

# UMA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE FUROS EM Ti6Al4V OBTIDOS NA FURAÇÃO COM APLICAÇÃO DE MÍNIMAS QUANTIDADES DE FLUIDO DE CORTE (MQF)

**Rodrigo Panosso Zeilmann**

Universidade de Caxias do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Caxias do Sul RS, Brasil,  
[RPZeilma@ucs.br](mailto:RPZeilma@ucs.br)

**Walter Lindolfo Weingaertner**

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis SC, Brasil, [wlw@lmp.ufsc.br](mailto:wlw@lmp.ufsc.br)

**Resumo.** *Esse trabalho apresenta um estudo do comportamento da usinagem da liga de titânio Ti6Al4V sob a condição de aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte (MQF). Para avaliar o efeito da lubrificação obtido com MQF foi escolhido o processo de furação, onde o fluido de corte foi aplicado por bicos externos e pelo interior da broca de metal-duro inteiriça. Com o apoio dos fabricantes de ferramentas de corte foram efetuadas modificações na geometria das ferramentas, objetivando uma redução da quantidade de calor gerado na formação do cavaco, contribuindo para o sucesso da furação com MQF. Os resultados mostram um bom potencial na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta. Os cavacos e a qualidade do furo são obtidos com características próximas às obtidas com a aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta. Na furação com MQF aplicado com bicos externos à broca, o processo fica restrito a pequenas profundidades e limitado com referência aos requisitos da qualidade do furo. A forte tendência de caldeamento de material da peça no gume da ferramenta de corte e na parede do furo apresentou-se também como fator crítico. Mostrou-se que, de uma forma geral, o efeito de lubrificação pode ser satisfatoriamente obtido com MQF.*

**Palavras-chave:** furação, liga de titânio Ti6Al4V, mínimas quantidades de fluido de corte (MQF), cavaco, qualidade superficial.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de fluidos lubri-refrigerantes na usinagem foi baseada originalmente no aumento da vida das ferramentas de corte, como consequência de uma lubrificação da interface ferramenta – peça – cavaco e da região em torno da raiz do cavaco no processo de usinagem [Koenig, 1997]. 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 manter a estabilidade do fluido, contém 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 [Klocke, 1996; 1998].

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 [Koenig, 1997; Eisenblätter, 1999; Weinert, 2002]. 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, é importante um trabalho inicial de geração de informações tecnológicas, permitindo a possibilidade de uma redução da utilização de fluidos de corte para os processos de usinagem de ligas de titânio.

Este trabalho tem a finalidade de avaliar o comportamento do processo de furação com MQF, considerando principalmente o efeito sobre a formação de cavacos e a qualidade das superfícies dos furos.

## 2. EXPERIMENTO

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 utilizadas três tipos de ferramentas de corte, Tab. 1. Todas as brocas são da classe K10, com grão fino, sendo que duas delas foram avaliadas 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.

Tabela 1 - Brocas utilizadas nos ensaios

Tipo de Broca	105	125	411
Revestimento	com e sem	sem	sem
Número de gumes	3	3	2
Diâmetro	8,5	8,5	8,5
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 existe 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.

Os fabricantes de brocas recomendam os seguintes parâmetros para a furação da liga de titânio Ti6Al4V com uma broca de metal-duro da classe K10: velocidade de corte  $v_c = 30 - 50$  m/min, avanço  $f = 0,10 - 0,20$  mm e emulsão em abundância (3,5 %).

Os parâmetros de usinagem empregados nos experimentos deste trabalho encontram-se num espectro mais amplo aos valores recomendados para a furação com fluido lubri-refrigerante em abundância. As condições de corte empregadas nos experimentos estão discriminadas na Tab. 2.

Tabela 2 - Condições utilizadas nos ensaios de furação com MQF

Tipo de Broca	105	125	411
Furo	Passante		
Comprimento/diâmetro l/d	2,3		
Velocidade de corte $v_c$	10 – 50 m/min		
Avanço $f$	0,10 – 0,20 mm		

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação de MQF com bicos externos pode ser comparada em alguns casos com a condição de usinagem a seco, pois o filme de óleo apresenta um efeito de lubrificação até uma profundidade máxima de furação em torno de 1,5 vezes o diâmetro da broca. Isto se repete para outros materiais [Sreejith, 2000; Weinert, 2002]. Na furação com profundidades superiores a 1,5 vezes o diâmetro da broca, a formação de cavacos emaranhados em torno da ferramenta de corte impede que o lubrificante entre no furo, Fig. 1, para a broca do tipo 105 (com e sem revestimento).

