

**Universidade de Brasília - UnB**

**Faculdade UnB Gama - FGA**

**Engenharia Automotiva**

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE E  
ACABAMENTO SUPERFICIAL DA PEÇA NO TORNEAMENTO  
PARALELO DE TITÂNIO COM DIFERENTES SISTEMAS DE  
LUBRIFRIGERAÇÃO**

**Autor: Pedro de Souza Camargo**

**Orientador: Prof. Rhander Viana**

**Brasília, DF**

**2017**



**PEDRO DE SOUZA CAMARGO**

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE E ACABAMENTO SUPERFICIAL DA  
PEÇA NO TORNEAMENTO PARALELO DE TITÂNIO COM DIFERENTES SISTEMAS DE  
LUBRIFRIGERAÇÃO**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Prof. Dr. Rhander Viana

**Brasília, DF**

**2017**

## **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

CAMARGO, Pedro de Souza.

AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE E ACABAMENTO SUPERFICIAL DA PEÇA NO TORNEAMENTO PARALELO DE TITÂNIO COM DIFERENTES SISTEMAS DE LUBRIFRIGERAÇÃO/ Pedro de Souza Camargo - Brasília: UnB, 2017. 13 p. : il. ; 29,5 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília  
Faculdade UnB Gama, Brasília, 2017. Orientação: Rhander  
Viana.

1. Titânio. 2.MQL. 3. Torneamento. I. VIANA, Rhander. II.  
Avaliação do desgaste da ferramenta de corte e acabamento  
superficial da peça no torneamento paralelo de titânio com  
diferentes sistemas de lubrificação.

CDU 00:000:000.0



**Pedro de Souza Camargo**

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE E ACABAMENTO  
SUPERFICIAL DA PEÇA NO TORNEAMENTO PARALELO DE TITÂNIO COM DIFERENTES  
SISTEMAS DE LUBRIFRIGERAÇÃO**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 14 de Dezembro de 2017, apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof.Dr. Rhander Viana**

Orientador

---

**Prof.Me. Danilo dos Santos Oliveira**

Membro Convidado

---

**Prof.Me. José Henrique de Oliveira**

Membro Convidado

Brasília, DF  
2017

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter condições de lutar e conseguir alcançar um dos meus objetivos de vida. Agradeço aos meus pais Edleusa e Norberto e minha irmã Jordanna, por todo amor e dedicação me apoiando durante esses anos de graduação. Agradeço a Maíta, pela paciência e carinho comigo, cuidando de nosso filho enquanto eu me dedicava aos estudos. Agradecimento especial a meu orientador Rhander por todo apoio apresentado, aos amigos Henrique e Danilo pela dedicação, ao amigo Mario Mendes e família. Aos tios Inês e Geovanni. Aos amigos das repúblicas Tião Carreiro, Friboi e Manolada, por todos os momentos vividos apoiando uns aos outros nessa jornada.

*“Eu sei quem sou, e sei pelo que devo lutar.  
Se você acha que meu orgulho é grande, é  
porque não viu o tamanho da minha fé.” (Tião  
Carreiro)*

# SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                      | 5  |
| 2. MATERIAIS E MÉTODOS.....             | 6  |
| 2.1 ENSAIOS DE VIDA DE FERRAMENTA ..... | 7  |
| 2.2 ENSAIOS DE RUGOSIDADE.....          | 9  |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....          | 11 |
| 3.1 ENSAIOS DE DESGASTE .....           | 11 |
| 3.2 ENSAIOS DE RUGOSIDADE.....          | 13 |
| 4. CONCLUSÕES.....                      | 14 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....      | 16 |



Universidade de Brasília  
FGA - Engenharia Automotiva  
Trabalho de Conclusão de Curso II

# AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE E ACABAMENTO SUPERFICIAL DA PEÇA NO TORNEAMENTO PARALELO DE TITÂNIO COM DIFERENTES SISTEMAS DE LUBRIFRIGERAÇÃO

