

UMA ANÁLISE DAS TEMPERATURAS PARA A FURAÇÃO DA LIGA Ti6Al4V COM APLICAÇÃO DE MÍNIMAS QUANTIDADES DE FLUIDO DE CORTE (MQF)

Rodrigo Panosso Zeilmann

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul (UCS)
Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, Bloco D, Caxias do Sul RS, CEP 95070-560, Brasil
RPZeilma@ucs.br

Walter Lindolfo Weingaertner

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Campus Universitário – Trindade, CTC / EMC, Florianópolis SC, CEP 88010-970, Brasil
wlw@emc.ufsc.br

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo das temperaturas geradas na peça, para o processo de furação da liga de titânio Ti6Al4V, empregando brocas de metal-duro da classe K10 sem e com diferentes revestimentos (TiAlN, CrCN e TiCN). O principal objetivo do estudo foi avaliar o efeito da utilização de diferentes revestimentos duros sobre o calor gerado no processo de furação sob condição de aplicação de mínimas quantidades de fluido lubri-refrigerante (MQL). O processo de furação foi adotado para avaliar o efeito da lubrificação empregando MQL, onde o fluido foi aplicado externamente e pelo interior da ferramenta de metal-duro. Os resultados apresentam um bom potencial na furação com MQL pelo interior da ferramenta de corte. Na furação com MQL aplicado externamente, o processo ficou restrito a pequenas profundidades de furação e limitado quanto aos requisitos de qualidade superficial do furo.

Palavras-chaves: Furação, revestimento, temperatura, qualidade superficial.

1. INTRODUÇÃO

Na furação a seco e com mínimas quantidades de fluido de corte (MQF) as funções de refrigeração ou estão ausentes, ou são desprezíveis em relação ao efeito de refrigeração obtida com quantidades normais (abundantes) de fluido lubri-refrigerante. Conseqüentemente, as solicitações térmicas devem ser maiores, tornando maiores os problemas numa transferência de tecnologia da usinagem convencional com fluido em abundância para a usinagem a seco ou com MQF [Eisenblätter⁽¹⁾, König⁽²⁾, Klocke⁽³⁻⁴⁾]. Para a melhor compreensão da redução da quantidade de fluido lubri-refrigerante é necessária a avaliação das solicitações térmicas no processo de furação. O problema das elevadas temperaturas em processo é ainda mais crítico na usinagem de ligas de titânio, que apresentam características térmicas inadequadas para a usinagem.

Vários processos permitem medições de temperatura *in loco*. Os mais comuns são os que empregam termo-tintas, a termografia, a pirometria, as medições termo-elétricas, a calorimetria e, os mais usuais, os que empregam termoelementos [König⁽⁵⁾]. Com o termo-elemento, a medida de temperatura é feita por um sensor de medição preferencialmente embutido no objeto na qual se deseja determinar a temperatura. Para a medição de temperatura estabilizada, a medição com termoelemento fornece excelente resultado. Mas quando se deseja medir temperaturas transientes, o transdutor e a posição que o transdutor é montado na peça influenciam o resultado [Fay⁽⁶⁾]. Em especial deve-se considerar a capacidade térmica dos termômetros, a situação de contato entre o termômetro e o objeto de medição e a velocidade de resposta dos mesmos [Blanke⁽⁷⁾]. O significado dos termoelementos na prática industrial de medições de temperatura é de grande importância,

desde muitos anos. Anualmente são fabricados milhões de termoelementos e com o desenvolvimento da eletrônica as características destes foram melhoradas [Körtvelyessy⁽⁸⁾].

Recentemente foram desenvolvidos vários trabalhos [König⁽⁵⁾, Klocke⁽⁴⁾, Eisenblätter⁽¹⁾, Koppka⁽⁹⁾] na medição e mapeamento das temperaturas em processos de usinagem. Koppka⁽⁹⁾ realizou ensaios para medir a temperatura de peças de liga de titânio para elevadas velocidades de corte, no torneamento.

No trabalho aqui apresentado foram avaliados os efeitos da utilização de diferentes revestimentos duros sobre o calor gerado no processo de furação, sob condição de aplicação de mínimas quantidades de fluido lubri-refrigerante (MQF). O comportamento das temperaturas foi medido com termopares embutidos em corpos-de-prova especialmente confeccionados para estes experimentos.