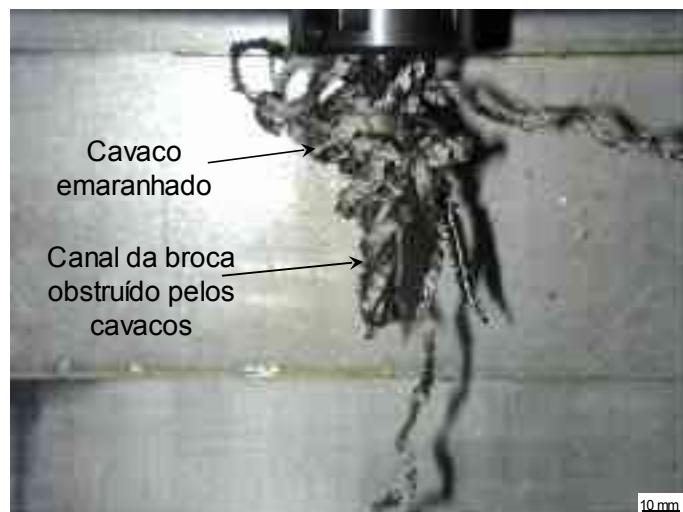


Figura 1. Típico cavaco obtido para a aplicação de MQF com bicos externos e a seco

Com a obstrução do lubrificante à região de corte, a uma determinada profundidade de furação, os efeitos térmicos sobre a parede do furo podem ser percebidos na transição da região micro-lubrificada (sob efeito do MQF aplicado por bicos externos) para a região não lubrificada, onde não há mais a presença do fluido. A Fig. 2 mostra duas fotos da superfície de um furo realizado com aplicação de MQF por bicos externos. A fotografia (1), à esquerda, mostra uma região próxima à entrada do furo, e a fotografia (2), à direita, mostra a superfície de um furo a uma profundidade de 10 mm.

A diferença de textura do furo indica que, para uma profundidade de 10 mm, equivalente a 1,17 do diâmetro da broca, o efeito do lubrificante era deficiente. Dessa forma, a carência de um micro-filme lubrificante propiciou o aumento do atrito entre as guias e a parede do furo, e consequentemente um super-aquecimento do material. Este material aquecido e pressionado pelas guias da ferramenta deformou-se plasticamente e caldeou-se sobre a superfície do furo, deteriorando a sua qualidade.

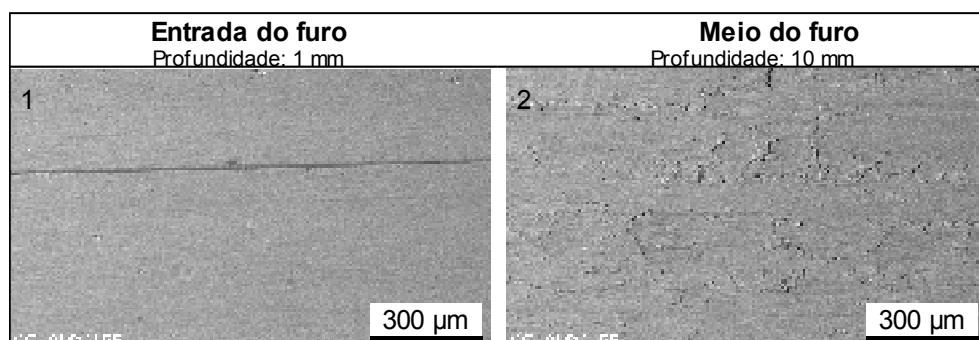


Figura 2. Região na entrada e no meio do furo obtido com MQF externo

O problema de caldeamento de material sobre a superfície do furo é crítico em peças onde são exigidas boas qualidades superficiais, como na fabricação de elementos mecânicos para turbinas. Neste tipo de superfície é propícia à formação de elevadas tensões residuais na superfície usinada. Na medição das grandezas de rugosidade não se pôde identificar este problema, fazendo-se necessária uma visualização do furo em um microscópio óptico. Desta forma, torna-se praticamente inviável a adoção do processo de furação a seco ou com MQF aplicado com bicos externos, para obtenção de furos com profundidades superiores ao seu diâmetro, para este tipo de peças.