**Pedro de Souza Camargo**

Universidade de Brasília Faculdade de Gama

e-mail: pedrosceng@gmail.com

**Rhander Viana**

Universidade de Brasília Faculdade Gama

e-mail: rhanderviana@gmail.com

## RESUMO

*Titânio e suas ligas são ideais para aplicações que exigem resistência à alta temperatura, propriedades anticorrosivas e antioxidativas, além de elevada resistência mecânica e baixa densidade. Possui grande afinidade química com oxigênio a altas temperaturas, exigindo controle de temperatura durante processo de usinagem. Este trabalho tem como objetivo comparar o desgaste da ferramenta de metal duro e a rugosidade superficial da peça no torneamento paralelo de titânio utilizando técnicas de lubrificação e refrigeração do tipo a seco, MQL e jorro. Os resultados mostraram uma maior vida útil da ferramenta com a utilização de fluido de corte em abundância ao passo que apresentou desgaste do flanco médio do tipo cratera com possível evolução para falha catastrófica, acompanhado de melhor acabamento superficial para rugosidade máxima Rz.*

**Palavras-chave:** Titânio, MQL, torneamento.

## ABSTRACT

Titanium and its alloys are ideal for applications requiring high temperature resistance, anti-corrosion and anti-oxidation properties, as well as high mechanical strength and low density. They are materials that have high chemical affinity with oxygen at high temperatures, requiring temperature control during the machining process, which can be performed with the use of

refrigeration systems as well as lubrication. This work aims to evaluate the wear of the M grade carbide tool and the surface roughness of the workpiece in titanium parallel turning using lubrication and cooling techniques using flood and MQL, as well as dry turning. The results showed a longer tool life with the use of cutting fluid in abundance whereas it showed crater type flank wear with possible evolution to catastrophic failure, accompanied by a better surface finish for RZ maximum roughness.

**Keywords:** Titanium, MQL, turning.

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade e a produtividade do produto são fatores importantes na indústria metal mecânica especialmente quando se trabalha com metais difíceis de serem conformados ou aplicados em peças de alta responsabilidade, como é o caso da utilização do titânio puro e suas ligas especiais de aplicação restrita.

O titânio puro é muito utilizado na indústria biomédica, e suas ligas são amplamente utilizadas pela indústria aeronáutica, aeroespacial, militar, naval, de óleo e gás, química e petroquímica, devido a suas propriedades únicas, tais como elevada resistência a corrosão, boa resistência à oxidação em temperaturas inferiores a 600°C, biocompatibilidade, elevada relação resistência/peso e capacidade de suportar elevadas temperaturas mantendo sua resistência mecânica (Leyens e Peters, 2003; Khan e Maity, 2017).

O titânio puro e suas ligas também são conhecidos pela dificuldade de serem usinados. Segundo Machado *et al.* (2011) a dificuldade na usinagem do titânio é diretamente proporcional ao aumento do teor dos elementos de liga e o aumento da fase  $\beta$  dispersa na matriz do material. Problemas associados ao processo de extração do minério, sua pobre condutividade térmica e sua elevada afinidade química com diversos materiais causam o rápido desgaste da ferramenta de corte (Guo e Jawahir, 2009).

Na usinagem do titânio a área de corte concentra elevadas temperaturas, de aproximadamente 1000 °C mesmo para velocidades de corte moderadas (Khan e Maity, 2017). As temperaturas elevadas desenvolvidas na área de corte do titânio resultam em uma maior força de corte, elevada imprecisão dimensional da peça e menor vida útil da ferramenta (Jahediet *al.*, 2009).

A usinagem de titânio, seja ele puro ou contendo elementos de liga, requer uma seleção adequada do material da ferramenta antes do processo de corte. Para melhorar o desempenho da ferramenta de corte na usinagem de titânio, várias abordagens foram testadas nas últimas décadas, como a aplicação de ar comprimido a altas pressões, aplicação de fluido de corte pela técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), aplicação de técnicas híbridas de

MQL com criogenia (CO<sub>2</sub> ou N<sub>2</sub>), aplicação de fluido de corte a baixas temperaturas e tratamento criogênico da ferramenta de corte.

Essas abordagens podem afetar significativamente os principais aspectos da usinagem do titânio, como a resistência ao desgaste da ferramenta, temperatura na zona de corte, qualidade da superfície usinada, variação dimensional e força de corte.

O propósito deste estudo é avaliar a vida de insertos de metal duro da classe M por meio da medição do desgaste de flanco médio da ferramenta, e o acabamento superficial da peça usinada com as medições dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq e Rz, no torneamento de titânio utilizando técnicas de lubrificação e refrigeração por jorro e MQL, e também no torneamento a seco.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma da Fig. (1) a seguir mostra a organização adotada para execução do trabalho proposto. Conforme a Fig. (1), a execução do trabalho teve início com o ensaio de vida de ferramenta com três variações - a seco, com jorro e com aplicação de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). A seguir foi executado o ensaio de rugosidade também com três variações no torneamento - a seco, com jorro e com aplicação de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL).



