

# DESGASTE EM BROCAS DE METAL-DURO QUANDO NA FURAÇÃO DA LIGA DE TITÂNIO Ti6Al4V

**Rodrigo Panosso Zeilmann<sup>1</sup>**  
[rpzeilma@ucs.br](mailto:rpzeilma@ucs.br)

**Walter Lindolfo Weingaertner<sup>2</sup>**  
[wlw@emc.ufsc.br](mailto:wlw@emc.ufsc.br)

<sup>1</sup>Universidade de Caxias do Sul, Cidade Universitária, Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, CCET DEMC, CEP 95070-560, Caxias do Sul, RS

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, DEMC, LMP, Florianópolis, SC

**Resumo.** *A usinagem de ligas aeronáuticas sempre foi classificada como de difícil usinabilidade. Entretanto, existem vários trabalhos e pesquisas que colaboram para a resolução destes problemas encontrados na fabricação. Mas, quando se trata de usinagem com redução ou eliminação dos fluidos lubri-refrigerantes, o comportamento do processo de usinagem é totalmente diferente, principalmente para o processo de furação, que apresenta maiores restrições devido as suas particularidades. Dessa forma, este trabalho relata um estudo do comportamento do desgaste em ferramentas inteiriças de metal-duro, na usinagem da liga de titânio Ti6Al4V. Para o desenvolvimento dos ensaios foram utilizadas brocas da classe K10, com dois e três gumes, sem e com diferentes revestimentos, com e sem a presença do fluido de corte. As brocas apresentaram principalmente os mecanismos de abrasão e adesão, e micro-lascamentos na região de topo e ponta. Com a utilização de mínimas quantidades de fluidos lubri-refrigerantes pelo interior da broca foram conseguidos resultados satisfatórios e a ferramenta apresentou, para alguns critérios de usinabilidade, resultados semelhantes aos obtidos com fluido em abundância. Já para a utilização de MQF pelo exterior da ferramenta e na furação a seco, o processo ficou bastante restrito e apresentou grandes dificuldades de continuidade, principalmente pelas grandes quantidades de material aderido na ferramenta devido ao grande calor gerado em processo.*

**Palavras-chave:** *usinagem, MQF, desgaste de flanco, lascamento*

## 1. INTRODUÇÃO

A aplicação de fluidos lubri-refrigerantes na usinagem está baseada originalmente no aumento da vida das ferramentas de corte, como conseqüência de uma lubrificação da interface ferramenta / peça / cavaco, e da região em torno da raiz do cavaco no processo de usinagem<sup>(1)</sup>. No entanto, até a década de 70, não havia uma legislação mais severa no controle dos produtos utilizados nos fluidos de usinagem. Esses produtos, para manterem a estabilidade dos fluidos, contêm em sua composição vários elementos como aditivos, produtos de reações, fungicidas e bactericidas, que indiretamente são causadoras de doenças ao homem. O descarte inadequado destes fluidos de corte é prejudicial ao meio ambiente, assim os fluidos lubri-refrigerantes devem ser separados e tratados adequadamente. Além disso, uma parcela dos fluidos é eliminada na região de trabalho por emissões e evaporação, pelo arrastamento efetuado pelas peças e cavacos, e também com a água utilizada para a limpeza do chão fabril, contribuindo para a poluição dos solos, da água e do ar<sup>(2,3)</sup>. Com a exigência de se reduzir os problemas causados direta ou indiretamente pelo uso do fluido

lubri-refrigerante, surgiu o conceito de minimização da quantidade de fluido lubri-refrigerante. Entretanto, a aplicação de MQF ainda vem sendo experimentada para alguns tipos de materiais <sup>(1, 4, 5)</sup>. Como as ligas de titânio apresentam na usinagem problemas já bem conhecidos, devido as suas características térmicas, até então não haviam sido realizados ensaios com a condição de aplicação de mínimas quantidades de fluidos lubri-refrigerantes.

Assim, são importantes trabalhos de geração de informações tecnológicas, principalmente na avaliação dos mecanismos e desgastes encontrados nas ferramentas, permitindo a possibilidade de uma redução da utilização de fluidos de corte para os processos de usinagem de ligas de titânio. Com o objetivo de agregar conhecimento a esta área, este trabalho tem a finalidade de avaliar o comportamento do desgaste em brocas inteiriças de metal-duro no processo de furação com variação da condição de aplicação de fluidos de corte.

## 2. METODOLOGIA

Esse trabalho é baseado em ensaios experimentais de furação desenvolvidos com ferramentas inteiriças de metal-duro, utilizando máquinas CNC e equipamentos para aplicação de fluidos lubri-refrigerantes.