O fato de para uma furação a seco ou com MQF aplicado com bicos externos levar a uma qualidade inadmissível do furo a partir de uma determinada profundidade de furação é a motivação para procurar uma alternativa que permita obter um melhor resultado. Uma das alternativas possíveis é garantir que mínimas quantidades de lubrificante atinjam o fundo do furo, e assim possam garantir a lubrificação das guias da broca contra a parede do furo, pelo uso de um sistema que alimenta uma nevoa de óleo e ar através dos furos internos da broca. Outras medidas preventivas ao caldeamento são o aumento da conicidade da broca e adequação da largura das guias, diminuindo desta forma o contato destas com a parede do furo.

Em ensaios de furação com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta não foram constatados os problemas de cavaco emaranhado na broca (broca do tipo 125), Fig. 3, e nem a formação de uma camada de material caldeado sobre a superfície do furo. Nessa condição de aplicação de fluido através da ferramenta, a pressão da mistura ar – lubrificante (3,5 bar), e a sua presença nas regiões de contato entre as guias e a parede do furo, garantiram uma melhor ruptura do cavaco, consequentemente um melhor escoamento para fora do furo. Dessa forma, com o menor atrito entre as guias e a parede do furo, houve a redução do calor gerado e a eliminação do efeito de caldeamento na superfície da parede do furo.



Figura 3. Broca posicionada para a furação, para MQF aplicado pelo interior da ferramenta

Para a condição de MQF aplicado pelo interior da ferramenta, pode-se observar a redução de aderência de material na guia da broca e uma melhora da formação de cavaco em relação a aplicação de MQF por bicos externos, Fig. 4.

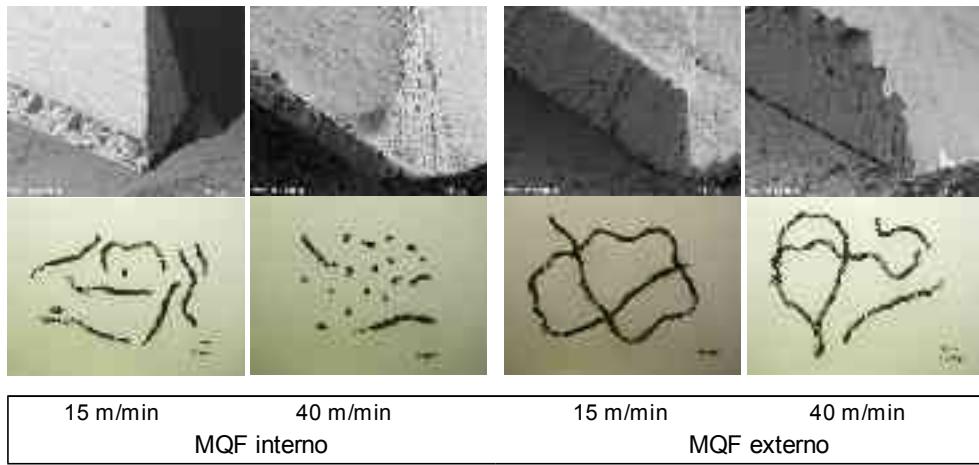


Figura 4. Detalhes da quina da broca e do cavaco obtido para diferentes formas de aplicação de MQF, pelo interior e com bicos externos à ferramenta

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 um certo ponto passa-se a atrito seco e iniciam-se processos de desgaste por aderências.