Figura 1 - Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados. (Fonte: Próprio autor).

## 2.1 ENSAIOS DE VIDA DE FERRAMENTA

O objetivo destes ensaios foi comparar o desempenho de insertos de metal duro da classe M no torneamento de titânio com aplicação de jorro, MQL e a seco. A escolha intencional da classe M de metal duro, utilizada para aços inoxidáveis, objetivou acelerar o desgaste dos insertos, uma vez que a classe de metal duro adequada para usinagem de titânio é a classe S. O material disponível eram duas barras maciças de titânio de 400 mm de comprimento e 12,7 mm de diâmetro.

Para a análise do desempenho dos insertos foram adotados dois critérios de fim de vida: o primeiro é o desgaste de flanco médio da ferramenta,  $V_B = 0,3$  mm; o segundo é o comprimento máximo de usinagem de 200 mm. Além do desempenho após o comprimento total usinado, observou-se o avanço do desgaste realizando coletas de dados a cada 50mm de usinagem, feito apenas para a primeira ferramenta de cada sistema de lubrificação e a seco, enquanto que para as demais ferramentas foi realizado a medição apenas após a usinagem do comprimento total.

A peça fixada em balanço contém 60mm de comprimento, sendo utilizado um comprimento de usinagem  $L=50$ mm. As condições de corte utilizadas nos ensaios de vida foram  $a_p=1,5$  mm,  $f=0,05$  mm/rot e  $v_c=139$  m/min, utilizando um torno CNC Nardini Logic 195 VS Millennium no torneamento cilíndrico externo como mostra a Fig. (2).



Figura 2 - Torneamento cilíndrico externo na usinagem de titânio. (Fonte: próprio autor).

Como já mencionado, o inserto de metal duro utilizado foi da classe M para aços inoxidáveis, revestido de  $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$  por CVD fabricado pela Sandvik, codificação

DNMG150608-MF2015. As especificações geométricas da ferramenta de corte utilizada, tais como espessura ( $S= 6,35$  mm), comprimento efetivo da aresta de corte ( $LE= 14,704$  mm), raio de canto ( $RE= 0,794$  mm) e diâmetro do círculo inscrito ( $IC= 12,7$  mm), estão representadas na Fig. (3).

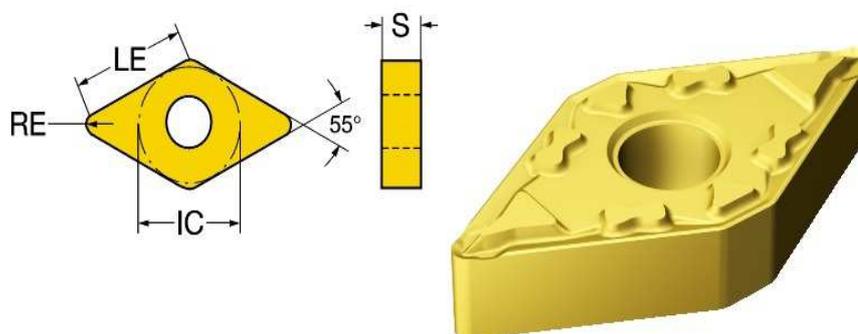


Figura 3 - Geometria do inserto de meta duro da classe M. (Sandvik, 2017).

Para análise da evolução do desgaste no flanco da ferramenta foi utilizado um estereomicroscópio com uma câmera TOUPCAM UCMOS 3.1MP acoplada e com zoom de 5x, e *software* para análise de desgaste Toupview<sup>®</sup>, Fig. (4).



Figura 4 - Estereomicroscópio utilizado para medição do desgaste de flanco.

(Fonte: próprio autor).

Para o torneamento em condição de lubrefrigeração por jorro foi utilizado uma vazão de 60 L/h, a Fig. (5-a) mostra a montagem do ensaio nesta condição. Para a condição de lubrefrigeração por MQL foi utilizado fluido de corte emulsionável a base de óleo vegetal de palma com adição de grafeno a uma vazão de 215 ml/h, nebulizado com ar comprimido a 6 bar

de pressão com aplicação sobre cabeça, peça e ferramenta, com maior proporção para a ferramenta de corte. A Fig. (5-b) mostra a montagem do ensaio de vida na condição de aplicação do MQL.