2. METODOLOGIA

Para verificar a temperatura na peça para diferentes profundidades foram realizados a confecção de corpos-de-prova com orifícios para a inserção de termoelementos do tipo K, conforme mostrado na Figura 1.

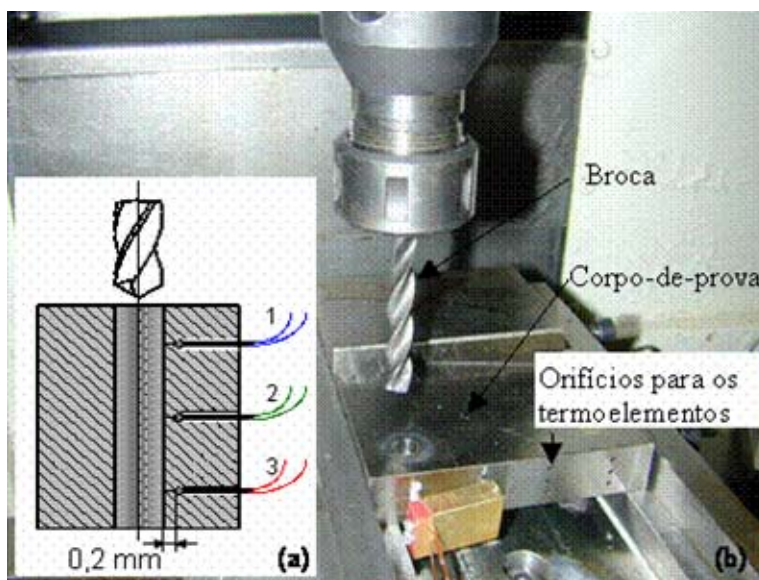


Figura 1. Sistema para medição da temperatura na peça

O posicionamento de 3 termoelementos (T1, T2 e T3) é feito numa distância de 0,2 mm da posição da parede do furo a ser executado, detalhe na Figura 1(a), baseado na experiência de ensaios anteriormente efetuados. Os termoelementos foram posicionados equidistantes entre si, e 5 mm afastados das duas bordas, permitindo a medição das temperaturas para as profundidades de 5, 10 e 15 mm, nos termoelementos 1, 2 e 3. Dessa forma, pode ser registrada a evolução dos gradientes de temperatura ao longo do eixo do furo durante a furação. A correta fixação dos sensores no fundo dos furos realizados foi garantida por um dispositivo especificamente projetado. O emprego de uma termopasta nos orifícios, juntamente com o termo-elemento, garante a condução uniforme do calor da peça para o termoelemento.

O material utilizado para os ensaios foi a liga de titânio Ti6Al4V, tipo $\alpha+\beta$, com resistência mecânica de 970 N/mm².

Como ferramentas foram empregadas brocas inteiriças de metal-duro, classe K10, contendo 9,5% de cobalto e com grãos finos, com um ângulo de hélice de 30° e um ângulo de folga de 6°, diâmetro de 8,5 mm e 3 gumes (brocas tipo 125 com furo de refrigeração interna e brocas tipo 105 sem furos). Foram empregadas ferramentas revestidas e não revestidas, conforma detalhamento nos resultados.

3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os resultados das temperaturas máximas registradas (dentro os três termopares) na peça para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante, como função da velocidade de corte. A representação resumida da condição de aplicação de fluido de corte é adotada para várias figuras que se seguem e está de acordo com a seguinte forma: MQF ext - aplicação de MQF por bicos externos; MQF int - aplicação de MQF pelo interior da ferramenta; seco - o ensaio ocorreu totalmente a seco; E int - aplicação de emulsão pelo interior da ferramenta; e E ext - aplicação de emulsão por bicos externos.