Avaliando a superfície do furo, verifica-se que na usinagem com MQF aplicado externamente, escamas caldeadas na parede do furo passam a ser mais e mais alisadas com o aumento do número de furos. Na usinagem a seco também se formam estas escamas de material caldeado sobre a superfície do furo que não sofre um alisamento, e sim piora a qualidade do furo com a progressão da profundidade total usinada. Julga-se que as pequenas quantidades de lubrificante disponibilizado pelo sistema MQF, propiciou o alisamento das escamas sobre a parede do furo, propiciando um arredondamento do gume secundário, ao passo que para a usinagem a seco micro-lascamentos e o atrito metálico propiciam uma piora gradual da superfície.

Uma análise comparativa mostra que melhores valores de rugosidade apresentaram-se para a condição de MQF aplicado pelo interior da ferramenta. A Fig. 5 mostra as curvas de comportamento para os três parâmetros de rugosidade mais usuais ( $R_z$ ,  $R_{max}$  e  $R_a$ ) como função da velocidade de corte.

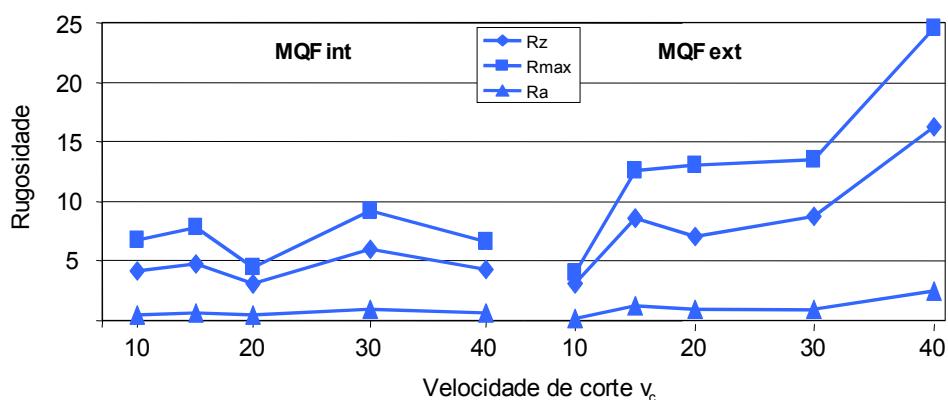


Figura 5. Rugosidade como função da velocidade de corte, para as condições de MQF aplicado pelo interior da ferramenta (broca 125) e com bicos externos (broca 105)

Em busca de melhores resultados de rugosidade na furação para a condição de MQF aplicado por bicos externos, motivado pela grande quantidade de máquinas-ferramenta incapacitadas de trabalhar com aplicação pelo interior da ferramenta de corte, foi avaliado o comportamento com ferramentas revestidas e não-revestida. Os revestimentos adotados (TiAlN, TiCN e CrCN) foram depositados fisicamente sobre o substrato da classe K10 com grão fino, também ensaiado sem revestimento. A Fig. 6 mostra as curvas do comportamento da qualidade da superfície usinada para as velocidades de corte de 15 e 30 m/min. O comportamento de rugosidade apresentou-se semelhante para todas as ferramentas, com exceção do revestimento de TiAlN, que apresentou valores de rugosidade superiores (cerca de 100%) aos medidos para as outras ferramentas. A explicação para este aumento da rugosidade pode ser o menor coeficiente de condutividade térmica deste revestimento, influenciando diretamente o material caldeado sobre a superfície da parede do furo. Para a broca revestida com TiAlN, com o aumento da velocidade de corte de 15 para 30 m/min, obteve-se uma melhora da rugosidade em torno de 20%. Estes valores de rugosidade foram medidos para os décimos furos de cada ferramenta ensaiada, a uma profundidade de aproximadamente 10 mm. Para a broca revestida com TiCN os valores de rugosidade permaneceram na mesma ordem, e para as demais ferramentas, as rugosidades apresentaram um ligeiro incremento, na ordem de até 20% para a broca revestida com CrCN e 10% para a broca não-revestida.

No entanto, os valores de rugosidade medidos de forma isolada não fornecem subsídios suficientes para uma avaliação rigorosa da qualidade da superfície do furo. Exemplo disto são os dados mostrados anteriormente, onde o material caldeado sobre a superfície do furo pode mascarar os valores de rugosidade. Dessa forma são necessárias outras informações adicionais para uma melhor avaliação sobre a real integridade da superfície do furo. Uma informação muito adotada pela indústria de manufatura de peças para aplicação aeronáutica é a profundidade das deformações plásticas e o endurecimento da camada superficial e sub-superficial, oriundos das solicitações térmicas e mecânicas durante o processo de corte.