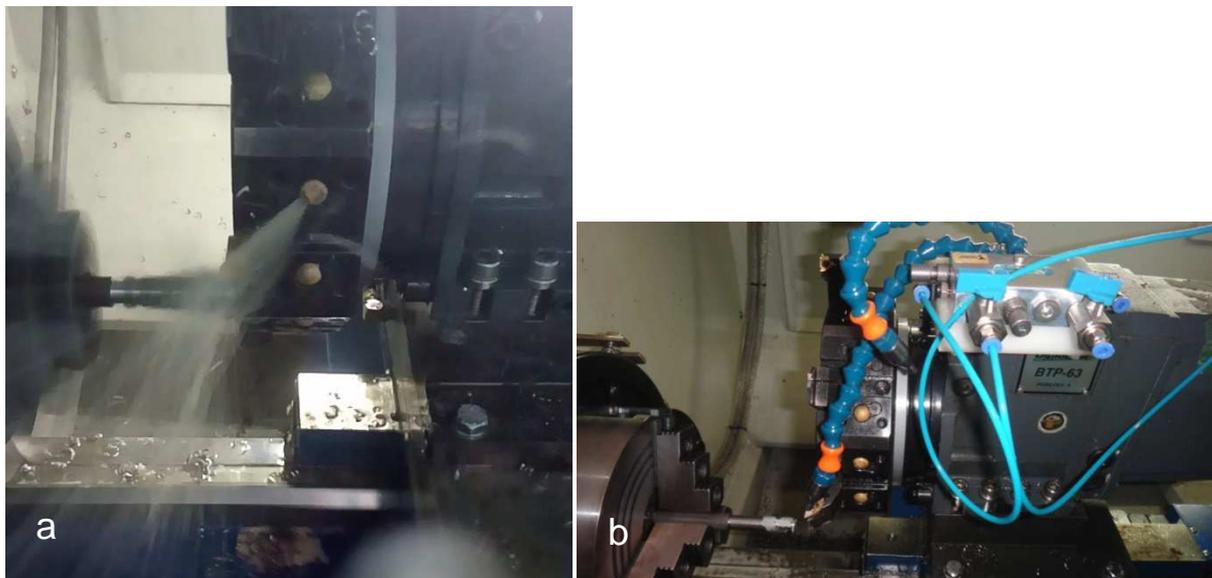


Figura 5 - a) Sistema de lubrefrigeração por jorro; b) Sistema de lubrefrigeração por MQL (Fonte: próprio autor).

## 2.2 ENSAIOS DE RUGOSIDADE

Nestes ensaios o objetivo foi obter a rugosidade da superfície torneada, tanto a seco quanto com aplicação de MQL e jorro. As mesmas condições de corte, dimensões do corpo de prova de titânio, comprimento de usinagem, vazões do fluido de corte na condição jorro e MQL foram utilizadas nos ensaios de rugosidade.

A medição da rugosidade foi executada com um rugosímetro da marca Mitutoyo modelo SJ-210, configurado de acordo com a norma ISO 1997, utilizando *cut-off* de 0,8mm e velocidade de deslocamento da ponta de 0,5 mm/s.

Os parâmetros de rugosidade medidos foram a rugosidade média ( $R_a$ ), a rugosidade quadrática média ( $R_q$ ) e a rugosidade máxima ( $R_z$ ), conforme recomendações da Norma ISO 4287/2002 que define os termos para especificação da rugosidade.

Foram realizadas três medições para cada condição de lubrefrigeração espaçadas  $120^\circ$  uma da outra, na direção transversal das linhas de avanço deixadas pela ferramenta de corte sobre o corpo de prova, sendo o rugosímetro instalado para realização das medições logo após a usinagem da peça. A Fig. (6-a) mostra o aparato de montagem para as medições de rugosidade e a Fig. (6-b) o espaçamento das medições. Todo o procedimento de medição de

rugosidade foi repetido para as condições a seco, com aplicação de jorro e mínima quantidade de lubrificante (MQL).