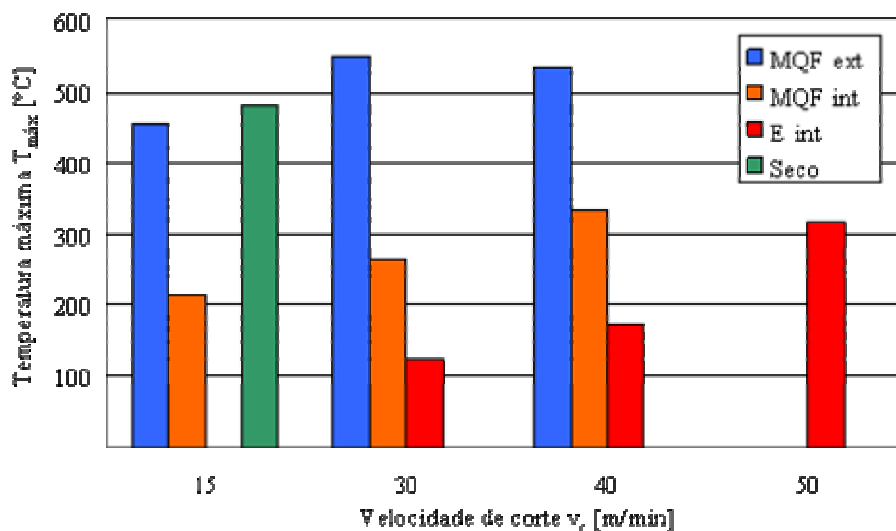


Figura 2. Temperatura máxima na peça para diferentes condições de aplicação de fluido lubri-refrigerante

Verifica-se o efeito de refrigeração da emulsão abundante aplicada pelo interior da ferramenta. As temperaturas máximas registradas na furação com emulsão abundante pelo interior da ferramenta ficaram na faixa de 22 a 32% dos valores obtidos com a aplicação de MQF por bicos externos. Na comparação de MQF aplicado por bicos externos com o aplicado pelo interior da ferramenta, os valores desta segunda condição apresentaram uma redução de aproximadamente 50%. Entre a furação com MQF aplicado com bicos externos e a seco, os valores desta segunda condição foram aproximadamente 6% superiores, de 455°C para 482°C, não sendo registrado valores confiáveis para velocidades de corte acima de 15 m/min, devido a problemas de superaquecimento e evaporação da termopasta utilizada nos orifícios de refrigeração.

Para a furação a seco e com MQF aplicado por bicos externos, as temperaturas registradas são superiores a 450°C, para a velocidade de corte de 15 m/min, e ultrapassando os 500°C para velocidade de corte igual a 30 m/min. Para temperaturas superiores a 500°C, a resistência mecânica da liga de titânio Ti6Al4V diminui sensivelmente e o material apresenta uma maior facilidade a ser deformado plasticamente, propícia ao escoamento entre a guia lateral da broca e a parede do furo, resultando na formação de caldeamentos sobre a superfície do furo.

As curvas de comportamento da temperatura medida na peça para os três termoelementos, na furação com emulsão abundante aplicada pelo interior da ferramenta, estão mostradas na Figura 3.

As curvas de temperatura para a condição de aplicação de emulsão aplicada internamente apresentaram comportamentos regulares e estáveis. Os picos de temperatura mostram o aumento gradativo da temperatura para maiores profundidades, sendo obtido o esperado, as maiores temperaturas para maiores profundidades ($T_1 < T_2 < T_3$). Para estes ensaios não houveram perturbações referentes ao mau posicionamento dos termoelementos ou ao efeito perturbador da obstrução dos canais pelos cavacos observado na furação a seco e com MQF.

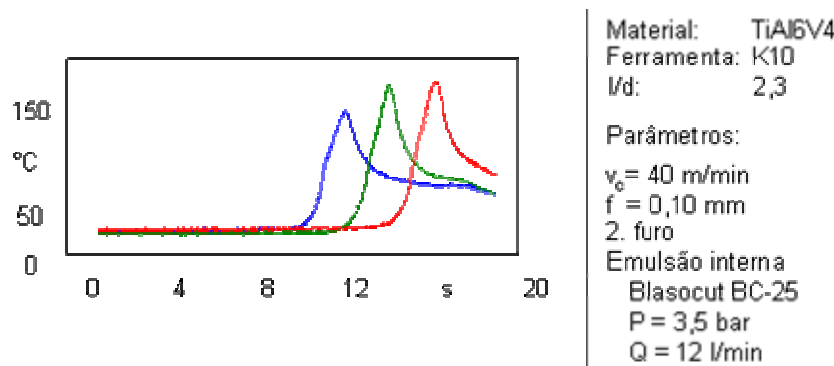


Figura 3. Comportamento da evolução da temperatura obtida na peça, na furatura com emulsão abundante aplicada pelo interior da ferramenta

A máxima temperatura medida na peça situa-se ligeiramente acima dos 150°C. Com o posterior corte do furo e a análise visual da superfície gerada, confirmou-se à inexistência de uma influência térmica ou de partículas caldeadas do material da própria peça sobre a superfície da parede do furo.

