT 52100, com rebolo de óxido de alumínio”**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, Bauru, SP, 88p.

Fitzpatrick, M. **“Introdução aos processos de usinagem”**, 1 ed., Porto Alegre, AMGH, 2013, 448p.

Lima, R. O. C., Melo, A. C. A., 2013, **“Análise do desgaste e das avarias em insertos de metal duro após o fresamento com ar quente”**. 7º Congresso de Engenharia de Fabricação, 20-24 maio, Penedo, Itatiaia, RJ, 10p.

Menezes, L. J., 2014, **“Estudo das condições dimensionais e forças geradas no fresamento de aço endurecido”**, Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 81p.

Machado. A. R., Abrão, A. M., Silva, M. B, Coelho. R. T. **“Teoria da usinagem dos materiais”**, 1 ed., São Paulo, Blucher, 2009, 371p.

Vicente Neto, L., 2012, **“Análise do efeito da metodologia de interpolação da trajetória da ferramenta de usinagem na etapa de polimento de moldes e matrizes”**, Dissertação (Mestrado), Universidade Metodista de Piracicaba, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e urbanismo, Santa Barbara d'Oeste, SP, 92p.

Oliveira, a. J., 2007, **“Análise do desgaste de ferramentas no fresamento com altas velocidades de aços endurecidos”**, Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 232p.

Quimatic, 2016, **“Nebulizador IV” Tapmatic**, Disponível em: www.quimatic.com.br/produtos/usinagem/nebulizador-4/.

Sandvik, 1999, **“Fabricação de Moldes e Matrizes: Guia de Aplicação”**. Sandvik Coromant, 202p.

Sandvik, 2012, **“Manual Técnico de Usinagem, Parte D – Fresamento”**, Sandvik Coromant, São Paulo, 197 p.

Scandiffio, I., 2000, **“Uma contribuição ao estudo do corte a seco e ao corte com mínima quantidade de lubrificante em torneamento de aço”**, Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 78p.

Seco, 2014, **“Fundamentos do Fresamento”**, Seco Tools, 174p.

Souza, A.J., 2011, **“Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 2: Processos de Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida”**, UFRGS, Apostila, 113p.

Villares, 2009, **“VC131 – Aço ferramenta para trabalho a frio”**, Ficha Técnica, Villares Metals, Disponível em www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131. Acesso em 04/02/2016.

ANEXO

Tabela A1 – Ficha técnica do aço VC131 [adaptado de Villares, 2009].

Composição Química	C - 2,1%	Cr - 11,5%	W - 0,7%	V - 0,15%
Normas / Similares	DIN X 210 CrW 12; Wnr 1.2436; AISI D6; ABNT D6; JIS G 4404-72; Tipo SDK 2.			
Características gerais	Alta estabilidade dimensional e excelente resistência ao desgaste, especialmente em condições abrasivas.			
Estado de fornecimento	Recozido, com dureza máxima de 250HB.			
Aplicações Típicas	Matriz de corte, facas e tesouras de alto rendimento, para cortes de chapas de aço silício e chapas de aço de até 4 mm de espessura; estampos para corte de precisão na indústria de papel. Placas de revestimento de moldes para tijolos e ladrilhos, ferramentas para prensagem de pós-metálicos e materiais altamente abrasivos; guias para máquinas operatrizes, réguas para retificadoras; peças de desgaste de calibres, micrômetros e ferramentas em geral, que exige a máxima resistência à abrasão e retenção de corte.			
Alívio de tensões	Deve ser realizado após usinagem e antes da têmpera. O alívio de tensões é necessário em peças com gravuras e perfis, nas quais a retirada de material tenha sido superior a 30%, a fim de minimizar as distorções durante a têmpera. O procedimento de alívio deve envolver aquecimento lento até temperaturas entre 500 e 600 °C e resfriamento em forno até a temperatura de 200 °C. Se aplicado após o trabalho, o alívio de tensões deve ser realizado em uma temperatura 50 °C inferior a temperatura do último revenimento.			
Têmpera	O aquecimento para têmpera deve ser entre 950 e 970 °C. Recomenda-se pré-aquecer as ferramentas. Resfriar em: - Óleo apropriado, com agitação e aquecido entre 40 e 70 °C. - Banho de sal fundido, mantido entre 500 e 550 °C. - Ar calmo. Pode ser temperado em forno a vácuo desde que utilizadas elevadas pressões de resfriamento (acima de 5 bar). Neste caso, a penetração de têmpera está atrelada a uma correta montagem da carga e a valores limites de seções transversais.			
Revenimento	As ferramentas devem ser revenidas imediatamente após a têmpera, tão logo atinjam 60 °C. Fazer, no mínimo, 2 revenimentos e entre cada revenimento as peças devem resfriar lentamente até a temperatura ambiente. Temperaturas de revenimento devem ser escolhidas conforme a dureza desejada (curva abaixo). O tempo de cada revenimento deve ser, de no mínimo, 2 horas. Para peças maiores que 70 mm, deve-se calcular o tempo em função de sua dimensão. Considerar 1 hora para cada polegada de espessura.			