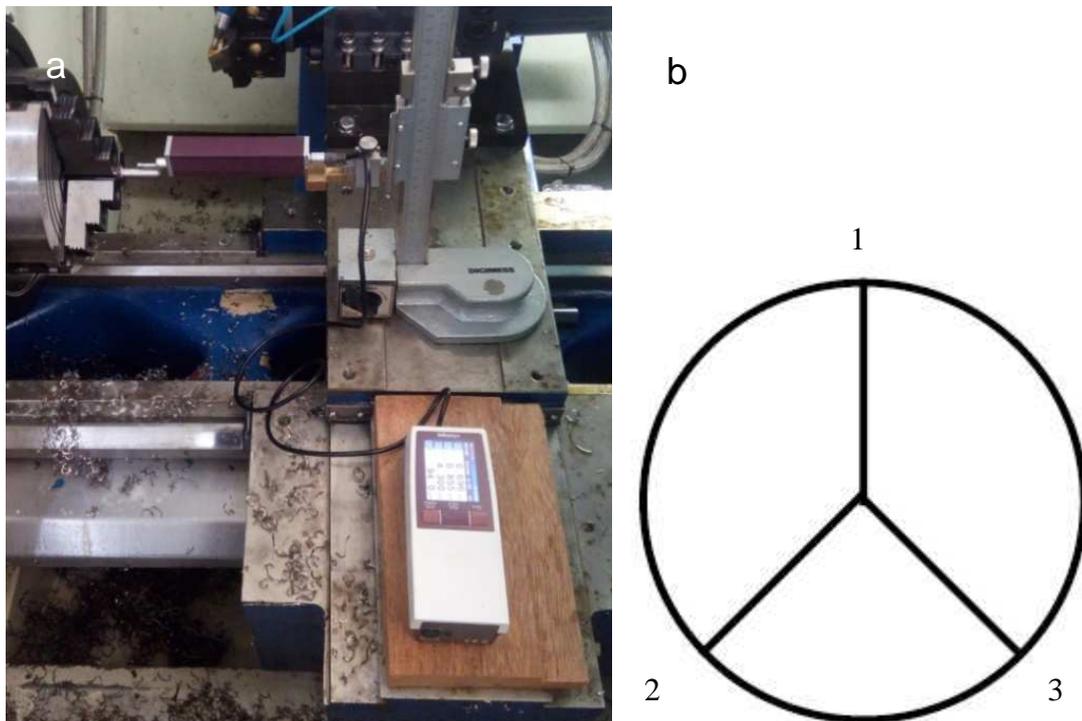


Figura 6 - Montagem do rugosímetro. (Fonte: próprio autor).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados abaixo os resultados obtidos das análises de desgaste de ferramenta e de rugosidade superficial da peça submetidos ao torneamento paralelo sob condições de lubrificação do tipo MQL, jorro e a seco.

#### 3.1 ENSAIOS DE DESGASTE

A amostragem foi realizada com a primeira ferramenta de cada ensaio, obtendo-se os valores do desgaste de flanco médio a cada 50mm usinados. A Fig. (7) mostra a evolução do desgaste de flanco médio ( $V_B$ ) *versus* comprimento usinado para os insertos de metal duro da classe M testados no torneamento a seco, jorro e com mínima quantidade de lubrificante (MQL).