Foram utilizados três tipos de ferramentas de corte, Tabela 1. As brocas são da classe K10 (exceção da 411 que é K20), com grão fino, sendo que parte delas foi avaliada apenas sem revestimento (as que possuem furos para lubri-refrigeração interna). Para a broca sem furo para lubri-refrigeração interna, foram avaliados os revestimentos de TiAlN, CrCN e TiCN, objetivando uma melhora do processo. Como ensaio complementar também foi utilizada uma broca K10 de diâmetro de 12 mm, semelhante a broca do tipo 105.

Tabela 1 - Brocas utilizadas nos ensaios

Tipo de Broca	105	125	411
Revestimento	com e sem	sem	com
Número de gumes	3	3	2
Diâmetro [mm]	8,5	8,5	12
Furo para refrigeração	sem	com	com

Os parâmetros de corte disponíveis, indicados para a furação sob condições de aplicação de mínimas quantidades de fluido lubri-refrigerante em processo são muito poucos. Já para a furação da liga Ti6Al4V com MQF, não há indicações desses parâmetros. Por isso, o trabalho pretende cobrir este nicho de informações e avaliar uma faixa mais ampla de condições de corte do que as recomendadas para aplicação de fluido em grande quantidade. A grande maioria dos fabricantes indica faixas de parâmetros de usinagem para a condição usual, fluido lubri-refrigerante em abundância. As condições de usinagem inicialmente empregadas neste trabalho foram sugeridas e indicadas pelos fornecedores das ferramentas. No entanto, os parâmetros de usinagem empregados nos experimentos deste trabalho encontram-se num espectro mais amplo aos valores recomendados pelos fabricantes das ferramentas para a furação com fluido lubri-refrigerante em abundância. As condições de corte empregadas nos experimentos estão discriminadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições utilizadas nos ensaios de furação

Tipo de Broca	Todas
Furo	Passante
Comprimento/diâmetro l/d	2,3
Velocidade de corte $v_c$ [m/min]	10 – 50
Avanço $f_n$ [mm/rot]	0,10 – 0,20

### 3. RESULTADOS

O comportamento de desgaste da ferramenta de corte é diretamente proporcional às solicitações mecânicas e térmicas às quais o gume encontra-se submetido <sup>(6)</sup>. Para o processo de furação, estas condições se intensificam com a redução da quantidade de lubri-refrigerante empregado em processo.

O estudo do comportamento do desgaste se deu na forma de uma avaliação dos critérios estipulados como fim de vida e o levantamento dos problemas registrados durante o decorrer dos experimentos. Para grande parte dos ensaios realizados, o critério de fim de vida registrado foi o lascamento da quina da broca, entre o gume principal e a guia. Para todas as formas de aplicação de fluido lubri-refrigerante, o lascamento da quina foi representativo. Para a furação com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, o lascamento da quina da broca apresentou-se como o critério predominante de fim de vida. Para esta condição de aplicação de fluido, para quase todos os ensaios realizados, houve lascamentos na quina sem que o desgaste de flanco fosse significativo, como mostrado na figura 1. A figura mostra o lascamento e o estado em que o gume da ferramenta se encontrava após a execução do vigésimo furo. Para esta broca, apresentada na figura, é possível verificar apenas uma pequena aderência na face e na região central. O desgaste de flanco máximo no fim de vida desta ferramenta ainda não era significativo.