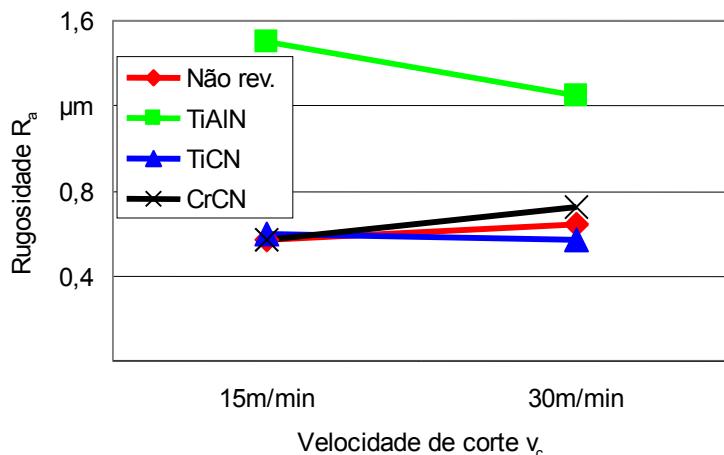


Figura 6. Comportamento da rugosidade Ra da superfície de furos usinados com brocas do tipo 105 sem e com diferentes revestimentos

Nos ensaios de furação com MQF aplicado por bicos externos, a má qualidade da superfície do furo foi perceptível a olho nu. A Fig. 7 mostra o material caldeado na superfície da parede do furo. A foto (A) mostra a parede do furo numa distância da referência da superfície 1 = 10 mm com material caldeado em forma de escamas. A foto (B) mostra a superfície numa distância da superfície 1 = 20 mm com partículas de material maiores caldeadas na parede do furo. A foto (C) mostra um detalhe, em perspectiva, da rebarba formada no fundo do furo. Esta formação de rebarba foi típica para a condição de aplicação de MQF por bicos externos. Este comportamento de caldeamento de material e formação de rebarba foi monitorado na superfície de saída dos furos para todas as condições ensaiadas. Os valores registrados de altura da rebarba de saída atingiram valores de até 1 mm. Em ensaios com aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta os valores da altura da

rebarba foram menores que 135  $\mu\text{m}$ . Para a condição de aplicação de MQF pelo interior da ferramenta, a ordem de grandeza obtida para a altura das rebarbas manteve-se abaixo dos 300  $\mu\text{m}$ .