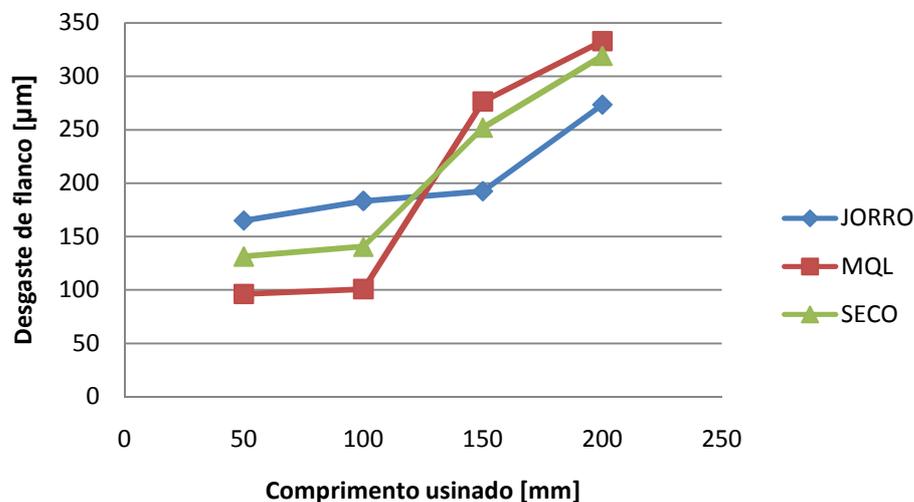
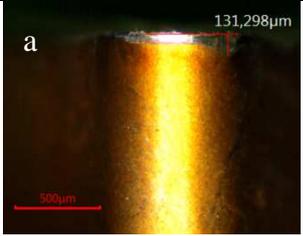
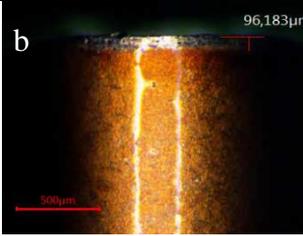
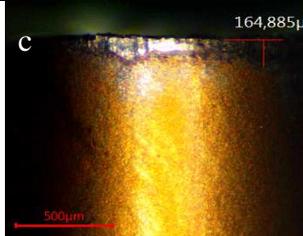
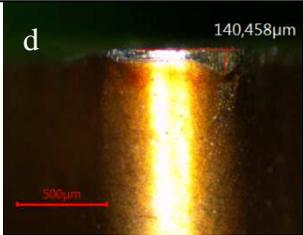
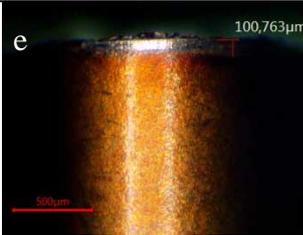
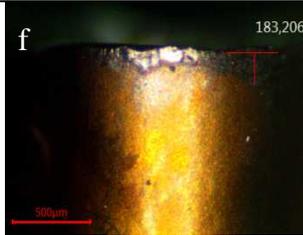
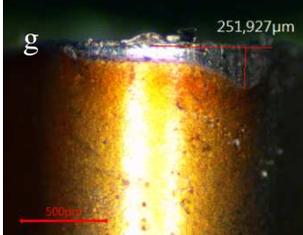
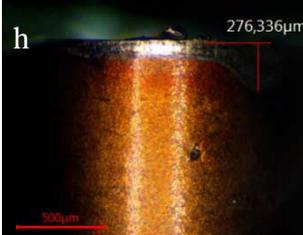
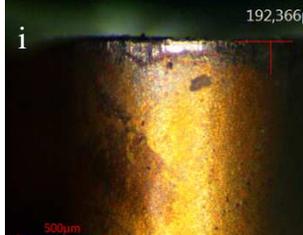
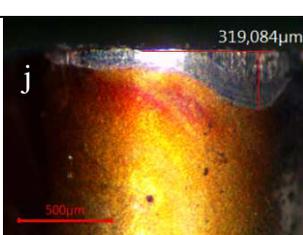
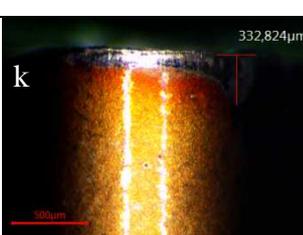
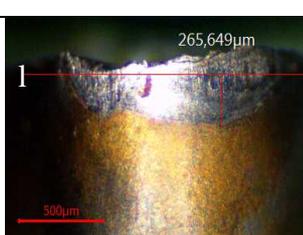


Figura 7 - Evolução do desgaste de flanco médio *versus* o comprimento usinado.

De maneira geral, a Fig. (7) mostra um desgaste inicial regular para moderado nas ferramentas testadas até os 100 mm de comprimento usinado, em que o melhor desempenho de ferramenta até este ponto foi com o uso de MQL seguido pelo torneamento a seco. As imagens do Quadro (1-d) e Quadro (1-e) mostram um desgaste mais homogêneo no flanco dos insertos para essas condições, MQL e seco. Na condição de jorro o desgaste da ferramenta foi maior até os 100 mm de comprimento usinado, e a imagem do inserto mostrada no Quadro (1-f) evidenciam um desgaste heterogêneo moderado, caracterizado principalmente por microlascamentos ao longo do flanco do inserto.