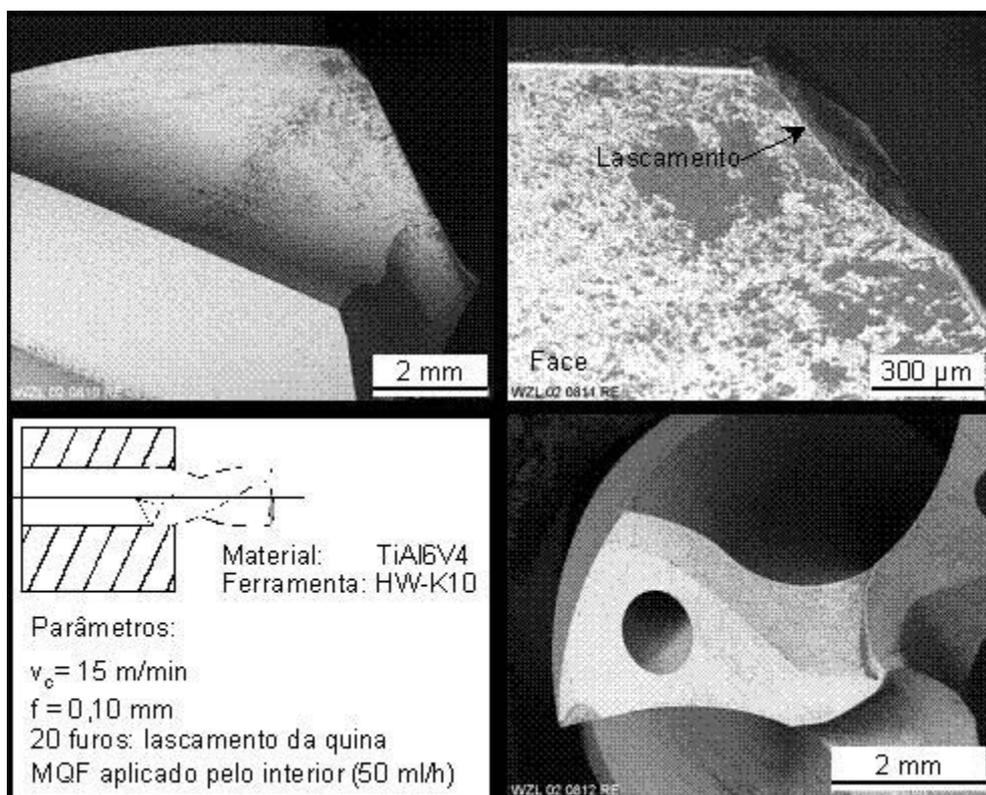


Figura 1 – Fotografias com detalhes do lascamento de uma broca após 20 furos com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta do tipo 125

A avaliação dos lascamentos ocorridos ao longo do desenvolvimento dos ensaios mostra que, na maioria das vezes, os lascamentos ocorrem na direção das maiores tensões mecânicas. Como as forças de corte foram os maiores esforços da resultante sobre o gume, somadas às altas temperaturas alcançadas durante a furação, houve as condições propícias à fragilização e formação de lascamentos na quina das brocas. Na quina da ferramenta tem-se a condição de corte mais severa na furação. Maior velocidade de corte, maior temperatura devido ao atrito cavaco / ferramenta e guia / parede do furo. Além disto, a quina apresenta a pior dissipação de calor, pois está apoiada em menos massa que o restante do gume. Com isto a solicitação térmica da quina é a mais severa. A

flutuação da força de usinagem, decorrente da formação de cavacos na forma de lamelas, e o choque térmico ao qual a quina da ferramenta é submetida no final da furação podem ser responsabilizados pelo lascamento preferencial da quina.

Para os ensaios com MQF aplicado pelo interior da ferramenta, os resultados foram os segundos melhores obtidos. No entanto, para esta condição apresentaram-se as maiores dispersões do número de furos executados. Para a velocidade de corte de 15 m/min, o número mínimo de furos executados foi 5 e o máximo foi 30 (sendo para esta condição o ensaio interrompido pelo número máximo de furos). A explicação encontrada para esta dispersão encontra-se na ferramenta, broca do tipo 125. Para uma broca do tipo 125 nova, o arredondamento da quina foi medido em 19  $\mu\text{m}$ , enquanto que para as demais brocas, o valor médio do arredondamento da quina permaneceu em 32  $\mu\text{m}$ . Com um menor raio, tem-se uma ponta menos robusta e com as tensões residuais mais concentradas na extremidade do gume, estando este mais suscetível ao lascamento. Apesar de a broca do tipo 125 ter sofrido um processo de micro-polimento em seus gumes e quinas, objetivando eliminar as tensões residuais do processo de retificação, ficou assim provado que não houve o efeito esperado para parte das brocas. Por isso, a dispersão dos resultados foi tão grande.

Para a furação a seco e com aplicação de MQF por bicos externos com a broca do tipo 105 não revestida, os resultados mostraram boa repetibilidade. O número de furos diminuiu com o aumento da velocidade de corte.

Na furação com aplicação de MQF com bicos externos surgiram muitas dificuldades na realização das medições de desgaste e na avaliação da existência ou não de lascamentos, devido à grande formação de aderências sobre os gumes e sobre as guias da broca.

Os resultados mais insatisfatórios foram os realizados com MQF aplicado por bicos externos para as ferramentas modificadas para a aplicação de MQF pelo interior da ferramenta (broca do tipo 125). A explicação também está na geometria da broca que apresenta um gume mais afiado e um menor arredondamento da quina, que propicia o lascamento.

Como mencionado anteriormente, na furação com MQF aplicado por bicos externos foi observado uma grande quantidade de aderência de material sobre os gumes e sobre as guias da broca. A figura 2 mostra em detalhes a aderência formada no gume e nas guias durante os ensaios com brocas do tipo 105, com (TiAlN) e sem revestimento, para as velocidades de corte de 15 e 40 m/min.