Para os ensaios com MQF aplicado por bicos externos foram obtidos os maiores valores de temperaturas, pois para a furatura a seco não foram registrados dados confiáveis para maiores velocidades de corte. Para essa condição foram testados ferramentas com diferentes revestimentos sobre o substrato classe K10. Os ensaios também foram realizados com ferramentas não-revestidas, possibilitando assim uma comparação do efeito do comportamento do revestimento sobre a máxima temperatura registrada. A Figura 4 mostra os resultados obtidos na furatura com aplicação de MQF por bicos externos, sem e com diferentes revestimentos, como função da velocidade de corte.

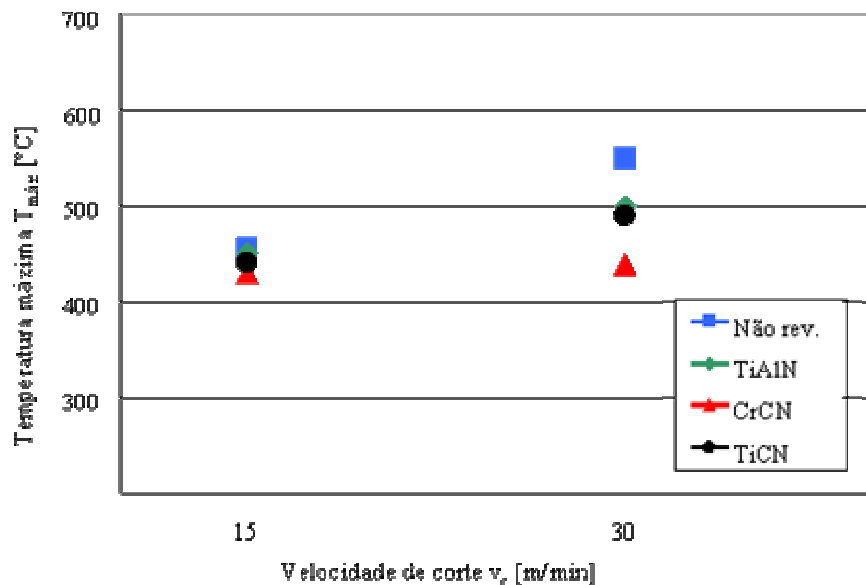


Figura 4. Máxima temperatura registrada na peça para ferramenta sem e com diferentes revestimentos, como função da velocidade de corte, para a condição de MQF ext

Os resultados mostram uma tendência clara de maiores temperaturas para as ferramentas não-revestidas. Esta diferença é mais evidenciada para a velocidade de corte de 30 m/min.

Em todas as curvas de comportamento da evolução da temperatura máxima medida na peça, como função da velocidade de corte, evidenciou-se o incremento dos valores de temperatura. Com o aumento da velocidade de corte este comportamento era esperado, pois a geração de calor se dá em um menor intervalo de tempo, e devido à baixa condutividade térmica da liga de titânio Ti6Al4V, leva a uma maior temperatura. Este comportamento é melhor detalhado na literatura técnica, tanto para a usinagem convencional [König⁽⁵⁾] como para a usinagem ecológica já existente [Klocke⁽³⁻⁴⁾, Eisenblätter⁽¹⁾].

O comportamento das temperaturas máximas para a velocidade de corte de 30 m/min, para os três termoelementos empregados no ensaio, é mostrado na Figura 5. Pode ser verificado um efeito positivo dos revestimentos, que reduzem significativamente a temperatura na peça.

As maiores temperaturas na peça foram alcançadas para a ferramenta não-revestida. A temperatura medida pelo termo-elemento 1 (T1) mostra que nesta posição (5 mm de profundidade), a ferramenta não-revestida propicia praticamente o dobro do valor em relação às ferramentas revestidas. A medição da temperatura para as profundidades de 10 e 15 mm apresenta uma redução da diferença entre a ferramenta não-revestida e as revestidas. No entanto, obtém-se ainda uma diferença significativa da temperatura.