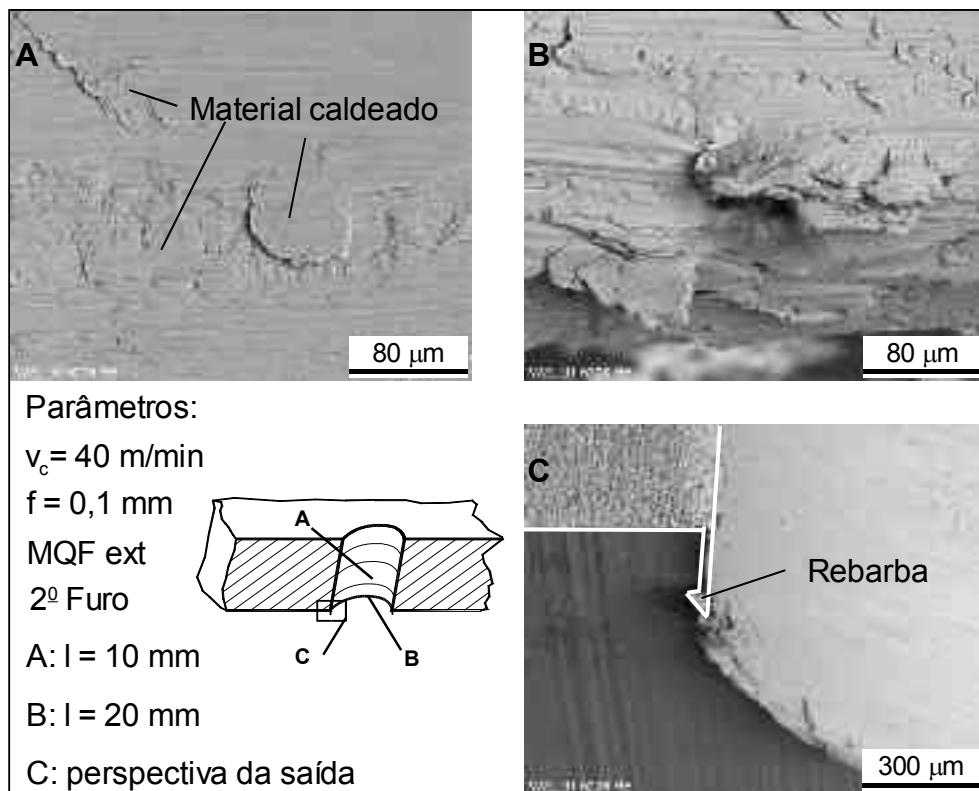


Figura 7. Detalhes da superfície do furo realizado com MQF aplicado por bicos externos

Na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta (brocas do tipo 125 e 411) foram obtidos melhores resultados que os obtidos com MQF aplicado por bicos externos, sendo registrados valores de deformação plástica menores que 30  $\mu\text{m}$ . Como a qualidade da superfície é melhor, pois está livre de material caldeado sobre a parede do furo, esta camada limite pode ser eliminada pelo processo posterior de alargamento, usualmente empregado na manufatura de componentes para turbinas aeronáuticas. Na furação com MQF aplicado por bicos externos as deformações plásticas atingiram profundidades de até 50  $\mu\text{m}$ , Fig. 8.

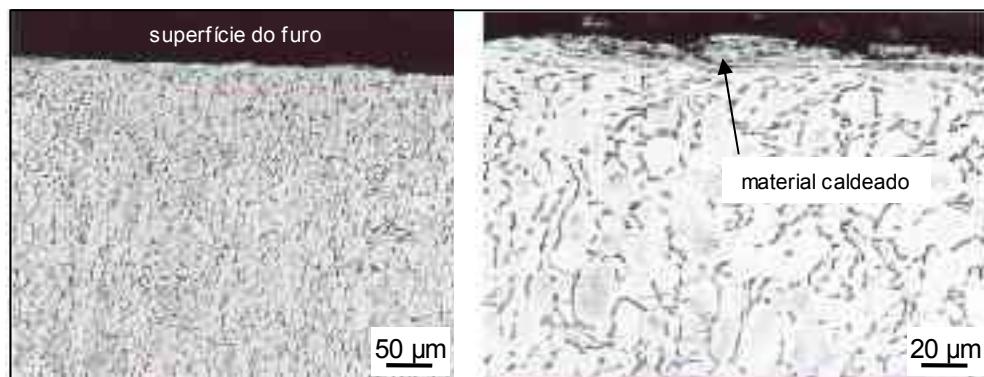


Figura 8. Detalhes da deformação plástica na furação com MQF aplicado por bicos externos (broca 105)

A Fig. 9 mostra a superfície e as deformações plásticas de uma amostra de material da parede de furo realizado com MQF aplicado pelo interior da ferramenta. Para este furo analisado foram

medidos valores de deformação plástica máximos na ordem de 25  $\mu\text{m}$ . Para esta ferramenta (broca 125) foram executados 19 furos utilizando parâmetros de corte próximos aos usuais da indústria (velocidade de corte  $v_c = 30 \text{ m/min}$  e avanço  $f = 0,10 \text{ mm}$ ).