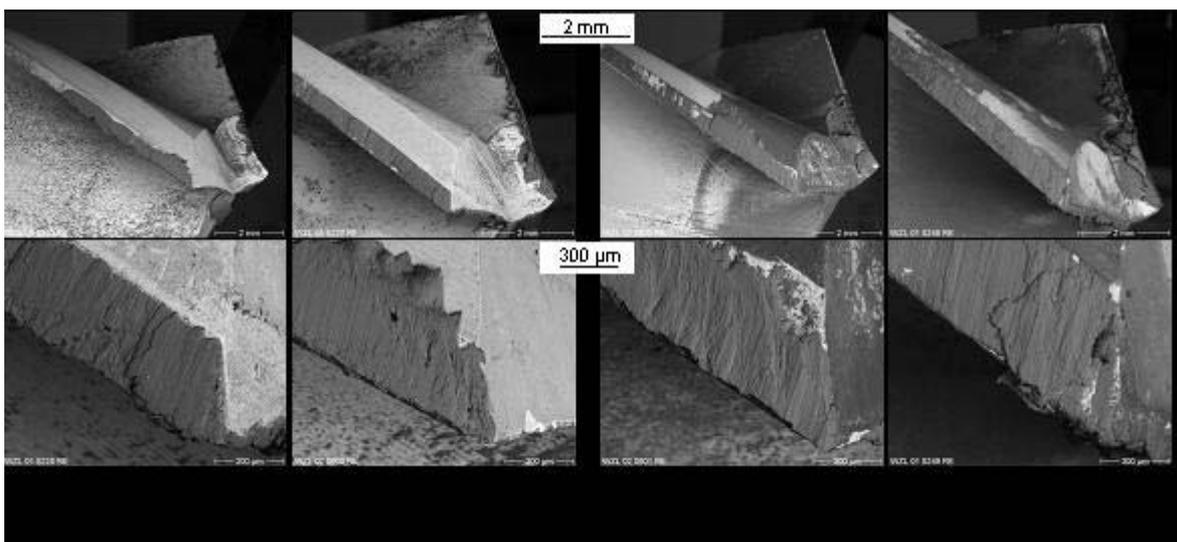


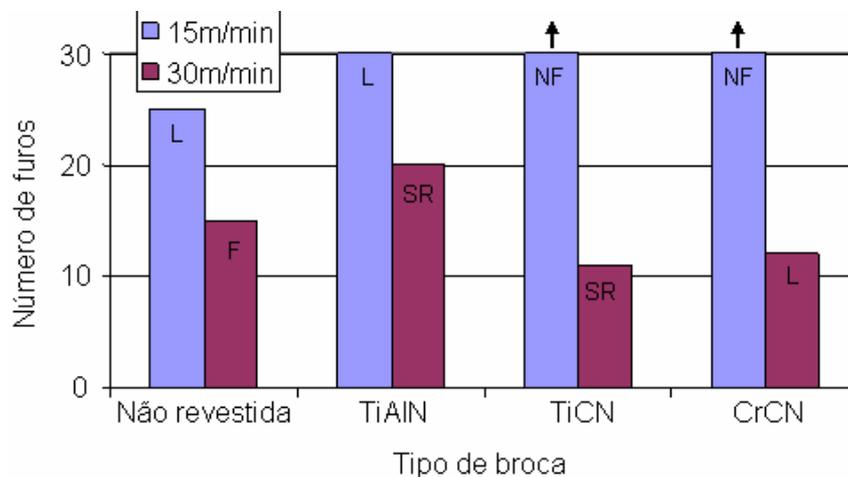
Figura 2 – Detalhes da aderência em ferramentas de metal-duro K10 (tipo 105), sem e com revestimento de TiAlN, observada nos ensaios com MQF aplicado por bicos externos

É possível visualizar a grande quantidade de aderências formadas sobre o gume e as guias da broca na usinagem com aplicação de MQF por bicos externos. Percebe-se também que não existe uma redução desta aderência para as diferentes velocidades de corte, ou até mesmo com a adoção de um revestimento de TiAlN. Esta aderência também se formou em semelhante intensidade para os

revestimentos de TiCN e de CrCN. O emprego de MQF aplicado pelo interior da ferramenta evidenciou uma redução significativa da aderência de material. Esta redução pode ser explicada pela formação de um pequeno filme de óleo lubrificante que, a partir de certa profundidade de corte, é formada apenas sob a utilização de MQF aplicado pelo interior da ferramenta. Com isso, para estas condições testadas, os revestimentos não se mostraram eficientes para a redução da aderência formada sobre a face, o gume e as guias da ferramenta de corte.

Conforme alguns pesquisadores <sup>(2, 3, 4, 5, 7)</sup>, a melhoria da geometria e da constituição do material da broca é fundamental para a obtenção de resultados satisfatórios com o emprego de MQF. Resultados positivos também são obtidos com a utilização de revestimentos que visam a redução de atrito e temperatura.