Através de uma análise do comportamento da temperatura medida para diferentes revestimentos utilizados sobre o substrato, como não há uma significativa diferença dos resultados, não é possível a determinação do revestimento que apresenta um melhor comportamento. No entanto, existe uma ligeira tendência de menores valores registrados para o revestimento CrCN. Para os outros revestimentos, TiAlN e TiCN, os resultados diferem em poucos graus centígrados. Na avaliação do comportamento das curvas de temperatura ao longo do tempo, todas as ferramentas revestidas apresentaram características semelhantes.

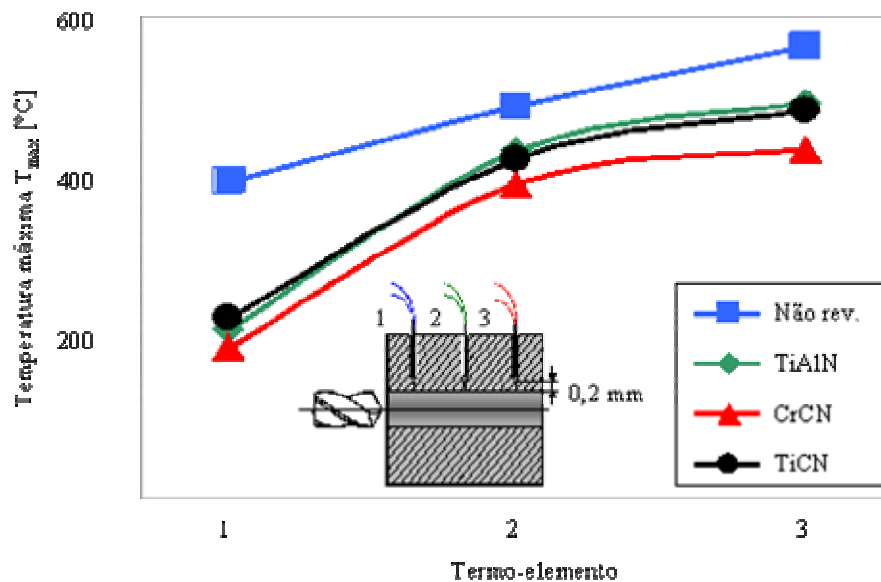


Figura 5. Temperatura máxima na peça para os 3 termoelementos em diferentes profundidades, para uma velocidade de corte de 30 m/min, com MQF aplicado por bicos externos

A Figura 6 mostra o comportamento da evolução da temperatura para os 3 termoelementos, para a broca revestida com TiAlN. Este revestimento é amplamente recomendado pela literatura e pelos fabricantes de ferramenta, para trabalhos a elevadas temperaturas de usinagem e para usinagem a seco [Eisenblätter⁽¹⁾].

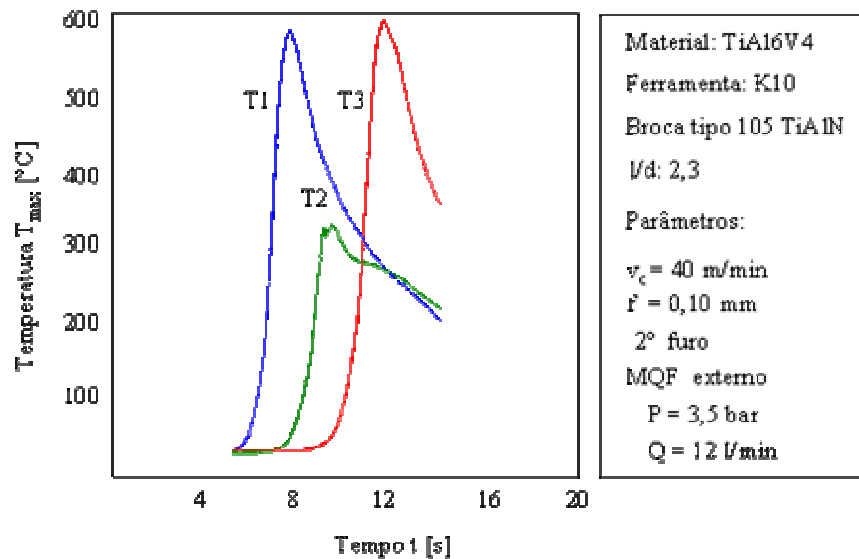


Figura 6. Comportamento da evolução da temperatura na peça e dos esforços de usinagem para a broca revestida com TiAlN, com aplicação de MQF ext

O gráfico mostra uma discrepância para o termoelemento 2 (T2) na medição. O comportamento do termoelemento 2 deveria apresentar uma temperatura situada entre os termoelementos 1 e 3, mas, possivelmente, houve um problema do posicionamento incorreto do termoelemento no fundo do orifício ou do preenchimento do furo com a termo-pasta.