Quadro 1 - Evolução do desgaste da ferramenta a seco, com MQL e jorro.  
(Aumento de 5x e Escala de 500  $\mu\text{m}$ ).

| L[mm] | Seco  | MQL   | Jorro   |
|-------|---|---|---|
| 50    |    |    |    |
| 100   |    |    |    |
| 150   |   |   |   |
| 200   |  |  |  |

Conforme a Fig. (7), no comprimento usinado de 100 a 200 mm as ferramentas com o uso de MQL e a seco apresentaram uma evolução rápida do desgaste até o fim de vida, ao passo que na condição de jorro a evolução do desgaste de flanco da ferramenta é mais suave até o comprimento de 200 mm, ficando abaixo do critério de fim de vida de 0,3 mm. No entanto, a imagem “l” do Quadro (1) mostra que na condição de jorro a integridade da ponta da ferramenta é comprometida em virtude da severidade do desgaste na superfície de saída do inserto, evoluindo para uma cratera, que pode levar a sua falha catastrófica.

Apesar das imagens de microscopia óptica do Quadro (1) não permitirem uma avaliação exata dos mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas ensaiadas para as diferentes

condições de usinagem, seco, MQL e jorro, é provável que dois mecanismos sejam os responsáveis pelo desgaste de flanco e cratera na superfície de saída das ferramentas.

O primeiro é o mecanismo de desgaste por difusão, uma vez que a velocidade de corte utilizada nos ensaios de vida provoca, para o material torneado, elevadas temperaturas na zona de corte, conseqüentemente, as transferências de átomos peça-ferramenta e ferramenta-peça são aceleradas, deixando a superfície da ferramenta desgastada com “aspecto liso”, já que a difusão ocorre a nível atômico. Além disso, a grande afinidade química do titânio com outros elementos químicos e sua baixa condutividade térmica favorecem a ocorrência de difusão.

Um segundo mecanismo de desgaste, provavelmente atuante nos ensaios de vida, é o *attrition*, caracterizado pela aderência de material da peça e arrastamento de material da ferramenta de corte, deixando a superfície desgastada da ferramenta com uma “aparência áspera”. Um fator preponderante para a sua ocorrência é a elevada afinidade química do titânio, que contribui para a forte adesão de material na superfície da ferramenta (Trent e Wright, 2000).

### 3.2 ENSAIOS DE RUGOSIDADE

Cada ensaio de rugosidade apresenta três leituras espaçadas 120° uma da outra. A Fig. (8) apresenta os resultados obtidos nos ensaios de rugosidade com a média dos parâmetros Ra, Rq e Rz.

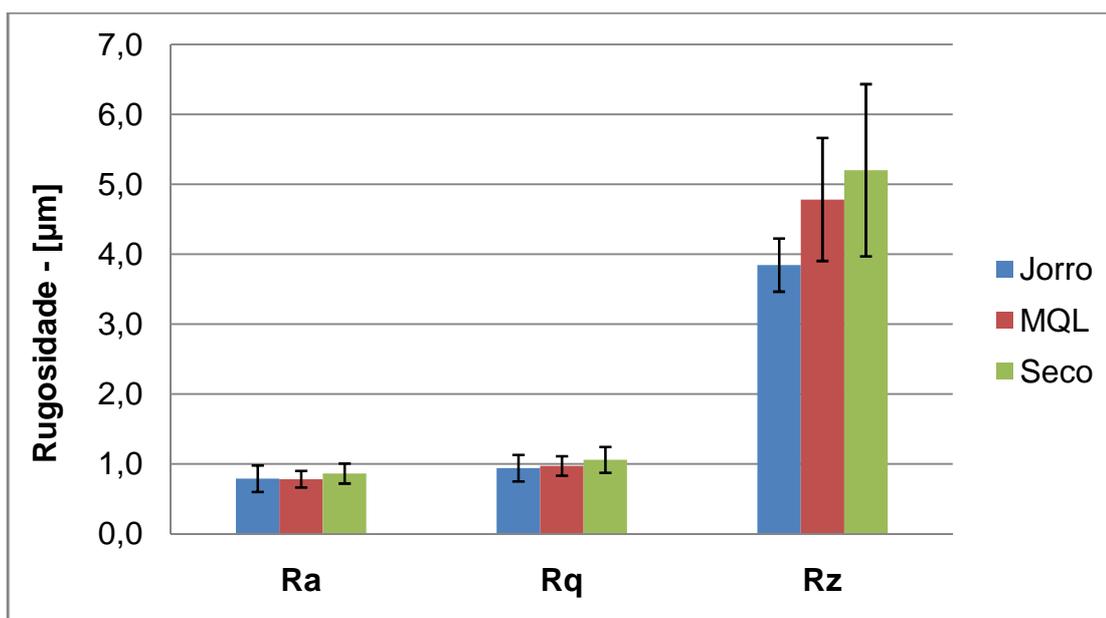


Figura 8 - Resultado dos ensaios de rugosidade para os parâmetros Ra, Rq e Rz.