Em decorrência da ausência do filme lubrificante de óleo em profundidades maiores que uma vez o diâmetro, para a aplicação de MQF com bicos externos, procurou-se minimizar os efeitos relacionados com o atrito e as elevadas temperaturas de corte com a utilização de diferentes revestimentos. A figura 3 mostra a vida das ferramentas e o seu respectivo critério de fim de vida para a broca de metal-duro K10 tipo 105, sem e com os revestimentos de TiAlN, de TiCN e de CrCN, para as velocidades de corte de 15 e 30 m/min.



(L: Lascamento; F: Fratura; NF: Número de furos limite; SR: superfície ruim)

Figura 3 – Vida da broca do tipo 105 para diferentes revestimentos, com MQF aplicado com bicos externos

Para a velocidade de corte de 15 m/min, em relação à broca não-revestida, observa-se um ligeiro aumento no número máximo de furos obtidos para a broca com revestimento de TiAlN. Os revestimentos de TiCN e de CrCN foram interrompidos em 30 furos. No entanto, para a velocidade de corte de 30 m/min, tanto para as brocas não revestidas, como também para as brocas revestidas, observa-se um elevado índice de lascamentos, já para um número pequeno de furos realizados, ou a qualidade da superfície usinada passa a apresentar irregularidades oriundas do caldeamento e adesões. Principalmente os revestimentos de TiCN e CrCN deixaram a desejar. Isto mostra que os revestimentos conseguem garantir a furação para baixas velocidades de corte, mesmo não havendo mais o efeito da lubrificação MQF para profundidades maiores que o diâmetro das brocas. No entanto, já para a velocidade de corte de 30 m/min, o efeito do revestimento não supre a falta de lubrificante no processo.

A broca apresentada na figura 4, tipo 411, também está disponível no mercado, entretanto, esta é recomendada para aplicações genéricas, não especificamente para a furação em ligas de titânio. Estas brocas não possuem qualquer modificação voltada para a adequação das condições de aplicação de MQF, assim foram utilizadas com a aplicação de emulsão.

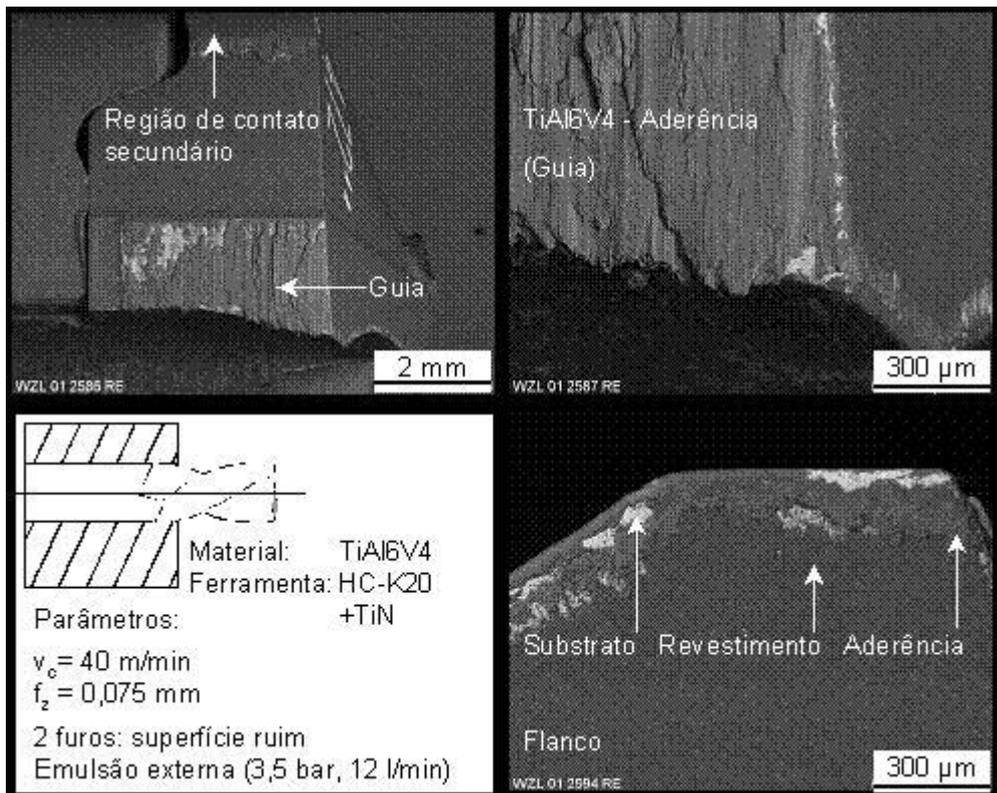


Figura 4 – Detalhes da face e das guias da ponta de metal-duro intercambiável, tipo 411 (K20 TiN), com aplicação de emulsão por bicos externos

A figura 4 mostra em detalhes a guia e a face de uma ponta de metal-duro, intercambiável, empregada na furação de titânio. A grande largura das guias desta broca de ponta intercambiável ocasionou um superaquecimento e, conseqüentemente, levou a ferramenta à falha prematura. Após o primeiro furo, parte do revestimento de TiN já havia sido removido e o substrato estava exposto. O contato da broca com a parede do furo também se apresentou como problemático nestes ensaios, levando a extrusão de material entre as guias e a superfície do furo.