O comportamento da temperatura medida na peça, na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta está apresentado na Figura 7. A figura também mostra o comportamento da força de avanço e do momento torçor como função do tempo de corte. O comportamento típico destas duas grandezas espelha basicamente o comportamento do material em relação ao aumento da temperatura e a maior área de contato entre a ferramenta e a parede do furo, e um aumento do contato do cavaco com a parede no final do furo, propiciando um aumento no momento torçor.

As temperaturas afetam o comportamento do material, isto é, com o aumento da temperatura, tem-se uma tendência a haver uma diminuição dos esforços de penetração, principalmente na força de avanço F_f . Isto também pôde ser evidenciado em casos onde as temperaturas medidas não são tão elevadas, como no caso de aplicação de MQF pelo interior da ferramenta.

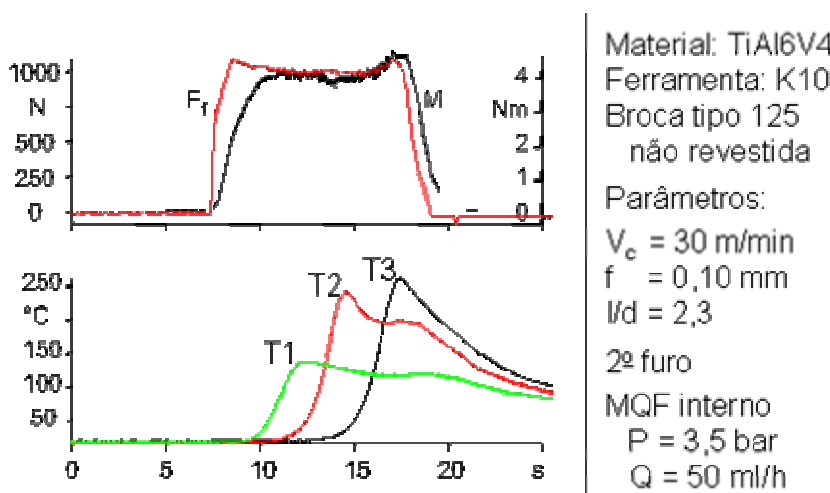


Figura 7. Comportamento da temperatura medida na peça, na furação com MQF aplicado pelo interior da ferramenta

A Figura 8 mostra o comportamento da temperatura na peça na furação a seco.