O gráfico da Fig. (8) evidencia que numa análise primária, baseando-se apenas na média dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq e Rz, que a utilização de jorro no torneamento de titânio melhora o acabamento da peça em relação às condições a seco e com aplicação de MQL. No entanto, os desvios padrão obtidos demonstram que não há uma diferença estatística significativa de rugosidades entre as condições de torneamento com jorro, MQL e a seco.

Observa-se que os parâmetros Ra e Rq apresentam pouca diferenciação em seus valores entre as condições de torneamento com jorro, MQL e a seco, com diferença máxima de  $0,1193\mu\text{m}$  encontrado na rugosidade Rq comparando jorro e seco. Isto possivelmente ocorre em virtude da pouca relevância das condições de torneamento a seco, com jorro e MQL nos valores de Ra, pois como é um parâmetro estável e não é influenciado por efeitos ocasionais, é um parâmetro de controle de processo, ou seja, se o seu valor for alterado isso significa que o processo de fabricação também foi alterado. Neste caso específico dos ensaios o parâmetro Ra não foi suficiente para identificar algumas características importantes na superfície torneada.

Já o parâmetro Rz mostrou uma relação direta, considerando apenas a média, entre a quantidade de lubrificação e o acabamento superficial, em que houve melhora em 8% para MQL e 26% para jorro quando comparado ao torneamento a seco. A rugosidade máxima Rz como sendo a distância vertical máxima entre o pico mais elevado e o vale mais profundo no comprimento de medição pode ser influenciada por qualquer irregularidade na superfície da peça. Provavelmente essa irregularidade, no caso específica deste trabalho, é o resultado observado dos problemas de vibração e deflexão da usinagem do titânio devido ao seu baixo módulo de elasticidade.

#### **4. CONCLUSÕES**

Diante dos resultados apresentados e das discussões desenvolvidas, pode-se concluir que para o torneamento de titânio deve haver uma atenção ao controle da temperatura durante o processo. Resistente a altas temperaturas e com elevada afinidade química com diversos elementos químicos, a dificuldade da usinagem torna-se ainda maior.

As formas de desgaste predominantes nos insertos de metal duro da classe M utilizados neste estudo foram o desgaste de flanco e de cratera. Provavelmente essas formas de desgaste foram originadas por dois mecanismos de desgaste, difusão e *attrition*.

A utilização de um sistema de lubrificação, especificamente, o fluido de corte em abundância, mostrou-se importante no aumento da vida da ferramenta de corte e no acabamento superficial da peça usinada.

Os resultados obtidos com a usinagem utilizando o MQL mostrou-se superior aos resultados encontrados com a usinagem a seco, porém no geral não ocorreu de forma significativa.

Baseado no tipo de aplicação da peça usinada, assim como suas características de acabamento superficial, as respostas das análises auxiliam na escolha de um processo de lubrificação a ser utilizado durante a usinagem do titânio e suas ligas.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Guo, Y., Li, W., Jawahir, I., 2009, "Surface Integrity Characterization and Prediction in Machining of Hardened and Difficult-to-Machine Alloys: a State-of-Art Research Review and Analysis", *Machining Science and Technology* vol. 3 pp. 437-470.

Jahedi, M. Z., Zahiri, S. H., Gulizia, S., Tiganis, B., Tang, C., Fraser, D., 2009, "Direct Manufacturing of Titanium Parts by Cold Spray", *Materials Science Forum*.

Khan, A., Maity, K., 2017, "Comparative Study of Some Machinability Aspects in Turning of Pure Titanium with Untreated and Cryogenically Treated Carbide Inserts", *Journal of Manufacturing Processes* vol. 28 pp. 272-284.

Leyens, C., Peters, M., 2003, "Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Applications", New York: Wiley VCH.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B., 2011, "Teoria da Usinagem dos Materiais", Editora Blucher, 2ª Edição Revista, São Paulo-SP, p. 397.

Trent, E. M., Wright, P.K., 2000, "Metal Cutting", 4<sup>th</sup> Edition, Butterworth Heinemann.

ABNT NBR ISO 4287, Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade. ABNT, 2002.