Ensaio comparativos realizados com brocas não-revestidas, substrato K10, de diâmetro de 12 mm, disponíveis no mercado, apresentaram interessantes resultados. Os ensaios foram realizados com as seguintes formas de aplicação de fluido: com MQF aplicado pelo exterior da ferramenta, com emulsão aplicada por bicos externos e a seco. Após o oitavo furo, foram medidos maiores desgastes para a ferramenta com aplicação de emulsão por bicos externos, figura 5.

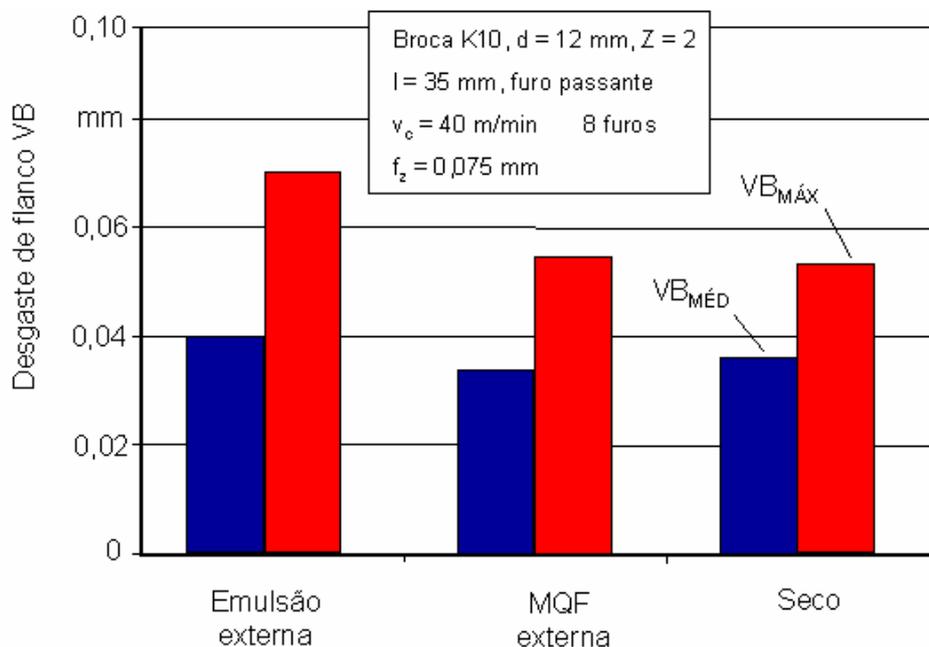


Figura 5 – Desgaste da broca para diferentes condições de aplicação de fluido

O maior desgaste apresentado para a condição de emulsão aplicada por bicos externos, após a execução de oito furos, pode ser explicado pelo choque térmico acentuado, decorrente da mudança brusca da temperatura da broca na saída do furo passante, quando ela entra em contato com o fluido, aplicado em abundância. Devido à diminuição rápida da temperatura na superfície da broca, surgem tensões de tração que podem ultrapassar o limite de resistência do material e enfraquecer o gume. A cada furo estes defeitos aumentam, caracterizando uma falha por fadiga térmica.

Para ensaios realizados com os mesmos parâmetros anteriores, porém utilizando brocas revestidas com uma camada de TiN, a diferença apresentada pelas condições de aplicação de fluido foi ainda maior. Para a aplicação de MQF com bicos externos, figura 6, os resultados foram sensivelmente melhores que os obtidos com emulsão aplicada por bicos externos e a seco.

Com o objetivo de diminuir os custos de furação foi avaliada a possibilidade de empregar brocas com ponta de metal-duro intercambiável. Em ensaios empregando esta broca de ponta intercambiável com revestimento de TiAlN, para as mesmas condições dos dois ensaios anteriormente apresentados, os resultados não foram satisfatórios. O número máximo de furos executados foram dois furos. O fim de vida para estes ensaios foi o péssimo acabamento e o lascamento dos gumes. A péssima qualidade da superfície usinada pôde ser visualmente comprovada, com uma grande quantidade de material caldeado sobre a superfície do furo.