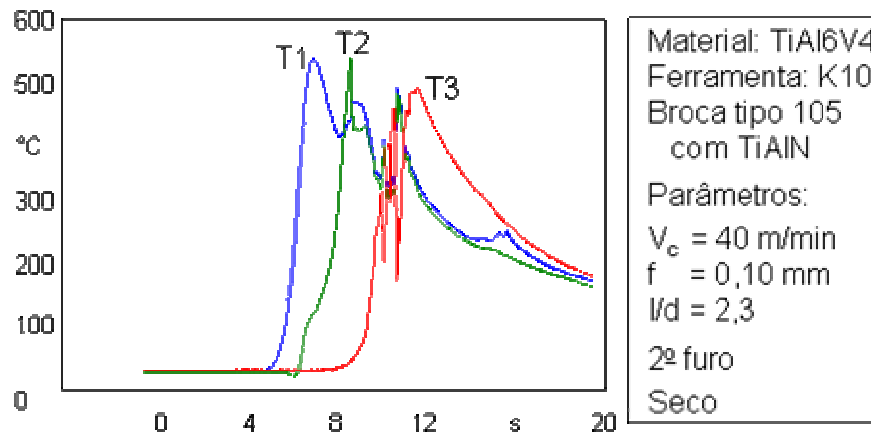


Figura 8. Comportamento da temperatura na peça para a furadeira a seco

Durante a furadeira a seco, observou-se um comportamento adverso da temperatura. Isto pode ser explicado pelo excesso de cavaco emaranhado em torno da ferramenta. O cavaco longo, do tipo segmentado, ao ser gerado na região de corte, acumulou-se nas câmaras de escoamento de cavaco e ocasionou a obstrução dos mesmos. Isto pode ser entendido, observando-se o comportamento das curvas de temperatura dos 3 termoelementos. Até o pico de temperatura do T1, praticamente não houveram problemas, pois para esta profundidade de corte o cavaco não apresentou problemas no transporte para fora do furo. Após o pico do termoelemento T1, juntamente com o pico do termoelemento T2, há um segundo pico do termoelemento T1. Este pico secundário espelha um novo contato na parede do furo na proximidade do posicionamento do termoelemento T1. Como a ferramenta já está próxima à posição do termoelemento T2, conclui-se que este contato foi realizado pelo esmagamento de um cavaco. A partir desta profundidade a situação permanece instável e há uma irregularidade do comportamento de medição.

4. CONCLUSÕES

A respeito das grandezas térmicas sobre a peça, pôde-se concluir que:

- as temperaturas medidas com aplicação de MQF pelo interior da ferramenta apresentaram-se cerca de 50% menores que as obtidas com MQF aplicado por bicos externos;
- com MQF aplicado com bicos externos, maiores temperaturas apresentaram-se na peça, empregando-se brocas não-revestidas;
- para a aplicação de MQF com bicos externos, os diferentes revestimentos (TiAlN, TiCN e CrCN) propiciaram valores semelhantes de temperatura na peça; e
- com o aumento da temperatura, menores forças de avanço foram medidas, caracterizadas pela menor resistência do material em relação à penetração da ponta da ferramenta de corte (F_f). Esta tendência não ocorreu para os valores medidos do momento torçor M.

5. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. EISENBLÄTTER, G. (b). **Trockenbohren mit Vollhartmetallwerkzeugen**. Dissertation RWTH Aachen, 1999.
2. KÖNIG, W. et al. **Trockenzerspanen - Eine ökologische Herausforderung an die Fertigungstechnik**. In: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik - Aachener Perspektiven. Hrsg.: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993, Seite 5/1 - 5/48.
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. KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K. **Grundlagen der Trockenbearbeitung**. Trockenbearbeitungseminar. WZL, 2001.

5. KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 5. Auflage 1997, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
6. FAY, E. **Kalibrierung von Berührungsthermometern – Verfahren, Normale, Meßeinrichtungen**. VDI-Lehrgang BW36-11-16 Technische Temperaturmessung, Stuttgart, 1990.
7. BLANKE, W. **Realisierung der internationalen Temperaturskala von 1990 – Grundlagen der Temperaturmeßtechnik**. VDI-Lehrgang BW36-11-16 Technische Temperaturmessung, Stuttgart, 1990.
8. KÖRTVÉLYESSY, L. **Thermoelement Praxis**. Vulkan Verlag Essen. 3. Ed. 1998.
9. KOPPKA, F. **Temperaturmessung im rotierenden Werkstück bei der Hochgeschwindigkeitzerspannung**. Studienarbeit RWTH Aachen, 2000.
10. NN. Conversa com especialista da área de usinagem a seco, K. Gerschwiler. 2002.

ANALYSIS OF TEMPERATURE TO DRILLING PROCESS OF Ti6Al4V WITH MINIMAL QUANTITY OF LUBRICANT (MQL)

Rodrigo Panosso Zeilmann

University of Caxias do Sul, Mechanical Engineering Department
Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, Bloco D, Caxias do Sul RS, CEP 95070-560, Brazil
RPZeilma@ucs.br

Walter Lindolfo Weingaertner

Federal University of Santa Catarina, Mechanical Engineering Department
Campus Universitário – Trindade, CTC / EMC, Florianópolis SC, CEP 88010-970, Brazil
wlw@emc.ufsc.br

***Abstract.** This paper presents a study of the measurement of temperature in drilling of Ti6Al4V titanium alloy employing drills of carbide from the class K10 without and with hard coated (TiAlN, CrCN and TiCN). The main object of this study were to avaliate the temperature effect for diferents coateds tools under the condition of application of Minimal Quantity of Lubricant - MQL. Drilling process was chosen to evaluate the effect of the lubrication gotten with MQL, where the lubricant was applied for external nozzle and internally of the drill. The results show potential in the drilling with MQL applied for the internally of the tool. For drilling with MQL applied for external nozzle the process was restricted to the small depths and limited with reference to the requirements of the surface quality of the hole.*

***Keywords:** Drilling, coated drill, temperature, surface quality*