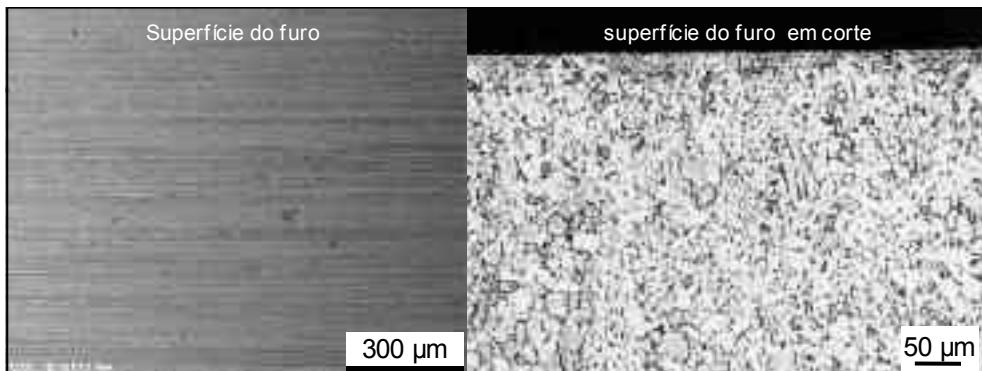


Figura 9. Detalhes da superfície usinada e das deformações plásticas do furo realizado com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta

A formação de micro-trincas em superfícies usinadas por processos com remoção de cavaco pode ser um problema na manufatura de componentes críticos. Assim, foram avaliadas várias amostras após a usinagem com aplicação de MQF, não sendo verificado qualquer tipo de formação de trincas.

#### 4. CONCLUSÕES

A furação da liga de titânio Ti6Al4V com mínimas quantidades de fluido de corte é possível. Aplicando-se o fluido através de atomizadores externos a furação fica limitada à profundidade de 1,5 vezes o diâmetro da broca. A qualidade superficial dos furos deteriora-se ao longo do número de furos, particularmente pelas taxas mais elevadas de aderência de material sobre o gume cortante. Ao longo de toda a superfície foram verificados caldeamentos de materiais oriundos do cavaco arrastado entre as guias da broca e a parede do furo. As deformações plásticas não são adequadas para a fabricação de componentes de risco, como as peças para turbinas aeronáuticas, pois não se pôde ter uma segurança das superfícies adquiridas devido às dificuldades de análise das mesmas. A formação do cavaco apresentou-se de forma emaranhada em torno da ferramenta, dificultando a saída do mesmo para fora do furo.

Para a alimentação do MQF pelo interior dos furos de refrigeração da broca obtiveram-se resultados próximos aos obtidos por fluido de corte aplicado em abundância. Para esta condição, devido ao efeito micro-lubrificante, não houve a formação de caldeamento sobre a superfície do furo e sobre o gume da ferramenta. As deformações plásticas apresentadas nos furos são adequadas, sendo próximas às obtidas com aplicação de emulsão em abundância pelo interior da ferramenta. A formação de cavaco apresentou-se satisfatória, não havendo dificuldades na saída do mesmo para fora do furo.

A escolha por um processo de utilização de MQF depende dos requisitos como a qualidade da integridade dos furos e a vida da ferramenta de corte, bem como das características de profundidade do furo.

#### 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

- Eisenblätter, G. Trockenbohren mit Vollhartmetallwerkzeugen. Dissertation RWTH Aachen, 1999.
- 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.
- Klocke, F.; Gerschwiler, K. Trockenbearbeitung – Grundlagen, Grenzen, Perspektiven. VDI Berichte 1240. 1996. p. 1 - 43.
- Koenig, W; Klocke, F. Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren. 5. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1997.
- Sreejith, P.S.; Ngoi, B.K.A. Dry machining: Machining of the future. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 101, Issue: 1-3, April 14, 2000, pp. 287-291.
- Weinert, K. Trockenbearbeitung. Bohren. VDI Verlag. 2002. p. 96 – 121.

## AN EVALUATION OF HOLES QUALITY IN DRILLING OF Ti6Al4V WITH MINIMAL QUANTITY OF LUBRICANT (MQL)

### Rodrigo Panosso Zeilmann

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

### Walter Lindolfo Weingaertner

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

**Abstract.** This paper presents a study of the behavior characteristics for the titanium alloy Ti6Al4V machining process under the condition of application of Minimal Quantity of Lubricant (MQL). 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 and limited to the surface quality requirements of the hole. 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.

**Keywords:** drilling, Ti6Al4V alloy, Minimal Quantity of Lubricant (MQL), chip, superficial quality.