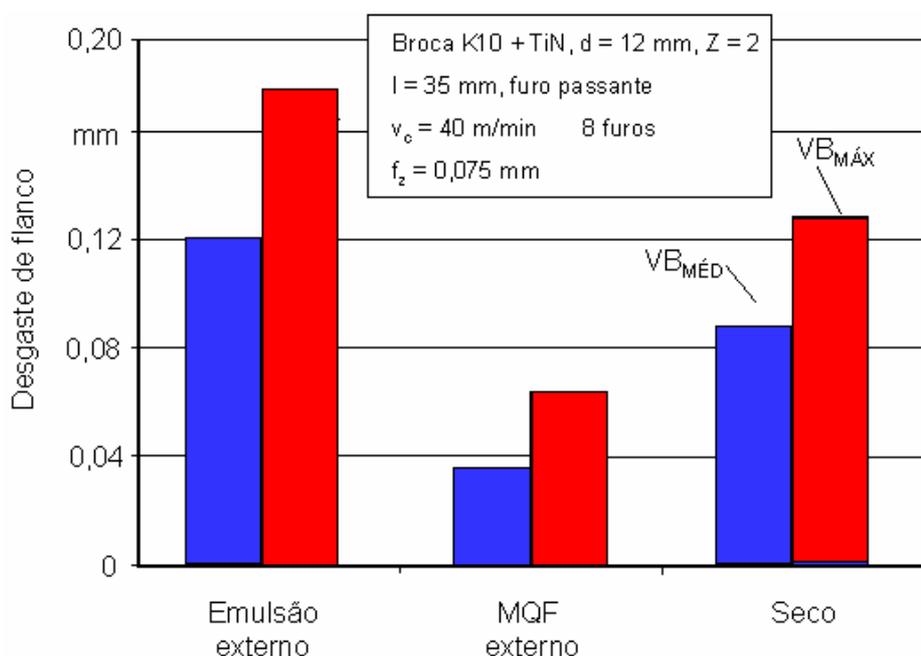


Figura 6 – Desgaste da broca revestida para diferentes formas de aplicação de fluidos e para a furação a seco

Alterando a aplicação de MQF pelo exterior para aplicação pelo interior da ferramenta, pode-se observar a redução da aderência de material na guia da broca do tipo 125 e o melhor tipo de cavaco, figura 7.

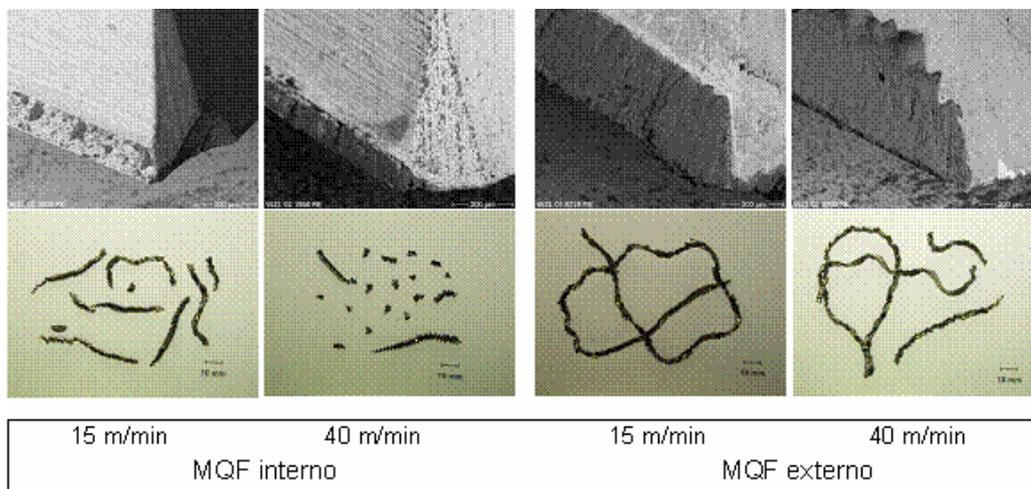


Figura 7 – Detalhes da quina da broca e do cavaco obtido para as diferentes formas de aplicação de MQF, pelo interior e com bicos externos à ferramenta

No atrito entre a parede do furo usinado e a broca, a lubrificação entre ferramenta e material da peça é garantida pelo lubrificante que adere à parede do furo. Apenas uma quantidade mínima de lubrificante consegue entrar na interface ferramenta / parede do furo, de forma que com o aumento do percurso deslocado do ponto genérico da parede do furo sobre a guia, as propriedades do lubrificante vão se perdendo (devido ao aumento da temperatura, perda da viscosidade e até a vaporização do fluido de corte) e a partir de certo ponto, passa-se a atrito seco e iniciam-se processos de desgaste por aderências.

#### 4. CONCLUSÕES

Os usuários de ligas de titânio e a literatura técnica <sup>(1, 8, 9, 10, 11)</sup> recomendam para a furação, com condições usuais de aplicação de fluido lubri-refrigerante, gumes bem afiados. Entretanto, os resultados obtidos com brocas que possuem gume com afiação muito acentuada podem apresentar problemas de fragilização da quina e do gume. Esta fragilização, somada as elevadas solicitações térmicas apresentadas em processo com aplicação de MQF, pode propiciar a formação de lascamentos no gume da ferramenta.

Os resultados obtidos mostram que a condição de aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta apresentou os melhores resultados. Para esta condição, todas as ferramentas testadas executaram 30 furos. Este número de furos limite foi estipulado com base nas informações obtidas das empresas parceiras, sendo indicado como um número mínimo adequado para a averiguação do comportamento de desgaste e da vida da broca. Após a execução de 30 furos foi possível uma caracterização satisfatória dos problemas ocorridos na ferramenta e também da superfície do furo. Para a condição de aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta (E int), não foram realizados ensaios para a velocidade de corte de 15 m/min, pois atualmente é usual o emprego de uma velocidade de corte de 30 a 40 m/min, não sendo assim justificável uma redução a faixas inferiores a 30 m/min.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Um dos autores (RPZ) agradece a bolsa de estudos do Serviço de Intercâmbio Acadêmico Alemão (DAAD) bem como a hospitalidade do grupo de pesquisa do Prof. Dr.-Ing. Fritz Klocke no Laboratório de Máquinas-Ferramentas (WZL) da Universidade Técnica de Aachen (RWTH Aachen), onde grande parte desse trabalho foi desenvolvido.

#### 6. REFERÊNCIAS

1. König, W; Klocke, F. **Fertigungsverfahren**. Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren. 5. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1997.
2. Klocke, F.; Gerschwiler, K. **Trockenbearbeitung** – Grundlagen, Grenzen, Perspektiven. VDI Berichte 1240. 1996. p. 1 - 43.
3. Klocke, F.; Gerschwiler, K. **Trockenbearbeitung** - Grundlagen, Grenzen, Perspektiven. In: VDI-Bericht 1375 Trockenbearbeitung prismatischer Teile. Tagung Aachen, 30./31.03.1998. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998, Seite 13 – 51.
4. Eisenblätter, G. **Trockenbohren mit Vollhartmetallwerkzeugen**. Dissertation RWTH Aachen, 1999.
5. Weinert, K. **Trockenbearbeitung**. Bohren. VDI Verlag, 2002. p. 96 – 121.
6. Stemmer, C. E. **Ferramentas de corte I**. 4ª ed. Ed. UFSC, Florianópolis, 1995.
7. Müller, P. **Bohrer und Gewindeschneidwerkzeuge für die Trockenbearbeitung**. Günther & Co. GmbH & Co. Frankfurt. Schriftenreihe Praxis Fórum. p.182 – 196.
8. Schauerte, O. **Anforderungen an den Werkstoff Titan im Fahrzeugbau**. Vortrag 4, Volkswagen AG. DGM-Workshop Titan, München, 30-31.03.2000.
9. Ezugwu, E. D.; WANG, Z. M. **Titanium alloys and their machinability - a review**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 68, 1997, pp. 262-274.
10. Le Maitre, F. **Contribution a l'étude de l'usinage du titane et de ses alliages**. CIRP, vol. 18, pp. 413-424
11. Klocke, F.; Gerschwiler, K. **Zerspanen von Titan- und Nickelbasislegierungen – Schneidstoffe im Leistungsvergleich**. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Plansee Seminar. Plansee AG, Reutte, 1997, Vol 2: Cemented Carbides and Hard Materials, 27-43.

## 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## TOOL WEAR IN DRILLING OF Ti6Al4V ALLOY

### Rodrigo Panosso Zeilmann

University of Caxias do Sul, Department of Mechanical Engineering, Caxias do Sul RS, Brazil, [RPZeilma@ucs.br](mailto:RPZeilma@ucs.br)

### Walter Lindolfo Weingaertner

Federal University of Santa Catarina, Department of Mechanical Engineering, Florianópolis SC, Brazil, [wlw@lmp.ufsc.br](mailto:wlw@lmp.ufsc.br)

**Abstract.** *This paper presents a study of the behavior of tool wear for the titanium alloy Ti6Al4V machining process under the condition of application of Minimal Quantity of Lubricant (MQL) with K10 class drills. Drilling process has been selected to evaluate the effect from the lubrication obtained with MQL, where the cut fluid was applied for external nozzle and internally of the drill. With the support of the manufacturers, modifications in the tool geometry had been effected, aiming a reduction from the amount of heat generated in the formation of the chip, contributing for the success from the drilling with MQL. The results show the potential of drilling process with MQF applied for the internally of the tool. The chips and the surface quality of the holes have shown characteristics next to the drilling with emulsion applied internally of the tool. The drilling with MQF applied with external nozzle, was restricted to the small depths. The adhesion of material on the edge and in the wall of the hole, was also presented as critical factor. As a general result, the lubricant effect satisfactorily with MQL.*

**Key-words:** *machining, MQL, flank wear, chipping*